1.9 Ozean und Kryosphäre

Die Veränderungen im Klimasystem manifestieren sich auch im Ozean und in der Kryosphäre. Letztere umfasst Schnee und Eis an der Erdoberfläche (Land und Wasser) sowie die Regionen mit Permafrost im Untergrund. Typische Auswirkungen sind die Erwärmung und Versauerung der Weltmeere – mit Konsequenzen für die marinen Ökosysteme –, der Anstieg des Meeresspiegels, der Rückgang von Gletschern, polaren Eisschilden, arktischem Meereis und der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre sowie die Erwärmung und das Auftauen von Permafrost. Für die Schweiz sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Veränderungen bei Schnee, Gletschern und Permafrost von grosser Bedeutung. In den letzten beiden Jahrzehnten wurden für diese Komponenten der Kryosphäre stark rückläufige Trends erfasst, die im Einklang mit der starken Zunahme der Lufttemperatur sind. Selbst wenn die weitere Erwärmung sofort gestoppt würde, gingen Gletscher und Permafrost noch über mehrere Jahrzehnte zurück, da sie nur sehr verzögert auf ein verändertes Klima reagieren. Der Meeresspiegelanstieg würde sogar noch über Jahrhunderte andauern, da die Wärme aus der Atmosphäre nur langsam via Ozeanoberfläche in die Tiefsee transportiert wird. Bei einer weiteren Erwärmung werden diese Trends hingegen beschleunigt voranschreiten.

*Gian-Kasper Plattner (Universität Bern, *neu WSL), Thomas F. Stocker (Universität Bern), Christoph Marty (SLF), Jeannette Nötzli (Universität Zürich, *neu SLF), Frank Paul (Universität Zürich), Christian Huggel (Universität Zürich)*

Globale Beobachtungen

Im Ozean zeigt sich die Klimaänderung unter anderem in einer Zunahme der insgesamt im Meer gespeicherten Energie und – damit eng verbunden – der Erwärmung des Meerwassers, im steigenden Meeresspiegel und in der Versauerung des Meerwassers aufgrund der Aufnahme von zusätzlichem CO_2 aus der Atmosphäre. In der Kryosphäre zeigt sich die Klimaänderung unter anderem in der Abnahme der polaren Eismassen, dem starken und teilweise beschleunigten Rückzug von Gletschern weltweit, der Abnahme der Ausdehnung des Meereises in der Arktis, der Abnahme der Schneebedeckung insbesondere auf der Nordhemisphäre und im Frühjahr sowie der Erwärmung und dem Auftauen von Permafrost in den meisten Regionen der Welt. Die Änderungen in der Kryosphäre und im Ozean sind zum Teil eng verknüpft. So tragen das Abschmelzen der polaren Eisschilde und der weltweite Rückgang der Gletscher substanziell zum Anstieg des globalen Meeresspiegels bei (Abb. 1.20) und das erwärmte Meerwasser beschleunigt das Schmelzen der vergleichsweise grossen Gletscher, die ins Meer münden. Alle Veränderungen sind durch weltweite Messungen vor allem seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bestens belegt (IPCC 2013/WGI).

Der Ozean wird wärmer und versauert

Der Ozean hat sich über die letzten Jahrzehnte erwärmt (IPCC 2013/WGI/Chap.3). Die grösste Erwärmung wurde in den obersten 700 Metern gemessen. Insgesamt sind mehr als 90 Prozent der zwischen 1971 und 2010 zusätzlich im Klimasystem angesammelten Energie im Ozean in Form von Wärme gespeichert worden und haben zur beobachteten Erwärmung des Meerwassers bis in grosse Tiefen geführt. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass die durch den Menschen verursachte Temperaturzunahme wesentlich zur Erwärmung der Meere oberhalb von 700 Metern Tiefe beigetragen hat (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Änderungen von Temperatur und Salzgehalt im Ozean beeinflussen durch deren Einfluss auf die Dichte die Schichtung von Wassermassen und die grossräumigen Ozeanströmungen. Es gibt aber bislang keine Hinweise für eine Änderung in der globalen Ozeanzirkulation und insbesondere in der Stärke der sogenannten Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation (der Golfstrom ist Teil dieser Zirkulation) (IPCC 2013/WGI/Chap.3). Schwankungen dieser Zirkulation beeinflussen wesentlich den Wärmetransport vom Äquator in die hohen nördlichen Breiten und damit auch das Klima in Europa und im Nordatlantik. Die Temperaturen an der Ozeanoberfläche beeinflussen ausserdem Klimaphänomene wie Dürren in Nordafrika oder das Auftreten und die Häufigkeit von tropischen Wirbelstürmen im Atlantik (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

Rund ein Viertel des durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre ausgestossenen CO_2 wird heute vom Ozean aufgenommen (IPCC 2013/WGI/Chap.3 und Chap.6). Diese Aufnahme von zusätzlichem CO_2 im Ozean verlangsamt den Anstieg der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre und damit den Klimawandel, führt aber gleichzeitig zu einer Abnahme des pH-Wertes[1] (d. h. einem Anstieg des

1 pH ist eine Masseinheit von Säure mit einer logarithmischen Skala: Eine Abnahme des pH-Wertes um eine Einheit entspricht einem 10-fachen Anstieg des Säuregehalts.

