

# Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima

Ein Sonderbericht des Zwischenstaatlichen  
Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)

Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger





# Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima

Ein Sonderbericht des Zwischenstaatlichen  
Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)

Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

Herausgegeben von

**Hans-Otto Pörtner**  
Ko-Vorsitzender  
von Arbeitsgruppe II

**Debra C. Roberts**  
Ko-Vorsitzende  
von Arbeitsgruppe II

**Valérie Masson-Delmotte**  
Ko-Vorsitzende  
von Arbeitsgruppe I

**Panmao Zhai**  
Ko-Vorsitzender  
von Arbeitsgruppe I

**Melinda Tignor**  
Leiterin der  
WGII-Geschäftsstelle

**Elvira Poloczanska**  
Wissenschaftliche  
Beraterin

**Katja Mintenbeck**  
Wissenschaftliche Direktorin

**Andrés Alegría**  
Grafik-Mitarbeiter

**Maïke Nicolai**  
Kommunikationsleiterin

**Andrew Okem**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter

**Jan Petzold**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter

**Bardhyl Rama**  
Organisatorischer  
Leiter

**Nora M. Weyer**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin

Geschäftsstelle von Arbeitsgruppe II

## Englisches Original

© 2019 Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *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. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Hrsg.)]. In Druck.

Herausgegeben von: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (*Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP*)

Die englische Originalversion dieses Dokuments ist in elektronischer Form auf der IPCC-Webseite unter <https://www.ipcc.ch/srocc/> erhältlich.

Die verwendeten Bezeichnungen und die Darstellungen auf Karten implizieren keine wie auch immer geartete Meinung seitens des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen im Hinblick auf den Rechtsstatus irgendeines Landes, eines Gebietes, einer Stadt oder Gegend bzw. dessen/deren Behörden, oder im Hinblick auf deren Grenzen.

Umschlagdesign: Stefanie Langsdorf

## Deutsche Übersetzung

Die vorliegende Übersetzung ist keine offizielle Übersetzung durch den IPCC. Sie wurde erstellt mit dem Ziel, die im Originaltext verwendete Sprache möglichst angemessen wiederzugeben.

Herausgeber: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, DLR Projektträger  
[www.de-ipcc.de](http://www.de-ipcc.de), [de-ipcc@dlr.de](mailto:de-ipcc@dlr.de)



Übersetzung: Carola Best unter Mitarbeit von Laurens Bouwer, Jochen Hinkel, Sina Löschke, Ben Marzeion, Denja Frederieke Otte, Esther Schübler

Layout: CD Werbeagentur GmbH

Mitfinanzierung: Deutsches Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, Kempten

Diese Übersetzung kann von den Webseiten [www.de-ipcc.de](http://www.de-ipcc.de), [www.proclim.ch](http://www.proclim.ch) und [www.umweltbundesamt.at](http://www.umweltbundesamt.at) als PDF-Datei heruntergeladen werden. Kostenfreie Druckexemplare sind erhältlich bei der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle über <https://www.de-ipcc.de/kontakt.php>

Als Gremium der Vereinten Nationen veröffentlicht der IPCC seine Berichte in den sechs offiziellen VN-Sprachen (Arabisch, Chinesisch, Englisch, Französisch, Russisch, Spanisch). Versionen in diesen Sprachen stehen auf [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) zum Herunterladen zur Verfügung. Weitere Informationen erteilt das IPCC-Sekretariat (Adresse: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Geneva 2, Schweiz; E-Mail: [ipcc-sec@wmo.int](mailto:ipcc-sec@wmo.int)).

ISBN 978-3-89100-054-0

## Danksagungen

Wir zeigen unsere tiefste Wertschätzung für die Sachkenntnis und das Engagement der Koordinierenden Leitautoren\* und der Leitautoren während des gesamten Prozesses. Sie wurden dabei sachkundig von den vielen beitragenden Autoren zum SROCC unterstützt. Die Begutachtungsexperten waren für die Unterstützung der Autorenteamer und die Gewährleistung der Integrität des Begutachtungsverfahrens von entscheidender Bedeutung. Wir sind den Chapter Scientists+ dankbar, die die Kapitelteams bei der Erstellung des Berichts unterstützt haben. Wir möchten auch allen Fach- und Regierungsprüfern danken, die Kommentare zu den Entwürfen eingereicht haben.

Die Erstellung des Berichts wurde von Mitgliedern des IPCC-Vostands geleitet. Wir möchten unseren Kollegen danken, die uns bei der Entwicklung des Berichts unterstützt und beraten haben: den Vize-Vorsitzenden von Arbeitsgruppe I Edvin Aldrian, Fatima Driouech, Gregory Flato, Jan Fuglestedt, Muhammad I. Tariq, Carolina Vera, Noureddine Yassaa; den Vize-Vorsitzende von Arbeitsgruppe II Andreas Fischlin, Mark Howden, Carlos Méndez, Joy Jacqueline Pereira, Roberto A. Sánchez-Rodríguez, Sergey Semenov, Pius Yanda und Taha M. Zadari sowie dem Vize-Vorsitzenden von Arbeitsgruppe III, Amjad Abdulla. Unser Dank geht auch an Ko Barrett, Vize-Vorsitzende des IPCC, die sich für den Bericht eingesetzt und uns vom Scoping bis zur Verabschiedung gekonnt unterstützt hat.

Unser aufrichtiger Dank geht an die Gastgeber und Organisatoren des Scoping-Treffens, der vier Leitautorentreffen und der gemeinsamen Sitzungen der Arbeitsgruppen und des IPCC. Wir danken dem Fürstentum Monaco und der Prinz-Albert-II-von-Monaco-Stiftung, der Regierung von Fidschi und der University of the South Pacific, der Regierung von Ecuador, der Regierung von China und der chinesischen Akademie der Wissenschaften, der Regierung der Russischen Föderation und der Föderalen Universität Kasan sowie dem Fürstentum Monaco und der Prinz-Albert-II-von-Monaco-Stiftung für ihre Unterstützung. Auch die Unterstützung, die von vielen Regierungen und durch den IPCC-Treuhandfonds für die vielen am Prozess beteiligten Experten geleistet wurde, wird mit Anerkennung zur Kenntnis genommen.

Die Mitarbeiter des IPCC-Sekretariats mit Sitz in Genf leisteten breit angelegte Unterstützung, für die wir Abdalah Mokssit, Sekretär des IPCC, und seinen Kollegen danken möchten: Kerstin Stendahl, Jonathan Lynn, Sophie Schlingemann, Jesbin Baidya, Laura Biagioni, Annie Courtin, Oksana Ekzarkho, Judith Ewa, Joelle Fernandez, Andrea Papucides Bach, Nina Peeva, Mxolisi Shongwe und Werani Zabula. Dank gebührt Elhouseine Gouaini und Adriana Oskarsson, die als Organisationsverantwortliche für die 51. IPCC-Plenarsitzung fungierten.

Die Erstellung des Berichts wurde von der Geschäftsstelle von IPCC-Arbeitsgruppe II geleitet, großzügig finanziell unterstützt durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung und das Hemholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung des Alfred-Wegener-Instituts. Die Prinz-Albert-II-von-Monaco-Stiftung und die Fondation de France stellten der Geschäftsstelle von Arbeitsgruppe II finanzielle Unterstützung für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter zur Verfügung, während die norwegische Umweltagentur zusätzliche grafische Unterstützung für die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger ermöglichte. Zusätzliche Mittel von den Regierungen Norwegens und Neuseelands unterstützen das Büro der Geschäftsstelle von Arbeitsgruppe II in Durban, Südafrika. Ohne die Unterstützung all dieser Stellen wäre dieser Bericht nicht möglich gewesen.

Dieser Bericht hätte nicht ohne das Engagement, den Einsatz und die Professionalität der Mitarbeiter der Geschäftsstelle von Arbeitsgruppe II erstellt werden können: Melinda Tignor, Elvira Poloczanska, Katja Mintenbeck, Andrés Alegría, Marlies Craig, Anka Freund, Stefanie Langsdorf, Philisiwe Manqele, Maïke Nicolai, Andrew Okem, Jan Petzold, Bardhyl Rama, Jussi Savolainen, Stefan Weisfeld, Nora Weyer und Mallou. Unser herzlichster Dank gilt der kollegialen und kooperativen Unterstützung durch Sarah Connors, Melissa Gomis, Robin Matthews, Clotilde Péan, Anna Pirani und Rong Yu von der WGI-Geschäftsstelle und Katie Kissick von der WGIII-Geschäftsstelle. Unterstützungseinheit. Darüber hinaus werden die folgenden Beiträge dankbar anerkannt: Martin Künsting (grafische Unterstützung für die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger), David Dokken (Unterstützung der Verabschiedungssitzung), Naomi Stewart (redaktionelle Bearbeitung), Marilyn Anderson (Index) und Soapbox (Layout).

\* Anmerkung des Übersetzers: Wenn in den nachfolgenden Texten nur eine Geschlechtsform genannt ist, sind immer alle geschlechtlichen Ausprägungen gemeint.

+ Anmerkung des Übersetzers: Wissenschaftler, die in speziell dafür geschaffenen Anstellungen die Koordinierenden Leitautoren bei der Berichtserstellung unterstützten.

Und zum Schluss ein besonderes Dankeschön an die Kollegen, Familienangehörigen und Freunde, die uns während der vielen langen Stunden und Tage, die wir während der Erstellung dieses Berichts zu Hause und außer Haus verbracht haben, unterstützt haben.



Hans-Otto Pörtner  
Ko-Vorsitzender von IPCC-Arbeitsgruppe II



Debra C. Roberts  
Ko-Vorsitzende von IPCC-Arbeitsgruppe II



Valérie Masson-Delmotte  
Ko-Vorsitzende von IPCC-Arbeitsgruppe I



Panmao Zhai  
Ko-Vorsitzender von IPCC-Arbeitsgruppe I

# Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

## **Autoren des Entwurfs:**

Nerilie Abram (Australien), Carolina Adler (Schweiz/Australien), Nathaniel L. Bindoff (Australien), Lijing Cheng (China), So-Min Cheong (Republik Korea), William W. L. Cheung (Kanada), Matthew Collins (Vereinigtes Königreich), Chris Derksen (Kanada), Alexey Ekaykin (Russische Föderation), Thomas Frölicher (Schweiz), Matthias Garschagen (Deutschland), Jean-Pierre Gattuso (Frankreich), Bruce Glavovic (Neuseeland), Stephan Gruber (Kanada/Deutschland), Valeria Guinder (Argentinien), Robert Hallberg (USA), Sherilee Harper (Kanada), Nathalie Hilmi (Monaco/Frankreich), Jochen Hinkel (Deutschland), Yukiko Hirabayashi (Japan), Regine Hock (USA), Anne Hollowed (USA), Helene Jacot Des Combes (Fiji), James Kairo (Kenia), Alexandre K. Magnan (Frankreich), Valérie Masson-Delmotte (Frankreich), J.B. Robin Matthews (Vereinigtes Königreich), Kathleen McInnes (Australien), Michael Meredith (Vereinigtes Königreich), Katja Mintenbeck (Deutschland), Samuel Morin (Frankreich), Andrew Okem (Südafrika/Nigeria), Michael Oppenheimer (USA), Ben Orlove (USA), Jan Petzold (Deutschland), Anna Pirani (Italien), Elvira Poloczanska (Vereinigtes Königreich/Australien), Hans-Otto Pörtner (Deutschland), Anjal Prakash (Nepal/Indien), Golam Rasul (Nepal), Evelia Rivera-Arriaga (Mexiko), Debra C. Roberts (Südafrika), Edward A.G. Schuur (USA), Zita Sebesvari (Ungarn/Deutschland), Martin Sommerkorn (Norwegen/Deutschland), Michael Sutherland (Trinidad und Tobago), Alessandro Tagliabue (Vereinigtes Königreich), Roderik Van De Wal (Niederlande), Phil Williamson (Vereinigtes Königreich), Rong Yu (China), Panmao Zhai (China)

## **Beitragende Autoren:**

Andrés Alegría (Honduras), Robert M. DeConto (USA), Andreas Fischlin (Schweiz), Shengping He (Norwegen/China), Miriam Jackson (Norwegen), Martin Künsting (Deutschland), Erwin Lambert (Niederlande), Pierre-Marie Lefeuve (Norwegen/Frankreich), Alexander Milner (Vereinigtes Königreich), Jess Melbourne-Thomas (Australien), Benoit Meyssignac (Frankreich), Maike Nicolai (Deutschland), Hamish Pritchard (Vereinigtes Königreich), Heidi Steltzer (USA), Nora M. Weyer (Deutschland)

## **Zitiervorschrift:**

IPCC, 2019: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima* [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 (Hrsg.)]. In Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Onlineversion inklusive Errata vom 2. März 2020. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, Januar 2021.

## Einleitung

SPM

Dieser Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre<sup>1</sup> in einem sich wandelnden Klima (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, SROCC) wurde aufgrund eines Beschlusses der IPCC-Vollversammlung 2016 verfasst, im Verlauf des sechsten Berichtszyklus drei Sonderberichte zu erstellen<sup>2</sup>. Mit der Bewertung neuer wissenschaftlicher Literatur<sup>3</sup> reagiert der SROCC<sup>4</sup> auf Vorschläge von Regierungen und Beobachterorganisationen. Der SROCC folgt auf die anderen beiden Sonderberichte über 1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5) sowie Klimawandel und Landsysteme (SRCLL)<sup>5</sup> und den Globalen Sachstandsbericht der Zwischenstaatlichen Plattform für Biodiversität und Ökosystemleistungen (IPBES) über Biodiversität und Ökosystemleistungen.

Diese Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (*Summary for Policymakers*, SPM) fasst die wichtigsten Ergebnisse („Schlüsselergebnisse“) des Berichts zusammen und ist in drei Teile gegliedert: SPM.A: Beobachtete Veränderungen und Folgen, SPM.B: Projizierte Veränderungen und Risiken sowie SPM.C: Umsetzung von Maßnahmen in Reaktion auf Veränderungen in Ozean und Kryosphäre. Um die Orientierung in der SPM zu erleichtern, zeigen Symbole an, wo sich bestimmte Inhalte befinden. Das mit den Schlüsselergebnissen verbundene Vertrauensniveau wird gemäß der IPCC-Sprachregelung angegeben<sup>6</sup>, und die zugrundeliegende wissenschaftliche Basis jedes Schlüsselergebnisses wird über Verweise auf Abschnitte im zugrundeliegenden Bericht angegeben.

### Symbollegende zur Kennzeichnung themenspezifischer Inhalte

	Kryosphäre in Hochgebirgen
	Polargebiete
	Küsten und Meeresspiegelanstieg
	Ozean

<sup>1</sup> Der Begriff Kryosphäre ist in diesem Bericht definiert (Annex I: Glossar) als die gefrorenen Komponenten des Erdsystems an und unter der Land- und Meeresoberfläche, einschließlich Schneedecke, Gletschern, Eisschilden, Eisschelfen, Eisbergen, Meereis, See-Eis, Flusseis, Permafrost und saisonal gefrorenen Bodens.

<sup>2</sup> Die Entscheidung, einen Sonderbericht über Klimawandel, Ozean und Kryosphäre zu erstellen, wurde auf der 43. Sitzung des IPCC in Nairobi, Kenia, vom 11. bis 13. April 2016 getroffen.

<sup>3</sup> Stichtage: 15. Oktober 2018 für die Einreichung von Manuskripten, 15. Mai 2019 für die Annahme der Publikation.

<sup>4</sup> Der SROCC wird unter der wissenschaftlichen Leitung von Arbeitsgruppe I und Arbeitsgruppe II erstellt. Im Einklang mit der verabschiedeten Struktur werden Minderungsoptionen (Arbeitsgruppe III) nicht betrachtet, mit Ausnahme des Minderungspotenzials von *Blue Carbon* (Küstenökosysteme).

<sup>5</sup> Die vollständigen Titel dieser beiden Sonderberichte lauten: „1,5 °C globale Erwärmung: Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut“; „Klimawandel und Landsysteme: Ein IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen“.

<sup>6</sup> Jede Aussage beruht auf einer Bewertung der zugrundeliegenden Belege und deren Übereinstimmung. Ein Vertrauensniveau wird unter der Verwendung von fünf Abstufungen angegeben: sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch, und kursiv gesetzt, zum Beispiel *mittleres Vertrauen*. Folgende Begriffe wurden verwendet, um die bewertete Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses anzugeben: „praktisch sicher“ 99–100% Wahrscheinlichkeit, „sehr wahrscheinlich“ 90–100%, „wahrscheinlich“ 66–100%, „etwa ebenso wahrscheinlich wie nicht“ 33–66%, „unwahrscheinlich“ 0–33%, „sehr unwahrscheinlich“ 0–10%, „besonders unwahrscheinlich“ 0–1%. Bewertete Wahrscheinlichkeiten werden kursiv gesetzt, zum Beispiel *sehr wahrscheinlich*. Gleiches gilt für den AR5 und die anderen AR6 Sonderberichte. Zusätzliche Begriffe („äußerst wahrscheinlich“ 95–100%, „eher wahrscheinlich als nicht“ >50–100%, „eher unwahrscheinlich als wahrscheinlich“ 0–50%, „äußerst unwahrscheinlich“ 0–5%) werden verwendet, wo angebracht. Dieser Bericht nutzt außerdem den Begriff „*wahrscheinliche Bandbreite*“ oder „*sehr wahrscheinliche Bandbreite*“, um anzuzeigen, dass die bewertete Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses innerhalb des Wahrscheinlichkeitsbereichs 17–83% beziehungsweise 5–95% liegt. Weitere Details siehe {1.9.2, Abbildung 1.4}.

## Startup-Box | Die Bedeutung des Ozeans und der Kryosphäre für den Menschen

Alle Menschen auf der Erde sind direkt oder indirekt vom Ozean und der Kryosphäre abhängig. Der globale Ozean bedeckt 71% der Erdoberfläche und enthält etwa 97% des Wassers der Erde. Der Begriff Kryosphäre bezieht sich auf gefrorene Komponenten des Erdsystems<sup>1</sup>. Etwa 10% der Landfläche der Erde sind von Gletschern oder Eisschilden bedeckt. Der Ozean und die Kryosphäre bieten die Grundlage für einzigartige Lebensräume und sind mit anderen Komponenten des Klimasystems durch den globalen Austausch von Wasser, Energie und Kohlenstoff verbunden. Die projizierten Reaktionen des Ozeans und der Kryosphäre auf vergangene und aktuelle vom Menschen verursachte Treibhausgasemissionen und auf die anhaltende globale Erwärmung umfassen Klimarückkopplungen, unvermeidbare Veränderungen über Jahrzehnte bis hin zu Jahrtausenden, Schwellenwerte für abrupte Veränderungen und Unumkehrbarkeit. {Box 1.1, 1.2}

Menschliche Gemeinschaften mit enger Verbindung zur küstennahen Umwelt, kleine Inseln (einschließlich Kleiner Inselentwicklungsländer (*Small Island Developing States*, SIDS)), Polargebiete und Hochgebirge<sup>7</sup> sind dem Wandel von Ozean und Kryosphäre besonders ausgesetzt, wie zum Beispiel dem Meeresspiegelanstieg, Extremwasserständen des Meeres und einer schrumpfenden Kryosphäre. Auch andere, weiter von der Küste entfernte Gemeinschaften bekommen Veränderungen im Ozean zu spüren, wie zum Beispiel durch Extremwetterereignisse. Heute leben rund 4 Millionen Menschen dauerhaft in der Arktis, 10% von ihnen gehören indigenen Völkern an. In niedrig gelegenen Küstenzonen<sup>8</sup> leben derzeit rund 680 Millionen Menschen (fast 10% der Weltbevölkerung im Jahr 2010), laut Projektionen werden es schon im Jahr 2050 mehr als eine Milliarde sein. 65 Millionen Menschen leben in Kleinen Inselentwicklungsländern. Rund 670 Millionen Menschen (fast 10% der Weltbevölkerung im Jahr 2010), einschließlich indigener Völker, leben in Hochgebirgen auf allen Kontinenten außerhalb der Antarktis. In Hochgebirgen wird die Bevölkerung laut Projektionen spätestens im Jahr 2050 740 bis 840 Millionen erreichen (etwa 8,4–8,7% der projizierten Weltbevölkerung). {1.1, 2.1, 3.1, Cross-Chapter Box 9, Abbildung 2.1}

Zusätzlich zu ihrer Rolle im Klimasystem, wie der Aufnahme und Umverteilung von natürlichem und anthropogenem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wärme sowie der Aufrechterhaltung von Ökosystemen, gehören die Bereitstellung von Nahrung und Süßwasser, erneuerbare Energie sowie Vorteile für Gesundheit und Wohlergehen, kulturelle Werte, Tourismus, Handel und Verkehr zu den Leistungen, die der Ozean und/oder die Kryosphäre dem Menschen bereitstellen. Der Zustand von Ozean und Kryosphäre steht in Wechselwirkung mit allen Nachhaltigkeitsaspekten, die in den Zielen für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (*United Nations Sustainable Development Goals*, SDGs) dargestellt werden. {1.1, 1.2, 1.5}

<sup>7</sup> Hochgebirge umfassen alle Berggebiete, in denen Gletscher, Schnee oder Permafrost die prominenten Landschaftselemente sind. Siehe Kapitel 2 für eine Liste der in diesem Bericht behandelten Hochgebirge. Die Bevölkerung in Hochgebirgen wird für Gebiete berechnet, die weniger als 100 Kilometer von Gletschern oder Permafrost in den in diesem Bericht untersuchten Hochgebirge entfernt sind. Projektionen für das Jahr 2050 zeigen die Bandbreite der Bevölkerungszahl in diesen Gebieten über alle fünf sozioökonomischen Szenarien der sogenannten *Shared Socioeconomic Pathways* hinweg. {Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}

<sup>8</sup> Die Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenzonen wird für an die Küste grenzende Landgebiete berechnet, einschließlich kleiner Inselstaaten, die weniger als 10 Meter über dem Meeresspiegel liegen. {Cross-Chapter Box 9} Projektionen für das Jahr 2050 zeigen die Bandbreite der Bevölkerungszahl in diesen Regionen über alle fünf sozioökonomischen Szenarien der sogenannten *Shared Socioeconomic Pathways* hinweg. {Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}

## A. Beobachtete Veränderungen und Folgen

### Beobachtete physische Veränderungen

- A.1 Im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte hat die globale Erwärmung dazu geführt, dass die Kryosphäre weiträumig geschrumpft ist; dies beinhaltet Massenverluste von Eisschilden und Gletschern (*sehr hohes Vertrauen*), Rückgänge der Schneebedeckung (*hohes Vertrauen*) und der arktischen Meereisausdehnung und -dicke (*sehr hohes Vertrauen*) sowie erhöhte Permafrosttemperaturen (*sehr hohes Vertrauen*). {2.2, 3.2, 3.3, 3.4, Abbildungen SPM.1, SPM.2}
- A.1.1  Eisschilde und Gletscher weltweit haben an Masse verloren (*sehr hohes Vertrauen*). Zwischen 2006 und 2015 verlor der grönländische Eisschild<sup>9</sup> Eismasse mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von  $278 \pm 11$  Gt pro Jahr (entspricht  $0,77 \pm 0,03$  mm globalem Meeresspiegelanstieg pro Jahr), hauptsächlich aufgrund von Oberflächenschmelze (*hohes Vertrauen*). In den Jahren 2006–2015 verlor der antarktische Eisschild<sup>10</sup> Masse mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von  $155 \pm 19$  Gt pro Jahr ( $0,43 \pm 0,05$  mm pro Jahr), hauptsächlich aufgrund schneller Dickenabnahme und des Rückzugs wichtiger Auslassgletscher, die den westantarktischen Eisschild drainieren (*sehr hohes Vertrauen*). Gletscher außerhalb Grönlands und der Antarktis verloren 2006–2015 weltweit Masse mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von  $220 \pm 30$  Gt pro Jahr (entspricht  $0,61 \pm 0,08$  mm Meeresspiegelanstieg pro Jahr). {3.3.1, 4.2.3, Anhang 2.A, Abbildung SPM.1}
- A.1.2  In der Arktis sank die Juni-Schneebedeckung an Land von 1967 bis 2018 um  $13,4 \pm 5,4\%$  pro Jahrzehnt, was einem Gesamtverlust von rund 2,5 Millionen km<sup>2</sup> entspricht, der hauptsächlich auf den Anstieg der oberflächennahen Lufttemperatur zurückzuführen ist (*hohes Vertrauen*). In fast allen Hochgebirgen sind Dicke, Ausdehnung und Dauer der Schneebedeckung in den letzten Jahrzehnten zurückgegangen, insbesondere in niedrigeren Lagen (*hohes Vertrauen*). {2.2.2, 3.4.1, Abbildung SPM.1}
- A.1.3  Permafrosttemperaturen sind auf ein Rekordniveau gestiegen (1980er Jahre bis heute) (*sehr hohes Vertrauen*), einschließlich des jüngsten Anstiegs um  $0,29 \text{ °C} \pm 0,12 \text{ °C}$  von 2007 bis 2016, gemittelt über Polargebiete und Hochgebirge weltweit. Arktischer und borealer Permafrost enthalten 1460–1600 Gt organischen Kohlenstoff, fast doppelt so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre (*mittleres Vertrauen*). Es gibt *mittelstarke Belege* mit *geringer Übereinstimmung* darüber, ob die nördlichen Permafrostregionen derzeit durch Tauen netto zusätzlich Methan und CO<sub>2</sub> freisetzen. Das Tauen von Permafrost und Gletscher-rückgänge haben die Stabilität von Hochgebirgshängen verringert (*hohes Vertrauen*). {2.2.4, 2.3.2, 3.4.1, 3.4.3, Abbildung SPM.1}
- A.1.4  Zwischen 1979 und 2018 ist die Ausdehnung des arktischen Meereises in allen Monaten des Jahres *sehr wahrscheinlich* zurückgegangen. Meereisrückgänge im September betragen mit *hoher Wahrscheinlichkeit*  $12,8 \pm 2,3\%$  pro Jahrzehnt. Diese Meereisveränderungen im September sind in den letzten mindestens 1 000 Jahren *wahrscheinlich* beispiellos. Arktisches Meereis ist dünner geworden, bei gleichzeitiger Verjüngung des Eises: Zwischen 1979 und 2018 ist der flächenmäßige Anteil von mehrjährigem Eis, das mindestens fünf Jahre alt ist, um etwa 90% zurückgegangen (*sehr hohes Vertrauen*). Rückkopplungen infolge des Verlustes von Sommermeereis und Frühjahresschneedecke an Land haben zu einer verstärkten Erwärmung in der Arktis beigetragen (*hohes Vertrauen*), wo die Lufttemperatur an der Erdoberfläche über die letzten zwei Jahrzehnte um mehr als das Doppelte des globalen Durchschnitts gestiegen ist. Veränderungen des arktischen Meereises haben das Potenzial das Wetter in den mittleren Breiten zu beeinflussen (*mittleres Vertrauen*), aber es besteht *geringes Vertrauen* in den Nachweis dieses Einflusses für bestimmte Wetterarten. Die antarktische Meereisausdehnung insgesamt zeigte keinen statistisch signifikanten Trend (1979–2018) aufgrund gegenläufiger regionaler Signale und großer interannueller Variabilität (*hohes Vertrauen*). {3.2.1, 6.3.1, Box 3.1, Box 3.2, SPM A.1.2, Abbildungen SPM.1, SPM.2}

