

1.6 Temperatur

Die Erde erwärmt sich und es ist äusserst wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist. Klimamodelle projizieren für die Zukunft einen weiteren Anstieg der globalen, kontinentalen und regionalen Temperaturen, unabhängig vom gewählten Szenario. Auch in der Schweiz werden die Mitteltemperaturen im Laufe des 21. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich in allen Regionen und Jahreszeiten weiter ansteigen: Im Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) SRES-A2 liegt die Erwärmung gemittelt übers Jahr bei rund drei bis fünf Grad Celsius, im Szenario mit starker Emissionsminderung (kurz: Verminderungsszenario) RCP2.6 ist die Erwärmung auf rund ein bis zwei Grad Celsius begrenzt.

Gian-Kasper Plattner (Universität Bern, ^{neu} WSL), Andreas M. Fischer (MeteoSchweiz),
Thomas F. Stocker (Universität Bern)

Globale Beobachtungen

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig

Die Erde erwärmt sich: Die global gemittelte Lufttemperatur an der Erdoberfläche ist von 1880 bis 2012 um 0,85 Grad Celsius angestiegen (Abb. 1.10a, links). Jedes der letzten drei Jahrzehnte war an der Erdoberfläche sukzessive wärmer als alle vorangegangenen Jahrzehnte seit dem Start der Messreihen um 1850. Die Erwärmung beschränkt sich nicht nur auf die bodennahen Luftschichten. Die Troposphäre, die unterste Schicht der Erdatmosphäre, in der sich die Wettervorgänge abspielen, hat sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts global erwärmt (IPCC 2013/WGI/Chap.2).

Neben der langfristigen Erwärmung zeigt die globale Jahresmitteltemperatur aber auch erhebliche jährliche und dekadische Schwankungen (Abb. 1.10a, links), die kurzfristige Erwärmungstrends stark beeinflussen.

Für den Zeitraum 1901 bis 2012 stehen genügend Beobachtungen zur Verfügung, um auch Aussagen über die regionalen Erwärmungstrends machen zu können. Die Daten zeigen, dass sich fast die ganze Erdoberfläche erwärmt hat (Abb. 1.10b, links) (IPCC 2013/WGI/Chap.2). Der Anstieg über den Kontinenten ist in den meisten Regionen ausgeprägter als über den Ozeanen. Auf der Nordhemisphäre war der Zeitraum 1983 bis 2012 *wahrscheinlich* sogar die wärmste 30-Jahr-Periode der letzten 1400 Jahre (IPCC 2013/WGI/Chap.5); (s.a. Kap. 1.2 Das vergangene Klima, S. 32). Seit ungefähr 1950 werden auch Veränderungen in Stärke und Häufigkeit von Temperaturextremen beobachtet (IPCC 2013/WGI/Chap.2; IPCC 2012/SREX/Chap.3); (s.a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

Menschlicher Einfluss auf Erwärmung ist klar

Laut dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013/WGI/Chap.10 und SPM) sind menschliche Aktivitäten für einen Grossteil der Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts verantwortlich:

