

1.2 Kryosphäre – Gegenwart und Zukunft

SASCHA WILLMES, GÜNTHER HEINEMANN & ALFRED HELBIG

Kryosphäre – Gegenwart und Zukunft: Im globalen Klimasystem hat die Kryosphäre – mit ihren Komponenten Schnee, Meereis, See- und Flusseis, Eisschilde, Gebirgsgletscher und Permafrost einen großen Einfluss auf den Energiehaushalt der Erdoberfläche und auf die Wechselwirkungen an den Grenzflächen zwischen Landflächen, Ozeanen und der Atmosphäre. Dies beruht u.a. auf ihren besonderen physikalischen Eigenschaften (u.a. der Eis-Albedo-Rückkopplung) und ihrer großen Fläche. Für den globalen Wasserhaushalt sind die in der Kryosphäre gebundenen Wassermengen von erheblicher Bedeutung. Zahlreiche internationale Forschungsprogramme sind vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels auf die Veränderungen und die zukünftige Entwicklung vor allem des arktischen Meereises und der Eisschilde fokussiert. Neben den in-situ Beobachtungen und Fernerkundungsmethoden ermöglichen numerische Modelle einen tieferen Einblick in die Prozesse und Wechselwirkungen der Kryosphäre. Zu den aktuellen Forschungsfeldern gehören vor allem die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen der Kryosphäre und dem globalen Klimasystem, die polaren Ökosysteme und die Verbesserung von Vorhersagen zukünftiger Änderungen innerhalb der Kryosphäre.

Cryosphere – Present and future: In the global climate system the cryosphere and its individual components, i.e. snow, sea ice, lake and river ice, ice sheets, glaciers and permafrost, have a significant impact on the global energy budget and on interactions at the interfaces between land surfaces, oceans and atmosphere. This is due to the specific physical properties of the cryosphere, e.g. the ice-albedo feedback, and its huge areal extent. The amount of water stored in the cryosphere is of immense importance for the global water budget. Numerous international scientific programs aim at investigating changes in the extent of Arctic sea-ice, in particular, as well as ice sheets, in the light of global climate change. Besides in-situ observations and remote sensing techniques, numerical models facilitate a detailed insight into cryosphere processes and interactions. Current fields of research mainly focus on an identification of interactions between the cryosphere and the global climate system, polar ecosystems and the improvement of predictions for future changes in the cryosphere.

Kryosphäre – Bestandteil des globalen Klimasystems

Wasser ist die einzige Substanz auf der Erde, die man unter natürlichen Bedingungen in ihren drei Aggregatzuständen – fest, flüssig, und gasförmig – vorfindet. Die Kryosphäre ist der Teil der Landoberfläche und des Ozeans, in dem Wasser als Eis vorliegt. Sie stellt ein Subsystem des globalen Klimasystems der Erde dar. Über mehrere Wirkungsmechanismen steht die Kryosphäre in direkter Kopplung mit dem gesamten Klimasystem, das aus den weiteren Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre, Biosphäre und dem Bereich menschlicher Aktivität, der Anthroposphäre, besteht. Innerhalb der Kryosphäre (Abb.

1.2-1) unterscheidet man zwischen Bestandteilen, die über den Verlauf eines einzelnen Jahres wenig Änderung zeigen, den sogenannten perennierenden Eisflächen und -volumina (Eisschilde, Gebirgsgletscher und Permafrost), und den saisonalen Eisflächen, deren Ausdehnung im Jahresverlauf stark schwankt (Schnee, Meereis, See- und Flusseis). Die gegenwärtige Ausdehnung und die Volumina einzelner Komponenten der Kryosphäre zeigt Tab. 1.2-1.