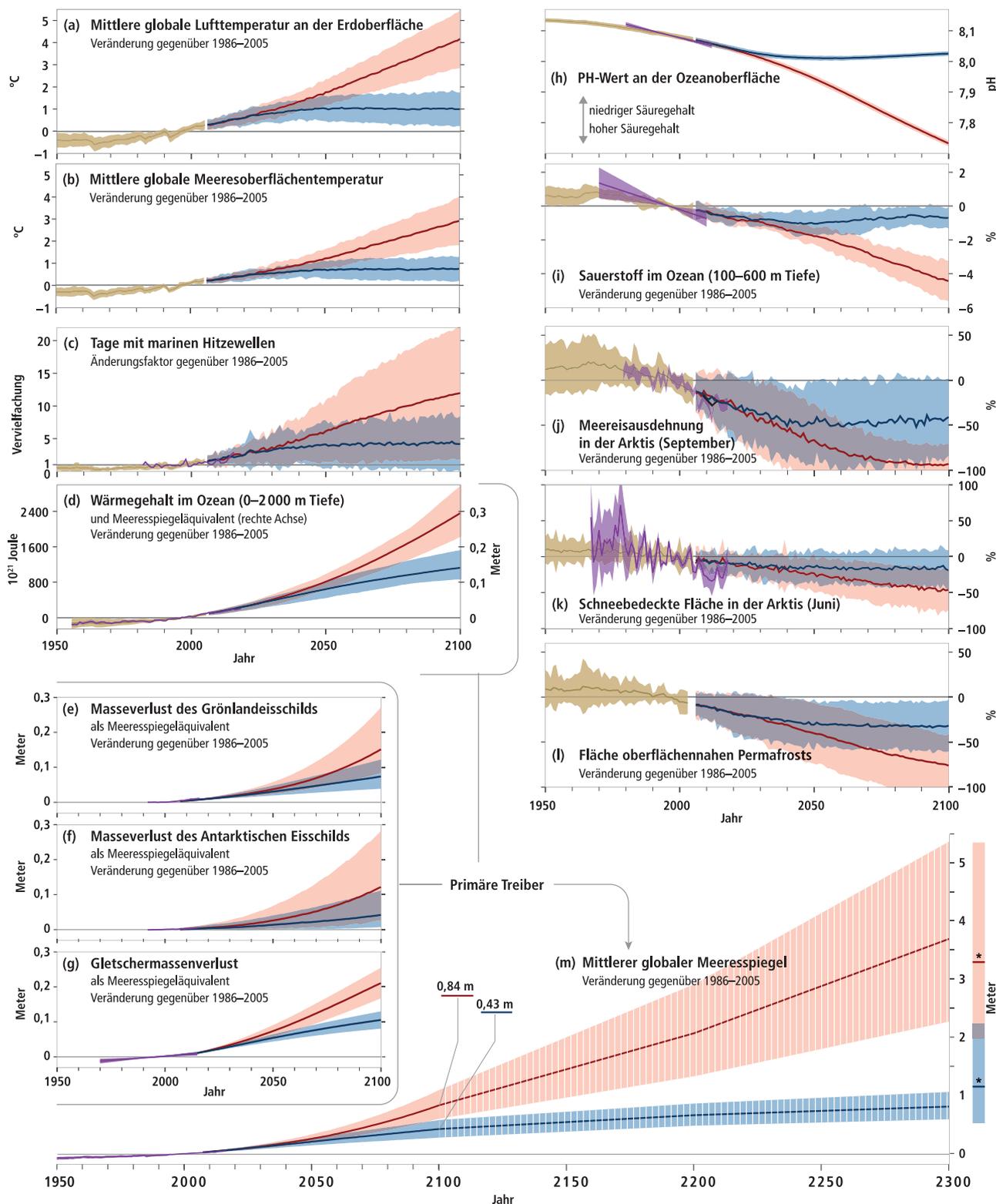
<sup>9</sup> Einschließlich peripherer Gletscher

<sup>10</sup> 360 Gt Eis entsprechen 1 mm mittleren globalen Meeresspiegels

# Vergangene und zukünftige Veränderungen in Ozean und Kryosphäre

Historische Veränderungen (beobachtet und modelliert) und Projektionen für Schlüsselindikatoren unter RCP2.6 und RCP8.5

historisch (beobachtet) historisch (modelliert) projiziert (RCP2.6) projiziert (RCP8.5)



**Abbildung SPM.1** | Beobachtete und modellierte historische Änderungen in Ozean und Kryosphäre seit 1950<sup>11</sup> und projizierte zukünftige Änderungen bei niedrigen (RCP2.6) und hohen (RCP8.5) Treibhausgasemissionen. {Box SPM.1}. Änderungen gezeigt für: **(a)** Änderung der mittleren globalen Lufttemperatur an der Erdoberfläche mit *wahrscheinlichem* Bereich {Box SPM.1, Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}. **Änderungen im Ozean** mit *sehr wahrscheinlichen* Bereichen für **(b)** mittlere globale Meeresoberflächentemperaturänderung {Box 5.1, 5.2.2}; **(c)** Änderungsfaktor für Tage mit marinen Hitzewellen an der Meeresoberfläche {6.4.1}; **(d)** Änderung des globalen Wärmegehalts im Ozean

<sup>11</sup> Dies bedeutet nicht, dass die Veränderungen 1950 begonnen haben. Manche Variablen haben sich seit der vorindustriellen Zeit verändert.

(0–2000 m Tiefe). Ein genähertes sterisches Meeresspiegeläquivalent wird auf der rechten Achse dargestellt, indem der Wärmegehalt im Ozean mit dem global gemittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $\epsilon \approx 0,125 \text{ m pro } 10^{24} \text{ Joule}$ )<sup>12</sup> für die beobachtete Erwärmung seit 1970 multipliziert wird {Abbildung 5.1}; **(h)** der mittlere globale Oberflächen-pH-Wert (auf der gesamten Skala). Bewertete Beobachtungstrends werden aus Zeitreihen im offenen Ozean zusammengestellt, die länger als 15 Jahre sind {Box 5.1, Abbildung 5.6, 5.2.2}; und **(i)** mittlere globale Änderung des Sauerstoffgehalts im Ozean (100–600 m Tiefe). Bewertete Beobachtungstrends umfassen den Zeitraum 1970–2010, zentriert auf 1996 {Abbildung 5.8, 5.2.2}. **Meeresspiegeländerungen** mit *wahrscheinlichen* Bereichen für **(m)** mittlere globale Meeresspiegeländerungen (Die gestreifte Schattierung spiegelt *geringes Vertrauen* in Meeresspiegelprojektionen über 2100 hinaus wider, und die Balken bei 2300 spiegeln eine Expertenerhebung über die Bandbreite möglicher Meeresspiegeländerungen wider.) {4.2.3, Abbildung 4.2} und Komponenten aus **(e, f)** Massenverlusten des grönländischen und der antarktischen Eisschilde {3.3.1} sowie **(g)** Gletschermassenverlust {Cross-Chapter Box 6 in Kapitel 2, Tabelle 4.1}. Weitere **Änderungen im Zusammenhang mit der Kryosphäre** mit *sehr wahrscheinlichen* Bandbreiten für **(j)** die Ausdehnung des arktischen Meereises im September<sup>13</sup> {3.2.1, 3.2.2 Abbildung 3.3}; **(k)** die Änderung der arktischen Schneebedeckung im Juni (Landflächen nördlich von 60 °N) {3.4.1, 3.4.2, Abbildung 3.10}; und **(l)** die Änderung der Ausdehnung oberflächennahen (innerhalb von 3–4 m) Permafrosts auf der Nordhalbkugel {3.4.1, 3.4.2, Abbildung 3.10}. Bewertungen projizierter Änderungen im Rahmen der mittleren Szenarien RCP4.5 und RCP6.0 sind nicht für alle hier betrachteten Variablen verfügbar, können aber, sofern verfügbar, im zugrundeliegenden Bericht gefunden werden {Für RCP4.5 siehe: 2.2.2, Cross-Chapter Box 6 in Kapitel 2, 3.2.2, 3.4.2, 3.4.2, 4.2.3, für RCP6.0 siehe Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}.

## SPM.1 | Verwendung von Klimawandel-Szenarien in SROCC

Bewertungen von projizierten zukünftigen Veränderungen in diesem Bericht basieren weitgehend auf CMIP5<sup>14</sup>-Klimamodellprojektionen unter Verwendung von Repräsentativen Konzentrationspfaden (*Representative Concentration Pathways*, RCPs). RCPs sind Szenarien, die Zeitreihen von Emissionen und Konzentrationen der gesamten Palette von Treibhausgasen (THGs) und Aerosolen und chemisch aktiven Gasen sowie Landnutzung/Landbedeckung beinhalten. RCPs bieten nur einen Satz vieler möglicher Szenarien, die zu unterschiedlichen Niveaus globaler Erwärmung führen würden. {Anhang I: Glossar}

Dieser Bericht verwendet in seiner Bewertung hauptsächlich RCP2.6 und RCP8.5, was die verfügbare Literatur widerspiegelt. RCP2.6 stellt eine Zukunft mit geringen Treibhausgasemissionen und hoher Minderung dar, die in CMIP5-Simulationen eine Chance von zwei Dritteln bietet, die globale Erwärmung bis 2100<sup>15</sup> auf unter 2 °C zu begrenzen. Im Gegensatz dazu ist RCP8.5 ein Szenario mit hohen Treibhausgasemissionen ohne Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels, was zu einem anhaltenden und nachhaltigen Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen führt. Im Vergleich aller RCPs entspricht RCP8.5 dem Pfad mit den höchsten Treibhausgasemissionen. Die zugrundeliegenden Kapitel beziehen sich auch auf andere Szenarien, einschließlich RCP4.5 und RCP6.0, die mittlere Niveaus an Treibhausgasemissionen aufweisen und zu mittleren Niveaus an Erwärmung führen. {Anhang I: Glossar, Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}

Tabelle SPM.1 liefert Schätzungen der gesamten Erwärmung seit vorindustrieller Zeit unter vier verschiedenen RCPs für die wichtigsten im SROCC verwendeten Bewertungsintervalle. Die Erwärmung von 1850–1900 bis 1986–2005 wurde unter Verwendung von Beobachtungen der oberflächennahen Lufttemperatur über dem Ozean und über Land<sup>16</sup> mit 0,63 °C (*wahrscheinlicher* Bereich 0,57 bis 0,69 °C) beziffert. In Übereinstimmung mit dem Verfahren in AR5 werden modellierte zukünftige Veränderungen der mittleren globalen oberflächennahen Lufttemperatur gegenüber 1986–2005 zu dieser beobachteten Erwärmung hinzugegerechnet. {Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}

**Tabelle SPM.1 | Projizierte mittlere globale Oberflächentemperaturänderung gegenüber 1850–1900 für zwei Zeiträume unter vier RCPs<sup>15</sup>.** {Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}

Szenario	Zeitnah: 2031–2050		Ende des Jahrhunderts: 2081–2100	
	Mittelwert (°C)	Wahrscheinlicher Bereich (°C)	Mittelwert (°C)	Wahrscheinlicher Bereich (°C)
RCP2.6	1,6	1,1 bis 2,0	1,6	0,9 bis 2,4
RCP4.5	1,7	1,3 bis 2,2	2,5	1,7 bis 3,3
RCP6.0	1,6	1,2 bis 2,0	2,9	2,0 bis 3,8
RCP8.5	2,0	1,5 bis 2,4	4,3	3,2 bis 5,4

<sup>12</sup> Dieser Skalierungsfaktor (global gemittelte Ausdehnung des Ozeans als Meeresspiegelanstieg in Metern pro Wärmeeinheit) variiert zwischen den verschiedenen Modellen um etwa 10 %, und er wird unter RCP8.5-Antrieb bis 2100 systematisch um etwa 10 % ansteigen, da die Erwärmung des Ozeans den durchschnittlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten erhöht. {4.2.1, 4.2.2, 5.2.2}

<sup>13</sup> Antarktisches Meereis wird hier aufgrund des *geringen Vertrauens* in zukünftige Projektionen nicht gezeigt. {3.2.2}

<sup>14</sup> CMIP5 ist Phase 5 des Gekoppelten Modellvergleichsprojekts (*Coupled Model Intercomparison Project*) (Anhang I: Glossar).

<sup>15</sup> Ein Pfad mit geringeren Emissionen (RCP1.9), der einem niedrigeren Niveau projizierter Erwärmung entspräche als RCP2.6, war nicht Teil von CMIP5.

<sup>16</sup> In einigen Fällen bewertet dieser Bericht die Veränderungen gegenüber 2006–2015. Die Erwärmung von 1850–1900 bis 2006–2015 wurde mit 0,87 °C (*wahrscheinlicher* Bereich 0,75 bis 0,99 °C) beziffert. {Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1}.

- A.2** Es ist *praktisch sicher*, dass sich der globale Ozean seit 1970 ungemindert erwärmt hat und mehr als 90% der zusätzlichen Wärme im Klimasystem aufgenommen hat (*hohes Vertrauen*). Seit 1993 hat sich die Geschwindigkeit der Ozeanerwärmung mehr als verdoppelt (*wahrscheinlich*). Die Häufigkeit von marinen Hitzewellen hat sich seit 1982 *sehr wahrscheinlich* verdoppelt, und ihre Intensität nimmt zu (*sehr hohes Vertrauen*). Durch die Aufnahme von mehr CO<sub>2</sub> ist die Ozeanoberfläche zunehmend versauert (*praktisch sicher*). Sauerstoffverlust fand von der Oberfläche bis in 1 000 m Tiefe statt (*mittleres Vertrauen*). {1.4, 3.2, 5.2, 6.4, 6.7, Abbildungen SPM.1, SPM.2}
- A.2.1**  Der im Fünften IPCC-Sachstandsbericht (AR5) dokumentierte Trend der Ozeanerwärmung hat sich fortgesetzt. Die Geschwindigkeit der Ozeanerwärmung und damit der Wärmeeaufnahme hat sich seit 1993 mehr als verdoppelt – von  $3,22 \pm 1,61$  ZJ pro Jahr (0–700 m Tiefe) und  $0,97 \pm 0,64$  ZJ pro Jahr (700–2 000 m) zwischen 1969 und 1993 auf  $6,28 \pm 0,48$  ZJ pro Jahr (0–700 m) und  $3,86 \pm 2,09$  ZJ pro Jahr (700–2 000 m) zwischen 1993 und 2017<sup>17</sup> (*wahrscheinlich*) – und wird anthropogenen Antrieben zugeschrieben (*sehr wahrscheinlich*). {1.4.1, 5.2.2, Tabelle 5.1, Abbildung SPM.1}
- A.2.2**  Auf den Südlichen Ozean entfielen zwischen 1970 und 2017 35–43% der gesamten Wärmezunahme in den oberen 2 000 m des globalen Ozeans aus (*hohes Vertrauen*). Sein Anteil stieg zwischen 2005 und 2017 auf 45–62% (*hohes Vertrauen*). Die Tiefsee unterhalb von 2 000 m hat sich seit 1992 (*wahrscheinlich*) erwärmt, vor allem im Südlichen Ozean. {1.4, 3.2.1, 5.2.2, Tabelle 5.1, Abbildung SPM.2}
- A.2.3**  Weltweit haben hitzebedingte Ereignisse im Meer zugenommen; marine Hitzewellen<sup>18</sup>, definiert als Ereignis, bei dem die Tagestemperatur an der Meeresoberfläche das lokale 99. Perzentil des Zeitraums 1982 bis 2016 überschreitet, haben sich in ihrer Frequenz verdoppelt und sind länger anhaltend, intensiver und großflächiger geworden (*sehr wahrscheinlich*). Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass 84–90% der zwischen 2006 und 2015 aufgetretenen marinen Hitzewellen dem anthropogenen Temperaturanstieg zuzuordnen sind. {Tabelle 6.2, 6.4, Abbildungen SPM.1, SPM.2}
- A.2.4**  Die Dichteschichtung<sup>19</sup> hat in den oberen 200 m des Ozeans seit 1970 zugenommen (*sehr wahrscheinlich*). Die beobachtete Erwärmung der Ozeanoberfläche und die Zufuhr von Süßwasser in hohen Breitengraden lassen die Ozeanoberfläche im Vergleich zu tieferen Teilen des Ozeans weniger dicht werden (*hohes Vertrauen*) und hemmen die Vermischung zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser (*hohes Vertrauen*). Die gemittelte Schichtung der oberen 200 m ist von dem Durchschnittswert für die Jahre 1971–1990 um  $2,3 \pm 0,1\%$  (*sehr wahrscheinliche* Bandbreite) auf den Durchschnittswert für 1998–2017 angestiegen. {5.2.2}
- A.2.5**  Der Ozean hat seit den 1980er Jahren 20–30% (*sehr wahrscheinlich*) der gesamten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgenommen, was zu weiterer Ozeanversauerung geführt hat. Der pH-Wert des Oberflächenwassers im offenen Ozean ist seit Ende der 1980er Jahre um einen *sehr wahrscheinlichen* Bereich von 0,017–0,027 pH-Einheiten pro Jahrzehnt gesunken<sup>20</sup>, wobei das Absinken des pH-Wertes der Ozeanoberfläche für mehr als 95% der Meeresoberfläche *sehr wahrscheinlich* bereits aus der natürlichen Hintergrundvariabilität hervorgetreten ist. {3.2.1, 5.2.2, Box 5.1, Abbildungen SPM.1, SPM.2}
- A.2.6**  Datensätze, die sich über den Zeitraum 1970–2010 erstrecken, zeigen, dass der offene Ozean über die oberen 1 000 m 0,5–3,3% Sauerstoff (*sehr wahrscheinliche* Bandbreite) verloren hat, parallel zu einer *wahrscheinlichen* Ausweitung der Volumina von Sauerstoffminimumzonen um 3–8% (*mittleres Vertrauen*). Der Sauerstoffverlust ist in erster Linie auf die zunehmende Schichtung des Ozeans, sich ändernde Belüftung und Biogeochemie zurückzuführen (*hohes Vertrauen*). {5.2.2, Abbildungen SPM.1, SPM.2}

<sup>17</sup> ZJ ist Zettajoule und entspricht 10<sup>21</sup> Joule. Die Erwärmung des gesamten Ozeans um 1 °C erfordert etwa 5 500 ZJ; 144 ZJ würden die oberen 100 m um etwa 1 °C erwärmen.

<sup>18</sup> Eine marine Hitzewelle ist eine Phase extrem hoher Temperatur nahe der Meeresoberfläche, die tage- bis monatelang anhält und sich über bis zu tausend Kilometer erstrecken kann (Anhang I: Glossar).

<sup>19</sup> In diesem Bericht wird Dichteschichtung definiert als der Dichtekontrast zwischen flacheren und tieferen Schichten. Eine erhöhte Schichtung verringert den vertikalen Austausch von Wärme, Salzgehalt, Sauerstoff, Kohlenstoff und Nährstoffen.

<sup>20</sup> Basierend auf In-situ-Aufzeichnungen von über fünfzehn Jahren.

- A.2.7  Beobachtungen, sowohl in situ (2004–2017) als auch basierend auf Rekonstruktionen der Meeresoberflächentemperatur, deuten darauf hin, dass sich die Atlantische Meridionale Umwälzbewegung (*Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC*)<sup>21</sup> gegenüber 1850–1900 abgeschwächt hat (*mittleres Vertrauen*). Für eine Quantifizierung des Ausmaßes der Schwächung oder eine angemessene Zuordnung zu anthropogenen Treibern liegen aufgrund der begrenzten Länge der Beobachtungsaufzeichnungen nicht ausreichend Daten vor. Obwohl eine Zuordnung derzeit nicht möglich ist, zeigen CMIP5-Modellsimulationen des Zeitraums 1850–2015 im Durchschnitt eine AMOC-Schwächung, wenn sie durch anthropogene Treiber angetrieben werden. {6.7}
- A.3 Der mittlere globale Meeresspiegel steigt an; in den letzten Jahrzehnten beschleunigte sich dieser Anstieg sowohl aufgrund der zunehmenden Geschwindigkeit von Eisverlusten des grönländischen und der antarktischen Eisschilde (*sehr hohes Vertrauen*) als auch aufgrund des anhaltenden Gletschermassenverlusts und der thermischen Ausdehnung des Ozeans. Erhöhte Windgeschwindigkeiten und Niederschläge tropischer Wirbelstürme sowie Zunahmen extremer Wellen verschärfen in Kombination mit dem relativen Meeresspiegelanstieg Extremwasserstände und Gefährdungen an Küsten (*hohes Vertrauen*). {3.3, 4.2, 6.2, 6.3, 6.8, Abbildungen SPM.1, SPM.2, SPM.4, SPM.5}**
- A.3.1  Der gesamte mittlere globale Meeresspiegelanstieg für 1902–2010 beträgt 0,16 m (*sehr wahrscheinlicher* Bereich 0,12–0,21 m). Die Geschwindigkeit des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs von 3,6 mm pro Jahr für 2006–2015 (*sehr wahrscheinlicher* Bereich 3,1–4,1 mm pro Jahr) ist beispiellos im letzten Jahrhundert (*hohes Vertrauen*) und etwa das 2,5-Fache der Geschwindigkeit für 1901–1990 von 1,4 mm pro Jahr (*sehr wahrscheinlicher* Bereich 0,8–2,0 mm pro Jahr). Die Summe der Beiträge von Eisschilden und Gletschern im Zeitraum 2006–2015 ist die dominierende Quelle des Meeresspiegelanstiegs (1,8 mm pro Jahr, *sehr wahrscheinlicher* Bereich 1,7–1,9 mm pro Jahr), die den Effekt der thermischen Ausdehnung des Ozeanwassers (1,4 mm pro Jahr, *sehr wahrscheinlich* 1,1–1,7 mm pro Jahr)<sup>22</sup> übersteigt (*sehr hohes Vertrauen*). Die Hauptursache für den mittleren globalen Meeresspiegelanstieg seit 1970 sind anthropogene Antriebe (*hohes Vertrauen*). {4.2.1, 4.2.2, Abbildung SPM.1}
- A.3.2  Der Meeresspiegelanstieg hat sich beschleunigt (*äußerst wahrscheinlich*), was auf die insgesamt erhöhten Eisverluste des grönländischen und der antarktischen Eisschilde zurückzuführen ist (*sehr hohes Vertrauen*). Der Massenverlust des antarktischen Eisschildes im Zeitraum 2007–2016 verdreifachte sich im Vergleich zu 1997–2006. Für Grönland hat sich der Massenverlust im gleichen Zeitraum verdoppelt (*wahrscheinlich, mittleres Vertrauen*). {3.3.1, Abbildungen SPM.1, SPM.2, SPM A.1.1}
- A.3.3  Eine Beschleunigung des Eisflusses und -rückzugs in der Antarktis, die das Potenzial besitzt, innerhalb weniger Jahrhunderte zu einem Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern zu führen, wird in der westantarktischen Amundsen-Bucht sowie im Wilkesland in der Ostantarktis beobachtet (*sehr hohes Vertrauen*). Diese Änderungen sind möglicherweise der Beginn einer irreversiblen<sup>23</sup> Eisschildinstabilität. Die Unsicherheit im Zusammenhang mit dem Beginn von Eisschildinstabilität ergibt sich aus begrenzten Beobachtungen, einer unzureichenden Modelldarstellung von Eisschildprozessen und einem begrenzten Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Eisschild. {3.3.1, Cross-Chapter Box 8 in Kapitel 3, 4.2.3}
- A.3.4  Der Meeresspiegelanstieg ist weltweit nicht einheitlich und unterscheidet sich je nach Region. Regionale Unterschiede, die innerhalb von  $\pm 30\%$  des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs liegen, ergeben sich aus dem Verlust von Landeis sowie aus Schwankungen der Ozeanerwärmung und -zirkulation. Unterschiede zum globalen Mittelwert können in Gebieten mit schneller vertikaler Landbewegung, auch durch lokale menschliche Aktivitäten (z. B. Grundwasserentnahme), größer sein (*hohes Vertrauen*). {4.2.2, 5.2.2, 6.2.2, 6.3.1, 6.8.2, Abbildung SPM.2}
- A.3.5  Extreme Wellenhöhen, die zu extremen Meeresspiegelereignissen, Küstenerosion und Überschwemmungen beitragen, haben im Süd- und im Nordatlantik im Zeitraum 1985–2018 um rund 1,0 cm pro Jahr beziehungsweise 0,8 cm pro Jahr zugenommen (*mittleres Vertrauen*). Der Meereisverlust in der Arktis hat auch die Wellenhöhen im Zeitraum 1992–2014 erhöht (*mittleres Vertrauen*). {4.2.2, 6.2, 6.3, 6.8, Box 6.1}

<sup>21</sup> Die Atlantische Meridionale Umwälzbewegung (*Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC*) ist das wichtigste Strömungssystem im Süd- und Nordatlantik (Anhang I: Glossar).