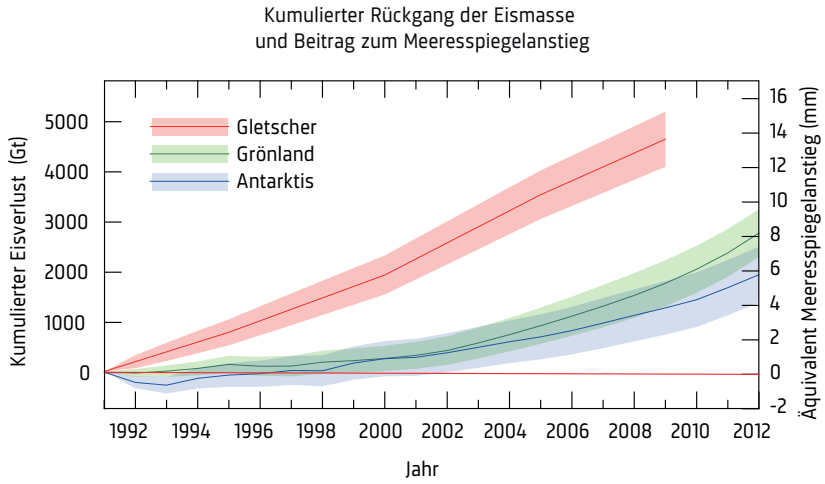

Abbildung 1.20: Abnahme der Eismasse von Gletschern und polaren Eisschilden und Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 1990 bis 2012. Die Figur ist eine Synthese der verfügbaren feld- und satelliten-basierten Beobachtungsreihen. Der Gletscherkurve liegen Daten von ungefähr 170 000 Gletschern weltweit zugrunde (totale Fläche von etwa 730 000 km²). Die Beiträge von Gletschern in der Peripherie der polaren Eisschilde werden aus beobachtungstechnischen Gründen in den Grönland- und Antarktis-Kurven mitberücksichtigt. Die schattierten Bänder zeigen die jeweiligen Unsicherheitsbereiche. (Quelle: Design nach IPCC 2013/WGI/Fig.4-25_errata respektive Fig. TS.3_errata, jeweils das untere Panel)

Säuregehalts) und damit zur Versauerung des Ozeans. Dies hat weitreichende Konsequenzen für Meeresökosysteme und die Nahrungskette, da zum Beispiel die Bildung von Kalkschalen erschwert wird (IPCC 2013/WGI/Chap.3; IPCC 2014/WGII/Chap.6).

Kryosphäre: Rückgang von Eis, Schnee und Permafrost

Weltweit sind die Gletscher über die letzten Jahrzehnte massiv geschrumpft und haben dabei an Ausdehnung und Masse verloren. Der Eisverlust hat sich seit 1993 *sehr wahrscheinlich* noch beschleunigt. Die Ausdehnung der Gletscher ist zudem bei weitem noch nicht wieder im Gleichgewicht mit dem heute vorherrschenden Klima. Das bedeutet, dass die Gletscher auch in Zukunft weiter schrumpfen werden, selbst ohne weitere Zunahme der Temperatur (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Der Mensch hat *wahrscheinlich* mit seinen Aktivitäten zum beobachteten Gletscherrückgang seit den 1980er-Jahren beigetragen (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Die polaren Eisschilde in der Arktis und in der Antarktis haben über die letzten zwei Jahrzehnte insgesamt an Masse verloren (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Basierend auf den seit 1992 verfügbaren Satellitenmessungen wurde festgestellt, dass der Grönländische Eisschild seit 1992 Jahr für Jahr an Masse verloren hat. Dieser Verlust hat zwischen 2002 und 2011 zugenommen. Die Massenverluste des Antarktischen Eisschildes (überwiegend durch Kalbung, das heisst dem Abbrechen grösserer Eismassen) haben sich seit 1992 ebenfalls beschleunigt. Im Gegensatz zu Grönland, wo die Eisverluste auf grosse Bereiche des Eisschildes verteilt sind, beschränken sich die Eisverluste in der Antarktis auf einige wenige Gebiete direkt an der Küste. Der Mensch hat *wahrscheinlich* mit dem aus seinen Aktivitäten[2] resultierenden Temperaturanstieg zum zunehmenden Eisverlust in Grönland beigetragen. Natürliche Faktoren und natürliche Klimavariabilität müssen aber sowohl in Grönland als auch in der Antarktis als Ursachen mitberücksichtigt werden (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Die Änderung in der Ausdehnung der Meereisbedeckung in den polaren Gebieten ist über die letzten Dekaden auf der Nord- und Südhemisphäre entgegengesetzt verlaufen. So hat die Ausdehnung des Arktischen Meereises von 1979 bis 2012 um 3,5 bis 4,1 Prozent pro Jahrzehnt abgenommen. Die Abnahme wurde in allen Jahreszeiten beobachtet, war aber am stärksten in den Sommermonaten (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Klimarekonstruktionen zeigen auf, dass ein Meereisrückgang in der Arktis – wie in den letzten 30 Jahren beobachtet – aussergewöhnlich ist und in den letzten fast 1500 Jahren nie vorgekommen ist (IPCC 2013/WGI/Chap.5). Die Meereisbedeckung um die Antarktis hat hingegen zwischen 1979 und 2012 um 1,2 bis 1,8 Prozent pro Jahrzehnt zugenommen (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Die Ursachen für diese unterschiedlichen Entwicklungen sind derzeit Gegenstand intensiver Forschung (IPCC 2013/WGI/Chap.10), denn die Meereisbedeckung in den polaren Gebieten ist nicht zuletzt wegen der sogenannten Eis-Albedo-Rückkopplung[3] von grosser Bedeutung für das globale Klimasystem.