Allen Bestandteilen der Kryosphäre ist gemeinsam, dass sie infolge ihrer physikalischen Eigenschaften (Reflexionsvermögen für solare, kurzwellige Strahlung /Albedo, Emissionsvermögen, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Oberflächenrauigkeit,

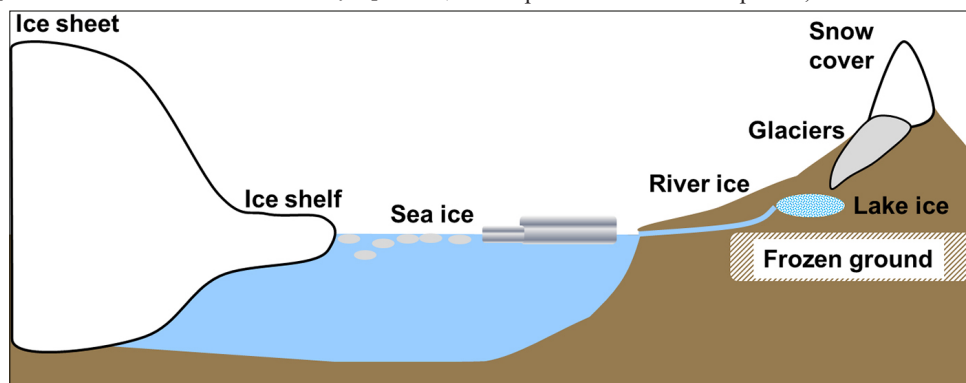


Abb. 1.2-1: Schematische Darstellung der Kryosphäre und ihrer Komponenten Schnee (Snow Cover), Gletscher (Glaciers), Fluss und See-Eis (Lake & River Ice), Permafrost (Frozen Ground), Meereis (Sea Ice), Schelfeis (Ice Shelf) und Eisschilde (Ice Sheet).

Dichte) und ihrer großen Fläche den Energiehaushalt der Erdoberfläche stark beeinflussen und die Wechselwirkungen an den Grenzflächen zwischen Kontinenten bzw. Ozeanen und der Atmosphäre entscheidend kontrollieren.

Von allen Teilen der Kryosphäre sind die mit starkem Jahresgang, Schneedecke und Meereis, am empfindlichsten gegenüber Klimaänderungen. Dabei spielt die Albedo der Schnee- und Eisflächen die wichtigste Rolle. Im globalen Mittel werden ca. 30% der Sonnenenergie vom Planeten Erde reflektiert (planetare Albedo). Da ausgedehnte Flächen von Schnee und schneebedecktem Eis mit einer sehr hohen Albedo von bis zu 90% stark dazu beitragen, würde eine Erde ohne Kryosphäre weit mehr Sonnenenergie absorbieren und damit wärmer sein.

Die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung beschreibt die Wechselwirkungen, die in Gang kommen, wenn sich die Ausdehnung der globalen Eisflächen ändert. So würde beispielsweise ein Rückgang der Schneeflächen zu einer erhöhten Absorption solarer Strahlung am Erdboden führen, was wiederum das weitere Abschmelzen des Schnees begünstigt und damit den Prozess positiv verstärkt. Beim Rückgang der Meereisfläche im Sommer findet die Rückkopplung ebenso statt, in den Übergangsjahreszeiten ist das Vorzeichen der Verstärkung aufgrund der Wechsel-

wirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre weniger eindeutig. Der Prozess der Meereisbildung steht über die thermohaline Zirkulation in direktem Zusammenhang mit dem Klimasystem, da die Bildung von kaltem, salzreichem Wasser während des Gefrierprozesses zu Absinkbewegungen führt, die eine wichtige Rolle im Antrieb der globalen ozeanischen Umwälzbewegungen spielen. Dieses Zirkulationssystem verbindet die großen Ozeane Atlantik, Indik und Pazifik miteinander, transportiert Wärme aus den Tropen in die polaren Gebiete und stellt eine direkte Verbindung zwischen Arktis und Antarktis her (TURNER & MARSHALL 2011).