<sup>22</sup> Die Gesamtgeschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs ist aufgrund von Unsicherheiten bei der Bezifferung der Änderung von Wasserspeicherung an Land größer als die Summe der Beiträge aus Kryosphäre und Ozean.

<sup>23</sup> Die Regenerationszeit liegt in der Größenordnung von Hunderten bis Tausenden von Jahren (Anhang I: Glossar).

- A.3.6  Der anthropogene Klimawandel hat die beobachteten Niederschläge (*mittleres Vertrauen*), Winde (*geringes Vertrauen*) und extremen Meeresspiegelereignisse (*hohes Vertrauen*) im Zusammenhang mit einigen tropischen Wirbelstürmen erhöht, wodurch sich die Intensität multipler Extremereignisse und damit verbundene kaskadenartige Folgen erhöht hat (*hohes Vertrauen*). Der anthropogene Klimawandel hat möglicherweise zu einer polwärts gerichteten Verlagerung der maximalen Intensität tropischer Wirbelstürme im westlichen Nordpazifik in den letzten Jahrzehnten beigetragen, die mit einer anthropogen getriebenen Ausweitung der Tropen in Zusammenhang steht (*geringes Vertrauen*). Es zeichnen sich Belege für einen Anstieg des Anteils tropischer Wirbelstürme der Kategorie 4 oder 5 weltweit pro Jahr in den letzten Jahrzehnten ab (*geringes Vertrauen*). {6.2, Tabelle 6.2, 6.3, 6.8, Box 6.1}

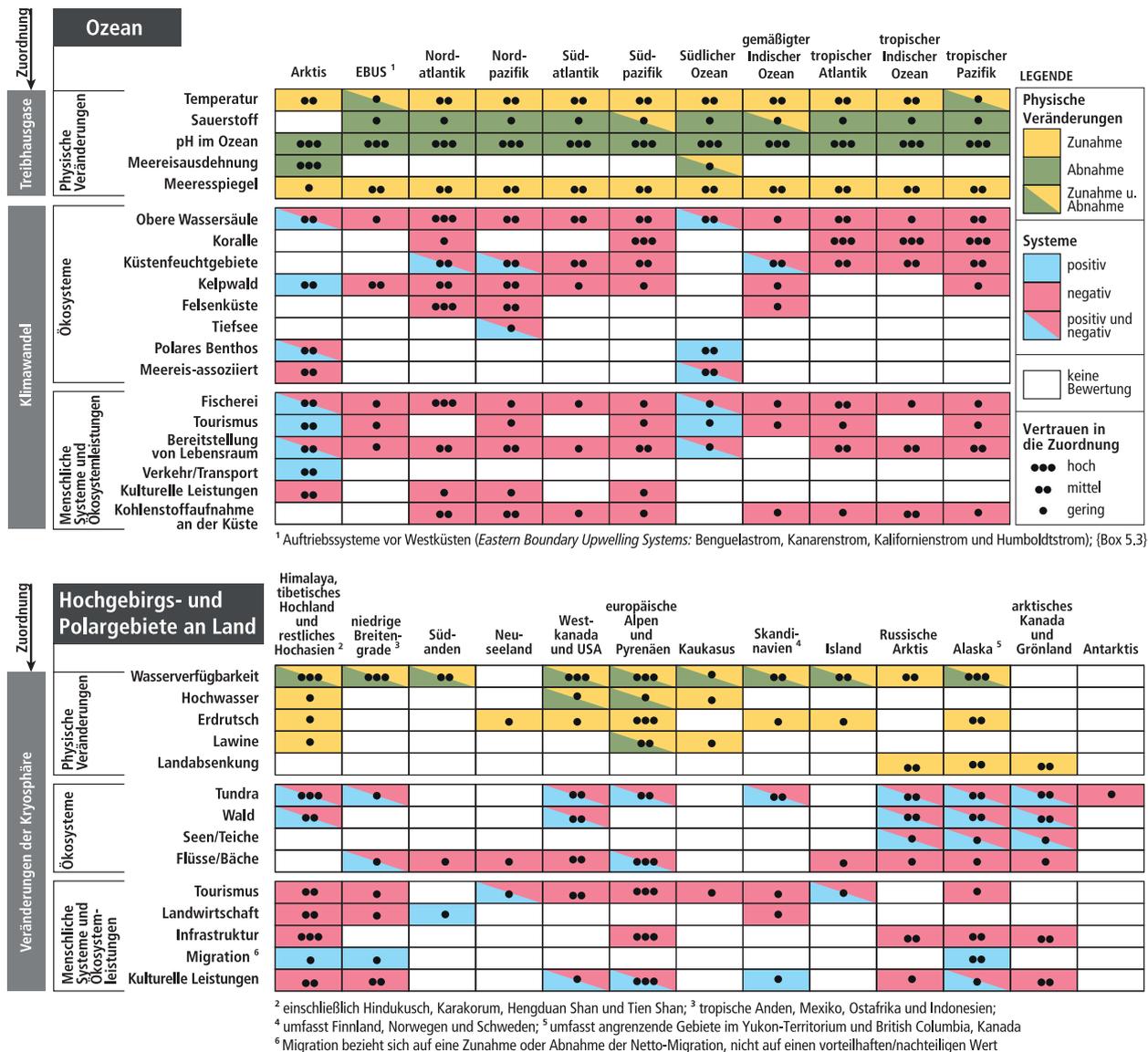
## Beobachtete Folgen für Ökosysteme

- A.4 Veränderungen der Kryosphäre und damit verbundene hydrologische Veränderungen hatten Folgen für Land- und Süßwasserarten und -ökosysteme in Hochgebirgen und Polargebieten durch das Freiwerden von ehemals eisbedecktem Land, Änderungen der Schneebedeckung und dem Tauen von Permafrost. Diese Veränderungen haben dazu beigetragen, die saisonalen Aktivitäten, die Populationsdichte und die Verbreitung von ökologisch, kulturell und wirtschaftlich wichtigen Pflanzen- und Tierarten, ökologische Störungen und die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen zu verändern (*hohes Vertrauen*). {2.3.2, 2.3.3, 3.4.1, 3.4.3, Box 3.4, Abbildung SPM.2}**
- A.4.1  Im Laufe des letzten Jahrhunderts haben einige Pflanzen- und Tierarten an Populationsdichte zugenommen, ihr Verbreitungsgebiet verlagert und sich in neuen Gebieten angesiedelt, als Gletscher zurückgingen und sich die schneefreie Saison verlängerte (*hohes Vertrauen*). Zusammen mit der Erwärmung haben diese Veränderungen die Anzahl an Arten in Hochgebirgen lokal erhöht, da Arten, die normalerweise auf niedrigerer Höhe vorkommen, hangaufwärts wandern (*sehr hohes Vertrauen*). Die Populationsdichten mancher kälteangepasster oder schneeabhängiger Arten sind zurückgegangen, was ihr Aussterberisiko erhöht, insbesondere auf Berggipfeln (*hohes Vertrauen*). In Polar- und Bergregionen haben viele Arten ihre saisonalen Aktivitäten vor allem im späten Winter und im Frühjahr verändert (*hohes Vertrauen*). {2.3.3, Box 3.4}
- A.4.2  Erhöhte Wald- und Flächenbrände und ein abruptes Tauen von Permafrost sowie Veränderungen der Hydrologie in der Arktis und in Gebirgen haben die Häufigkeit und Intensität von Ökosystemstörungen verändert (*hohes Vertrauen*). Daraus resultierten positive und negative Folgen für Vegetation und Tierwelt, beispielsweise für Rentiere und Lachse (*hohes Vertrauen*). {2.3.3, 3.4.1, 3.4.3}
- A.4.3  In der gesamten Tundra zeigen Satellitenbeobachtungen ein allgemeines Ergrünen, was oft auf erhöhte Pflanzenproduktivität hinweist (*hohes Vertrauen*). Verbräunte Flächen in Tundra und borealen Wäldern deuten auf eine verringerte Produktivität hin (*hohes Vertrauen*). Diese Veränderungen haben sich sowohl im Hochgebirge (*mittleres Vertrauen*) als auch in Polargebieten (*hohes Vertrauen*) negativ auf versorgende, regulierende und kulturelle Ökosystemleistungen ausgewirkt, wobei sich auch manche vorübergehende positive Folgen für Versorgungsleistungen ergeben haben. {2.3.1, 2.3.3, 3.4.1, 3.4.3, Anhang I: Glossar}

- A.5** Seit etwa 1950 haben sich die geografischen Verbreitungsgebiete und die saisonalen Aktivitäten vieler mariner Arten aus unterschiedlichen Gruppen als Reaktion auf die Ozeanerwärmung, Meereisveränderung und biogeochemische Veränderungen in ihren Lebensräumen, wie beispielsweise Sauerstoffverlust, verschoben (*hohes Vertrauen*). Dies hat vom Äquator bis zu den Polen zu Verschiebungen in Artenzusammensetzung, Populationsdichte und Biomasseproduktion von Ökosystemen geführt. Veränderte Wechselwirkungen zwischen Arten haben zu kaskadenartigen Folgen für die Struktur und Funktionsweise von Ökosystemen geführt (*mittleres Vertrauen*). In manchen Meeresökosystemen sind Arten sowohl von den Folgen von Fischereipraktiken als auch vom Klimawandel betroffen (*mittleres Vertrauen*). {3.2.3, 3.2.4, Box 3.4, 5.2.3, 5.3, 5.4.1, Abbildung SPM.2}
- A.5.1**  Die Geschwindigkeiten, mit denen sich die Verbreitungsgebiete unterschiedlicher mariner Arten polwärts verlagern, betragen für Organismen in epipelagischen Ökosystemen (die oberen 200 m unter der Meeresoberfläche) und solchen am Meeresboden seit den 1950er Jahren  $52 \pm 33$  km pro Jahrzehnt beziehungsweise  $29 \pm 16$  km pro Jahrzehnt (*sehr wahrscheinliche* Bandbreiten). Die Geschwindigkeit und Richtung der beobachteten Verlagerungen von Verbreitungsgebieten wird durch die lokale Temperatur, den Sauerstoff und durch Meeresströmungen über Tiefen-, Breiten- und Längsgradienten hinweg beeinflusst (*hohes Vertrauen*). Erwärmungsbedingte Ausweitungen der Verbreitungsgebiete von Arten haben zu veränderten Ökosystemstrukturen und -funktionen geführt, beispielsweise im Nordatlantik, Nordostpazifik und in der Arktis (*mittleres Vertrauen*). {5.2.3, 5.3.2, 5.3.6, Box 3.4, Abbildung SPM.2}
- A.5.2**  In der Arktis hat in den letzten Jahrzehnten die Nettoprimärproduktion in eisfreien Gewässern zugenommen (*hohes Vertrauen*), und Phytoplanktonblüten im Frühjahr treten als Reaktion auf Meereisveränderungen und Nährstoffverfügbarkeit früher im Jahr auf, was räumlich unterschiedliche positive und negative Folgen für marine Ökosysteme hat (*mittleres Vertrauen*). In der Antarktis sind solche Veränderungen räumlich heterogen und waren in der Vergangenheit mit schneller lokaler Umweltveränderung wie rückläufigen Gletschern und Meereisveränderungen verbunden (*mittleres Vertrauen*). Veränderungen saisonaler Aktivitäten, der Produktion und Verteilung mancher arktischer Zooplanktonarten und eine Südwärtsverlagerung des Verbreitungsgebiets des antarktischen Krillvorkommens im Südatlantik sind mit klimabedingten Umweltveränderungen verbunden (*mittleres Vertrauen*). In den Polargebieten haben mit Eis assoziierte Meeressäuger und Seevögel aufgrund von Meereisveränderungen eine Verkleinerung ihres Habitats (*hohes Vertrauen*) und Folgen für die erfolgreiche Nahrungssuche aufgrund von Klimafolgen für die Beuteverteilungen (*mittleres Vertrauen*) zu spüren bekommen. Kaskadenartige Effekte multipler klimabedingter Treiber auf polares Zooplankton haben die Struktur und Funktion des Nahrungsnetzes, die Biodiversität sowie die Fischerei beeinflusst (*hohes Vertrauen*). {3.2.3, 3.2.4, Box 3.4, 5.2.3, Abbildung SPM.2}
- A.5.3**  Auftriebssysteme vor Westküsten (*Eastern Boundary Upwelling Systems, EBUS*) gehören zu den produktivsten Meeresökosystemen. Zunehmende Ozeanversauerung und Sauerstoffverlust wirken sich negativ auf zwei der vier großen Auftriebssysteme aus: den Kalifornienstrom und den Humboldtstrom (*hohes Vertrauen*). Ozeanversauerung und ein Rückgang des Sauerstoffgehalts im Kalifornienstrom-Auftriebssystem haben die Ökosystemstruktur verändert, was direkte nachteilige Folgen für die Biomasseproduktion und die Artenzusammensetzung hat (*mittleres Vertrauen*). {Box 5.3, Abbildung SPM.2}
- A.5.4**  Die Ozeanerwärmung im 20. Jahrhundert und danach hat zu einem allgemeinen Rückgang des maximalen Fangpotenzials beigetragen (*mittleres Vertrauen*), was die Folgen der Überfischung für einige Fischbestände noch verstärkt (*hohes Vertrauen*). In vielen Regionen haben Rückgänge der Populationsdichten von Fischen und Schalentieren aufgrund direkter und indirekter Folgen der globalen Erwärmung und biogeochemischer Veränderungen bereits zu verringerten Fischereierträgen beigetragen (*hohes Vertrauen*). In manchen Gebieten haben sich verändernde Bedingungen im Ozean zur Erweiterung des geeigneten Lebensraums und/oder zur Zunahme der Populationsdichte mancher Arten beigetragen (*hohes Vertrauen*). Diese Veränderungen wurden von Veränderungen der Artenzusammensetzung der Fischereierträge seit den 1970er Jahren in vielen Ökosystemen begleitet (*mittleres Vertrauen*). {3.2.3, 5.4.1, Abbildung SPM.2}

- A.6 Küstenökosysteme werden durch die Erwärmung des Ozeans beeinträchtigt – einschließlich verstärkter mariner Hitzewellen – sowie durch Versauerung, Sauerstoffverlust, Eindringen von Salzwasser und Meeresspiegelanstieg, in Kombination mit negativen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf den Ozean und auf Landsysteme (*hohes Vertrauen*). Folgen für die Größe von Lebensräumen und die Biodiversität sowie für Ökosystemfunktionen und -leistungen werden bereits beobachtet (*hohes Vertrauen*). {4.3.2, 4.3.3, 5.3, 5.4.1, 6.4.2, Abbildung SPM.2}**
- A.6.1  Küstenökosysteme mit Pflanzenbewuchs schützen die Küstenlinie vor Stürmen und Erosion und helfen, die Folgen des Meeresspiegelanstiegs zu puffern. Fast 50% der Küstenfeuchtgebiete sind in den letzten 100 Jahren durch die kombinierten Auswirkungen von lokalem menschlichem Druck, Meeresspiegelanstieg, Erwärmung und extremen Klimaereignissen verloren gegangen (*hohes Vertrauen*). Küstenökosysteme mit Pflanzenbewuchs sind wichtige Kohlenstoffspeicher; ihr Verlust ist für die aktuelle Freisetzung von 0,04–1,46 GtC pro Jahr verantwortlich (*mittleres Vertrauen*). Als Reaktion auf die Erwärmung dehnen sich seit Ende der 1970er Jahre die Verbreitungsgebiete von Seegraswiesen und Kelpwäldern in hohen Breitengraden aus und schrumpfen in niedrigen Breitengraden (*hohes Vertrauen*), und in manchen Gebieten treten nach Hitzewellen episodische Verluste auf (*mittleres Vertrauen*). Eine großräumige Mangrovensterblichkeit im Zusammenhang mit der Erwärmung seit den 1960er Jahren wurde teilweise durch das Eindringen von Mangroven in subtropische Salzwiesen infolge von Temperaturanstiegen ausgeglichen; dies führt zum Verlust von offenen Flächen mit krautigen Pflanzen, die Nahrung und Lebensraum für abhängige Fauna bieten (*hohes Vertrauen*). {4.3.3, 5.3.2, 5.3.6, 5.4.1, 5.5.1, Abbildung SPM.2}
- A.6.2  Ein verstärktes Eindringen von Meerwasser in Flussmündungen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs hat eine Umverteilung mariner Arten stromaufwärts angetrieben (*mittleres Vertrauen*) und zu einer Verringerung geeigneter Lebensräume für Mündungsartengemeinschaften geführt (*mittleres Vertrauen*). Erhöhte Lasten von Nährstoffen und organischer Substanz in den Flussmündungen seit den 1970er Jahren aufgrund intensiver Erschließung durch den Menschen und aufgrund des Eintrags aus Flüssen haben die anregenden Auswirkungen der Ozeanerwärmung auf bakterielle Atmung verschärft, was zu einer Ausdehnung sauerstoffarmer Bereiche führt (*hohes Vertrauen*). {5.3.1}
- A.6.3  Zu den Folgen des Meeresspiegelanstiegs für Küstenökosysteme gehören die Verengung von Lebensräumen, die geografische Verschiebung der dazugehörigen Arten sowie der Verlust der biologischen Vielfalt und der Funktionalität von Ökosystemen. Folgen werden durch direkte menschliche Störungen und dort, wo menschengemachte Hindernisse eine Verlagerung von Marschland und Mangrovenwäldern landeinwärts verhindern (sogenannter *coastal squeeze*), verschärft (*hohes Vertrauen*). Abhängig von der lokalen Geomorphologie und der Sedimentversorgung können Sümpfe und Mangroven mit Geschwindigkeiten in die Höhe wachsen, die gleich oder größer sind als der aktuelle mittlere Meeresspiegelanstieg (*hohes Vertrauen*). {4.3.2, 4.3.3, 5.3.2, 5.3.7, 5.4.1}
- A.6.4  Warmwasserkorallenriffe und Felsküsten, die von unbeweglichen, kalkbildenden (z. B. schalen- und skelettproduzierenden) Organismen wie Korallen, Seepocken und Muscheln dominiert werden, sind derzeit von extremen Temperaturen und Ozeanversauerung betroffen (*hohes Vertrauen*). Marine Hitzewellen haben bereits mit zunehmender Häufigkeit zu großflächigen Korallenbleichen geführt (*sehr hohes Vertrauen*), die seit 1997 weltweit Schädigung von Riffen verursachen, und falls Regeneration stattfindet, ist diese langsam (über 15 Jahre) (*hohes Vertrauen*). Langanhaltende Phasen mit hoher Umgebungstemperatur und Austrocknung der Organismen stellen ein hohes Risiko für Ökosysteme an Felsküsten dar (*hohes Vertrauen*). {SR1.5, 5.3.4, 5.3.5, 6.4.2, Abbildung SPM.2}

## Beobachtete regionale Folgen von Veränderungen in Ozean und Kryosphäre



**Abbildung SPM.2** | Synthese der beobachteten regionalen Gefährdungen und Folgen im Ozean<sup>24</sup> (oben) sowie in Hochgebirgen und Polargebieten an Land (unten), die in SROCC bewertet wurden. Für jede Region werden physikalische Veränderungen, Folgen für wichtige Ökosysteme und Folgen für menschliche Systeme sowie Ökosystemfunktionen und -leistungen dargestellt. Bei physikalischen Änderungen bezieht sich Gelb/Grün auf eine Zunahme bzw. Abnahme der Menge oder Häufigkeit der Messgröße. Bei Folgen für Ökosysteme, menschliche Systeme und Ökosystemleistungen zeigt Blau oder Rot an, ob eine beobachtete Folge positiv (vorteilhaft) oder negativ (nachteilig) für das jeweilige System oder die Leistung ist. Zellen, denen „Zunahme und Abnahme“ zugeordnet ist, zeigen an, dass innerhalb dieser Region sowohl Zunahmen als auch Abnahmen von physischen Veränderungen gefunden werden, diese aber nicht unbedingt gleich sind; dasselbe gilt für Zellen, die „positive und negative“ zuordenbare Folgen aufweisen. Bei Ozeanregionen bezieht sich das Vertrauensniveau auf das Vertrauen in die Zuordnung beobachteter Veränderungen zu Veränderungen des Treibhausgasantriebs für physische Veränderungen und zum Klimawandel für Ökosysteme, menschliche Systeme und Ökosystemleistungen. Für Hochgebirge und Polargebiete an Land wird das Vertrauensniveau bezüglich der zumindest teilweisen Zuordnung von physikalischen Veränderungen und Folgen zu einer Veränderung der Kryosphäre gezeigt. „Keine Bewertung“ bedeutet: nicht anwendbar, nicht auf regionaler Ebene bewertet, oder die Belege sind für die Bewertung unzureichend. „Physikalische Veränderungen im Ozean“ sind definiert als: Temperaturänderung in den oberen 700 m des Ozeans mit Ausnahme des Südlichen Ozeans (0–2 000 m) und des Arktischen Ozeans (obere gemischte Schicht und große einfließende Strömungssäste); Sauerstoff in den oberen 1 200 m oder Sauerstoffminimumschicht; Ozean-pH als Oberflächen-pH (abnehmender pH ent-

<sup>24</sup> Randmeere werden in diesem Bericht nicht einzeln als Meeresregionen bewertet.

spricht zunehmender Ozeanversauerung). Ökosysteme im Ozean: „Korallen“ beziehen sich auf Warmwasserkorallenriffe und Kaltwasserkorallen. Die Kategorie „obere Wassersäule“ bezieht sich auf die epipelagische Zone für alle Ozeanregionen mit Ausnahme der Polarregionen, in denen die Folgen für einige pelagische Organismen im Freiwasser tiefer als die oberen 200 m einbezogen wurden. „Küstenfeuchtgebiete“ umfassen Salzwiesen, Mangrovenwälder und Seegras. „Kelpwälder“ sind Lebensräume einer bestimmten Gruppe von Makroalgen. „Felsküsten“ sind Küstenlebensräume, die von unbeweglichen, kalkbildenden Organismen wie Muscheln und Seepocken dominiert werden. „Tiefsee“ bezieht sich auf Ökosysteme am Meeresboden in Tiefen von 3 000–6 000 m. „Mit Meereis assoziiert“ umfasst Ökosysteme im, auf und unter dem Meereis. „Lebensraumleistungen“ beziehen sich auf unterstützende Strukturen und Leistungen (z. B. Lebensraum, Biodiversität, Primärproduktion). „Kohlenstoffsequestrierung an der Küste“ bezieht sich auf die Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff durch blaue Kohlenstoff-Ökosysteme an der Küste. Ökosysteme an Land: „Tundra“ bezieht sich auf Tundra und alpine Wiesen und umfasst terrestrische Ökosysteme der Antarktis. „Migration“ bezieht sich auf eine Zunahme oder Abnahme der Netto-Migration und nicht auf einen zuträglichen/schädlichen Wert. „Folgen für Tourismus“ beziehen sich auf die Betriebsbedingungen für den Tourismussektor. „Kulturelle Leistungen“ umfassen kulturelle Identität, Heimatgefühl sowie spirituelle, intrinsische und ästhetische Werte und Beiträge aus der Gletscherarchäologie. Die zugrunde liegende Information für Landregionen ist in den Tabellen SM2.6, SM2.7, SM2.8, SM3.8, SM3.9 und SM3.10 und für Ozeanregionen in den Tabellen SM5.10, SM5.11, SM3.8, SM3.9 und SM3.10 angegeben. {2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7, Abbildung 2.1, 3.2.1, 3.2.3, 3.2.4, 3.3.3, 3.4.1, 3.4.3, 3.5.2, Box 3.4, 4.2.2, 5.2.2, 5.2.3, 5.3.3, 5.4, 5.6, Abbildung 5.24, Box 5.3}

## Beobachtete Folgen für Menschen und Ökosystemleistungen

**A.7 Seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat die schrumpfende Kryosphäre in der Arktis und in Hochgebirgen zu überwiegend negativen Folgen für Ernährungssicherheit, Wasserressourcen, Wasserqualität, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlergehen, Infrastruktur, Verkehr, Tourismus und Erholung sowie für die Kultur menschlicher Gesellschaften geführt, insbesondere für indigene Völker (*hohes Vertrauen*). Kosten und Nutzen waren ungleichmäßig über Bevölkerungen und Regionen verteilt. Anpassungsanstrengungen haben von der Einbeziehung indigenen Wissens und lokalen Wissens profitiert (*hohes Vertrauen*). {1.1, 1.5, 1.6.2, 2.3, 2.4, 3.4, 3.5, Abbildung SPM.2}**