2 Diese umfassen hauptsächlich die Verbrennung von fossilen Energieträgern (Kohle, Öl, Gas), die globale Abholzung und die Zementproduktion (s. a. Kap. 1.1 Einleitung, S. 28).

3 Die durch die Erwärmung verursachte Änderung von eis- und schneebedeckten Flächen zu eis- und schneefreien Flächen führt zu verminderter Reflexion der einfallenden Sonneneinstrahlung und damit zu erhöhter Aufnahme der Energie und verstärkter Erwärmung. Man spricht von einem positiven Rückkopplungseffekt

Die meisten der Regionen der Welt, für die lange Messreihen vorhanden sind, zeigen insbesondere in tiefen Lagen eine Abnahme der Schneedecke als Folge der steigenden Temperaturen. Es gibt allerdings auch einzelne Regionen mit einer Zunahme, zum Beispiel in den höheren Lagen von Norwegen, wo eine Zunahme der Niederschläge auch eine Zunahme der maximalen Schneehöhe bewirkt hat (IPCC 2013/WGI/Chap.4.5).

Permafrost findet sich hauptsächlich in der Arktis und in höheren Gebirgslagen. Betrachtet man dessen weltweite Veränderungen, stehen vor allem die riesigen, im polaren Flachland gelegenen Regionen von Sibirien, Kanada und Alaska im Fokus. In diesen arktischen Gebieten zeigen die Messstationen seit etwa 1980 eine Zunahme der Temperaturen in 10 bis 20 Metern Tiefe (Romanovsky et al. 2010). Der auftauende Permafrost führt zu vielfältigen Auswirkungen auf natürliche und menschliche Systeme (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80). So können sich zum Beispiel die hydrologischen Bedingungen in arktischen Ökosystemen stark verändern, wenn ganze Seen verschwinden und grosse Flüsse einen anderen Verlauf nehmen. Bauliche Infrastruktur (z. B. Strassen, Bahngleise) und sogar ganze Siedlungen sind vermehrt strukturellen Problemen ausgesetzt wie Problemen bei Bau und Unterhalt von Gebäuden, die durch Setzung oder Bewegungen des eishaltigen Untergrunds beeinträchtigt werden. Dies ist auch bedeutend für vergleichbare Infrastruktur im Hochgebirge.

Der globale Meeresspiegel steigt an

Millionen von Menschen sind sehr direkt von Änderungen des Meeresspiegels betroffen. Von 1901 bis 2010 ist der globale Meeresspiegel um etwa 19 Zentimeter angestiegen (Abb. 1.21a, links) (IPCC 2013/WGI/Chap.3 und Chap.13). Der Meeresspiegelanstieg wird vor allem durch folgende Prozesse verursacht:

- Erwärmung des Ozeans und daraus resultierende thermische Ausdehnung des Meerwassers,
- Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden sowie Eintrag von Schmelzwasser in den Ozean,
- Veränderungen der Wasserspeicher an Land (z. B. Grundwasser, Seen und Flüsse) durch Damm-/Reservoirbau für Wasser- und Energienutzung, landwirtschaftliche Bewässerungsanlangen oder Grundwasserabsenkung durch (Trink-)Wassergewinnung.

Änderungen im Meereis tragen global hingegen nicht zu Veränderungen des Meeresspiegels bei.

Der seit den frühen 1970er-Jahren beobachtete Anstieg des Meeresspiegels ist zu zirka 75 Prozent durch die thermische Ausdehnung des Ozeanwassers und das weltweite Abschmelzen der Gletscher verursacht. Der Anstieg ist damit *sehr wahrscheinlich* wesentlich auf die menschgemachte Erwärmung zurückzuführen (IPCC 2013/WGI/Chap.13 und Chap.10).

Der Anstieg des globalen Meeresspiegels hat sich in den letzten Jahren beschleunigt im Vergleich zum langfristigen Anstieg von 1901 bis 2010 (Abb. 1.21a, links) (IPCC 2013/WGI/Chap.3 und Chap.13). Auch im historischen Vergleich steigt der Meeresspiegel zurzeit stark an: Der Anstieg seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist grösser als im Mittel über die vorangegangenen zwei Jahrtausende (IPCC 2013/WGI/Chap.5 und Chap.13).

Globale Projektionen

Von Szenarien angetriebene Klimamodelle ermöglichen die Abschätzung von zukünftigen Änderungen im Ozean, in der Meereis- und Schneebedeckung. Gletscher und Eisschilde werden in der Regel unabhängig modelliert, in eigenständigen, dynamischen Gletscher- und Eisschildmodellen, die mit den Klimaszenarien angetrieben werden. Die Projektionen des globalen Meeresspiegelanstiegs und des Gletscherschwundes sind in den letzten Jahren markant verbessert worden und schliessen heute alle relevanten Faktoren ein.