Für den globalen Wasserhaushalt sind die in der Kryosphäre gebundenen Wassermengen von erheblicher Bedeutung. Sie machen etwa 2,1% des Weltwasservorrates aus; ohne das Meereis ergibt sich ein Anteil von etwa 1,8%. Der Süßwasservorrat der Erde besteht zu 85% aus dem Volumen der Eisschilde der Antarktis und Grönlands, aller Gebirgsgletscher und der ständig liegenden Schneedecke (DYCK & PESCHKE 1983, MARCINEK 1997). Allein der antarktische Eisschild enthält 70% des globalen Süßwasservorrats. Auch in der Atmosphäre befindet sich Eis mit einem Anteil von 0,01%, das eine wichtige Rolle im globalen Energie-, Wasser- bzw. Eiskreislauf spielt (dieses Eis wird aber nicht zur Kryosphäre gezählt).

Rasch veränderliche Komponenten der Kryosphäre					
		Ausdehnung (Mio km ²)			Zeitraum
Typ und Erdhälfte		Mittl. jährliches Minimum	Mittl. jährliches Maximum	Globales ganzjähriges Mittel	
Meereis	Nordhalbkugel	6,4 (SEP)	15,2 (MRZ)	ca. 23	1979-2013
	Südhalbkugel	3,1 (FEB)	18,5 (SEP)		
Schnee (ohne Meereis und Eisschilde)	Nordhalbkugel	3,0 (AUG)	47,1 (JAN)	ca. 20	1967-2014
	Südamerika <small>(Südamerika ist der einzige Kontinent der Südhemisphäre, auf dem in den Wintermonaten eine nennenswerte Schneebedeckung auftritt)</small>	-	0,3 (JUL)		1979-2006

Perennierende Komponenten		
Region	Fläche (Mio km ²)	Prozent der globalen Landfläche ¹⁾
Grönländischer Eisschild	1,77	1,2
Antarktischer Eisschild	12,25	8,3
Gebirgsgletscher	0,74	0,5
Terrestrischer Permafrost	13,3 – 17,7	9 - 12

Tab. 1.2-1: Fläche und Volumen einzelner Komponenten der Kryosphäre (Daten aus PARKINSON 2014 (Meereis), ESTILOV et al. 2015 (Schnee Nordhalbkugel); FOSTER et al. 2009 (Schnee Südamerika), IPCC 2013a)

¹⁾Globale Landfläche 147,6 Mio km²

Die Eisschilde (s. Kap. 6 in diesem Band) und Gebirgsgletscher (s. Kap. 4 in diesem Band) entstehen und existieren in Gebieten des Festlandes, die in den Regionen der Akkumulation (Nährgebiete) mehr festen Niederschlag erhalten als in den Regionen der Ablation (Zehrgebiete) abschmelzen und verdunsten kann. Mit einer Geschwindigkeit, die von ihrer Mächtigkeit, vom Nachschub und vom Gefälle des Gletscherbodens abhängt, schieben sich Eisschilde und Gletscher aus den Nährgebieten in die Zehrgebiete und finden ihre Grenze dort, wo sich Massenverlust und Nachschub die Waage halten.

Über dem Antarktischen Kontinent wölbt sich ein riesiger Eisschild, der 98,6% der Kontinentalfläche bedeckt und im Klimaregime der Südpolarregion als der bedeutendste Einflussfaktor wirkt. In seinem zentralen Teil weist der Eisschild eine maximale Mächtigkeit von mehr als 4 km auf und besitzt eine mittlere Höhe von 2.450 Metern. Der Eisschild bedeckt drei morphologisch unterschiedliche Zonen: die Ost-Antarktis mit einer Fläche von 9,90 Mio km², die West-Antarktis mit 1,96 Mio km² und die Antarktische Halbinsel mit 0,39 Mio km². Die West-Antarktis ist mit einer mittleren Höhe von 1119 m niedriger als die Ostantarktis (TURNER & MARSHALL 2011).

Der Grönländische Eisschild befindet sich am Rand des Nordpolargebietes. Seine Ausdehnung beträgt 1,77 Mio km², das sind 81% der Fläche Grönlands. Die mittlere Mächtigkeit des Eisschildes längs des Breitenkreises 72° N im zentralen Teil beträgt 2.300 m, die maximale Mächtigkeit erreicht 3.300-3.400 m, nach Norden und Süden nimmt sie ab.