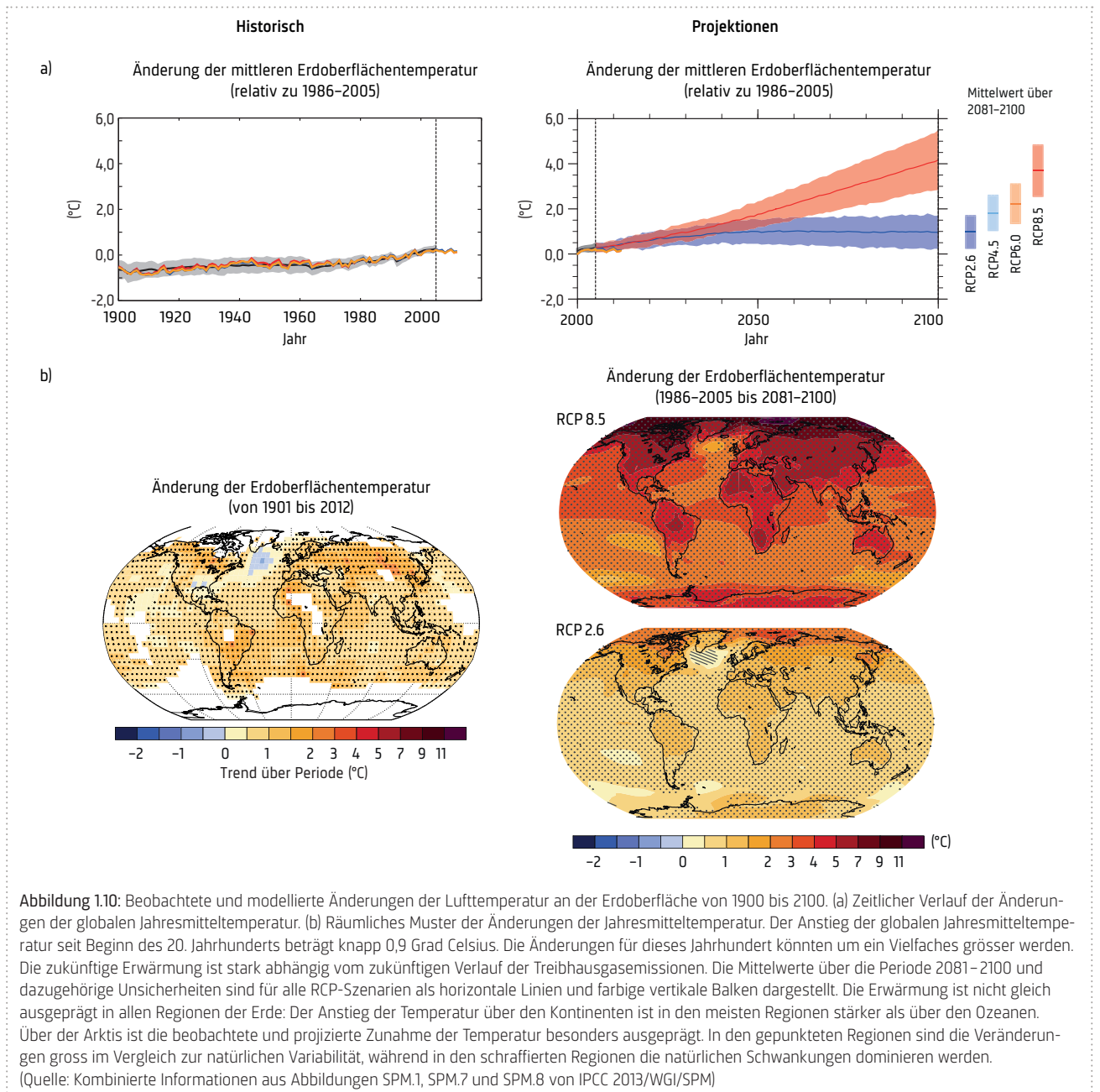
- Global: Ein Grossteil der beobachteten globalen Erwärmung ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen, vor allem auf die Emission von Treibhausgasen, insbesondere CO₂, Methan und Lachgas durch die Verbrennung fossiler Treibstoffe oder durch Änderungen in der Landnutzung und der Abholzung von Wäldern. So ist es *äusserst wahrscheinlich*, dass der durch den Menschen verursachte Anstieg der Treibhausgaskonzentration (vor allem CO₂) in der Atmosphäre für mehr als die Hälfte des beobachteten globalen Temperaturanstiegs von 1951 bis 2010 verantwortlich ist.
- Kontinental: Der Einfluss des Menschen auf die Erwärmung ist mittlerweile auf allen Kontinenten – mit Ausnahme der Antarktis – nachweisbar. Menschliche Aktivitäten haben auch wesentlich zur Erwärmung der Arktis beigetragen.