Ozean: Erwärmung und Versauerung schreiten voran

Unabhängig vom Szenario (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38) wird sich der globale Ozean im 21. Jahrhundert und darüber hinaus weiter erwärmen. Die zusätzliche Wärme wird – durch den Effekt der Temperatur auf die Dichte – die Schichtung der Wassermassen und zunehmend die grossräumigen Ozeanströmungen beeinflussen. Zum Beispiel wird die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation im 21. Jahrhundert *sehr wahrscheinlich* schwächer werden. Es ist aber *sehr unwahrscheinlich*, dass sich diese Zirkulation im 21. Jahrhundert abrupt abschwächt oder gar ganz zum Erliegen kommen wird. Ein Zusammenbruch nach dem Jahr 2100 kann jedoch bei starker, anhaltender Erwärmung nicht völlig ausgeschlossen werden (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Dank Resultaten aus der Paläoklimaforschung ist heute bekannt, dass eine deutliche Abschwächung oder gar ein Zusammenbruch dieser Zirkulation zu einer massiven Abkühlung in Europa führen und sogar das globale Klimasystem beeinflussen würde (IPCC 2013/WGI/Chap.5).

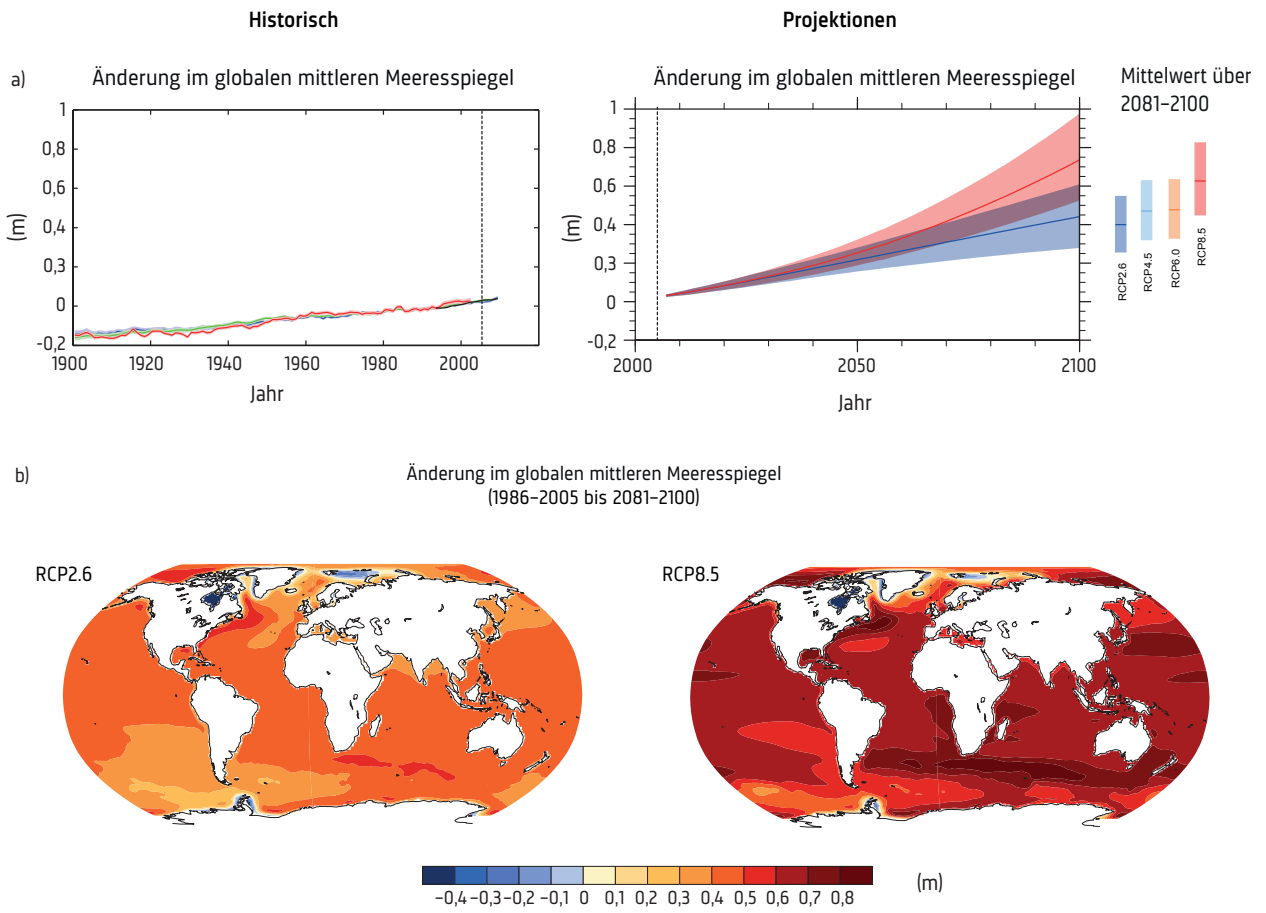

Abbildung 1.21: Beobachtete und projizierte Änderungen im Meeresspiegel von 1900 bis 2100. (a) Zeitlicher Verlauf des globalen Meeresspiegelanstiegs. (b) Räumliches Muster der Änderungen des Meeresspiegels. Der Anstieg des globalen Meeresspiegels seit Beginn des 20. Jahrhunderts beträgt etwa 19 Zentimeter. Die Änderungen für dieses Jahrhundert könnten um ein Vielfaches grösser werden, wie die verschiedenen Szenarien zeigen. Der zukünftige Meeresspiegelanstieg ist stark abhängig vom zukünftigen Verlauf der Treibhausgasemissionen. Die historische Zeitreihe (oben links) zeigt den mittleren globalen Meeresspiegelanstieg für verschiedene Datensätze mit den jeweiligen Unsicherheitsbereichen. Die Projektionszeitreihen (oben rechts) zeigen den mittleren globalen Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert basierend auf der Kombination von Klimamodellen und prozessbasierten Gletscher- und Eisschildmodellen. Die Medianwerte über die Periode 2081–2100 und dazugehörige Unsicherheiten sind für alle RCP-Szenarien als horizontale Linien und farbige vertikale Balken dargestellt. (Quelle: IPCC 2013/WGI, Kombination aus Abbildungen SPM.3, SPM.9, TS.22 und TS.23)

Der Ozean wird auch in Zukunft einen substanziellen Teil des durch menschliche Aktivitäten ausgestossenen CO_2 direkt aufnehmen und damit den menschgemachten Klimawandel verlangsamen. Damit wird aber auch der pH-Wert des Ozeanwassers weiter abnehmen und die Ozeanversauerung voranschreiten (IPCC 2013/WGI/Chap.6).

Kryosphäre: Eis, Schnee und Permafrost auf dem Rückzug