Wegen der kleinen Gesamtfläche der Gebirgsgletscher und ihres geringen Volumens (kleiner 1% des gegenwärtigen gesamten Eisvolumens) sind keine nennenswerten Rückkopplungen auf das globale Klima zu erwarten. Sie sind jedoch sehr empfindliche Indikatoren für Klimaänderungen.

Meereis (s. Kap. 5 in diesem Band) bildet sich in den polaren Ozeanen der Arktis und Antarktis durch eine Abkühlung der oberen Ozeanschicht, wenn die Lufttemperatur im Winter unter den Gefrierpunkt für Meerwasser sinkt. Die Ausdehnung von Meereis variiert sehr stark im Verlaufe eines Jahres. Meereis reflektiert im Vergleich zum offenen Ozean einen hohen Anteil der kurzwelligen solaren Einstrahlung. Weiterhin reduziert Meereis den Energieaustausch durch turbulente Flüsse zwischen Ozean und Atmosphäre deutlich und führt damit in den Wintermonaten auf großen Flächen zu einer starken Entkopplung dieser beiden Klimasystemkomponenten. Die Ausdehnung von Meereis zeigt insbesondere in der Arktis in den Herbstmonaten einen stark negativen Trend für die vergangenen 35

Jahre, wohingegen in der Antarktis eine leichte Zunahme festzustellen ist.

Schnee (s. Kap. 3 in diesem Band) findet sich auf allen Komponenten der Kryosphäre (Meereis, Gletscher, Eisschilde, Permafrost) wie auch auf den Landflächen v.a. der Nordhemisphäre. Er zeigt mit Ausnahme seines Auftretens auf dem antarktischen Eisschild und im Inneren Grönlands jedoch eine ausgeprägte Saisonalität, da er in den Sommermonaten nahezu komplett abschmilzt. Physikalisch zeichnen ihn vor allem sein besonders hohes Reflexionsvermögen für solare Strahlung sowie seine Eigenschaft der Unterbindung des Wärmeaustauschs zwischen Unterlage (Meereis, Boden, Fels) und Atmosphäre aus.

Im Gebiet des Permafrost (s. Kap. 3 in diesem Band) liegt die Bodentemperatur nahe oder unter 0° C für mindestens zwei aufeinanderfolgende Jahre (IPCC 2013a). Das unterirdische Eis befindet sich sowohl in der permanent als auch jahreszeitlich gefrorenen Bodenschicht, die eine Fläche von bis zu 18 Mio km² bzw. 49 Mio km² überdecken. Besonders großen Raum nimmt der Permafrostboden auf der Nordhemisphäre (ca. 25% der Landfläche) ein, vor allem in den subpolaren Breiten Nordamerikas und Eurasiens. Die Mächtigkeit des ständig gefrorenen Bodens erreicht in Sibirien bis zu 1.300-1.500 m, in Nordkanada 400-600 m. Sehr große Teile des Dauerfrostbodens tauen im Sommer an der Oberfläche auf. Diese aktive Schicht ist zwischen 0,5 und 4 m mächtig. Beim Auftauen wird das Treibhausgas Methan freigesetzt, das zur globalen Klimaänderung beiträgt (STRAHLER & STRAHLER 1996, SLAYMAKER & KELLY 2007).

Kryosphäre als Forschungsgegenstand

Die Erforschung der Kryosphäre stellt aufgrund ihrer geografischen Besonderheiten nach wie vor eine besondere Herausforderung dar. Die Polargebiete zeichnen sich v.a. in den Wintermonaten durch Bedingungen aus, die eine Datenerfassung vor Ort nur unter dem Einsatz einer hoch spezialisierten Technik und sehr aufwendigen Logistik erlauben (extreme Kälte, Abgeschiedenheit, schlechte Zugänglichkeit). Das gilt vor allem für die Antarktis, während in den arktischen Regionen Messprogramme der nationalen meteorologischen und hydrologischen Dienste in großem Umfang Daten zum Zustand von Kryosphäre und Atmosphäre erheben. Dazu gehören auch die von den UN-Organisationen koordinierten (bezahlt wird aus nationalen Forschungsprogrammen) Beobachtungsprogramme Global Climate Observing System (GCOS), das Global Terrestrial Observing System (GTOS) und das Global Ocean Observing System (GOOS) (SLAYMAKER & KELLY 2007). Nationale Initiativen und interdisziplinäre Forschungs-