- A.7.1  Die Ernährungs- und Wasserversorgungssicherheit wurde in vielen arktischen Regionen durch Veränderungen von Schneebedeckung, See- und Flusseis sowie Permafrost negativ beeinflusst (*hohes Vertrauen*). Diese Veränderungen haben den Zugang zu und die Nahrungsmittelverfügbarkeit in Weide-, Jagd-, Fischerei- und Sammelgründen gestört, was die Lebensgrundlagen und die kulturelle Identität der arktischen Einwohner, einschließlich der indigenen Bevölkerung, beeinträchtigt (*hohes Vertrauen*). Gletscherrückgang und Veränderungen der Schneebedeckung haben zu lokal begrenzten Rückgängen der landwirtschaftlichen Erträge in manchen Hochgebirgen beigetragen, darunter der Hindukusch-Himalaya und die tropischen Anden (*mittleres Vertrauen*). {2.3.1, 2.3.7, Box 2.4, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.5.2, Abbildung SPM.2}
- A.7.2  Zu den negativen Folgen von Veränderungen der Kryosphäre auf die menschliche Gesundheit in der Arktis gehörten ein erhöhtes Risiko für durch Lebensmittel und Wasser übertragbare Krankheiten, Unterernährung, Verletzungen und psychische Gesundheitsprobleme, insbesondere unter indigenen Bevölkerungsgruppen (*hohes Vertrauen*). In manchen Hochgebirgen wurde die Wasserqualität durch Schadstoffe, die aus schmelzenden Gletschern und auftauendem Permafrost freigesetzt wurden, insbesondere Quecksilber, beeinträchtigt (*mittleres Vertrauen*). Gesundheitsbezogene Anpassungsbemühungen in der Arktis reichen von lokaler bis zur internationalen Ebene, und Erfolge wurden durch indigenes Wissen untermauert (*hohes Vertrauen*). {1.8, Cross-Chapter Box 4 in Kapitel 1, 2.3.1, 3.4.3}
- A.7.3  Bewohner der Arktis, insbesondere indigene Völker, haben die zeitliche Planung ihrer Aktivitäten angepasst, um auf Veränderungen bezüglich der Saisonalität und der Sicherheit von Bedingungen für Reisen an Land, auf Eis und auf Schnee zu reagieren. Kommunen und Industrie beginnen, Infrastrukturausfälle im Zusammenhang mit Überschwemmungen und auftauendem Permafrost anzugehen, und einige Küstengemeinden haben eine Verlagerung geplant (*hohes Vertrauen*). Die Anpassung wurde durch begrenzte finanzielle Mittel, Fähigkeiten, Kapazitäten und institutionelle Unterstützung für eine sinnvolle Beteiligung an Planungsprozessen erschwert (*hohes Vertrauen*). {3.5.2, 3.5.4, Cross-Chapter Box 9}
- A.7.4  Arktischer Schiffsverkehr im Sommer (einschließlich Tourismus) nahm in den letzten zwei Jahrzehnten parallel zu den Meereisrückgängen zu (*hohes Vertrauen*). Dies hat Auswirkungen auf den Welthandel und auf Wirtschaftssysteme, die von traditionellen Schifffahrtskorridoren abhängen, und birgt Risiken für marine Ökosysteme der Arktis und für Küstengemeinschaften (*hohes Vertrauen*), beispielsweise durch invasive Arten und lokale Verschmutzung. {3.2.1, 3.2.4, 3.5.4, 5.4.2, Abbildung SPM.2}

- A.7.5   In den vergangenen Jahrzehnten ist die Exposition von Menschen und Infrastruktur gegenüber Naturgefahren aufgrund wachsender Bevölkerung, Tourismus und sozioökonomischer Entwicklung gestiegen (*hohes Vertrauen*). Einige Katastrophen sind mit Veränderungen in der Kryosphäre in Verbindung gebracht worden, zum Beispiel in den Anden, den Hochgebirgen Asiens, im Kaukasus und in den europäischen Alpen (*mittleres Vertrauen*). {2.3.2, Abbildung SPM.2}
- A.7.6   Schnee- und Gletscherveränderungen haben Menge und Saisonalität der Abflüsse und Wasserressourcen in schneedominierten und von Gletschern gespeisten Flussbecken verändert (*sehr hohes Vertrauen*). Wasserkraftwerke haben Veränderungen der Saisonalität und sowohl Zunahmen als auch Abnahmen des Wassereintrags aus Hochgebirgen zu spüren bekommen, zum Beispiel in Mitteleuropa, Island, den westlichen USA/Kanada und den tropischen Anden (*mittleres Vertrauen*). Es gibt jedoch nur begrenzte Belege für daraus resultierende Folgen für den Betrieb der Anlagen und die Energieerzeugung. {SPM B.1.4, 2.3.1}
- A.7.7   Ästhetische und kulturelle Aspekte im Hochgebirge wurden durch den Rückgang von Gletschern und Schneebedeckung negativ beeinflusst (z. B. im Himalaya, Ostafrika, den tropischen Anden) (*mittleres Vertrauen*). Tourismus und Erholung, einschließlich Ski- und Gletschertourismus, Wandern und Bergsteigen, wurden in vielen Bergregionen ebenfalls negativ beeinflusst (*mittleres Vertrauen*). An manchen Orten hat künstliche Beschneidung die negativen Folgen für den Skitourismus reduziert (*mittleres Vertrauen*). {2.3.5, 2.3.6, Abbildung SPM.2}
- A.8 Veränderungen im Ozean haben sich mit regional unterschiedlichen Resultaten auf marine Ökosysteme und deren Leistungen ausgewirkt, was deren Management und Steuerung erschwert (*hohes Vertrauen*). Es ergeben sich sowohl positive als auch negative Folgen für die fischereigestützte Ernährungssicherheit (*mittleres Vertrauen*), lokale Kulturen und Lebensgrundlagen (*mittleres Vertrauen*) sowie Tourismus und Erholung (*mittleres Vertrauen*). Die Folgen für Ökosystemleistungen haben negative Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlergehen (*mittleres Vertrauen*) sowie auf von der Fischerei abhängige indigene Völker und lokale Gemeinschaften (*hohes Vertrauen*). {1.1, 1.5, 3.2.1, 5.4.1, 5.4.2, Abbildung SPM.2}**
- A.8.1    Erwärmungsbedingte Veränderungen in der räumlichen Verteilung und Populationsdichte mancher Fisch- und Muschelbestände hatten positive und negative Folgen für Erträge, wirtschaftliche Nutzen, Lebensgrundlagen und lokale Kultur (*hohes Vertrauen*). Es gibt negative Auswirkungen für indigene Völker und lokale Gemeinschaften, die von der Fischerei abhängig sind (*hohes Vertrauen*). Veränderungen von Verbreitungsgebieten und Populationsdichten von Arten stellen die internationale und nationale Meeres- und Fischereipolitik, auch in der Arktis, im Nordatlantik und im Pazifik, in Bezug auf die Regulierung der Fischerei zur Sicherung der Ökosystemintegrität und der Aufteilung von Ressourcen zwischen Fischereieinheiten vor Probleme (*hohes Vertrauen*). {3.2.4, 3.5.3, 5.4.2, 5.5.2, Abbildung SPM.2}
- A.8.2   Schädliche Algenblüten zeigen seit den 1980er Jahren als Reaktion auf klimatische und nichtklimatische Faktoren, wie beispielsweise erhöhten Nährstoffabfluss in Flüssen, eine Reichweitungsausdehnung und eine erhöhte Häufigkeit in Küstengebieten (*hohes Vertrauen*). Die beobachteten Trends bei schädlichen Algenblüten werden zum Teil den Auswirkungen von Ozeanerwärmung, marinen Hitzewellen, Sauerstoffverlust, Eutrophierung und Verschmutzung zugeordnet (*hohes Vertrauen*). Schädliche Algenblüten hatten negative Folgen für Ernährungssicherheit, Tourismus, lokale Wirtschaft und menschliche Gesundheit (*hohes Vertrauen*). Menschliche Gemeinschaften in Gebieten ohne kontinuierliche Überwachungsprogramme und spezielle Frühwarnsysteme für schädliche Algenblüten sind anfälliger für diese biologischen Gefährdungen (*mittleres Vertrauen*). {Box 5.4, 5.4.2, 6.4.2}

- A.9 Die Küstenbevölkerung ist einer Vielzahl klimabedingter Gefahren ausgesetzt, darunter tropische Wirbelstürme, extreme Meeresspiegel und Überschwemmungen, marine Hitzewellen, Meereisverlust und Tauen von Permafrost (*hohes Vertrauen*). Weltweit wurden vielfältige Maßnahmen umgesetzt, meist nach Extremereignissen, aber manche auch in Erwartung zukünftigen Meeresspiegelanstiegs, z. B. bei großen Infrastrukturen. {3.2.4, 3.4.3, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.4.2, 5.4.2, 6.2, 6.4.2, 6.8, Box 6.1, Cross-Chapter Box 9, Abbildung SPM.5}
- A.9.1  Aktuelle Folgen für die Küstenbevölkerung dem Meeresspiegelanstieg zuzuordnen, ist an den meisten Orten nach wie vor schwierig, da die Folgen durch vom Menschen verursachte nichtklimatische Treiber wie Landabsenkung (z. B. Grundwasserentnahme), Verschmutzung, Lebensraumzerstörung, Riff- und Sandabbau verschärft wurden (*hohes Vertrauen*). {4.3.2, 4.3.3}
- A.9.2  „Harter“ Küstenschutz durch Maßnahmen wie Deiche, Flutmauern und Sperrwerke ist in vielen Küstenstädten und Flussdeltas weit verbreitet. Ökosystembasierter Küstenschutz und gemischte Ansätze, die Ökosysteme und harten Küstenschutz kombinieren, werden weltweit immer beliebter. Die Vorverlagerung von Küsten, also die Schaffung neuer Flächen durch meerwärts gerichtete Landgewinnung, hat in den meisten Gebieten, in denen es eine dichte Küstenbevölkerung und einen Mangel an Land gibt, eine lange Geschichte. Rückzug von der Küste, also die Beseitigung menschlicher Besiedlung von Küstengebieten, wird ebenfalls beobachtet, ist aber im Allgemeinen auf kleine menschliche Gemeinschaften beschränkt oder dient der Schaffung von Lebensraum für Küstenfeuchtgebiete. Die Wirksamkeit der Reaktionen auf den Meeresspiegelanstieg wird in Abbildung SPM.5 bewertet. {3.5.3, 4.3.3, 4.4.2, 6.3.3, 6.9.1, Cross-Chapter Box 9}

## B. Projizierte Veränderungen und Risiken

### Projizierte physische Veränderungen<sup>25</sup>

- B.1 Massenverluste von Gletschern in globalem Ausmaß, das Tauen von Permafrost sowie der Rückgang der Schneebedeckung und des arktischen Meereises werden sich laut Projektionen in der nahen Zukunft (2031–2050) fortsetzen, da die oberflächennahe Lufttemperatur zunimmt (*hohes Vertrauen*), was unvermeidliche Auswirkungen auf den Abfluss von Flüssen und lokale Gefahren hat (*hohes Vertrauen*). Der grönländische und die antarktischen Eisschilde werden laut Projektionen während des gesamten 21. Jahrhunderts und darüber hinaus mit zunehmender Geschwindigkeit an Masse verlieren (*hohes Vertrauen*). Die Geschwindigkeiten und Ausmaße dieser kryosphärischen Veränderungen werden laut Projektionen in einem Szenario mit hohen Treibhausgasemissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts weiter zunehmen (*hohes Vertrauen*). Starke Verringerungen der Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahrzehnten werden laut Projektionen weitere Veränderungen nach 2050 reduzieren (*hohes Vertrauen*). {2.2, 2.3, Cross-Chapter Box 6 in Kapitel 2, 3.3, 3.4, Abbildung SPM.1, SPM Box SPM.1}
- B.1.1  Projizierte Gletschermassenrückgänge zwischen 2015 und 2100 (Eisschilde ausgenommen) liegen zwischen  $18 \pm 7\%$  (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP2.6 und  $36 \pm 11\%$  (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP8.5, was einem Meeresspiegelbeitrag von  $94 \pm 25$  mm (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP2.6 und  $200 \pm 44$  mm (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP8.5 entspricht (*mittleres Vertrauen*). Regionen mit meist kleineren Gletschern (zum Beispiel Mitteleuropa, Kaukasus, Nordasien, Skandinavien, tropische Anden, Mexiko, Ostafrika und Indonesien) werden laut Projektionen unter RCP8.5 bis 2100 mehr als 80% ihrer derzeitigen Eismasse verlieren (*mittleres Vertrauen*), und viele Gletscher werden laut Projektionen ungeachtet zukünftiger Emissionen verschwinden (*sehr hohes Vertrauen*). {Cross-Chapter Box 6 in Kapitel 2, Abbildung SPM.1}

<sup>25</sup> Dieser Bericht verwendet aus folgenden Gründen hauptsächlich RCP2.6 und RCP8.5: Diese Pfade stellen weitgehend den bewerteten Bereich für die in diesem Bericht behandelten Themen dar; sie stellen weitgehend dar, was in der bewerteten Literatur, basierend auf CMIP5, behandelt wird, und sie ermöglichen eine konsistente Darstellung der projizierten Veränderungen. RCP4.5 und RCP6.0 sind nicht für alle im Bericht behandelten Themen verfügbar.

- B.1.2  Im Jahr 2100 beträgt der projizierte Beitrag des grönländischen Eisschildes zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg 0,07 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,04–0,12 m) unter RCP2.6 und 0,15 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,08–0,27 m) unter RCP8.5. Im Jahr 2100 wird der antarktische Eisschild laut Projektionen 0,04 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,01–0,11 m) unter RCP2.6 und 0,12 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,03–0,28 m) unter RCP8.5 beitragen. Der Grönländische Eisschild trägt derzeit stärker zum Meeresspiegelanstieg bei als der Antarktische Eisschild (*hohes Vertrauen*), aber die Antarktis könnte bis Ende des 21. Jahrhunderts als Folge eines schnellen Rückzugs (*geringes Vertrauen*) einen größeren Beitrag leisten. Über 2100 hinaus hat der zunehmende Unterschied zwischen den relativen Beiträgen von Grönland und Antarktis zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg unter RCP8.5 erhebliche Auswirkungen auf das Tempo des relativen *Meeresspiegelanstiegs* auf der Nordhalbkugel. {3.3.1, 4.2.3, 4.2.5, 4.3.3, Cross-Chapter Box 8 in Kapitel 3, Abbildung SPM.1}
- B.1.3  Die Schneebedeckung in der Arktis im Herbst und im Frühjahr wird laut Projektionen in der nahen Zukunft (2031–2050) um 5–10% gegenüber 1986–2005 abnehmen, gefolgt von keinen weiteren Verlusten unter RCP2.6, aber einem zusätzlichen Verlust von 15–25% bis Ende des Jahrhunderts unter RCP8.5 (*hohes Vertrauen*). In Hochgebirgen betragen projizierte Rückgänge der mittleren Winterschneehöhe in niedrigen Lagen bis 2031–2050 wahrscheinlich 10–40% gegenüber 1986–2005, unabhängig vom Emissionsszenario (*hohes Vertrauen*). Für 2081–2100 beträgt dieser projizierte Rückgang wahrscheinlich 10–40% unter RCP2.6 und 50–90% unter RCP8.5. {2.2.2, 3.3.2, 3.4.2, Abbildung SPM.1}
- B.1.4  Für dieses Jahrhundert (*sehr hohes Vertrauen*) und darüber hinaus wird ein weit verbreitetes Tauen von Permafrost prognostiziert. Bis 2100 zeigt die projizierte oberflächennahe (innerhalb von 3–4 m) Permafrostfläche einen Rückgang von  $24 \pm 16\%$  (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP2.6 und  $69 \pm 20\%$  (*wahrscheinliche* Bandbreite) unter RCP8.5. Das RCP8.5-Szenario führt bis 2100 zu einer kumulativen Freisetzung von mehreren zehn bis hunderten Milliarden Tonnen (GtC) Permafrostkohlenstoff als CO<sub>2</sub><sup>26</sup> und Methan in die Atmosphäre, was den Klimawandel verschärfen kann (*mittleres Vertrauen*). Niedrigere Emissionsszenarien dämpfen die Reaktion von Kohlenstoffemissionen aus der Permafrostregion (*hohes Vertrauen*). Methan stellt einen kleinen Anteil der gesamten zusätzlichen Kohlenstofffreisetzung dar, ist aber aufgrund seines höheren Erwärmungspotenzials von Bedeutung. Laut Projektionen wird erhöhtes Pflanzenwachstum den Bodenkohlenstoff teilweise wieder aufstocken, aber langfristig nicht gleich den Kohlenstofffreisetzungen sein (*mittleres Vertrauen*). {2.2.4, 3.4.2, 3.4.3, Abbildung SPM.1, Cross-Chapter Box 5 in Kapitel 1}
- B.1.5  In vielen Hochgebirgen werden Gletscherrückgang und das Tauen von Permafrost die Stabilität von Hängen weiter verringern, und die Anzahl und Fläche von Gletscherseen wird weiter zunehmen (*hohes Vertrauen*). Überschwemmungen durch Gletscherseeausbrüche oder Regen, der auf Schnee fällt, Erdbeben und Schneelawinen, werden laut Projektionen auch an neuen Standorten oder zu anderen Jahreszeiten auftreten (*hohes Vertrauen*). {2.3.2}
- B.1.6  Flussabflüsse in schneegeprägten oder von Gletschern gespeisten Hochgebirgsbecken werden sich laut Projektionen unabhängig vom Emissionsszenario ändern (*sehr hohe Wahrscheinlichkeit*), wobei der durchschnittliche Winterabfluss zunehmen (*hohe Wahrscheinlichkeit*) und Frühjahrsspitzen früher auftreten werden (*sehr hohe Wahrscheinlichkeit*). In allen Emissionsszenarien wird projiziert, dass die durchschnittlichen Jahres- und Sommerabflüsse aus Gletschern am oder vor dem Ende des 21. Jahrhunderts ihren Höhepunkt erreichen (*hohes Vertrauen*), zum Beispiel um die Mitte des Jahrhunderts in den Hochgebirgen Asiens, gefolgt von einem Rückgang des Gletscherabflusses. In Regionen mit geringer Gletscherbedeckung (zum Beispiel tropische Anden, Europäische Alpen) haben die meisten Gletscher diesen Höhepunkt bereits überschritten (*hohes Vertrauen*). Projizierte Rückgänge des Gletscherabflusses bis 2100 (RCP8.5) können den Beckenabfluss mehrerer großer Flussbecken in mindestens einem Monat der Schmelzaison um 10% oder mehr reduzieren, insbesondere in den Hochgebirgen Asiens während der Trockenzeit (*geringes Vertrauen*). {2.3.1}
- B.1.7  Der arktische Meereisverlust wird sich laut Projektionen bis nach Mitte des Jahrhunderts fortsetzen, wobei danach Unterschiede abhängig vom Ausmaß der globalen Erwärmung bestehen: Bei einer stabilisierten globalen Erwärmung von 1,5 °C beträgt die jährliche Wahrscheinlichkeit eines meereisfreien Septembers spätestens Ende des Jahrhunderts etwa 1%, was bei einer stabilisierten globalen Erwärmung von 2 °C auf 10–35% ansteigt (*hohes Vertrauen*). Es besteht *geringes Vertrauen* in Projektionen für das antarktische Meereis. {3.2.2, Abbildung SPM.1}

<sup>26</sup> Zur Einordnung: Die gesamten jährlichen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen über den Zeitraum 2008–2017 im Durchschnitt  $10,8 \pm 0,8$  GtC pro Jahr ( $39,6 \pm 2,9$  Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr). Die gesamten jährlichen anthropogenen Methanemissionen betragen im Zeitraum 2003–2012 durchschnittlich  $0,35 \pm 0,01$  Gt CH<sub>4</sub> pro Jahr. {5.5.1}

- B.2** Laut Projektionen wird der Ozean im Laufe des 21. Jahrhunderts einen Übergang zu noch nie dagewesenen Bedingungen vollziehen, mit erhöhten Temperaturen (*praktisch sicher*), stärkerer Schichtung im oberen Ozean (*sehr wahrscheinlich*), weiterer Versauerung (*praktisch sicher*), Sauerstoffrückgang (*mittleres Vertrauen*) sowie veränderter Nettoprimärproduktion (*geringes Vertrauen*). Marine Hitzewellen (*sehr hohes Vertrauen*) und extreme El Niño- und La Niña-Ereignisse (*mittleres Vertrauen*) werden laut Projektionen häufiger werden. Die Atlantische Meridionale Umwälzbewegung (*Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC*) wird sich laut Projektionen abschwächen (*sehr wahrscheinlich*). Die Geschwindigkeiten und Größenordnungen dieser Veränderungen werden unter Szenarien mit geringen Treibhausgasemissionen kleiner sein (*sehr wahrscheinlich*). {3.2, 5.2, 6.4, 6.5, 6.7, Box 5.1, Abbildungen SPM.1, SPM.3}
- B.2.1**  Der Ozean wird sich im Laufe des gesamten 21. Jahrhunderts weiter erwärmen (*praktisch sicher*). Bis spätestens zum Jahr 2100 werden die oberen 2 000 m des Ozeans laut Projektionen 5–7 mal mehr Wärme unter RCP8.5 (oder 2–4 mal mehr unter RCP2.6) aufnehmen als die beobachtete kumulierte Wärmeaufnahme durch den Ozean seit 1970 (*sehr wahrscheinlich*). Die jährliche mittlere Dichteschichtung<sup>14</sup> der oberen 200 m, gemittelt zwischen 60 °S und 60 °N, wird für 2081–2100 gegenüber 1986–2005 laut Projektionen um 12–30% unter RCP8.5 und um 1–9% unter RCP2.6 zunehmen (*sehr wahrscheinlich*), wodurch vertikale Nährstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoffflüsse gehemmt werden. {5.2.2, Abbildung SPM.1}
- B.2.2**  Unter RCP8.5 wird projiziert, dass bis spätestens 2081–2100 der Sauerstoffgehalt im Ozean (*mittleres Vertrauen*), der Gehalt an Nitrat im oberen Ozean (*mittleres Vertrauen*), die Nettoprimärproduktion (*geringes Vertrauen*) und der Kohlenstoffexport (*mittleres Vertrauen*) weltweit um *sehr wahrscheinlich* 3–4%, 9–14%, 4–11% bzw. 9–16% gegenüber 2006–2015 sinken werden. Unter RCP2.6 sind die global projizierten Veränderungen in Bezug auf Sauerstoffverlust (*sehr wahrscheinlich*), Nährstoffverfügbarkeit (*etwa ebenso wahrscheinlich wie nicht*) und Nettoprimärproduktion (*hohes Vertrauen*) bis 2081–2100 geringer als unter RCP8.5. {5.2.2, Box 5.1, Abbildungen SPM.1, SPM.3}
- B.2.3**  Die anhaltende Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean bis 2100 wird die Ozeanversauerung *praktisch sicher* verschärfen. Der pH-Wert der offenen Meeresoberfläche wird unter RCP8.5 laut Projektionen bis 2081–2100 um etwa 0,3 pH-Einheiten gegenüber 2006 sinken (*praktisch sicher*). Unter RCP8.5 bestehen erhöhte Risiken für aragonitschalenbildende Schlüsselarten, da im Polar- und Subpolarmeer bis 2081–2100 ein Aragonit-Stabilitätsschwellenwert ganzjährig überschritten wird (*sehr wahrscheinlich*). Unter RCP2.6 werden diese Bedingungen in diesem Jahrhundert (*sehr wahrscheinlich*) vermieden, aber einige Auftriebssysteme vor Westküsten werden laut Projektionen weiterhin verwundbar bleiben (*hohes Vertrauen*). {3.2.3, 5.2.2, Box 5.1, Box 5.3, Abbildung SPM.1}
- B.2.4**  Klimabedingungen, wie sie seit der vorindustriellen Zeit noch nicht vorgekommen sind, entwickeln sich im Ozean und erhöhen Risiken für Ökosysteme im offenen Ozean. Oberflächenversauerung und -erwärmung sind im historischen Zeitraum bereits aufgetreten (*sehr wahrscheinlich*). Laut Projektionen wird unter RCP8.5 bis 2031–2050 in 59–80% der Meeresfläche Sauerstoffverlust in Tiefen zwischen 100 und 600 m auftreten (*sehr wahrscheinlich*). Die projizierten Zeitpunkte des Hervortretens\* fünf primärer Treiber mariner Ökosystemänderungen (Oberflächenerwärmung und Versauerung, Sauerstoffverlust, Nitratgehalt und Nettoprimärproduktionsänderung) liegen für über 60% der Meeresfläche unter RCP8.5 und für über 30% unter RCP2.6 vor dem Jahr 2100 (*sehr wahrscheinlich*). {Anhang I: Glossar, Box 5.1, Box 5.1 Abbildung 1}
- B.2.5**  Marine Hitzewellen werden laut Projektionen weiter an Häufigkeit, Dauer, räumlicher Ausdehnung und Intensität (Maximaltemperatur) zunehmen (*sehr hohes Vertrauen*). Klimamodelle projizieren bis 2081–2100 einen Anstieg der Häufigkeit mariner Hitzewellen um das etwa 50-fache unter RCP8.5 und um das 20-fache unter RCP2.6 gegenüber 1850–1900 (*mittleres Vertrauen*). Die größten Häufigkeitszunahmen werden für die Arktis und die tropischen Ozeane projiziert (*mittleres Vertrauen*). Die Intensität mariner Hitzewellen wird unter RCP8.5 bis 2081–2100 voraussichtlich um das Zehnfache gegenüber 1850–1900 zunehmen (*mittleres Vertrauen*). {6.4, Abbildung SPM.1}

\* Zeitpunkt, zu dem für ein spezifisches anthropogenes Signal im Zusammenhang mit dem Klimawandel statistisch erfasst wird, dass es aus dem Hintergrundrauschen der natürlichen Klimavariabilität in einem Referenzzeitraum für eine bestimmte Region hervortritt (Hawkins und Sutton, 2012). {Glossar}