Der Rückgang der Eis- und Schneebedeckung wird mit weiterer Erwärmung des Klimasystems (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40) unter allen berücksichtigten Szenarien weltweit weiter voranschreiten (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Die Eismassen in den polaren Eisschilden werden weiter abnehmen und Gletscher werden weltweit weiter schrumpfen, das heisst an Volumen und Fläche verlieren. Das weltweite Gletschervolumen wird je nach Szenario bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Zeitraum 2081 – 2100 relativ zu 1986 – 2005) um 15 bis 55 Prozent (Szenario mit starker Emissionsminderung [kurz: Verminderungsszenario RCP2.6] beziehungsweise 35 bis 85 Prozent (Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz [kurz: Referenzszenario] RCP8.5 verringert werden) (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Ausdehnung und Volumen des arktischen Meereises werden *sehr wahrscheinlich* weiter abnehmen. Im Referenzszenario RCP8.5 ist sogar ein nahezu eisfreier arktischer Ozean im September, dem Monat mit der im langjährigen Mittel geringsten Meereisausdehnung, noch vor der Mitte des Jahrhunderts *wahrscheinlich*. Im Vergleich zur Arktis sind die Projektionen für Änderungen im Meereis in der Antarktis sehr unsicher. Für das Ende des 21. Jahrhunderts wird gleichwohl von einer Abnahme von Meereisausdehnung und -volumen ausgegangen (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Die Ausdehnung der Schneebedeckung im Frühjahr auf der Nordhemisphäre wird *sehr wahrscheinlich* weiter abnehmen. Die Abnahme bis Ende des 21. Jahrhunderts (Zeitraum 2081–2100 relativ zu 1986–2005) variiert stark je nach Szenario: 7 Prozent im Verminderungsszenario RCP2.6 und 25 Prozent im Referenzszenario RCP8.5 (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Mit der weiteren Erwärmung im 21. Jahrhundert wird sich auch der Permafrost weiter erwärmen und seine Ausdehnung weiter abnehmen (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Permafrostgebiete befinden sich vor allem in der Arktis und in höheren Gebirgslagen, also jenen Gebieten wo gemäss Klimamodellen die Erwärmung am stärksten ist (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40). Die Permafrostvorkommen in den arktischen Gebieten enthalten häufig grosse Mengen an Kohlenstoff, der beim Auftauen des Permafrosts nach und nach als Kohlendioxid (CO_2) und in Form des noch stärkeren Treibhausgases Methan (CH_4) freigesetzt werden könnte. Dieser Prozess wäre unumkehrbar auf Zeitskalen von hunderten bis tausenden von Jahren und könnte die Klimaänderung deutlich verstärken. Die Quantifizierung der Änderungen im Permafrost mit Klimamodellen ist jedoch schwierig und die Projektionen sind entsprechend unsicher.

Meeresspiegel: Anstieg wird über viele Jahrhunderte andauern

Der Meeresspiegel steigt im 21. Jahrhundert in allen Szenarien weiter an (Abb. 1.21). Der Anstieg wird in Zukunft *sehr wahrscheinlich* noch rascher vor sich gehen als über die letzten Jahrzehnte. Gründe hierfür sind vor allem die raschere Ozeanerwärmung und der zunehmende Massenverlust von Gletschern und Eisschilden. Der Meeresspiegelanstieg wird regional Unterschiede aufweisen, da die Faktoren, die den Meeresspiegel beeinflussen, je nach Region verschieden stark ausgeprägt sind (Abb. 1.21b). Die durch den Klimawandel verursachten regionalen Muster im Meeresspiegel werden dann ausgeprägter sein als die regionalen Muster aufgrund natürlicher Variabilität. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird der Meeresspiegel aber praktisch überall deutlich ansteigen (IPCC 2013/WGI/Chap.13).