programme bündeln sich auf internationaler und multi-lateraler Ebene für die Arktis im International Arctic Science Committee (IASC) und für die Antarktis im Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR).

Beginnend mit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGJ) 1957-1958 (3. Internationales Polarjahr) intensivierte sich die rezente Polarforschung in erheblichem Maße. In der Antarktis wurden 48 permanente und temporäre Forschungsstationen eingerichtet, von denen viele bis heute bestehen und ausgebaut wurden. Mit dem IGJ wurde die internationale Gemeinschaftsarbeit fortgesetzt, die mit dem 1. Internationalen Polarjahr 1882-1883, dem 2. Internationalen Polarjahr 1932-1933 begonnen hatte und in der Gegenwart mit dem 4. Internationalen Polarjahr 2007-2009 ihren vorläufigen Höhepunkt fand. Inzwischen sind zahlreiche Expeditionen und Forschungsprojekte vieler Länder auf die Auswirkungen des Klimawandels in polaren Regionen fokussiert und liefern wichtige Daten über die polaren Ökosysteme und deren Gefährdung durch die Erkundung und Nutzung von Rohstoffen. Das trifft vor allem auf den arktischen Ozean und die ihn umgebenden Küstenregionen zu.

Die Untersuchungen der Kryosphäre stützen sich im Wesentlichen auf drei Säulen:

- 1) Die direkte (in-situ) Beobachtung bezeichnet die Messungen am Forschungsobjekt selbst durch direkten Kontakt. Sie erfordert eine anspruchsvolle, meist teure Logistik und ihre Durchführbarkeit wird sehr stark von den vorherrschenden Witterungsbedingungen mitbestimmt. In-situ Messungen liefern sehr detaillierte Einblicke in die physikalischen Eigenschaften der Kryosphäre und in die relevanten Prozesse. Sie sind jedoch meistens auf einen sehr begrenzten räumlichen Ausschnitt beschränkt.
- 2) Über Methoden der Fernerkundung werden v.a. mittels Satelliten und Flugzeugen großflächig Daten über den Zustand der Kryosphäre erhoben. Dabei wird die von den Oberflächen reflektierte Strahlung bzw. deren Eigenstrahlung dazu verwendet, um Informationen über die Ausdehnung einzelner Kryosphärenkomponenten sowie deren physikalische Eigenschaften abzuleiten (passive Fernerkundung). Bei aktiven Fernerkundungsverfahren (Laser- und Radarsysteme) wird Strahlung vom Satelliten zur Erdoberfläche ausgesendet und das von der Oberfläche zurückgestreute Signal am Sensor aufgezeichnet. Insbesondere mit polumlaufernden Satelliten kann eine tägliche, globale Abdeckung der Kryosphäre erreicht werden.
- 3) Die Modellierung fasst die bestehenden Kenntnisse der ablaufenden Prozesse mittels numerischer Modelle zusammen und versucht dabei neue Zusam-

menhänge zwischen den einzelnen Prozessen und Wechselwirkungen zu identifizieren, den aktuellen und vergangenen Zustand der Kryosphäre zu analysieren und auf der Basis von Projektionen die zukünftige Entwicklung abzuleiten.

Einen Überblick über die Beobachtungen zur Kryosphäre bietet das online-Portal der WMO <http://globalcryospherewatch.org>.