- B.2.6  Extreme El Niño- und La Niña-Ereignisse werden laut Projektionen im 21. Jahrhundert *wahrscheinlich* häufiger auftreten und *wahrscheinlich* bestehende Gefahren verstärken, was in mehreren Regionen auf der ganzen Welt zu trockeneren oder feuchteren Bedingungen führt. Extreme El Niño-Ereignisse werden laut Projektionen im 21. Jahrhundert sowohl unter RCP2.6 als auch unter RCP8.5 etwa doppelt so häufig auftreten wie im 20. Jahrhundert (*mittleres Vertrauen*). Projektionen deuten darauf hin, dass extreme Ausprägungen des Indischen-Ozean-Dipols ebenfalls an Häufigkeit zunehmen (*geringes Vertrauen*). {6.5, Abbildungen 6.5, 6.6}
- B.2.7  Es wird erwartet, dass sich die AMOC im 21. Jahrhundert unter allen RCPs abschwächen wird (*sehr wahrscheinlich*), obwohl ein Zusammenbruch *sehr unwahrscheinlich* ist (*mittleres Vertrauen*). Basierend auf CMIP5-Prognosen ist bis 2300 ein AMOC-Kollaps unter Szenarien mit hohen Emissionen *etwa ebenso wahrscheinlich wie nicht* und unter niedrigen *sehr unwahrscheinlich* (*mittleres Vertrauen*). Jegliche erhebliche Schwächung der AMOC wird laut Projektionen zu einem Rückgang der Meeresproduktivität im Nordatlantik (*mittleres Vertrauen*), mehr Stürmen in Nordeuropa (*mittleres Vertrauen*), weniger Sommerregen im Sahel (*hohes Vertrauen*) und in Südasien (*mittleres Vertrauen*), einer geringeren Anzahl tropischer Wirbelstürme im Atlantik (*mittleres Vertrauen*) und einem Anstieg des regionalen Meeresspiegels an der nordöstlichen Küste Nordamerikas (*mittleres Vertrauen*) führen. Solche Änderungen würden zusätzlich zum Signal der globalen Erwärmung auftreten. {6.7, Abbildungen 6.8–6.10}
- B.3 Der Meeresspiegel steigt weiter mit zunehmender Geschwindigkeit. Extremwasserstände, die historisch selten sind (einmal pro Jahrhundert in der jüngeren Vergangenheit), werden laut Projektionen bis 2050 in allen RCP-Szenarien an vielen Orten häufig (mindestens einmal pro Jahr) auftreten, insbesondere in tropischen Regionen (*hohes Vertrauen*). Die zunehmende Häufigkeit von Hochwasserständen kann je nach Exposition an vielen Orten schwerwiegende Folgen haben (*hohes Vertrauen*). Der Meeresspiegelanstieg wird sich laut Projektionen in allen RCP-Szenarien über das Jahr 2100 hinaus fortsetzen. Für ein Szenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) sind die Projektionen für den globalen Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 höher als in AR5, was auf einen verstärkten Beitrag des antarktischen Eisschildes zurückzuführen ist (*mittleres Vertrauen*). Unter den Bedingungen von RCP8.5 wird projiziert, dass der Meeresspiegelanstieg in den kommenden Jahrhunderten Geschwindigkeiten von mehreren Zentimetern pro Jahr überschreiten wird, was zu einem Anstieg von mehreren Metern führt (*mittleres Vertrauen*), während in RCP2.6 der Meeresspiegelanstieg laut Projektionen auf etwa 1 Meter im Jahr 2300 begrenzt ist (*geringes Vertrauen*). Extremwasserstände und küstenbezogene Gefährdungen werden durch einen prognostizierten Anstieg der Intensität und der Niederschläge tropischer Wirbelstürme verschärft (*hohes Vertrauen*). Projizierte Veränderungen von Wellen und Gezeiten variieren lokal dahingehend, ob sie diese Gefahren verstärken oder mildern (*mittleres Vertrauen*). {Cross-Chapter Box 5 in Kapitel 1, Cross-Chapter Box 8 in Kapitel 3, 4.1, 4.2, 5.2.2, 6.3.1, Abbildungen SPM.1, SPM.4, SPM.5}**
- B.3.1  Der Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels unter RCP2.6 gegenüber 1986–2005 wird für den Zeitraum 2081–2100 mit 0,39 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,26–0,53 m) und für 2100 mit 0,43 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,29–0,59 m) projiziert. Unter RCP8.5 beträgt der entsprechende mittlere globale Meeresspiegelanstieg 0,71 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,51–0,92 m) für 2081–2100 und 0,84 m (*wahrscheinliche* Bandbreite 0,61–1,10 m) im Jahr 2100. Die Projektionen für den Anstieg des mittleren Meeresspiegels unter RCP8.5 im Jahr 2100 sind um 0,1 m höher als im AR5, und die *wahrscheinliche* Bandbreite reicht über 1 m im Jahr 2100 hinaus, da der projizierte Eisverlust des antarktischen Eisschildes größer ist (*mittleres Vertrauen*). Die Unsicherheit zum Ende des Jahrhunderts wird hauptsächlich durch die Eisschilde bestimmt, insbesondere in der Antarktis. {4.2.3, Abbildungen SPM.1, SPM.5}
- B.3.2  Meeresspiegelprojektionen zeigen regionale Unterschiede zum mittleren globalen Meeresspiegel. Prozesse, die nicht durch den jüngsten Klimawandel angetrieben werden, wie z. B. lokale Absenkung aufgrund natürlicher Prozesse und menschlicher Aktivitäten, sind wichtig für relative Meeresspiegeländerungen an der Küste (*hohes Vertrauen*). Während die relative Bedeutung des klimabedingten Meeresspiegelanstiegs laut Projektionen mit der Zeit zunehmen wird, müssen lokale Prozesse bei Projektionen und hinsichtlich der Folgen des Meeresspiegels berücksichtigt werden (*hohes Vertrauen*). {SPM A.3.4, 4.2.1, 4.2.2, Abbildung SPM.5}

- B.3.3  Die Geschwindigkeit des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs wird laut Projektionen unter RCP8.5 im Jahr 2100 15 mm pro Jahr erreichen (*wahrscheinliche* Bandbreite 10–20 mm pro Jahr) und im 22. Jahrhundert mehrere Zentimeter pro Jahr übertreffen. Unter RCP2.6 wird die Geschwindigkeit laut Projektionen im Jahr 2100 4 mm pro Jahr erreichen (*wahrscheinliche* Bandbreite 2–6 mm pro Jahr). Modellstudien zeigen einen Anstieg des Meeresspiegels um mehrere Meter bis zum Jahr 2300 (2,3–5,4 m unter RCP8.5 und 0,6–1,07 m unter RCP2.6) (*geringes Vertrauen*), was die Bedeutung reduzierter Emissionen für die Begrenzung des Meeresspiegelanstiegs aufzeigt. Prozesse, die den Zeitpunkt zukünftigen Schelfeisverlustes und das Ausmaß von Eisschildinstabilitäten steuern, könnten den antarktischen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg auf Werte erhöhen, die wesentlich höher sind als die *wahrscheinliche* Bandbreite über Zeitskalen von Jahrhunderten oder länger (*geringes Vertrauen*). Angesichts der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs, die ein Zusammenbruch von Teilen des antarktischen Eisschildes mit sich bringt, verdient dieses mit großen Folgen verbundene Risiko Aufmerksamkeit. {Cross-Chapter Box 5 in Kapitel 1, Cross-Chapter Box 8 in Kapitel 3, 4.1, 4.2.3}
- B.3.4  Der mittlere globale Meeresspiegelanstieg wird dazu führen, dass die Häufigkeit extremer Meeresspiegelergebnisse an den meisten Standorten steigt. Lokale Meeresspiegel, die historisch einmal pro Jahrhundert auftraten (historische Jahrhundertereignisse), werden laut Projektionen unter allen RCP-Szenarien bis 2100 an den meisten Standorten mindestens einmal jährlich auftreten (*hohes Vertrauen*). Viele niedrig gelegene Megastädte und kleine Inseln (einschließlich Kleiner Inselentwicklungsländer) werden laut Projektionen bis 2050 unter RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 mindestens einmal jährlich historischen Jahrhundertereignissen ausgesetzt sein. Das Jahr, in dem das historische Jahrhundertereignis zu einem jährlichen Ereignis wird, tritt in den mittleren Breitengraden am frühesten in RCP8.5, als nächstes in RCP4.5 und zuletzt in RCP2.6 auf. Die zunehmende Häufigkeit von Hochwasserständen kann abhängig vom Expositionsgrad an vielen Standorten schwere Folgen haben (*hohes Vertrauen*). {4.2.3, 6.3, Abbildungen SPM.4, SPM.5}
- B.3.5  Signifikante Wellenhöhen (der durchschnittliche vertikale Abstand zwischen Wellental und Wellenkamm des höchsten Drittels aller Wellen) werden laut Projektionen unter RCP8.5 im gesamten Südlichen Ozean und im tropischen Ostpazifik (*hohes Vertrauen*) sowie in der Ostsee (*mittleres Vertrauen*) ansteigen und im Nordatlantik und im Mittelmeer abnehmen (*hohes Vertrauen*). Laut Projektionen werden sich Amplituden und räumliche Verteilung der Gezeiten an der Küste aufgrund des Meeresspiegelanstiegs und aufgrund von Küstenanpassungsmaßnahmen ändern (*sehr wahrscheinlich*). Projizierte Änderungen von Wellen, die sich aus Veränderungen des Wettergeschehens ergeben, und Änderungen der Gezeiten aufgrund des Meeresspiegelanstiegs können Gefahren an der Küste lokal verstärken oder mildern (*mittleres Vertrauen*). {6.3.1, 5.2.2}
- B.3.6  Die durchschnittliche Intensität tropischer Wirbelstürme, der Anteil tropischer Wirbelstürme der Kategorien 4 und 5 und die damit verbundenen durchschnittlichen Niederschlagsraten werden laut Projektionen bei einem Anstieg der globalen Temperatur um 2 °C gegenüber einem beliebigen Basiszeitraum zunehmen (*mittleres Vertrauen*). Steigende mittlere Meeresspiegel werden zu höheren extremen Meeresspiegeln im Zusammenhang mit tropischen Wirbelstürmen beitragen (*sehr hohes Vertrauen*). Gefahren an der Küste werden durch eine Zunahme der durchschnittlichen Intensität, des Ausmaßes der Sturmflut und der Niederschlagsraten tropischer Wirbelstürme verschärft werden. Ab etwa Mitte des Jahrhunderts bis 2100 werden unter RCP8.5 größere Steigerungen als unter RCP2.6 projiziert (*mittleres Vertrauen*). Es besteht *geringes Vertrauen* in Veränderungen der zukünftigen Häufigkeit tropischer Wirbelstürme auf globaler Ebene. {6.3.1}

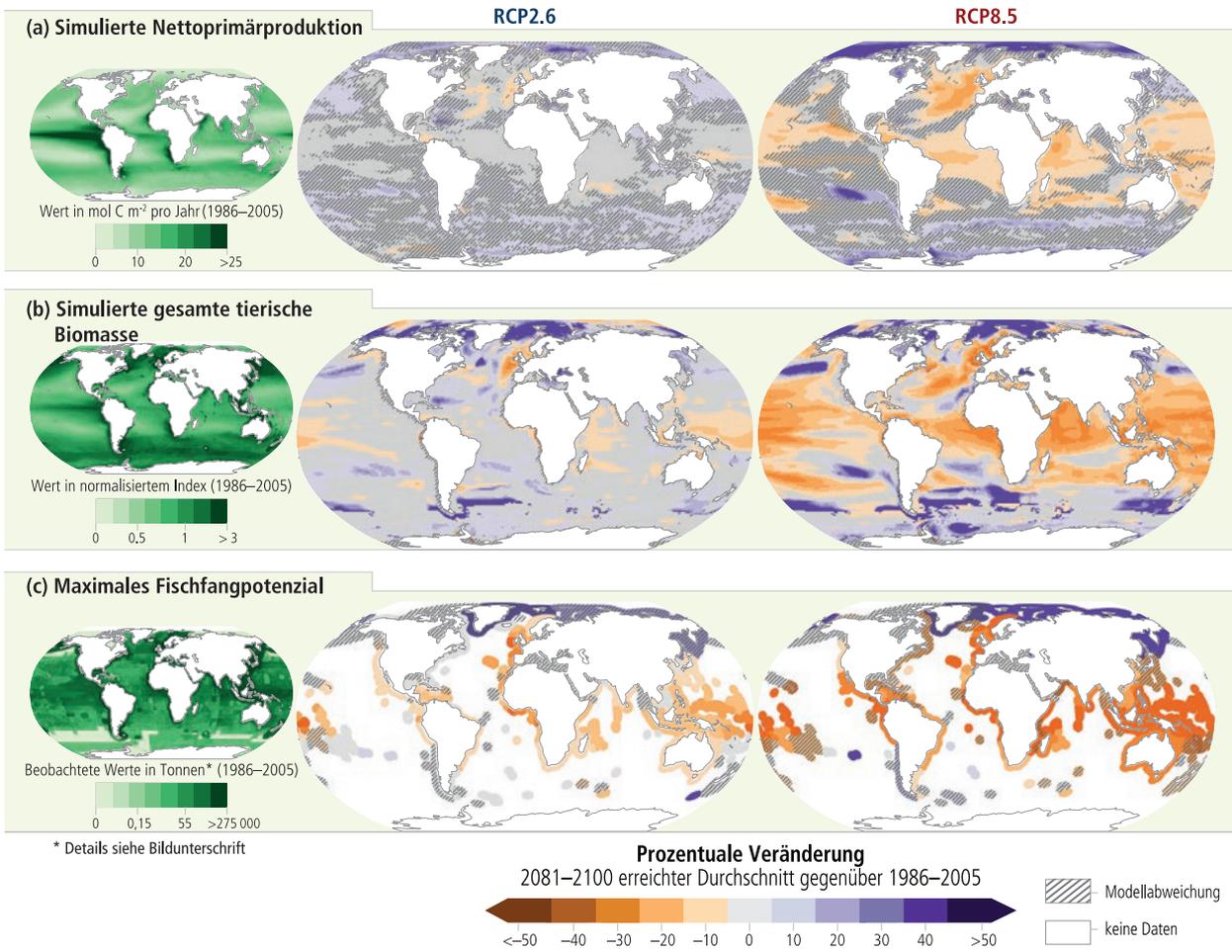
## Projizierte Risiken für Ökosysteme

- B.4** Zukünftige Veränderungen der Kryosphäre an Land werden weiterhin Land- und Süßwasserökosysteme in Hochgebirgen und Polargebieten verändern, wobei sich die Verbreitungsgebiete von Arten stark verlagern, was zu Veränderungen der Struktur und Funktionsweise von Ökosystemen und schließlich zum Verlust weltweit einzigartiger biologischer Vielfalt führt (*mittleres Vertrauen*). Wald- und Flächenbrände werden laut Projektionen für den Rest dieses Jahrhunderts in den meisten Tundragebieten und borealen Regionen sowie in manchen Gebirgsregionen deutlich zunehmen (*mittleres Vertrauen*). {2.3.3, Box 3.4, 3.4.3}
- B.4.1**  In Hochgebirgen werden eine weitere Aufwärtswanderung von Arten aus niedrigeren Höhen, Verkleinerungen von Verbreitungsgebieten und eine erhöhte Sterblichkeit zu einem Populationsrückgang vieler alpiner Arten führen, insbesondere von gletscher- oder schneeabhängigen Arten (*hohes Vertrauen*), was lokalen und letztendlichen globalen Artenverlust mit sich bringt (*mittleres Vertrauen*). Das Fortbestehen alpiner Arten und die Erhaltung von Ökosystemleistungen hängen von geeigneten Schutz- und Anpassungsmaßnahmen ab (*hohes Vertrauen*). {2.3.3}
- B.4.2**  Auf arktischen Landflächen wird ein Verlust an weltweit einzigartiger Biodiversität projiziert, da für manche Arten der Hocharktis begrenzte Rückzugsmöglichkeiten existieren und sie daher von Arten aus gemäßigteren Breiten verdrängt werden (*mittleres Vertrauen*). Laut Projektionen werden sich Sträucher und Bäume ausdehnen, so dass sie bis zum Jahr 2050 24–52% der arktischen Tundra bedecken (*mittleres Vertrauen*). Laut Projektionen wird sich der boreale Wald an seinem nördlichen Rand ausdehnen, während er an seinem südlichen Rand abnimmt, wo er durch Wälder/Buschland mit geringerer Biomasse ersetzt wird (*mittleres Vertrauen*). {3.4.3, Box 3.4}
- B.4.3**  Das Tauen von Permafrost und Schneerückgänge werden sich auf die Hydrologie sowie auf Wald- und Flächenbrände der Arktis und von Gebirgen auswirken, was Folgen für Vegetation und Wildtiere hat (*mittleres Vertrauen*). Etwa 20% des arktischen Landpermafrostes sind anfällig für abruptes Permafrosttauen und Bodenabsenkung, was die Fläche kleiner Seen laut Projektionen unter RCP8.5 bis 2100 um über 50% ansteigen lässt (*mittleres Vertrauen*). Auch wenn sich laut Projektionen der gesamte regionale Wasserkreislauf intensivieren wird, einschließlich erhöhter Niederschläge, Evapotranspiration und Flussabfluss in den Arktischen Ozean, können Schnee- und Permafrostrückgänge zu einer Austrocknung des Bodens führen, was Auswirkungen auf die Ökosystemproduktivität und auf Störungen hat (*mittleres Vertrauen*). Laut Projektionen werden Wald- und Flächenbrände für den Rest dieses Jahrhunderts in den meisten Tundragebieten und borealen Regionen sowie auch in manchen Gebirgsregionen zunehmen, während die Wechselwirkungen zwischen Klima und sich verlagernder Vegetation die zukünftige Feuerintensität und -häufigkeit beeinflussen werden (*mittleres Vertrauen*). {2.3.3, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, SPM B.1}

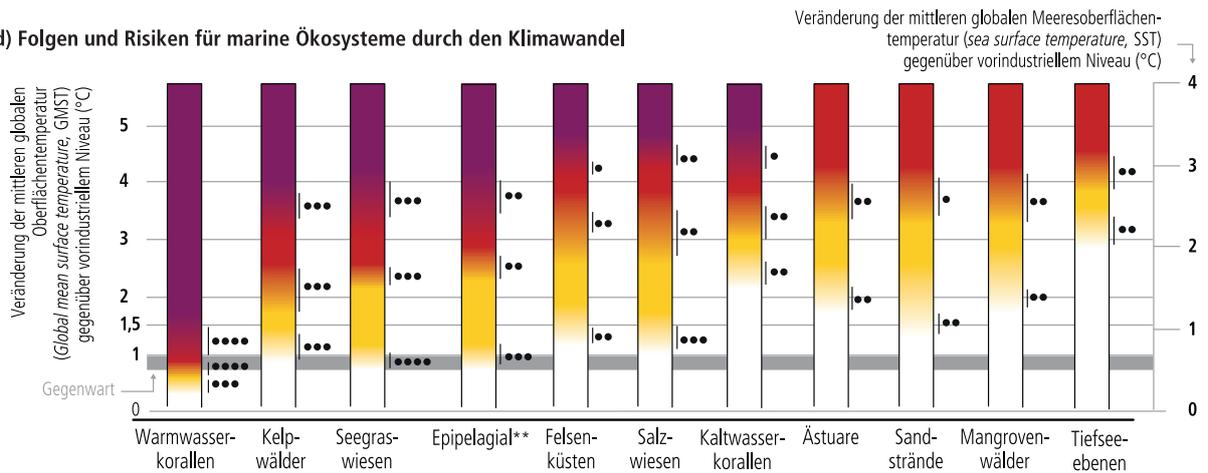
- B.5** Für Ökosysteme der Ozeane von der Oberfläche bis zum Tiefseeboden wird unter allen Emissionsszenarien im Laufe des 21. Jahrhunderts ein Rückgang der globalen Biomasse mariner Tiergemeinschaften, ihrer Produktion und ihres Fangpotenzials sowie eine Verschiebung der Artenzusammensetzung projiziert (*mittleres Vertrauen*). Die Geschwindigkeit und das Ausmaß des Rückgangs werden laut Projektionen in den Tropen am höchsten sein (*hohes Vertrauen*), wohingegen die Folgen in den Polarregionen vielfältig bleiben (*mittleres Vertrauen*) und unter hohen Emissionsszenarien zunehmen. Ozeanversauerung (*mittleres Vertrauen*), Sauerstoffverlust (*mittleres Vertrauen*) und geringere Meereisausdehnung (*mittleres Vertrauen*) sowie nichtklimatische menschliche Aktivitäten (*mittleres Vertrauen*) haben das Potenzial, diese durch Erwärmung hervorgerufenen Ökosystemfolgen zu verschärfen. {3.2.3, 3.3.3, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, 5.4.1, Abbildung SPM.3}
- B.5.1**  Die projizierte Erwärmung der Meere und Veränderungen der Nettoprimärproduktion verändern Biomasse, Produktion und Gemeinschaftsstruktur von marinen Ökosystemen. Die globale Biomasse von Meerestieren im gesamten Nahrungsnetz wird laut Projektionen unter RCP8.5 bis Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber 1986–2005 um  $15,0 \pm 5,9\%$  (*sehr wahrscheinliche* Bandbreite) und das maximale Fangpotenzial der Fischerei um 20,5–24,1% sinken (*mittleres Vertrauen*). Diese Änderungen werden laut Projektionen unter RCP8.5 *sehr wahrscheinlich* drei- bis viermal größer sein als unter RCP2.6. {3.2.3, 3.3.3, 5.2.2, 5.2.3, 5.4.1, Abbildung SPM.3}
- B.5.2**  Bei verstärkter Schichtung wird die reduzierte Nährstoffversorgung laut Projektionen dazu führen, dass die Nettoprimärproduktion im tropischen Ozean unter RCP8.5 bis 2081–2100 um 7–16% (*sehr wahrscheinliche* Bandbreite) sinkt (*mittleres Vertrauen*). In tropischen Regionen werden Biomasse und Produktion von Meerestieren laut Projektionen im 21. Jahrhundert unter allen Emissionsszenarien stärker als der globale Durchschnitt sinken (*hohes Vertrauen*). Laut Projektionen werden Erwärmung und Meeresänderungen die Nettoprimärproduktion in der Arktis (*mittleres Vertrauen*) und um die Antarktis (*geringes Vertrauen*) erhöhen, abgewandelt durch sich ändernde Nährstoffversorgung aufgrund von Verlagerungen von Auftrieb und Schichtung. Das Absinken organischer Materie aus dem oberen Ozean wird laut Projektionen global abnehmen, was vor allem auf Veränderungen der Nettoprimärproduktion zurückzuführen ist (*hohes Vertrauen*). Infolgedessen werden laut Projektionen unter RCP8.5 mindestens 95% der Meeresbodenfläche der Tiefsee (3 000–6 000 m Tiefe) und Kaltwasserkorallenökosysteme einen Rückgang der benthischen Biomasse erfahren (*mittleres Vertrauen*). {3.2.3, 5.2.2, 5.2.4, Abbildung SPM.1}
- B.5.3**  Erwärmung, Ozeanversauerung, verringerte Ausdehnung einjähriger Meereises und anhaltender Verlust mehrjähriger Meereises werden laut Projektionen polare marine Ökosysteme beeinflussen, durch direkte und indirekte Auswirkungen auf Lebensräume, Populationen und ihre Überlebensfähigkeit (*mittleres Vertrauen*). Das geografische Verbreitungsgebiet arktischer Meeresarten, einschließlich Meeressäuger, Vögel und Fische, wird sich laut Projektionen verkleinern, während sich das Verbreitungsgebiet mancher subarktischer Fischgemeinschaften laut Projektionen ausweiten wird, was den Druck auf Arten der Hocharktis weiter erhöht (*mittleres Vertrauen*). Im Südlichen Ozean wird sich der Lebensraum des antarktischen Krills, einer wichtigen Beutearart für Pinguine, Robben und Wale, laut Projektionen sowohl unter RCP2.6 als auch unter RCP8.5 nach Süden hin verkleinern (*mittleres Vertrauen*). {3.2.2, 3.2.3, 5.2.3}
- B.5.4**  Ozeanerwärmung, Sauerstoffverlust, Versauerung und ein Rückgang des organischen Kohlenstoffflusses von der Oberfläche in die Tiefsee werden laut Projektionen lebensraumbildende Kaltwasserkorallen, die eine hohe Biodiversität unterstützen, teilweise durch verminderte Kalkbildung, erhöhte Skelettauflösung und Bioerosion (*mittleres Vertrauen*) schädigen. Verwundbarkeit und Risiken sind am größten, wo und wenn sowohl Temperatur als auch Sauerstoffbedingungen Werte erreichen, die außerhalb der Toleranzbereiche von Arten liegen (*mittleres Vertrauen*). {Box 5.2, Abbildung SPM.3}

# Projizierte Veränderungen, Folgen und Risiken für Ozeanökosysteme aufgrund des Klimawandels

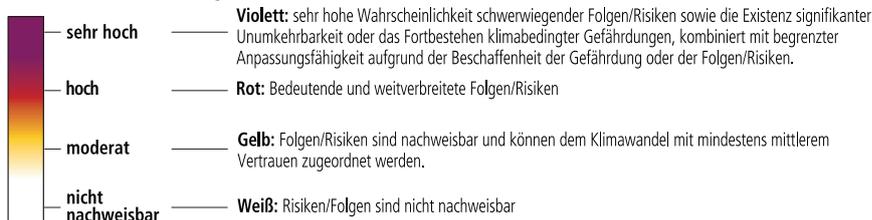
SPM



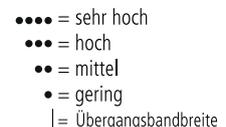
## (d) Folgen und Risiken für marine Ökosysteme durch den Klimawandel