Die Projektionen der zukünftigen Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs für das Ende des 21. Jahrhunderts (Zeitraum 2081–2100 relativ zu 1986–2005) liefern einen *wahrscheinlichen* Anstieg von 26 bis 55 Zentimetern für das Verminderungsszenario RCP2.6 und von 45 bis 82 Zentimetern für das Referenzszenario RCP8.5 (Abb. 1.21a, rechts). Der Anstieg über das 21. Jahrhundert ist hauptsächlich auf den Effekt der thermischen Ausdehnung aufgrund der Erwärmung des Ozeans und das Abschmelzen der Gletscher zurückzuführen (IPCC 2013/WGI/Chap.13). Als Folge des Anstiegs des globalen Meeresspiegels werden auch regionale Extremereignisse (z. B. Überflutungen bei Sturmfluten) *sehr wahrscheinlich* zunehmen (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.13).

Im Jahr 2100 steigt der Meeresspiegel in allen Projektionen – also auch im Verminderungsszenario RCP2.6 – weiter an (Abb. 1.21a, links). Es ist darum *praktisch sicher*, dass der Meeresspiegel auch über das Jahr 2100 hinaus weiter ansteigen wird und dass der Anstieg aufgrund der verzögerten thermischen Ausdehnung des Ozeanwassers über viele Jahrhunderte andauern wird. In diesem Zusammenhang wird oft auch von einem «Commitment» oder einem unabwendbaren Meeresspiegelanstieg gesprochen, der durch vergangene und gegenwärtige Emissionen von CO_2 und anderen Treibhausgasen verursacht wird und der selbst bei einem sofortigen und kompletten Stopp der Temperaturzunahme nicht vermieden werden kann.

Auf längeren Zeitskalen könnte ein anhaltender Massenverlust der polaren Eisschilde einen noch viel grösseren Meeresspiegelanstieg verursachen. Nach heutigem, nach wie vor limitiertem Wissensstand, könnte eine anhaltende Erwärmung zwischen ungefähr einem und vier Grad Celsius gegenüber 1750 zu einem nahezu vollständigen Verlust des Grönländischen Eisschildes führen. Dies würde auf einer Zeitskala von einem Jahrtausend oder mehr einen Meeresspiegelanstieg von bis zu sieben Metern verursachen. Solche Werte traten letztmals während der letzten Zwischeneiszeit (vor 129 000 bis 116 000 Jahren) über mehrere tausend Jahre auf (IPCC 2013/WGI/Chap.5 und Chap.13).

Kryosphäre: Situation in der Schweiz

Für die Schweiz sind die beobachteten und projizierten zukünftigen Veränderungen bei Gletschern, Schnee und Permafrost von grosser Bedeutung. Die Schweiz hat in den letzten Jahren stark ins langfristige Kryosphären-Monitoring investiert und besitzt heute gut ausgebaute Messnetze für die Beobachtung von Gletschern, Schnee und

Permafrost. Die damit verbundenen Messungen tragen entscheidend zum detaillierten Wissen über den Zustand und die Veränderungen der Kryosphäre allgemein und in der Schweiz im Speziellen bei.

Gletscher: Rascher Rückzug

Die Gletscher der Alpen sind vor allem seit Mitte der 1980er-Jahre kontinuierlich und sehr rasch geschmolzen. Von den total 2900 Quadratkilometern Gletscherfläche Mitte der 1970er-Jahre waren im Jahr 2003 noch etwa 2100 Quadratkilometer übrig (Paul et al. 2011). Die Gletscherfläche der Schweizer Alpen ist von 1973 bis 2010 von 1300 auf 940 Quadratkilometer zurückgegangen (Fischer et al. 2014). Auch die Gletschermasse nimmt immer schneller ab: Bezogen auf eine Einheitsfläche (ein Quadratmeter) und umgerechnet in Wasserwert (also wie beim Niederschlag) betrug vor 1980 der Nettoverlust 0,3 Meter pro Jahr, in den 1990er-Jahren 0,6 Meter pro Jahr und in den letzten zehn Jahren etwa 1 Meter pro Jahr. Die Folgen dieses starken Massenverlustes sind der Zerfall von Gletschern, das Abtrennen von Gletscherzungen und die Bildung neuer Seen, respektive die Vergrösserung bestehender. Auch für die Schweizer Gletscher gilt, dass sie verzögert auf den Anstieg der Temperatur reagieren und ihre derzeitige Ausdehnung noch nicht an die starke Erwärmung seit Mitte der 1980er-Jahre angepasst ist. Sie werden deshalb unabhängig von der zukünftigen Temperaturentwicklung weiter schrumpfen, mit Folgen für die Schweizer Wasser- und Energiewirtschaft (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84). Modellrechnungen mit aktuell verfügbaren Klimaszenarien sagen einen Verlust der Gletscherfläche von etwa 20 bis 50 Prozent bis zum Jahr 2050 voraus und von 50 bis 90 Prozent bis 2100 (jeweils im Vergleich zum Jahr 2000) (Jouvet et al. 2011; Linsbauer et al. 2013). Mit dem Flächenschwund geht eine Reduktion des Eisvolumens von bis zu 90 Prozent bis Ende dieses Jahrhunderts einher. Falls der globale Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius (gegenüber vorindustriellem Niveau) beschränkt werden kann, bedeutet das für die Schweizer Gletscher immer noch einen Volumenverlust von etwa 50 Prozent bis 2050 und etwa 75 Prozent bis 2100 (Salzmann et al. 2012).