Für die Analyse der Ausdehnung von Meereis liefern Satelliten seit mehr als drei Jahrzehnten die entsprechende Datengrundlage (PARKINSON 2014). Die Beobachtungen sind von grundlegender Bedeutung für Klimastudien und für den Antrieb von Modellen zur Simulation der Atmosphäre und des Systems Ozean/Eis. Wesentliche methodische Fortschritte wurden in den vergangenen Jahren auch in der flächendeckenden Beobachtung der Dicke von Meereis gemacht, v.a. durch neue Satellitensysteme. Um detailliertere Erkenntnisse über den Zustand des Meereises zu erlangen und um die Interpretation der Satellitendaten zu verbessern, werden im Rahmen von Schiffsexpeditionen regelmäßig auch in-situ Messungen durchgeführt. Die Bewegung von Meereis (Meereisdrift) wird mit einem ganzen System von sogenannten Driftbojen verfolgt, die regelmäßig ihre aktuelle Position per Satellit übermitteln und so einen guten Einblick in die Schwankungen der Richtung und Geschwindigkeit von Meereisbewegungen liefern, die durch Ozeanströmungen und Winde beeinflusst werden.

Aktuelle Meereisbeobachtungen und früher erhobene Daten werden auf einem vom Alfred-Wegener-Institut AWI Bremerhaven betriebenen Datenportal (<http://www.meereisportal.de>) archiviert und grafisch aufbereitet. Weitere detaillierte Daten zur globalen Schnee- und Eisbedeckung werden vom U.S. National Snow and Ice Data Center (NSIDC, <http://nsidc.org>) bereitgestellt.

Auch beim Schnee sind in erster Linie die globale Ausdehnung und deren Schwankungen von wissenschaftlichem Interesse. Diese lassen sich sehr gut unter Verwendung von Satellitendaten dokumentieren (ESTILOW et al. 2015). Die jährliche Schnee-Niederschlagsmenge im Nährgebiet von Gletschern sowie auf den Grönländischen und Antarktischen Eisschilden ist für deren Massenbilanz von zentraler Bedeutung. Eine entscheidende Einflussgröße ist die Dauer der Schneeschmelze. Aktuelle Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass insbesondere auf dem Grönländischen Eisschild und dem arktischen Meereis der Schnee immer früher im Laufe des Jahres zu schmelzen beginnt (u.a. HÄKKINEN et al. 2014). Die Mächtigkeit der Schneeeauflage ist eine weitere wichtige Kenngröße bei der Erforschung der Kryosphäre. Zusammen mit

der Dichte des Schnees lässt sie sich in die äquivalente Wassermenge umrechnen. Diese Größe stellt insbesondere für schneebedeckte Landflächen eine wichtige Information dar, da sich aus ihr wichtige hydrologische Erkenntnisse ableiten lassen. Messdaten zur globalen Schneebedeckung werden beispielsweise im online-Portal GlobSnow (<http://www.globsnow.info>) archiviert.

Kryosphäre und Klimaänderung

Die Kryosphäre reagiert aus physikalischen Gründen sehr empfindlich auf das Über- oder Unterschreiten des Gefrierpunktes in Wasserkörpern, in den Landmassen und in der bodennahen Atmosphäre. Die Lufttemperatur, der Niederschlag und die solare Einstrahlung verändern wichtige Zustandsgrößen der Kryosphäre wie z.B. die Meereisbedeckung oder die Ausdehnung der Schneedecke. Deren Änderungen haben nun wiederum Einfluss auf die großräumigen Zirkulationssysteme sowohl im Ozean als auch in der Atmosphäre und die damit verbundenen advektiven Wärmetransporte.

Darüber hinaus stellen insbesondere das Meereis und die Randbereiche der großen Eisschilde einen wichtigen Lebensraum für eine große Anzahl von Lebewesen dar. Diese Bereiche haben sich als bedeutend für die Nettoprimärproduktion und damit auch für die globale Nahrungskette herausgestellt.

Für die Schifffahrt in den arktischen Regionen ist die zukünftige Veränderung der Meereisfläche im Arktischen Ozean von großer Bedeutung. Als Folge der Klimaerwärmung und des Eisrückganges waren die Nordwest-Passage und die Nordost-Passage im August 2008 erstmals gleichzeitig eisfrei (NSIDC 2008).