### Niveau der zusätzlichen Folgen/Risiken



### Vertrauensniveau für Übergang



\*\* Definition siehe Bildunterschrift

**Abbildung SPM.3** | Projizierte Änderungen, Folgen und Risiken für Meeresregionen und -ökosysteme: **(a)** über die Tiefe integrierte Nettoprimärproduktion (NPP aus CMIP5<sup>27</sup>), **(b)** gesamte tierische Biomasse (über die Tiefe integriert, einschließlich Fische und Wirbellose aus FISHMIP<sup>28</sup>), **(c)** maximales Fischfangpotenzial und **(d)** Folgen und Risiken für Ökosysteme an der Küste und im offenen Meer. Die drei linken Tafeln stellen die simulierten (a, b) und beobachteten (c) Mittelwerte für die jüngste Vergangenheit (1986–2005) dar, die mittleren und rechten Tafeln stellen projizierte Änderungen (%) bis 2081–2100 gegenüber der jüngsten Vergangenheit unter niedrigen (RCP2.6) bzw. hohen (RCP8.5) Treibhausgasemissionsszenarien dar [Box SPM.1]. Die gesamte tierische Biomasse in der jüngsten Vergangenheit (b, linke Tafel) stellt die projizierte gesamte tierische Biomasse für jedes räumliche Pixel gegenüber dem globalen Durchschnitt dar. (c) \*Durchschnittliche beobachtete Fischfangmengen in der jüngsten Vergangenheit (basierend auf Daten aus der globalen Fischereidatenbank *Sea Around Us*); projizierte Änderungen des maximalen Fangpotenzials in Schelfmeeren basieren auf den durchschnittlichen Ergebnissen aus zwei Fischerei- und marinen Ökosystemmodellen. Um Bereiche mit Modellinkonsistenz anzuzeigen, stellen schraffierte Bereiche Regionen dar, in denen die Modelle bezüglich der Änderungsrichtung uneins sind: in (a) und (b) bei mehr als 3 von 10 Modellprojektionen und in (c) bei mehr als einem von zwei Modellen. Obwohl nicht schraffiert, besteht in die projizierten Änderungen in den arktischen und antarktischen Regionen bezüglich (b) der gesamten tierischen Biomasse und (c) dem Fangpotenzial *niedriges Vertrauen* aufgrund von Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Modellierung vielfacher interagierender Treiber und Ökosystemreaktionen. Die unter (b) und (c) dargestellten Projektionen werden durch Änderungen der physikalischen und biogeochemischen Bedingungen des Ozeans angetrieben, z. B. Temperatur, Sauerstoffgehalt und Nettoprimärproduktion, die aus CMIP5-Erdsystemmodellen berechnet werden. \*\*Epipelagial bezieht sich auf den obersten Teil des Ozeans mit einer Tiefe von <200 m unter der Oberfläche, wo genügend Sonnenlicht für Photosynthese vorhanden ist. (d) Bewertung der Risiken für Ökosysteme an der Küste und im offenen Meer aus Grundlage von beobachteten und projizierten Klimafolgen für Struktur, Funktion und Biodiversität des Ökosystems. Folgen und Risiken sind in Bezug auf Änderungen der mittleren globalen Oberflächentemperatur (*Global Mean Surface Temperature*, GMST) gegenüber vorindustriellem Niveau dargestellt. Da die Bewertung von Risiken und Folgen auf der Grundlage der mittleren globalen Meeresoberflächentemperatur (*Sea Surface Temperature*, SST) erfolgt, sind die entsprechenden SST-Werte dargestellt<sup>29</sup>. Die Bewertung von Risikoübergängen wird in Kapitel 5, Abschnitte 5.2, 5.3, 5.3, 5.2.5 und 5.3.7 sowie den Zusatzmaterialien SM5.3, Tabelle SM5.6, Tabelle SM5.8 und anderen Teilen des zugrundeliegenden Berichts beschrieben. Die Abbildung zeigt bewertete Risiken bei ungefähren Erwärmungswerten und zunehmende klimabedingten Gefahren im Ozean: Ozeanerwärmung, Versauerung, Sauerstoffentzug, verstärkte Dichtenschichtung, Änderungen der Kohlenstoffflüsse, Meeresspiegelanstieg sowie erhöhte Häufigkeit und/oder Intensität von Extremereignissen. Die Bewertung berücksichtigt die natürliche Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme, ihre Exposition und Verwundbarkeit. Folgen und Risikoniveaus berücksichtigen keine Strategien zur Risikominderung wie menschliche Eingriffe oder zukünftige Änderungen nicht-klimatischer Treiber. Risiken für Ökosysteme wurden unter Berücksichtigung biologischer, biogeochemischer, geomorphologischer und physikalischer Aspekte bewertet. Zu den höheren Risiken, die mit zusammengesetzten Auswirkungen von Klimagefahren verbunden sind, gehören der Verlust von Lebensraum und biologischer Vielfalt, Veränderungen der Artenzusammensetzung und von Verbreitungsgebieten sowie Folgen/Risiken für Struktur und Funktion von Ökosystemen, einschließlich Veränderungen der tierischen/pflanzlichen Biomasse und Dichte, der Produktivität, von Kohlenstoffflüssen und von Sedimenttransport. Im Rahmen der Bewertung wurde Literatur zusammengestellt und es wurden Daten in eine Übersichtstabelle extrahiert. Ein mehrstufiger Expertenbefragungsprozess mit unabhängiger Beurteilung der Einschätzung von Schwellenwerten und einer abschließenden Konsensdiskussion wurde durchgeführt. Weitere Informationen zu Methoden und zugrundeliegender Literatur sind in Kapitel 5, Abschnitte 5.2 und 5.3 und im Zusatzmaterial (*Supplementary Material*) zu finden. {3.2.3, 3.2.4, 5.2, 5.3, 5.2.5, 5.3.7, SM5.6, SM5.8, Abbildung 5.16, Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1 Tabelle CCB1}

<sup>27</sup> NPP werden aus dem Gekoppelten Modellvergleichsproject 5 (*Coupled Models Intercomparison Project 5, CMIP5*) geschätzt.

<sup>28</sup> Die gesamte tierische Biomasse stammt aus dem Modellvergleichsprojekt für Fischerei und Meeresökosysteme (*Fisheries and Marine Ecosystem Models Intercomparison Project, FISHMIP*).

<sup>29</sup> Die Konvertierung zwischen GMST und SST basiert auf einem Skalierungsfaktor von 1,44, der aus Änderungen in einem Ensemble von RCP8.5-Simulationen abgeleitet wird; dieser Skalierungsfaktor weist aufgrund von Unterschieden zwischen den Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 eine Unsicherheit von etwa 4% auf [Tabelle SPM.1].

- B.6** Die Risiken schwerwiegender Folgen für Biodiversität, Struktur und Funktion von Küstenökosystemen werden laut Projektionen im 21. Jahrhundert und darüber hinaus bei erhöhten Temperaturen unter Szenarien mit hohen Emissionen gegenüber solchen mit niedrigen Emissionen höher ausfallen. Zu den projizierten Reaktionen von Ökosystemen gehören der Verlust von Lebensraum und Artenvielfalt sowie die Schädigung von Ökosystemfunktionen. Die Anpassungsfähigkeit von Organismen und Ökosystemen ist bei niedrigeren Emissionsszenarien größer (*hohes Vertrauen*). Für empfindliche Ökosysteme wie Seegraswiesen und Kelpwälder werden hohe Risiken projiziert, wenn die globale Erwärmung 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau überschreitet, kombiniert mit anderen klimabedingten Gefährdungen (*hohes Vertrauen*). Für Warmwasserkorallen besteht schon ein hohes Risiko und es wird ein Übergang zu sehr hohem Risiko projiziert, selbst wenn die globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt wird (*sehr hohes Vertrauen*). {4.3.3, 5.3, 5.5, Abbildung SPM.3}
- B.6.1**  Laut Projektionen werden alle bewerteten Küstenökosysteme bis 2100 einem steigenden Risikoniveau ausgesetzt sein, von mittlerem bis hohem Risiko unter RCP2.6 bis hin zu hohem bis sehr hohem Risiko unter RCP8.5. Ökosysteme an Felsküsten in der Gezeitenzone sind laut Projektionen unter RCP8.5 bis 2100 einem sehr hohen Risiko ausgesetzt (*mittleres Vertrauen*), da sie Erwärmung, insbesondere während mariner Hitzewellen, sowie Versauerung, dem Meeresspiegelanstieg und dem Verlust von kalkbildenden Arten und der biologischen Vielfalt ausgesetzt sind (*hohes Vertrauen*). Ozeanversauerung stellt diese Ökosysteme vor Herausforderungen und schränkt ihre Eignung als Lebensraum weiter ein (*mittleres Vertrauen*), da geringere Kalkbildung und verstärkte Bioerosion eine Erholung behindern. Der Rückgang von Kelpwäldern wird sich laut Projektionen in gemäßigten Regionen aufgrund der Erwärmung fortsetzen, insbesondere unter der projizierten Intensivierung mariner Hitzewellen, wobei unter RCP8.5 ein hohes Risiko lokalen Aussterbens besteht (*mittleres Vertrauen*). {5.3, 5.3.5, 5.3.6, 5.3.7, 6.4.2, Abbildung SPM.3}
- B.6.2**  Seegraswiesen und Salzwiesen und die damit verbundenen Kohlenstoffspeicher sind bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C einem moderaten Risiko ausgesetzt, das mit zunehmender Erwärmung zunimmt (*mittleres Vertrauen*). Weltweit werden laut Projektionen 20–90% der derzeitigen Küstenfeuchtgebiete bis 2100 verloren gehen, je nach projiziertem Meeresspiegelanstieg, regionalen Unterschieden und Feuchtgebietstypen, insbesondere, wenn das vertikale Wachstum bereits durch reduzierte Sedimentzufuhr begrenzt ist und eine Verlagerung landeinwärts durch steile Topografie oder menschliche Veränderungen von Küstenlinien eingeschränkt wird (*hohes Vertrauen*). {4.3.3, 5.3.2, Abbildung SPM.3, SPM A.6.1}
- B.6.3**  Ozeanerwärmung, Meeresspiegelanstieg und Änderungen der Gezeiten werden laut Projektionen zu einer Ausweitung von Versalzung und Sauerstoffmangel in Flussmündungen führen (*hohes Vertrauen*), wobei unter Szenarien mit hohen Emissionen für einige Lebewesen hohe Risiken bestehen, die zu Abwanderung, geringeren Überlebensraten und lokalem Aussterben führen (*mittleres Vertrauen*). Laut Projektionen werden diese Folgen in verwundbareren eutrophen und seichten Flussmündungen mit niedrigem Tidenhub in gemäßigten und hohen Breitengraden stärker ausgeprägt sein (*mittleres Vertrauen*). {5.2.2, 5.3.1, Abbildung SPM.3}
- B.6.4**  Fast alle Warmwasserkorallenriffe werden laut Projektionen erhebliche Flächenverluste erleiden und lokal absterben, selbst wenn die globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt wird (*hohes Vertrauen*). Die Artenzusammensetzung und -vielfalt der verbleibenden Riffgemeinschaften wird sich laut Projektionen von heutigen Riffen unterscheiden (*sehr hohes Vertrauen*). {5.3.4, 5.4.1, Abbildung SPM.3}

## Projizierte Risiken für Menschen und Ökosystemleistungen

- B.7** Zukünftige Veränderungen der Kryosphäre an Land werden sich laut Projektionen auf die Wasserressourcen und deren Nutzung wie Wasserkraft (*hohes Vertrauen*) und bewässerte Landwirtschaft in und flussabwärts von Hochgebirgen (*mittleres Vertrauen*) sowie auf die Lebensgrundlagen in der Arktis (*mittleres Vertrauen*) auswirken. Veränderungen bei Überschwemmungen, Lawinen, Erdbeben und Bodendestabilisierung werden laut Projektionen das Risiko für Infrastruktur sowie Kultur-, Tourismus- und Freizeitgüter erhöhen (*mittleres Vertrauen*). {2.3, 2.3.1, 3.4.3}
- B.7.1**  Es wird erwartet, dass Katastrophenrisiken für menschliche Siedlungen und für mögliche Lebensgrundlagen in Hochgebirgen und der Arktis zunehmen werden (*mittleres Vertrauen*), da sich Gefährdungen wie Überschwemmungen, Brände, Erdbeben, Lawinen, unzuverlässige Eis- und Schneebedingungen und eine erhöhte Exposition von Menschen und Infrastrukturen in Zukunft ändern werden (*hohes Vertrauen*). Laut Projektionen werden bereits entwickelte Ansätze zur Risikominderung weniger

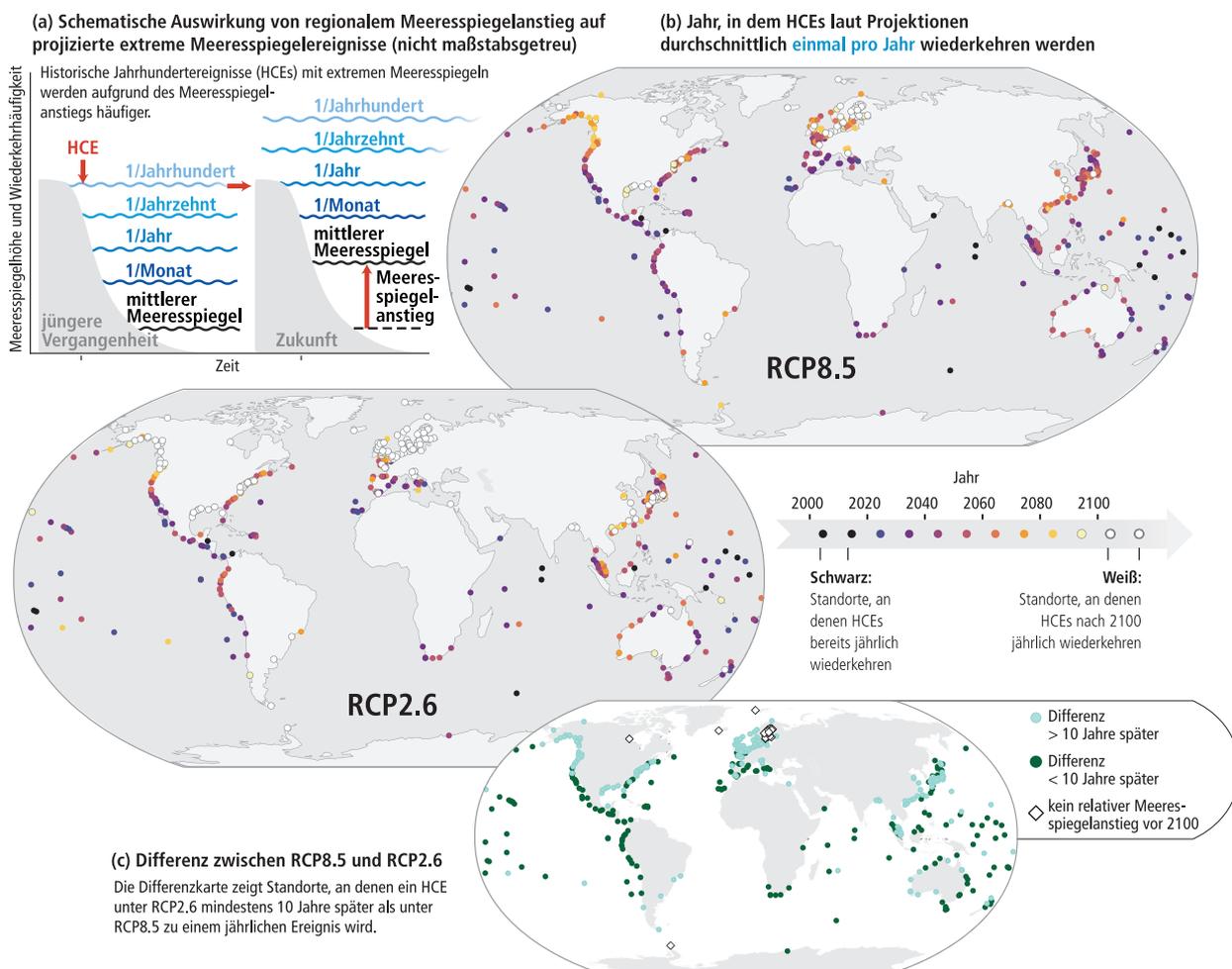
effektiv sein, da sich der Charakter der Gefährdungen ändert (*mittleres Vertrauen*). Signifikante Risikominderungs- und Anpassungsstrategien helfen, stärkere Folgen von Gefährdungen durch Bergfluten und Erdbeben zu vermeiden, wenn Exposition und Verwundbarkeit in vielen Berggebieten in diesem Jahrhundert zunehmen (*hohes Vertrauen*). {2.3.2, 3.4.3, 3.5.2}

- B.7.2  Die durch das Tauen von Permafrost verursachte Absenkung der Landoberfläche wird laut Projektionen Folgen für darüber liegende städtische und ländliche Kommunikations- und Verkehrsinfrastruktur in der Arktis und in Hochgebirgen haben (*mittleres Vertrauen*). Der Großteil arktischer Infrastruktur befindet sich in Gebieten, in denen sich das Tauen von Permafrost bis Mitte des Jahrhunderts laut Projektionen verstärken wird. Durch Nachrüstung und Neugestaltung von Infrastruktur können die Kosten halbiert werden, die aus dem Tauen von Permafrost und den damit verbundenen Klimafolgen bis 2100 entstehen (*mittleres Vertrauen*). {2.3.4, 3.4.1, 3.4.3}
- B.7.3  Tourismus, Erholung und Kulturgüter in Hochgebirgen werden laut Projektionen durch zukünftige Veränderungen der Kryosphäre negativ beeinflusst (*hohes Vertrauen*). Derzeitige Beschneigungstechnologien werden die Risiken für den Skitourismus in einem wärmeren Klima in den meisten Teilen Europas, Nordamerikas und Japans laut Projektionen weniger effektiv verringern, insbesondere bei einer globalen Erwärmung um 2 °C und darüber hinaus (*hohes Vertrauen*). {2.3.5, 2.3.6}
- B.8 Zukünftige Verschiebungen der Verbreitungsgebiete von Fischarten sowie Rückgänge ihrer Populationsdichten und des Fangpotenzials aufgrund des Klimawandels werden sich laut Projektionen auf das Einkommen, die Lebensgrundlagen und die Ernährungssicherheit von Gemeinschaften auswirken, die von Meeresressourcen abhängig sind (*mittleres Vertrauen*). Langfristiger Verlust und Schädigung mariner Ökosysteme beeinträchtigen die Rolle des Ozeans im Hinblick auf kulturelle, freizeitbezogene und intrinsische Werte, die für die Identität und das Wohlergehen des Menschen wichtig sind (*mittleres Vertrauen*). {3.2.4, 3.4.3, 5.4.1, 5.4.2, 6.4}**
- B.8.1  Projizierte geografische Verschiebungen und Rückgänge der globalen marinen tierischen Biomasse und des Fischfangpotenzials sind unter RCP8.5 im Vergleich zu RCP2.6 stärker ausgeprägt, was das Risiko für Einkommen und Lebensgrundlagen davon abhängiger menschlicher Gemeinschaften erhöht, insbesondere in wirtschaftlich gefährdeten Gebieten (*mittleres Vertrauen*). Die projizierte Umverteilung von Ressourcen und Populationsdichten erhöht das Risiko von Konflikten zwischen Fischereien, Behörden oder Gemeinschaften (*mittleres Vertrauen*). Herausforderungen für die Fischereiverwaltung sind unter RCP8.5 weit verbreitet, wobei es regionale Hotspots wie die Arktis und den tropischen Pazifik gibt (*mittleres Vertrauen*). {3.5.2, 5.4.1, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, 6.4.2, Abbildung SPM.3}
- B.8.2  Der Rückgang von Warmwasserkorallenriffen wird laut Projektionen die Leistungen, die sie für die Gesellschaft erbringen, wie Nahrungsmittelversorgung (*hohes Vertrauen*), Küstenschutz (*hohes Vertrauen*) und Tourismus (*mittleres Vertrauen*), stark beeinträchtigen. Laut Projektionen wird das Risiko für die Ernährungsgesundheit mancher Gemeinschaften, die stark von Meeresfrüchten abhängen (*mittleres Vertrauen*) beispielsweise in der Arktis, in Westafrika und in Kleinen Inselentwicklungsländern – durch mit rückläufiger Verfügbarkeit von Meeresfrüchten steigende Risiken für die darauf basierende Ernährungssicherheit (*mittleres Vertrauen*) erhöht. Solche Folgen verschärfen jegliche Risiken durch andere Verlagerungen in Ernährungsweisen und Ernährungssystemen, die durch soziale und wirtschaftliche Veränderungen und den Klimawandel über Land verursacht werden (*mittleres Vertrauen*). {3.4.3, 5.4.2, 6.4.2}
- B.8.3  Die globale Erwärmung gefährdet die Nahrungsmittelsicherheit von Meeresfrüchten (*mittleres Vertrauen*), indem sie Menschen erhöhter Bioakkumulation von persistenten organischen Schadstoffen und Quecksilber in Meerespflanzen und -tieren (*mittleres Vertrauen*), zunehmender Häufigkeit wasserbürtiger *Vibrio*-Erreger (*mittleres Vertrauen*) und einer erhöhten Wahrscheinlichkeit schädlicher Algenblüten (*mittleres Vertrauen*) aussetzt. Diese Risiken sind laut Projektionen für menschliche Gemeinschaften mit hohem Konsum an Meeresfrüchten, einschließlich indigener Küstengemeinschaften (*mittleres Vertrauen*), und für Wirtschaftssektoren wie Fischerei, Aquakultur und Tourismus (*hohes Vertrauen*) besonders groß. {3.4.3, 5.4.2, Box 5.3}
- B.8.4  Klimawandelfolgen für marine Ökosysteme und ihre Leistungen gefährden wichtige kulturelle Dimensionen des Lebens und Lebensgrundlagen (*mittleres Vertrauen*), unter anderem durch Verlagerungen der Verbreitungsgebiete oder der Populationsdichten genutzter Arten und durch einen geringeren Zugang zu Fischerei- oder Jagdgebieten. Dies umfasst potenziell schnellen und irreversiblen Verlust von Kultur sowie lokalem und indigenem Wissen und auch negative Folgen für traditionelle Ernährungsweisen und die Ernährungssicherheit, ästhetische Aspekte und Freizeitaktivitäten auf See (*mittleres Vertrauen*). {3.4.3, 3.5.3, 5.4.2}

- B.9** Erhöhte mittlere Meeresspiegel und Extremwasserstände verschärfen zusammen mit der Erwärmung und Versauerung des Ozeans auch die Risiken für menschliche Gemeinschaften in tief gelegenen Küstengebieten (*hohes Vertrauen*). In arktischen menschlichen Siedlungen ohne schnelle Landhebung und auf städtischen Atollinseln werden die Risiken selbst unter einem niedrigen Emissionsszenario (RCP2.6) als moderat bis hoch projiziert (*mittleres Vertrauen*), was auch das Erreichen von Anpassungsgrenzen mit einschließt (*hohes Vertrauen*). Delta-Regionen und ressourcenreiche Küstenstädte werden laut Projektionen unter Annahme eines Szenarios mit hohen Emissionen (RCP8.5) nach 2050 mit gegenwärtiger Anpassung ein hohes Risikoniveau aufweisen (*mittleres Vertrauen*). Von einer ehrgeizigen Anpassung einschließlich transformativer politischer Steuerung wird erwartet, dass sie Risiko reduziert (*hohes Vertrauen*), allerdings mit kontextspezifischen Nutzen. {4.3.3, 4.3.4, 6.9.2, Cross-Chapter Box 9, SM4.3, Abbildung SPM.5}
- B.9.1**  Ohne ehrgeizigere Anpassungsbemühungen im Vergleich zu heute und unter den derzeitigen Trends zunehmender Exposition und Anfälligkeit von Küstengemeinden werden laut Projektionen Risiken wie Erosion und Landverlust, Überschwemmung, Versalzung und kaskadenartige Folgen aufgrund des mittleren Meeresspiegelanstiegs und aufgrund von Extremereignissen im Laufe dieses Jahrhunderts unter allen Treibhausgasemissionsszenarien deutlich zunehmen (*sehr hohes Vertrauen*). Unter den gleichen Annahmen werden jährliche Küstenhochwasserschäden bis 2100 gegenüber heute laut Projektionen um 2–3 Größenordnungen zunehmen (*hohes Vertrauen*). {4.3.3, 4.3.4, Box 6.1, 6.8, SM.4.3, Abbildungen SPM.4, SPM.5}
- B.9.2**  Unter Szenarien mit hohen Emissionen nähern sich verwundbare Gemeinschaften in Korallenriffumgebungen, städtischen Atollinseln und niedrig gelegenen arktischen Gebieten weit vor Ende dieses Jahrhunderts hohen bis sehr hohen Risiken durch den Meeresspiegelanstieg. Dies bedeutet, dass Anpassungsgrenzen erreicht werden, also diejenigen Punkte, an denen die Ziele (oder Systembedürfnisse) eines Akteurs nicht durch Anpassungsmaßnahmen vor untragbaren Risiken geschützt werden können (*hohes Vertrauen*). Das Erreichen von (z. B. biophysikalischen, geografischen, finanziellen, technischen, sozialen, politischen und institutionellen) Anpassungsgrenzen hängt vom Emissionsszenario und der kontextspezifischen Risikotoleranz ab; nach dem Jahr 2100 werden laut Projektionen aufgrund des bereits jetzt langfristig festgelegten Meeresspiegelanstiegs (*mittleres Vertrauen*) in mehr Gebieten Anpassungsgrenzen erreicht. Manche Inselstaaten werden *wahrscheinlich* aufgrund klimabedingter Ozean- und Kryosphärenveränderungen unbewohnbar werden (*mittleres Vertrauen*), aber Schwellenwerte für Bewohnbarkeit sind nach wie vor äußerst schwer wissenschaftlich zu bewerten. {4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 5.5.2, Cross-Chapter Box 9, SM.4.3, SPM C.1, Glossar, Abbildung SPM.5}
- B.9.3**  Global bietet eine langsamere Geschwindigkeit klimabedingter Veränderungen des Ozeans und der Kryosphäre größere Anpassungsmöglichkeiten (*hohes Vertrauen*). Obwohl *hohes Vertrauen* in die Tatsache besteht, dass eine ehrgeizige Anpassung, einschließlich politischer Steuerung eines transformativen Wandels, das Potenzial hat, Risiken an vielen Standorten zu verringern, können solche Vorteile je nach Standort unterschiedlich sein. Auf globaler Ebene kann Küstenschutz das Hochwasserrisiko im 21. Jahrhundert um 2–3 Größenordnungen reduzieren. Er hängt jedoch von Investitionen in der Größenordnung von zehn bis mehreren hundert Milliarden US-Dollar pro Jahr ab (*hohes Vertrauen*). Während solche Investitionen in dicht besiedelten städtischen Gebieten im Allgemeinen kosteneffizient sind, können ländliche und ärmere Gebiete vor Problemen stehen, solche Investitionen aufzubringen, weil die relativen jährlichen Kosten für manche kleine Inselstaaten mehrere Prozent des BIP betragen (*hohes Vertrauen*). Laut Projektionen treten auch mit großem Anpassungsaufwand Restrisiken und damit verbundene Verluste auf (*mittleres Vertrauen*), aber kontextspezifische Anpassungsgrenzen und Restrisiken sind nach wie vor schwer wissenschaftlich zu bewerten. {4.1.3, 4.2.2.4, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.4, 4.4.3, 6.9.1, 6.9.2, Cross-Chapter Boxen 1–2 in Kapitel 1, SM.4.3, Abbildung SPM.5}

## Extreme Meeresspiegelereignisse

Aufgrund des projizierten Anstiegs des mittleren globalen Meeresspiegels werden lokale Meeresspiegel, die historisch einmal pro Jahrhundert aufgetreten sind (historische Jahrhundertereignisse, *historical centennial events*, HCEs), laut Projektionen an den meisten Orten im 21. Jahrhundert mindestens jährlich auftreten. Die Höhe eines HCE variiert stark und kann je nach Expositionsniveau bereits schwerwiegende Folgen haben. Folgen können mit zunehmender Häufigkeit von HCE weiter zunehmen.