Schnee: Saison wird kürzer

Im Schweizer Mittelland wurde in den letzten Jahrzehnten parallel zur Erhöhung der Lufttemperatur (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40) ein deutlicher Rückgang der Schneedeckendauer beobachtet (Marty 2008). Oberhalb von 2000 Metern über Meer sind jedoch die Wintertemperaturen nach wie vor mehrheitlich im Minusbereich, so dass dort bislang keine signifikanten Veränderungen der Dauer und Mächtigkeit der Winterschneedecke beobachtet werden konnten (Marty & Meister 2012).

In Zukunft wird sich, bei einer weiteren Erhöhung der Lufttemperatur, die Untergrenze einer saisonalen Schneedecke in höhere Lagen verschieben. Ebenso wird sich die Dauer der Schneesaison in allen Höhenlagen weiter verkürzen. Diese Effekte werden sich mit einer weiteren Erwärmung noch weiter verstärken. Unter der Annahme eines mittleren Emissionsszenarios projizieren die verschiedenen Klimamodelle Temperaturen, bei denen sich bis Ende des Jahrhunderts die Schneesaison je nach Höhenlage um vier bis acht Wochen verkürzt und die Schneegrenze um 500 bis 700 Meter nach oben verschieben würde. Die als Schnee gespeicherte Wassermenge könnte dabei um bis zu zwei Drittel kleiner werden, was zu einem geringeren Abfluss vor allem im Frühling und Sommer führen würde (Schmucki et al. 2015). Die grösste Unsicherheit dieser Projektionen resultiert im Hochgebirge, da die (unsichere) Winterniederschlagsentwicklung einen Teil der Erwärmung kompensieren könnte.

Alpiner Permafrost: Trend zu Erwärmung

Die Systematische Messreihen von Untergrundtemperaturen in den alpinen Permafrostgebieten sind noch relativ kurz. Erste Messungen in Blockgletschern (gefrorene, kriechende Sedimentkörper) begannen in den späten 1980er-Jahren, im steilen Fels sogar erst nach der Jahrtausendwende. Aussagen zu langfristigen Trends sind daher vorsichtig zu interpretieren. Die grössten Permafrostvorkommen in der Schweiz haben zudem Temperaturen zwischen etwa minus drei und null Grad Celsius – also nur wenig unter dem Schmelzpunkt. Eine Erhöhung der Temperatur braucht in diesem Bereich sehr viel mehr Energie als in kälterem Permafrost, da Phasenwechsel (fest – flüssig) stattfinden. Die Erwärmungstrends zeigen sich damit weniger klar als bei tieferen Temperaturen. Es lässt sich jedoch an mehreren Standorten beobachten, dass die Temperatur in der Tiefe zunimmt (Abb. 1.22) und die jährliche Auftauschicht immer mächtiger wird (PERMOS 2016). Ergänzend zu den Permafrosttemperaturen zeigen sich auch bei den Geschwindigkeiten, mit denen sich Blockgletscher talwärts bewegen, zum Teil deutliche Zunahmen und es wird ein steigender Anteil von flüssigem Wasser im Untergrund gemessen. Auch dies sind beides Hinweise auf eine Erwärmung oder Degradation von Eis. Insbesondere in den 2010er-Jahren wurden an den meisten Standorten konstant deutlich wärmere Permafrostverhältnisse beobachtet, verglichen mit den Verhältnissen zu Beginn der meisten Messungen vor zirka 15 Jahren (PERMOS 2016).

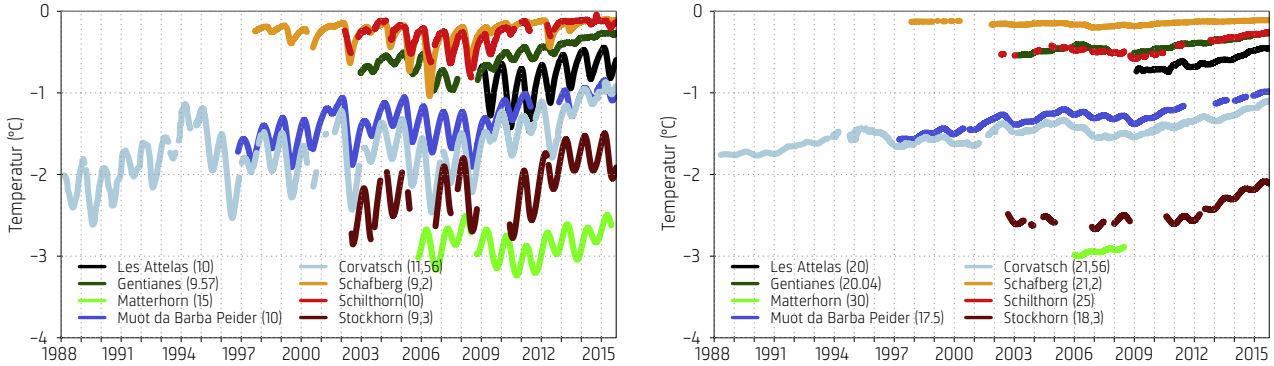

Abbildung 1.22: Temperaturverlauf in verschiedenen Bohrlöchern im Permafrost in den Schweizer Alpen. Links in etwa 10 Metern, rechts in etwa 20 Metern Tiefe (die genaue Messtiefe in Metern in Klammern). (Quelle: PERMOS 2016)