Im aktuellen 5. Bericht des Weltklimarates 2013 (IPCC, 2013a, b) sind die rezenten Änderungen in den Komponenten der Kryosphäre ausführlich dargestellt worden. Danach haben während der letzten beiden Jahrzehnte die Eisschilde in Grönland und in der Antarktis an Masse verloren, die Gletscher sind fast überall in der Welt weiter abgeschmolzen, und die Ausdehnung des arktischen Meereises sowie der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre im Frühjahr haben weiter abgenommen. Aus den Modellrechnungen einer Vielzahl von Klimamodellen unter Annahme von verschiedenen Szenarien der Konzentrationsänderung der Treibhausgase ist die zukünftige Entwicklung abgeleitet worden.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass im 21. Jahrhundert bei einem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur die arktische Meereisbedeckung weiter an Fläche verlieren und noch dünner wird sowie die Schneebedeckung im Frühjahr auf der Nordhemisphäre abnehmen wird. Das Gletschervolumen wird weiter zurückgehen. In der Antarktis wird bei einem Anstieg

der mittleren globalen Erdoberflächentemperaturen am Ende des 21. Jahrhunderts mit geringer Wahrscheinlichkeit eine Abnahme der Meereis-Ausdehnung und seines Volumens projiziert.

Es gilt praktisch als sicher, dass die Ausdehnung des oberflächennahen (obere 3,5 m) Permafrosts in höheren nördlichen Breiten bei einem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur abnehmen wird. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für das Modellmittel eine Abnahme der Fläche des oberflächennahen Permafrosts zwischen 37% und 81% projiziert (IPCC 2013b).

Aktuelle Forschungsfragen

In den vergangenen 20 Jahren wurden in der Polarforschung erhebliche Fortschritte erzielt. Dazu hat nicht zuletzt das Internationale Polarjahr 2007-2009 beigetragen, das auch zahlreiche internationale Kooperationen ermöglicht hat. Ausgehend vom aktuellen Stand der Wissenschaft bleibt für die Zukunft eine große Anzahl an offenen Forschungsfragen. Für die Antarktis wurden die wichtigsten Fragen im Rahmen des sog. Horizon-Scans ermittelt (KENNICUTT et al. 2014). Für die Arktis findet aktuell die dritte Phase der International Conference on Arctic Research Planning (ICARP III 2015) statt, bei der die wissenschaftlichen Prioritäten der Arktisforschung der kommenden Dekade ermittelt werden. Auf nationaler Ebene entwickelt das Nationalkomitee SCAR/IASC (<http://www.scar-iasc.de>) z.Z. eine deutsche Polarforschungsagenda für die kommenden 10-15 Jahre. In Bezug auf die Kryosphäre wird es beispielsweise nötig sein, die Wechselwirkungen zwischen Kryosphäre, Atmosphäre und Ozean besser zu verstehen und zu quantifizieren. Die Ursachen der beobachteten sehr unterschiedlichen Veränderungen in der Meereisbedeckung in beiden Hemisphären sind noch weitgehend wenig verstanden. Auch die zukünftige Entwicklung des Meereises und Auswirkungen auf die Mittleren Breiten werden im Fokus der zukünftigen Forschung stehen (JAISER et al. 2012, VIHMA 2014). Es gilt auch, mit Hilfe eines besseren Prozessverständnisses die Simulationen mit Klimamodellen zu verbessern.

Im Rahmen der Studien der Eisschildentwicklung ist es von großem Interesse, die Prozesse zu verstehen, die abrupte Klimaänderungen in Warmzeiten und am Übergang von Eiszeiten in Warmzeiten verursachen. Dabei sind Fragen der Stabilität der polaren Eisschilde und Schelfeisregionen von essentieller Bedeutung. Insgesamt wird es wichtig sein, die kurzen Zeiträume von nur wenigen Jahrzehnten, in denen in-situ Beobachtungsdaten vorhanden sind, in einen paläoklimatischen Kontext zu setzen.