**Abbildung SPM.4 |** Die Auswirkung des regionalen Meeresspiegelanstiegs auf extreme Meeresspiegelereignisse an Küstenstandorten. **(a)** Schematische Darstellung extremer Meeresspiegelereignisse und deren durchschnittlicher Wiederkehrhäufigkeit in der jüngsten Vergangenheit (1986–2005) und der Zukunft. Als Folge des mittleren Meeresspiegelanstiegs werden lokale Meeresspiegel, die historisch einmal pro Jahrhundert aufgetreten sind (historische Jahrhundertereignisse, *historical centennial events*, HCEs), laut Projektionen in Zukunft häufiger wiederkehren. **(b)** Das Jahr, in dem HCEs unter RCP8.5 und RCP2.6 an den 439 einzelnen Küstenstandorten, an denen die Beobachtungsaufzeichnungen ausreichend sind, durchschnittlich einmal pro Jahr wiederkehren werden. Das Fehlen eines Kreises deutet darauf hin, dass eine Bewertung aufgrund mangelnder Daten unmöglich war, bedeutet aber nicht, dass keine Exposition und kein Risiko bestehen. Je dunkler der Kreis, desto früher wird dieser Übergang erwartet. Die *wahrscheinliche* Bandbreite beträgt  $\pm 10$  Jahre für Standorte, an denen dieser Übergang vor 2100 erwartet wird. Weiße Kreise (33% der Standorte unter RCP2.6 und 10% unter RCP8.5) deuten darauf hin, dass nicht erwartet wird, dass HCEs vor 2100 durchschnittlich einmal pro Jahr wiederkehren werden. **(c)** Ein Hinweis darauf, an welchen Standorten dieser Übergang von HCEs zu jährlichen Ereignissen laut Projektionen unter RCP2.6 mehr als 10 Jahre später als unter RCP8.5 erfolgen wird. Da die Szenarien bis 2050 an vielen Standorten zu kleinen Unterschieden führen, werden die Ergebnisse für RCP4.5 hier nicht dargestellt, sind aber in Kapitel 4 verfügbar. [4.2.3, Abbildung 4.10, Abbildung 4.12]

## C. Umsetzung von Maßnahmen in Reaktion auf Veränderungen in Ozean und Kryosphäre

### Herausforderungen

- C.1 Folgen klimabedingter Veränderungen in Ozean und Kryosphäre stellen die gegenwärtigen politischen Steuerungsbemühungen zur Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen vom lokalen bis zum globalen Maßstab zunehmend infrage und bringen sie in einigen Fällen an ihre Grenzen. Menschen mit der höchsten Exposition und Verwundbarkeit sind oft diejenigen mit der geringsten Anpassungskapazität (*hohes Vertrauen*). {1.5, 1.7, Cross-Chapter Boxen 2–3 in Kapitel 1, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.4, 3.2.4, 3.4.3, 3.5.2, 3.5.3, 4.1, 4.3.3, 4.4.3, 5.5.2, 5.5.3, 6.9}**
- C.1.1**  Klimawandelfolgen in Ozean und Kryosphäre und ihre gesellschaftlichen Auswirkungen laufen über Zeithorizonte ab, die länger sind als diejenigen von gesellschaftlicher Regelung und Steuerung (z. B. Planungszyklen, öffentliche und unternehmerische Entscheidungszyklen sowie Finanzinstrumente). Solche zeitlichen Unterschiede stellen die Fähigkeit von Gesellschaften, sich angemessen auf langfristige Veränderungen, einschließlich Veränderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen, vorzubereiten und darauf zu reagieren vor Herausforderungen (*hohes Vertrauen*). Beispiele sind unter anderem Veränderungen in Bezug auf Erdbeben und Überschwemmungen in Hochgebirgen und Risiken für wichtige Arten und Ökosysteme in der Arktis sowie für niedrig gelegene Staaten und Inseln, kleine Inselstaaten, andere Küstenregionen und Korallenriffökosysteme. {2.3.2, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.3, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3, 6.9}
- C.1.2**  Gesellschaftliche Regelungs- und Steuerungssysteme (z. B. Meeresschutzgebiete, Raumpläne und Wasserwirtschaftssysteme) sind in vielen Kontexten über Verwaltungsgrenzen und Sektoren hinweg zu fragmentiert, um integrierte Reaktionen auf die zunehmenden und kaskadenartigen Risiken durch klimabedingte Veränderungen im Ozean und/oder der Kryosphäre zu geben (*hohes Vertrauen*). Die Fähigkeit von Steuerungssystemen in Polar- und Meeresregionen, auf Klimawandelfolgen zu reagieren, hat sich in letzter Zeit verstärkt, aber diese Entwicklung ist nicht schnell oder robust genug, um dem Ausmaß der zunehmenden projizierten Risiken angemessen zu begegnen (*hohes Vertrauen*). In Hochgebirgen, Küstenregionen und auf kleinen Inseln gibt es aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen klimatischen und nicht-klimatischen Risikotreibern (wie z. B. Unzugänglichkeit, demografische und Siedlungstrends oder durch lokale Aktivitäten verursachte Landabsenkung) in allen Größenordnungen, Sektoren und Politikbereichen auch Schwierigkeiten bei der Koordinierung von Klimaanpassungsmaßnahmen (*hohes Vertrauen*). {2.3.1, 3.5.3, 4.4.3, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, Box 5.6, 6.9, Cross-Chapter Box 3 in Kapitel 1}
- C.1.3**  Es gibt eine breite Palette bekannter Hürden und Grenzen für Anpassung an den Klimawandel in Ökosystemen (*hohes Vertrauen*). Dazu gehören der Raum, den Ökosysteme benötigen, nicht-klimatische Treiber und menschliche Einflüsse, die als Teil der Anpassungsreaktion behandelt werden müssen, die Verringerung der Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen aufgrund des Klimawandels und die langsameren Erholungsraten von Ökosystemen im Vergleich zur Wiederkehr von Klimafolgen, die Verfügbarkeit von Technologie, Wissen und finanzieller Unterstützung sowie bestehende gesellschaftliche Regelungs- und Steuerungssysteme (*mittleres Vertrauen*). {3.5.4, 5.5.2}
- C.1.4**  Es bestehen finanzielle, technologische, institutionelle und andere Hürden für die Umsetzung von Maßnahmen in Reaktion auf aktuelle und projizierte negative Folgen klimabedingter Veränderungen in Ozean und Kryosphäre, was Maßnahmen zum Aufbau von Resilienz und zur Risikominderung behindert (*hohes Vertrauen*). Ob solche Hürden die Anpassungswirksamkeit beeinträchtigen oder Anpassungsgrenzen entsprechen, hängt von den kontextspezifischen Gegebenheiten, der Geschwindigkeit und dem Ausmaß der Klimaänderungen sowie von der Fähigkeit der Gesellschaften ab, ihre Anpassungsfähigkeit in effektive Anpassungsreaktionen umzuwandeln. Die Anpassungsfähigkeit unterscheidet sich weiterhin sowohl zwischen als auch innerhalb von Gemeinschaften und Gesellschaften (*hohes Vertrauen*). Menschen mit der höchsten Exposition und Verwundbarkeit gegenüber aktuellen und zukünftigen Gefährdungen durch Ozean- und Kryosphärenveränderungen sind oft auch diejenigen mit der geringsten Anpassungsfähigkeit, insbesondere in niedrig gelegenen Inseln und Küsten, arktischen Gebieten und Hochgebirgen mit Entwicklungsherausforderungen (*hohes Vertrauen*). {2.3.1, 2.3.2, 2.3.7, Box 2.4, 3.5.2, 4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 5.5.2, 6.9, Cross-Chapter Boxen 2 und 3 in Kapitel 1, Cross-Chapter Box 9}

## Stärkung von Reaktionsmöglichkeiten

- C.2 Die weitreichenden Leistungen und Möglichkeiten, die von Ökosystemen im Zusammenhang mit Ozean und Kryosphäre bereitgestellt werden, können durch Schutz, Wiederherstellung, vorsorgliche ökosystembasierte Bewirtschaftung erneuerbarer Ressourcen und die Reduzierung von Verschmutzung und anderen Stressfaktoren unterstützt werden (*hohes Vertrauen*). Integrierte Wassermanagement- (*mittleres Vertrauen*) und ökosystembasierte Anpassungsverfahren (*hohes Vertrauen*) verringern Klimarisiken vor Ort und bieten vielfältige gesellschaftliche Vorteile. Allerdings bestehen ökologische, finanzielle, institutionelle und steuerungsbegleitende Beschränkungen für solche Maßnahmen (*hohes Vertrauen*), und in vielen Zusammenhängen wird ökosystembasierte Anpassung nur unter den niedrigsten Erwärmungsniveaus wirksam sein (*hohes Vertrauen*). {2.3.1, 2.3.3, 3.2.4, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.2, 5.2.2, 5.4.2, 5.5.1, 5.5.2, Abbildung SPM.5}
- C.2.1  Netzwerke von Schutzgebieten tragen dazu bei, Ökosystemleistungen einschließlich der Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff aufrechtzuerhalten und zukünftige ökosystembasierte Anpassungsmöglichkeiten zu eröffnen, indem sie die polwärtigen und die Höhenbewegungen von Arten, Populationen und Ökosystemen erleichtern, die als Reaktion auf Erwärmung und Meeresspiegelanstieg auftreten (*mittleres Vertrauen*). Geografische Hürden, Ökosystemdegradierung, die Fragmentierung von Lebensräumen und Hürden für die regionale Zusammenarbeit schränken das Potenzial solcher Netzwerke zur Unterstützung künftiger Verlagerung von Artenverbreitungsgebieten in Meeres-, Hochgebirgen und Polargebieten an Land ein (*hohes Vertrauen*). {2.3.3, 3.2.3, 3.3.2, 3.5.4, 5.5.2, Box 3.4}
- C.2.2  Die Wiederherstellung terrestrischer und mariner Lebensräume sowie Ökosystem-Managementinstrumente, wie z. B. unterstützte Artenumsiedlung und Korallengärtnern, können lokal wirksam zur Verbesserung von ökosystemgestützter Anpassung beitragen (*hohes Vertrauen*). Solche Maßnahmen sind am erfolgreichsten, wenn sie gemeinschaftsgetragen sind, wissenschaftsbasiert sind und gleichzeitig lokales und indigenes Wissen nutzen, langfristige Unterstützung einschließlich der Verringerung oder Beseitigung nichtklimatischer Stressoren erfahren, und wenn der Grad der Erwärmung am niedrigsten ist (*hohes Vertrauen*). Beispielsweise können mögliche Maßnahmen zur Wiederherstellung von Korallenriffen unwirksam sein, wenn die globale Erwärmung 1,5 °C übersteigt, da Korallen bereits unter den derzeitigen Erwärmungsniveaus einem hohen Risiko (*sehr hohes Vertrauen*) ausgesetzt sind. {2.3.3, 4.4.2, 5.3.7, 5.5.1, 5.5.2, Box 5.5, Abbildung SPM.3}
- C.2.3  Die Stärkung von Vorsorgeansätzen, wie dem Wiederaufbau überfischter oder ausgeschöpfter Fischereibestände und der Reaktionsfähigkeit bestehender Fischereimanagementstrategien, verringert negative Folgen des Klimawandels für die Fischerei, was Vorteile für regionale Wirtschaftssysteme und Lebensgrundlagen mit sich bringt (*mittleres Vertrauen*). Fischereimanagement, das im Laufe der Zeit regelmäßig Maßnahmen bewertet und aktualisiert und dabei Bewertungen künftiger Ökosystemtrends berücksichtigt, reduziert die Risiken für die Fischerei (*mittleres Vertrauen*), kann aber Ökosystemveränderungen nur begrenzt angehen. {3.2.4, 3.5.2, 5.4.2, 5.5.2, 5.5.3, Abbildung SPM.5}
- C.2.4  Die Wiederherstellung bewachsener Küstenökosysteme wie Mangrovenwälder, Marschland und Seegraswiesen (Küstenökosysteme mit „blauem Kohlenstoff“) könnte den Klimawandel durch eine erhöhte Kohlenstoffaufnahme und -speicherung von jährlich etwa 0,5% der derzeitigen globalen Emissionen mindern (*mittleres Vertrauen*). Verbesserter Schutz und besseres Management können Kohlenstoffemissionen aus diesen Ökosystemen reduzieren. Zusammengenommen haben diese Maßnahmen auch zahlreiche andere Vorteile, wie z. B. Sturmschutz, Verbesserung der Wasserqualität und Förderung der biologischen Vielfalt und der Fischerei (*hohes Vertrauen*). Eine Verbesserung der Quantifizierung von Kohlenstoffspeicherung und Treibhausgasflüssen dieser Küstenökosysteme wird die derzeitigen Unsicherheiten bei Messung, Berichterstattung und Überprüfung verringern (*hohes Vertrauen*). {Box 4.3, 5.4, 5.5.1, 5.5.2, Anhang I: Glossar}
- C.2.5  Erneuerbare Energien aus dem Ozean können die Minderung des Klimawandels unterstützen und Energiegewinnung aus Winden über dem offenen Meer, Gezeiten, Wellen, Wärme- und Salzgehaltsgradienten sowie Algenbiokraftstoffen umfassen. Es wird erwartet, dass die sich abzeichnende Nachfrage nach alternativen Energiequellen wirtschaftliche Chancen für den Sektor der erneuerbaren Energien aus dem Ozean schafft (*hohes Vertrauen*), obwohl ihr Potenzial auch durch den Klimawandel beeinträchtigt werden könnte (*geringes Vertrauen*). {5.4.2, 5.5.1, Abbildung 5.23}

- C.2.6  Integrierte Wassermanagementansätze über mehrere Größenordnungen hinweg können wirksam Folgen von Kryosphärenveränderungen in Hochgebirgen bewältigen und daraus entstehende Chancen nutzen. Diese Ansätze unterstützen auch die Wasserressourcenbewirtschaftung durch die Entwicklung und Optimierung von Mehrzweckspeichern und der Freisetzung von Wasser aus Stauseen (*mittleres Vertrauen*) unter Berücksichtigung potenziell negativer Folgen für Ökosysteme und Gemeinschaften. Eine Diversifizierung von Tourismusaktivitäten über das ganze Jahr hinweg unterstützt die Anpassung in Wirtschaftssystemen in Hochgebirgen (*mittleres Vertrauen*). {2.3.1, 2.3.5}
- C.3 Küstenbevölkerungen stehen vor schwierigen Entscheidungen, wenn es darum geht, kontextspezifische und integrierte Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg zu entwickeln, die Kosten, Nutzen und Zielkonflikte der verfügbaren Optionen abwägen und die im Laufe der Zeit angepasst werden können (*hohes Vertrauen*). Alle Arten von Optionen, einschließlich Küstenschutz, Akkommodation, ökosystembasierter Anpassung, Landgewinnung und Rückzug von der Küste, wo immer möglich, können bei solchen integrierten Maßnahmen eine wichtige Rolle spielen (*hohes Vertrauen*). {4.4.2, 4.4.3, 4.4.4, 6.9.1, Cross-Chapter Box 9; Abbildung SPM.5}**
- C.3.1  Je höher die Meeresspiegel steigen, desto schwieriger ist Küstenschutz, vor allem eher aufgrund wirtschaftlicher, finanzieller und sozialer Hürden als aufgrund technischer Grenzen (*hohes Vertrauen*). In den kommenden Jahrzehnten stellt die Verringerung lokaler Treiber von Exposition und Verwundbarkeit, wie Küstenurbanisierung und durch den Menschen verursachte Landabsenkungen, eine wirksame Maßnahme dar (*hohes Vertrauen*). Wo der Platz begrenzt und der Wert der exponierten Vermögenswerte hoch ist (z. B. in Städten), stellt harter Küstenschutz (z. B. Deiche) während des 21. Jahrhunderts *wahrscheinlich* eine kosteneffiziente Reaktionsmöglichkeit dar, wenn kontextspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden (*hohes Vertrauen*). Ressourcenarme Gebiete aber können sich solche Investitionen möglicherweise nicht leisten. Wo Platz vorhanden ist, kann ökosystembasierte Anpassung das Risiko an der Küste verringern und mehrere andere Vorteile bieten wie z. B. Kohlenstoffspeicherung, verbesserte Wasserqualität, Schutz der biologischen Vielfalt und Unterstützung von Lebensgrundlagen (*mittleres Vertrauen*). {4.3.2, 4.4.2, Box 4.1, Cross-Chapter Box 9, Abbildung SPM.5}
- C.3.2  Einige Akkommodationsmaßnahmen an der Küste wie Frühwarnsysteme und Hochwassersicherung von Gebäuden sind bei derzeitigem Meeresspiegel oft sowohl kostengünstig als auch sehr kosteneffizient (*hohes Vertrauen*). Bei projiziertem Meeresspiegelanstieg und Zunahme von Gefährdungen an der Küste werden einige dieser Maßnahmen weniger wirksam, wenn sie nicht mit anderen Maßnahmen kombiniert werden (*hohes Vertrauen*). Alle Arten von Reaktionsmöglichkeiten, einschließlich Schutz, Akkommodation, ökosystembasierter Anpassung, Landgewinnung und geplanter Umsiedlung, wenn alternative Standorte verfügbar sind, können bei solchen integrierten Maßnahmen eine wichtige Rolle spielen (*hohes Vertrauen*). Im Falle von kleinen betroffenen Gemeinschaften oder nach einer Katastrophe lohnt es sich, das Risiko durch geplante Umsiedlungen an der Küste zu reduzieren, falls sichere alternative Standorte zur Verfügung stehen. Eine solche geplante Umsiedlung kann durch soziale, kulturelle, finanzielle und politische Faktoren eingeschränkt werden (*sehr hohes Vertrauen*). {4.4.2, Box 4.1, Cross-Chapter Box 9, SPM B.3}
- C.3.3  Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg und die damit verbundene Risikominderung stellen für die Gesellschaft tiefgreifende Herausforderungen bezüglich politischer Regelung und Steuerung dar; dies beruht auf der Unsicherheit bezüglich des Ausmaßes und der Geschwindigkeit des künftigen Meeresspiegelanstiegs sowie auf viel umstrittenen gesellschaftlichen Zielkonflikten (z. B. Sicherheit, Naturschutz, wirtschaftliche Entwicklung, intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit), auf begrenzten Ressourcen und auf widersprüchlichen Interessen und Werten unterschiedlicher Interessengruppen (*hohes Vertrauen*). Diese Herausforderungen können durch lokal angepasste Kombinationen von Entscheidungsanalyse, Landnutzungsplanung, Öffentlichkeitsbeteiligung, verschiedenen Wissenssystemen und Konfliktlösungsansätzen gemildert werden, die im Laufe der Zeit an veränderte Umstände angepasst werden (*hohes Vertrauen*). {Cross-Chapter Box 5 in Kapitel 1, 4.4.3, 4.4.4, 6.9}
- C.3.4  Trotz der großen Unsicherheiten bezüglich des Ausmaßes und der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs nach 2050 werden viele Entscheidungen zu Küsten mit Zeithorizonten von Jahrzehnten bis über ein Jahrhundert jetzt getroffen (z. B. kritische Infrastruktur, Küstenschutzwerke, Stadtplanung); diese können durch folgende Faktoren verbessert werden: Berücksichtigung des relativen Meeresspiegelanstiegs, Bevorzugung flexibler Anpassungsmaßnahmen (d. h. solcher, die

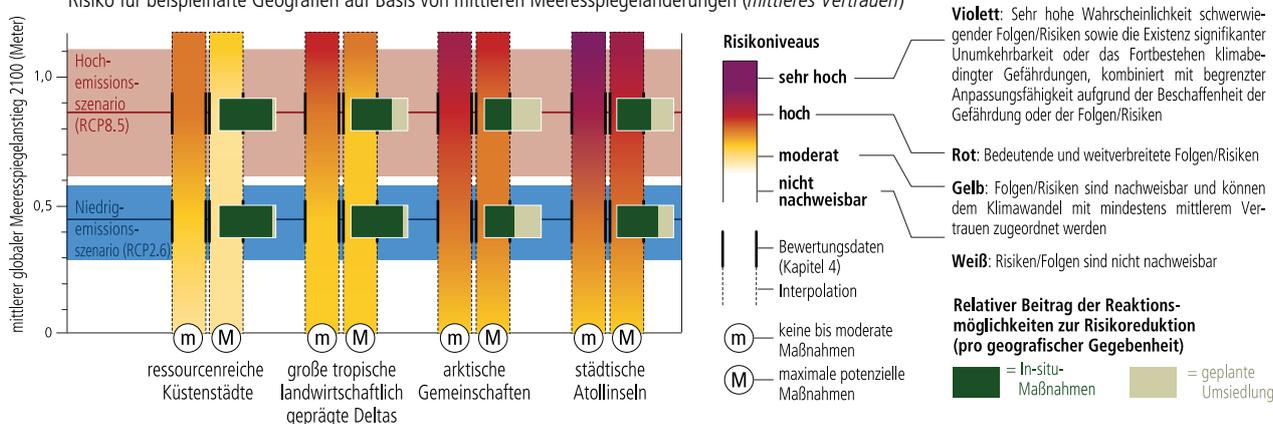
im Laufe der Zeit angepasst werden können), die von Überwachungssystemen für Frühwarnsignale unterstützt werden, regelmäßige Anpassung von Entscheidungen (d. h. adaptive Entscheidungsfindung) sowie Verwendung robuster Entscheidungsansätze, Expertenbeurteilung, Szenarienentwicklung und mehrerer Wissenssysteme (*hohes Vertrauen*). Die Bandbreite an Meeresspiegelanstieg, die bei der Planung und Umsetzung von Küstenmaßnahmen berücksichtigt werden muss, hängt von der Risikotoleranz der relevanten Akteure ab. Akteure mit höherer Risikotoleranz (z. B. solche, die Investitionen planen, die sich sehr leicht an unvorhergesehene Bedingungen anpassen lassen) bevorzugen oft den *wahrscheinlichen* Bereich von Projektionen, während Akteure mit geringerer Risikotoleranz (z. B. diejenigen, die über kritische Infrastruktur entscheiden) auch den globalen und lokalen mittleren Meeresspiegel oberhalb des oberen Endes der *wahrscheinlichen* Bandbreite (global 1,1 m unter RCP8.5 bis 2100) und Abschätzungen des Meeresspiegelanstiegs auf Basis von Methoden, die mit geringerem Vertrauen behaftet sind, wie beispielsweise die Expertenerhebungen, berücksichtigen. {1.8.1, 1.9.2, 4.2.3, 4.4.4, Abbildung 4.2, Cross-Chapter Box 5 in Kapitel 1, Abbildung SPM.5, SPM B.3}

## Risiko des Meeresspiegelanstiegs und Maßnahmen in Reaktion darauf

Der Begriff Maßnahmen wird hier anstelle von Anpassung verwendet, da einige Maßnahmen, wie z. B. Rückzug, als Anpassung betrachtet werden können oder auch nicht.