Herausforderungen für die Klimaforschung

Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2013/WGI) hat bestätigt, dass die Kryosphäre und der Ozean derzeit grosse und zum Teil rasch voranschreitende Veränderungen durchlaufen. Auch in der Schweiz und insbesondere im Hochgebirge haben Schnee, Gletscher und Permafrost bereits stark, und im Fall der Gletscher auch gut sichtbar, auf den Klimawandel reagiert. Weitere allenfalls noch grössere Abnahmen werden für das 21. Jahrhundert und darüber hinaus projiziert. Die Schweiz muss sich folglich mit neuen, möglicherweise gletscherfreien Landschaften und den damit verbundenen Auswirkungen – auf beispielsweise Wasserhaushalt, Energieversorgung, Infrastruktur und Tourismus – auseinandersetzen (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80). Mehr und qualitativ gute Beobachtungsdaten, insbesondere auch von Satelliten, ein verbessertes Prozessverständnis und verbesserte Modelle haben dazu beigetragen, dass die Veränderungen in der Vergangenheit und die Projektionen für die Zukunft quantifiziert und die Unsicherheiten besser abgeschätzt werden konnten. Viele der beobachteten Veränderungen können mittlerweile auch eindeutig mit dem vom Menschen verursachten Klimawandel in Verbindung gebracht werden. Die Quantifizierung der natürlichen Variabilität im Vergleich zum Einfluss des Menschen bleibt aber räumlich und zeitlich schwierig.

Trotz der Fortschritte sind mehr, längere und bessere Beobachtungsreihen notwendig für ein noch besseres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge und der mit Klimamodellen projizierten Veränderungen. Zum Beispiel ist die Erforschung des Ozeans unterhalb von 2000 Metern Tiefe weiterhin extrem lückenhaft und behindert damit unter anderem ein besseres Verständnis der Rolle des Ozeans bei der seit 1998 verlangsamten Erwärmung in der Atmosphäre (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40). Auch bleibt die Datengrundlage im Ozean für viele für den Kohlenstoffkreislauf und für marine Ökosysteme relevanten Grössen (Kohlenstoff, Sauerstoff, Nährstoffe etc.) sowohl räumlich als auch zeitlich noch immer sehr limitiert. Die ungenügende Datengrundlage mit unter anderem zu kurzen Messreihen verunmöglicht auch eine abschliessende Beurteilung der Änderungen in der Stärke der Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation und damit der Zukunft des Golfstroms im Nordatlantik.

Die Unsicherheiten in der Abschätzung des Meeresspiegelanstiegs in der Vergangenheit und der Zukunft sind und bleiben gross. Es existieren bis heute keine Projektionen, die zum Beispiel regionale Änderungen in der Ozeantemperatur direkt mit der Dynamik der polaren Eisschilde koppeln, oder Projektionen, welche die Reaktion der polaren Eisschilde auf realistische Klimaänderungen berücksichtigen. Die Quantifizierung und der zeitliche Verlauf der Beiträge der polaren Eisschilde zum Meeresspiegelanstieg über das 21. Jahrhundert und darüber hinaus, die regionale Verteilung der Meeresspiegeländerungen und die Häufigkeit und Stärke regionaler Höchststände (z. B. bei Sturmfluten) sind allesamt nicht gut verstanden. Gemäss derzeitigem Wissensstand könnte aber nur der Kollaps von Teilen des Antarktischen Eisschildes den Anstieg des Meeresspiegels im 21. Jahrhundert substanziell, das heisst um mehrere Dezimeter erhöhen im Vergleich zu den hier berücksichtigten Szenarien (IPCC 2013/WGI/Chap.13). Ein besseres Verständnis all dieser Faktoren im Zusammenhang mit dem Meeresspiegelanstieg ist zentral für den Schutz der Küstengebiete und die Planung von Küstenschutzmassnahmen.

Referenzen

Fischer M, Huss M, Barboux C, Hoelzle M (2014) **The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers.** Arctic, Antarctic and Alpine Research 46: 933–945.

IPCC (2012) **Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).** Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». www.ipcc.ch/report/srex

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 3 «Observations: Ocean». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 4 «Observations: Cryosphere». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 10 «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 13 «Sea Level Change». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 6 «Ocean systems». www.ipcc.ch/report/ar5/wg2

Jouvet G, Huss M, Funk M, Blatter H (2011) **Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate.** Journal of Glaciology 57: 1033–1045.

Linsbauer A, Paul F, Machguth H, Haeberli W (2013) **Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps.** Annals of Glaciology 54: 241–253.

Marty C (2008) **Regime shift of snow days in Switzerland.** Geophysical Research Letters 35: L12501.

Marty C, Meister R (2012) **Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps.** Theoretical and Applied Climatology 110: 573–583.

Paul F, Frey H, Le Bris R (2011) **A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results.** Annals of Glaciology 52: 144–152.

PERMOS (2016) **Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014.** Noetzli J, Luethi R, Staub B (eds.). Glaciological Report (Permafrost) No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.

Romanovsky VE, Smith SL, Christiansen HH (2010) **Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: A Synthesis.** Permafrost Periglacial Processes 21: 106–116.

Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glaciers' response to the global «2 °C air temperature target».** Environmental Research Letters 7: 044001.

Schmucki E, Marty C, Fierz C, Lehning M (2015) **Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs.** International Journal of Climatology 35: 3262–3273.