Da in der Arktis ein besonders starker Rückgang der Meereisfläche im Spätsommer beobachtet wird und Klimamodelle eine Meereis-freie Arktis noch in diesem Jahrhundert simulieren, wird sich die Forschung in den kommenden Jahren auch mit den potenziellen Konsequenzen einer Meereis-freien Arktis auseinandersetzen. Dieses Thema beinhaltet nicht nur naturwissenschaftliche Forschungsaspekte, sondern betrifft auch juristische und sozio-ökonomische Problemfelder wie die Nutzung von Ressourcen und Seewegen.

Literatur

- DYCK, S. & G. PESCHKE (1983): Grundlagen der Hydrologie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin. 388 S.
- ESTILOW, T. W., YOUNG, A. H. & D. A. ROBINSON (2015): A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring, *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 137-142, doi:10.5194/essd-7-137-2015.
- FOSTER, J. L., HALL, D. K., KELLY, R. E. J. & L. CHIU (2009): Seasonal snow extent and snow mass in South America using SMMR and SSM/I passive microwave data (1979-2006).
- HÄKKINEN, S., D. K. HALL, C. A. SHUMAN, D. L. WORTHEN & N. E. DIGIROLAMO (2014): Greenland ice sheet melt from MODIS and associated atmospheric variability, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1600-1607, doi:10.1002/2013GL059185.
- ICARP-III (2015): <http://icarp.iasc.info/>.
- IPCC (2013a): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-30, doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- IPCC (2013b): Summary for Policy Makers. Herausgeber der deutschen Übersetzung: ProClim – www.proclim.ch, proclim@scnat.ch / Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Projektträger im DLR – www.de-ipcc.de, info@de-ipcc.de / Umweltbundesamt GmbH – www.umweltbundesamt.at, publikationen@umweltbundesamt.at.
- JAISER, R., DETHLOFF, K., HANDORF, D., RINKE, A. & J. COHEN (2012): Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A* 64, 11595.
- KENNICUTT II, M. C., CHOWN, S. L., CASSANO, J. J., LIGGETT, D., MASSOM, R., PECK, L. S., RINTOUL, S. R., STOREY, J. W. V., VAUGHAN, D. G., WILSON, T. J. & W. J. SUTHERLAND (2014): COMMENT: six priorities for Antarctic science, *Nature*, 512, 23–25, doi:10.1038/512023a.
- MARCINEK, J. (1997): Kap.: 5. Allgemeine Hydrogeographie. In: Hendl, M. & H. Liedtke (Hrsg.): *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*. Klett-Perthes Verlag. 3. Aufl. 449-510.
- NSIDC (2008): <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2008/08/arctic-shortcuts-open-up-decline-pace-steady/>
- PARKINSON, C. L. (2014): Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends. *J. Climate*, 27, 9377–9382. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00605.1>
- SLAYMAKER, O. & R. E. J. KELLY (2007): *The cryosphere and global environmental change*. Blackwell Publishing 261 pp.
- STRAHLER, A. & A. STRAHLER (1996): *Physical Geography. Science and Systems of the Human Environment*. John Wiley & Sons, Inc. 637 pp.
- TURNER, J. & G. J. MARSHALL (2011): *Climate Change in the Polar Regions*. Cambridge Univ. Press, 434 pp.
- VIHMA, T. (2014): Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review, *Surv Geophys* (2014) 35:1175–1214, doi:10.1007/s10712-014-9284-0.

Kontakt:

Dr. Sascha Willmes
 Prof. Dr. Günther Heinemann
 Prof. Dr. Alfred Helbig
 FB VI Raum- und Umweltwissenschaften
 Fach Umweltmeteorologie
 Universität Trier
willmes@uni-trier.de

Willmes, S., G. Heinemann & A. Helbig (2015): *Kryosphäre – Gegenwart und Zukunft*. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 25-30. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de - doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.04