### (a) Risiko im Jahr 2100 unter verschiedenen Meeresspiegelanstiegs- und Maßnahmen Szenarien

Risiko für beispielhafte Geografien auf Basis von mittleren Meeresspiegeländerungen (*mittleres Vertrauen*)

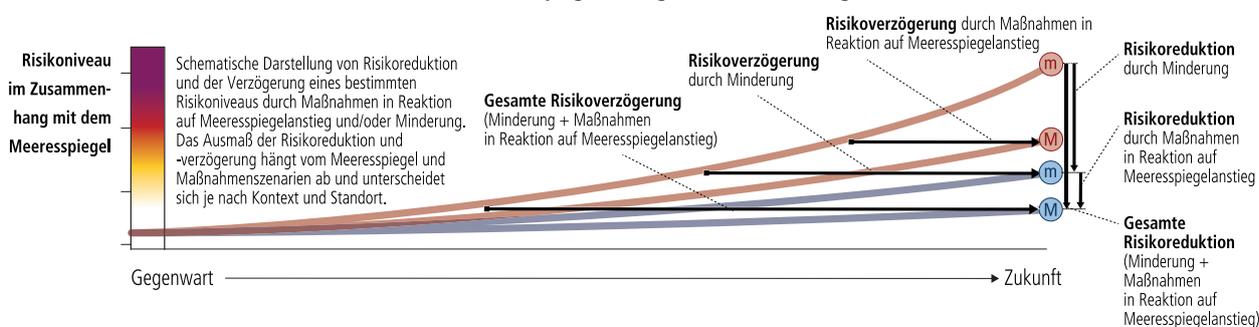


In dieser Bewertung bezieht sich der Begriff Maßnahme auf In-situ-Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg (fest installierter Küstenschutz, Wiederherstellung von Ökosystemen, Einschränkung von Landabsenkung) sowie geplante Umsiedlung. Geplante Umsiedlung bezieht sich in dieser Bewertung auf proaktiven geordneten Rückzug oder Neusiedlung nur im lokalen Rahmen sowie gemäß der Besonderheiten eines bestimmten Kontexts (z. B. auf städtischen Atollinseln: innerhalb der Insel, auf einer benachbarten Insel oder auf künstlich angehobenen Inseln). Erzwungene Umsiedlung und internationale Migration werden in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Die beispielhaften geografischen Gegebenheiten basieren auf einer begrenzten Anzahl von Fallstudien, die von der fachbegutachteten Literatur ausführlich behandelt werden. Die Verwirklichung von Risiko wird von Kontextbesonderheiten abhängen.

Szenarien des Meeresspiegelanstiegs: RCP4.5 und RCP6.0 werden in dieser Risikobewertung nicht berücksichtigt, da die Literatur, die dieser Bewertung zugrunde liegt, nur für RCP2.6 und RCP8.5 verfügbar ist.

### (b) Vorteile von Maßnahmen in Reaktion auf Meeresspiegelanstieg und von Minderung



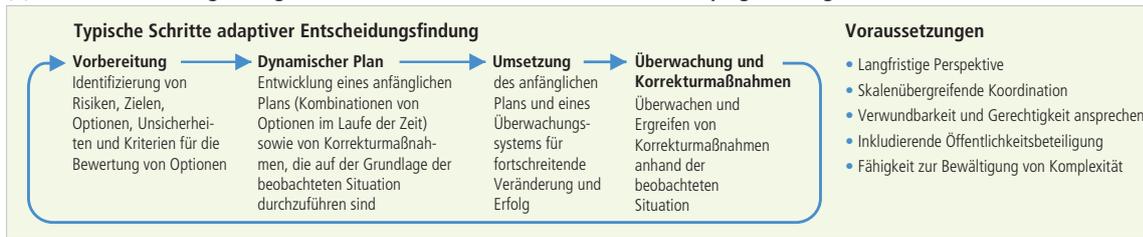
(c) Maßnahmen in Reaktion auf steigende mittlere und extreme Meeresspiegel

Die Tabelle veranschaulicht Maßnahmen und ihre Merkmale. Sie ist nicht erschöpfend. Ob eine Maßnahme anwendbar ist, hängt von den geografischen Gegebenheiten und dem Kontext ab.

Vertrauensniveaus (hinsichtlich Wirksamkeit bewertet): ●●● = sehr hoch ●●● = hoch ●● = mittel ● = gering

Maßnahmen	Potenzielle Wirksamkeit  In Bezug auf Reduktion von Risiken durch Meeresspiegelanstieg (MSA)  (technische/biophysikalische Grenzen)	Vorteile  (über Risikoreduktion hinaus)	Zusatznutzen	Nachteile	Wirtschaftliche Effizienz	Herausforderungen der politischen Steuerung und Regelung	
<b>Fest installierte Schutzvorrichtungen</b>	Bis hin zu mehreren Metern MSA {4.4.2.2.4} ●●●	Vorhersagbare Sicherheitsniveaus {4.4.2.2.4}	Multifunktionale Deiche, z. B. für Erholung oder andere Landnutzung {4.4.2.2.5}	Zerstörung von Lebensraum durch Küstendruck, Hochwasser- & Erosionsverlagerung, Anbindeeffekte, katas-trophale Auswirkung bei Versagen der Schutzvorrichtung {4.3.2.4, 4.4.2.2.5}	Hoch, wenn der Wert der Güter hinter der Schutzvorrichtung hoch ist, wie in vielen städtischen und dicht besiedelten Küstengebieten der Fall {4.4.2.2.7}	Oft unerschwinglich für ärmere Gebiete. Zielkonflikte (z. B. Naturschutz, Sicherheit und Tourismus), Konflikte um die Verteilung öffentlicher Haushalte, fehlende Finanzierung {4.3.3.2, 4.4.2.2.6}	
<b>Sedimentbasierter Schutz</b>	Wirksam, hängt aber von Sedimentverfügbarkeit ab {4.4.2.2.4} ●●●	Hohe Flexibilität {4.4.2.2.4}	Erhaltung von Stränden für Erholung/Tourismus {4.4.2.2.5}	Zerstörung von Lebensraum, wo Sediment abgebaut wird {4.4.2.2.5}	Hoch, wenn Einnahmen aus Tourismus hoch sind {4.4.2.2.7}	Konflikte über die Verteilung öffentlicher Haushalte {4.4.2.2.6}	
<b>Ökosystembasierte Anpassung</b>	<b>Korallenschutz</b>	Wirksam bis zu 0,5 cm MSA pro Jahr. ●● Stark begrenzt durch Ozeanerwärmung und -versauerung. Eingeschränkt bei 1,5 °C Erwärmung und vielerorts bei 2 °C verloren {4.3.3.5.2, 4.4.2.3.2, 5.3.4} ●●●	Möglichkeit zur Beteiligung der Gemeinschaft {4.4.2.3.1}	Zugewinn von Lebensraum, Biodiversität, Kohlenstoffbindung, Einkommen aus Tourismus, erhöhte Produktivität der Fischerei, verbesserte Wasserqualität. Bereitstellung von Nahrung, Medizin, Brennstoff, Holz und kulturellem Nutzen {4.4.2.3.5}	Langfristige Wirksamkeit hängt von der Erwärmung und Versauerung des Ozeans und den Emissionsszenarien ab {4.3.3.5.2., 4.4.2.3.2}	Begrenzte Belege für das Nutzen-Kosten-Verhältnis; hängt von Bevölkerungsdichte und der Verfügbarkeit von Land ab {4.4.2.3.7}	Genehmigungen für die Umsetzung sind schwer zu erhalten. Es fehlt an Finanzierung. Mangelnde Durchsetzung der Naturschutzrichtlinien. EBA-Optionen wegen kurzfristiger wirtschaftlicher Interessen, Verfügbarkeit von Land {4.4.2.3.6}
	<b>Korallenwiederherstellung</b>						
	<b>Schutz von Feuchtgebieten</b> (Marschland, Mangrovenwälder)						
<b>Wiederherstellung von Feuchtgebieten</b> (Marschland, Mangrovenwälder)	Wirksam bis zu 0,5–1 cm MSA pro Jahr, ●● verringert bei 2 °C {4.3.3.5.1, 4.4.2.3.2, 5.3.7} ●●●	Sicherheitsniveaus weniger vorhersehbar, viel Land benötigt, Hürden für Ausdehnung von Ökosystemen landeinwärts müssen beseitigt werden {4.4.2.3.5, 4.4.2.3.2}					
<b>Landgewinnung</b>	Bis hin zu mehreren Metern MSA {4.4.2.2.4} ●●●	Vorhersagbare Sicherheitsniveaus {4.4.2.2.4}	Generiert Land und Landverkaufseinnahmen, die zur Anpassungsfinanzierung verwendet werden können {4.4.2.4.5}	Grundwasserversalzung, verstärkte Erosion und Verlust von Küstenökosystemen und -lebensraum {4.4.2.4.5}	Sehr hoch, wenn Grundstückspreise hoch sind, wie an vielen städtischen Küsten der Fall {4.4.2.4.7}	Oft unerschwinglich für ärmere Gebiete. Soziale Konflikte im Hinblick auf Zugang und Verteilung von neuem Land {4.4.2.4.6}	
<b>Akkommodation an der Küste</b>  (Hochwassersicherung von Gebäuden, Frühwarnsysteme für Hochwasserereignisse usw.)	Sehr wirksam bei geringem MSA {4.4.2.5.4} ●●●	Ausgereifte Technologie; bei Hochwasser abgelagerte Sedimente können die Höhe über dem Meeresspiegel anheben {4.4.2.5.5}	Erhält Landschaftszusammenhalt {4.4.2.5.5}	Verhindert Hochwasser/Folgen nicht {4.4.2.5.5}	Sehr hoch für Frühwarnsysteme und Maßnahmen an Gebäuden {4.4.2.5.7}	Frühwarnsysteme erfordern wirksame institutionelle Vorkehrungen {4.4.2.6.6}	
<b>Rückzug</b>	<b>Geplante Umsiedlung</b>	Wirksam, wenn alternative sichere Orte zur Verfügung stehen {4.4.2.6.4} ●●●	Meeresspiegelrisiken am Herkunftsort können beseitigt werden {4.4.2.6.4}	Zugang zu verbesserten Dienstleistungen (Gesundheit, Bildung, Wohnen), Arbeitsmöglichkeiten und Wirtschaftswachstum {4.4.2.6.5}	Verlust des sozialen Zusammenhalts, der kulturellen Identität und des Wohlbefindens. Verringerte Dienstleistungen (Gesundheit, Bildung, Wohnen), Arbeitsmöglichkeiten und Wirtschaftswachstum {4.4.2.6.5}	Begrenzte Belege {4.4.2.6.7}	Versöhnung der divergierenden Interessen, die sich aus der Umsiedlung von Menschen vom Herkunftsort ergeben {4.4.2.6.6}
	<b>Erzwungene Umsiedlung</b>	Adressiert nur das unmittelbare Risiko am Herkunftsort	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Reicht von Verlust von Leben bis zu Verlust von Lebensgrundlagen und Souveränität {4.4.2.6.5}	Nicht anwendbar	Wirft komplexe humanitäre Fragen zu Lebensgrundlagen, Menschenrechten und Gerechtigkeit auf {4.4.2.6.6}

**(d) Auswahl und Ermöglichung von Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg**



**Abbildung SPM.5** | Risiken des Meeresspiegels und Maßnahmen in Reaktion darauf. Der Begriff Maßnahmen\* wird hier anstelle von Anpassung verwendet, da einige Maßnahmen, wie z. B. Rückzug, als Anpassung betrachtet werden können oder auch nicht. **(a)** zeigt das kombinierte Risiko von Küstenhochwasser, Erosion und Versalzung aufgrund sich ändernder mittlerer und extremer Meeresspiegel unter RCP2.6 und RCP8.5 sowie unter zwei Maßnahmenszenarien für beispielhafte Geografien im Jahr 2100. Risiken unter den RCPs 4.5 und 6.0 wurden aufgrund fehlender Literatur bezüglich der bewerteten Regionen nicht bewertet. Die Bewertung berücksichtigt keine Veränderungen des extremen Meeresspiegels über die direkt durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels verursachten Veränderungen hinaus; Risikoniveaus könnten ansteigen, falls andere Veränderungen des extremen Meeresspiegels berücksichtigt würden (z. B. aufgrund von Änderungen der Wirbelsturmintensität). Tafel a) betrachtet ein sozioökonomisches Szenario mit einer relativ stabilen Bevölkerungsdichte an der Küste im Laufe des Jahrhunderts {SM.4.3.2}. Risiken für beispielhafte geografische Gegebenheiten wurden anhand von relativen Änderungen des Meeresspiegels bewertet, die für eine Reihe spezifischer Beispiele projiziert wurden: New York City, Shanghai und Rotterdam für ressourcenreiche Küstenstädte, die ein breites Spektrum an Erfahrungen mit Maßnahmen abdecken; South Tarawa, Fongafale und Malé für städtische Atollinseln; Mekong und Ganges-Brahmaputra-Meghna für große tropische landwirtschaftlich geprägte Deltas; und Bykovskiy, Shishmaref, Kivalina, Tuktoyaktuk und Shingle Point für arktische Gemeinschaften in Regionen, die räumlich von einer schnellen glazialisostatischen Anpassung entfernt liegen. {4.2, 4.3.4, SM.4.2} Die Bewertung unterscheidet zwei gegensätzliche Maßnahmenszenarien. „Keine-bis-moderate Maßnahmen“ beschreibt die Bemühungen zum heutigen Zeitpunkt (d. h. keine weiteren signifikanten Handlungen oder neue Arten von Handlungen). „Maximale potenzielle Maßnahmen“ stellt eine Kombination von in vollem Umfang umgesetzten Maßnahmen und damit erhebliche zusätzliche Anstrengungen im Vergleich zu heute dar, wobei minimale finanzielle, soziale und politische Hürden angenommen werden. Die Bewertung wurde für jedes Meeresspiegelanstiegs- und Maßnahmenszenario durchgeführt, wie über die „burning embers“-Darstellung in der Abbildung gezeigt; Risikoniveaus dazwischen sind interpoliert. {4.3.3} Zu den Bewertungskriterien gehören Exposition und Verwundbarkeit (Vermögensdichte, Grad der Verschlechterung von terrestrischen und marinen Pufferökosysteme), Gefährdungen an der Küste (Hochwasser, Küstenerosion, Versalzung), *In-situ*-Maßnahmen (fest installierter Küstenschutz, Wiederherstellung von Ökosystemen oder Schaffung neuer natürlicher Puffergebiete und Absenkungsmanagement) sowie geplante Umsiedlung. Geplante Umsiedlung bezieht sich auf geordneten Rückzug oder Neuansiedlung wie in Kapitel 4 beschrieben, d. h. proaktive und lokale Maßnahmen zur Risikominderung durch Umsiedlung von Menschen, Vermögenswerten und Infrastruktur. Zwangsumsiedlung wird in dieser Bewertung nicht berücksichtigt. Tafel **(a)** hebt auch die relativen Beiträge von *In-situ*-Maßnahmen und geplanter Umsiedlung zur Gesamtrisikominderung hervor. **(b)** veranschaulicht schematisch die Risikominderung (vertikale Pfeile) und Risikoverzögerung (horizontale Pfeile) durch Minderung und/oder Maßnahmen gegen den Meeresspiegelanstieg. **(c)** fasst Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg zusammen und bewertet sie im Hinblick auf ihre Wirksamkeit, Kosten, Zusatznutzen, Nachteile, wirtschaftliche Effizienz und auf mit ihnen verbundene Herausforderungen der politischen Steuerung und Regelung. {4.4.2} **(d)** zeigt typische Schritte eines adaptiven Entscheidungsfindungsansatzes sowie die wichtigsten Voraussetzungen für Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg. {4.4.4, 4.4.5}

\* Anmerkung des Übersetzers: Das englische Original „response“ wird in diesem Zusammenhang als „Maßnahme (in Reaktion auf)“ übersetzt.

+ Anmerkung des Übersetzers: Balken im Farbverlauf von Weiß über Gelb und Rot nach Violett.

## Voraussetzungen

- C.4 Die Ermöglichung von Klimaresilienz und nachhaltiger Entwicklung hängt entscheidend von dringender und ehrgeiziger Emissionsreduktion in Verbindung mit koordinierten anhaltenden und zunehmend ehrgeizigen Anpassungsmaßnahmen ab (*sehr hohes Vertrauen*). Zu den wichtigsten Voraussetzungen für die Umsetzung wirksamer Maßnahmen in Reaktion auf klimabedingte Veränderungen in Ozean und Kryosphäre gehört die Intensivierung der Zusammenarbeit und Koordination unter Regierungsbehörden über räumliche Maßstäbe und Planungshorizonte hinweg. Von wesentlicher Bedeutung sind auch Bildung und Klimakompetenz, Überwachung und Vorhersage, die Nutzung aller verfügbaren Wissensquellen, das Teilen von Daten, Information und Wissen, Finanzen, die Bekämpfung sozialer Verwundbarkeit und Gerechtigkeit sowie institutionelle Unterstützung. Solche Investitionen ermöglichen den Aufbau von Kapazitäten, soziales Lernen und Beteiligung an kontextspezifischer Anpassung sowie die Aushandlung von Zielkonflikten und die Realisierung von positiven Nebeneffekten bei der Verringerung zeitnaher Risiken und dem Aufbau langfristiger Resilienz und Nachhaltigkeit (*hohes Vertrauen*). Dieser Bericht spiegelt den Stand der Wissenschaft bezüglich Ozean und Kryosphäre für niedrige Niveaus globaler Erwärmung (1,5 °C) wider, wie er auch in früheren IPCC- und IPBES-Berichten bewertet wurde. {1.1, 1.5, 1.8.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4, Abbildung 2.7, 2.5, 3.5.2, 3.5.4, 4.4, 5.2.2, Box 5.3, 5.4.2, 5.5.2, 6.4.3, 6.5.3, 6.8, 6.9, Cross-Chapter Box 9, Abbildung SPM.5}**
- C.4.1**  Angesichts von beobachteten und projizierten Veränderungen in Ozean und Kryosphäre werden viele Nationen vor Anpassungsherausforderungen stehen, selbst bei ehrgeiziger Minderung (*sehr hohes Vertrauen*). In einem Szenario mit hohen Emissionen werden laut Projektionen viele Gemeinschaften, die von Ozean und Kryosphäre abhängig sind, während der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit Anpassungsgrenzen (z. B. biophysikalischen, geografischen, finanziellen, technischen, sozialen, politischen und institutionellen) konfrontiert. Zum Vergleich begrenzen Pfade mit niedrigen Emissionen die Risiken durch Veränderungen in Ozean und Kryosphäre in diesem Jahrhundert und darüber hinaus und ermöglichen effektivere Maßnahmen in Reaktion darauf (*hohes Vertrauen*) bei gleichzeitiger Schaffung von Zusatznutzen. Ein tiefgreifender wirtschaftlicher und institutioneller transformativer Wandel wird klimaresistente Entwicklungspfade (*Climate Resilient Development Pathways*) im Kontext von Ozean und Kryosphäre ermöglichen (*hohes Vertrauen*). {1.1, 1.4–1.7, Cross-Chapter Boxen 1–3 in Kapitel 1, 2.3.1, 2.4, Box 3.2, Abbildung 3.4, Cross-Chapter Box 7 in Kapitel 3, 3.4.3, 4.2.2, 4.2.3, 4.3.4, 4.4.2, 4.4.3, 4.4.6, 5.4.2, 5.5.3, 6.9.2, Cross-Chapter Box 9, Abbildung SPM.5}
- C.4.2**  Eine Intensivierung der Zusammenarbeit und Koordination zwischen Verwaltungsbehörden über Maßstäbe, Zuständigkeitsbereiche, Sektoren, Politikbereiche und Planungshorizonte hinweg kann wirksame Maßnahmen in Reaktion auf Veränderungen in Ozean und Kryosphäre sowie auf den Meeresspiegelanstieg ermöglichen (*hohes Vertrauen*). Regionale Zusammenarbeit, einschließlich Verträge und Konventionen, kann Anpassungsmaßnahmen unterstützen; jedoch ist das Ausmaß, in dem die Reaktion auf Folgen und Verluste, die sich aus Veränderungen in Ozean und Kryosphäre ergeben, durch regionalpolitische Rahmenbedingungen ermöglicht wird, derzeit begrenzt (*hohes Vertrauen*). Institutionen, die starke Verbindungen mit lokalen und indigenen Gemeinschaften auf vielen Ebenen herstellen, unterstützen die Anpassung (*hohes Vertrauen*). Koordinierung und Komplementarität zwischen nationalen und grenzüberschreitenden regionalen politischen Strategien kann Bemühungen zur Bewältigung von Risiken für Ressourcensicherheit und -management, wie Wasser und Fischerei, unterstützen (*mittleres Vertrauen*). {2.3.1, 2.3.2, 2.4, Box 2.4, 2.5, 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, Tabelle 4.9, 5.5.2, 6.9.2}
- C.4.3**  Bisherige Erfahrungen – zum Beispiel mit Maßnahmen in Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg, auf wasserbedingte Risiken in einigen Hochgebirgen und auf Risiken des Klimawandels in der Arktis – machen auch den entscheidenden Einfluss der Einnahme einer langfristigen Perspektive bei der Fällung kurzfristiger Entscheidungen deutlich, wobei explizit die Unsicherheit kontextspezifischer Risiken über 2050 hinaus berücksichtigt wird (*hohes Vertrauen*) und politische Steuerungskapazitäten zur Bewältigung komplexer Risiken aufgebaut werden (*mittleres Vertrauen*). {2.3.1, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, Tabelle 4.9, 5.5.2, 6.9, Abbildung SPM.5}

- C.4.4  Investitionen in Bildung und Kapazitätsaufbau auf verschiedenen Ebenen und in unterschiedlichen Maßstäben unterstützen soziales Lernen und langfristige Kapazitäten für kontextspezifische Maßnahmen, um Risiken zu verringern und Resilienz zu erhöhen (*hohes Vertrauen*). Konkret gehören hierzu unter anderem die Nutzung vielfältiger Wissenssysteme und regionaler Klimainformation bei der Entscheidungsfindung sowie die Einbeziehung lokaler Gemeinschaften, indigener Völker und relevanter Interessengruppen in anpassungsfähige Regelungen zur Steuerung und Planungsrahmen (*mittleres Vertrauen*). Die Förderung von Klimakompetenz und die Nutzung lokaler, indigener und wissenschaftlicher Wissenssysteme ermöglicht öffentliches Bewusstsein, Verständnis und soziales Lernen über lokalspezifisches Risiko- und Reaktionspotenzial (*hohes Vertrauen*). Solche Investitionen können Institutionen schaffen – und in vielen Fällen bestehende verändern – sowie fundierte, interaktive und anpassungsfähige Regelungen zur Steuerung ermöglichen (*hohes Vertrauen*). {1.8.3, 2.3.2, Abbildung 2.7, Box 2.4, 2.4, 3.5.2, 3.5.4, 4.4.4, 4.4.5, Tabelle 4.9, 5.5.2, 6.9}
- C.4.5  Eine kontextspezifische Überwachung und Vorhersage von Veränderungen in Ozean und Kryosphäre dient der Anpassungsplanung und -umsetzung und ermöglicht robuste Entscheidungen über Zielkonflikte zwischen kurz- und langfristigen Gewinnen (*mittleres Vertrauen*). Anhaltende langfristige Überwachung, das Teilen von Daten, Informationen und Wissen sowie verbesserte kontextspezifische Vorhersagen, einschließlich Frühwarnsysteme zur Vorhersage extremerer *El Niño/La Niña*-Ereignisse, tropischer Wirbelstürme und mariner Hitzewellen, tragen dazu bei, negative Folgen von Veränderungen im Ozean wie Verluste in der Fischerei und nachteilige Folgen für die menschliche Gesundheit, Ernährungssicherheit, Landwirtschaft, Korallenriffe, Aquakultur, Wald- und Flächenbrände, Tourismus, Naturschutz, Dürre und Hochwasser zu bewältigen (*hohes Vertrauen*). {2.4, 2.5, 3.5.2, 4.4.4, 5.5.2, 6.3.1, 6.3.3, 6.4.3, 6.5.3, 6.9}
- C.4.6  Eine Priorisierung von Maßnahmen zur Bewältigung von sozialer Verwundbarkeit und Gleichstellung unterstützt Bemühungen zur Förderung einer fairen und gerechten Klimaresilienz sowie einer nachhaltigen Entwicklung (*hohes Vertrauen*) und kann durch die Schaffung sicherer Rahmenbedingungen in Gemeinschaften für eine sinnvolle öffentliche Teilhabe, Beratung und Konfliktlösung unterstützt werden (*mittleres Vertrauen*). {Box 2.4, 4.4.4, 4.4.5, Tabelle 4.9, Abbildung SPM.5}
- C.4.7  Diese Bewertung bezüglich des Ozeans und der Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima legt die Vorteile ehrgeiziger Minderung und wirksamer Anpassung für eine nachhaltige Entwicklung und umgekehrt die eskalierenden Kosten und Risiken verzögerter Maßnahmen offen. Das Potenzial, klimaresistente Entwicklungspfade aufzeigen zu können, unterscheidet sich innerhalb und zwischen Ozean, Hochgebirgen und Polargebieten an Land. Die Realisierung dieses Potenzials hängt von transformativem Wandel ab. Dies unterstreicht die Dringlichkeit der Priorisierung von rechtzeitigen, ehrgeizigen, koordinierten und dauerhaften Maßnahmen (*sehr hohes Vertrauen*). {1.1, 1.8, Cross-Chapter Box 1 in Kapitel 1, 2.3, 2.4, 3.5, 4.2.1, 4.2.2, 4.3.4, 4.4, Tabelle 4.9, 5.5, 6.9, Cross-Chapter Box 9, Abbildung SPM.5}