Weitere Faktoren haben die Temperaturen beeinflusst, zum Beispiel Aerosole, die insgesamt eine abkühlende Wirkung haben. Einen Einfluss haben auch natürliche Faktoren wie die Sonne oder Vulkanereignisse; ihr über Jahrzehnte gemittelter Einfluss ist aber gering, sodass sie für die seit 1951 gemessene globale Erwärmung eine vernachlässigbare Rolle spielen (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Globale Projektionen

CO₂-Emissionen entscheiden über Ausmass der Erwärmung

Um mögliche Entwicklungen des Klimas abzuschätzen, werden Klimamodelle angetrieben mit verschiedenen



Szenarien zur Entwicklung der Emissionen von CO₂, anderen Treibhausgasen sowie weiteren klimarelevanten Substanzen (Abb. 1.10a/b, rechts) (s. a. Kap. 1.4 Klimamodelle, S. 36). Die hierfür im Fünften Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013/WGI/SPM) berücksichtigten Szenarien reichen von einem Szenario mit starker Emissionsminderung (kurz: Verminderungsszenario) RCP2.6 bis zu einem Referenzszenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz RCP8.5 (kurz: Referenzszenario RCP8.5) (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38). Ausser im Verminderungsszenario RCP2.6 überschreitet die Erwärmung seit Beginn der In-

dustrialisierung (hier gewählt als der modellierte Mittelwert von 1850 bis 1900) bis zum Ende des Jahrhunderts in allen Szenarien *wahrscheinlich* 1,5 Grad Celsius (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Unabhängig vom Szenario werden natürliche interne Schwankungen im Klimasystem auch in Zukunft einen wesentlichen Einfluss auf das Klima haben, vor allem kurzfristig und regional. Ab Mitte des 21. Jahrhunderts wird das Ausmass der projizierten Klimaänderungen vorwiegend durch die Wahl des Szenarios bestimmt, da in erster Linie die totale Menge an CO₂-Emissionen darüber bestimmt, wie sich die mittlere globale Erwärmung der Erdoberfläche bis zum Ende des Jahrhun-

derts entwickelt (IPCC 2013/WGI/Chap.12 und TS) (s. a. Kap. 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen, S. 156).

Für die kommenden Jahrzehnte (Zeitraum 2016–2035 bezogen auf 1986–2005) wird die Erwärmung der globalen Jahresmitteltemperatur *wahrscheinlich* im Bereich von 0,3 bis 0,7 Grad Celsius liegen (IPCC 2013/WGI/Chap.11). Dies unter der Annahme, dass es keine grösseren Vulkan- ausbrüche oder unerwartete langfristige Änderungen in der totalen Sonneneinstrahlung geben wird.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Zeitraum 2081–2100 relativ zu 1986–2005) projizieren die Klimamodelle folgende *wahrscheinlichen* Entwicklungen der globalen Jahresmitteltemperatur (IPCC 2013/WGI/Chap.12):¹

- **Verminderungsszenario RCP2.6:** Erwärmung zwischen 0,3 und 1,7 Grad Celsius
- **Referenzszenario RCP8.5:** Erwärmung zwischen 2,6 und 4,8 Grad Celsius

Die projizierte Erwärmung geht unter allen RCP-Szenarien – ausser im Verminderungsszenario RCP2.6 – auch über das Jahr 2100 hinaus weiter (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Selbst bei einem sofortigen und kompletten Stopp der globalen CO₂-Emissionen bliebe die globale Jahresmitteltemperatur über mehrere Jahrhunderte annähernd konstant.

Trotz des generell projizierten Anstiegs der globalen Jahresmitteltemperatur in der Zukunft wird die Erwärmung wie bis anhin regional unterschiedlich sein (IPCC 2013/WGI/Chap.12 und Chap.14). So erwärmt sich zum Beispiel die Arktische Region in allen Szenarien schneller als das globale Mittel und die mittlere Erwärmung über dem Land ist im Allgemeinen grösser als über dem Meer.

Beobachtungen in der Schweiz

Temperaturanstieg ist eindeutig

Je kleiner der betrachtete Raum ist, desto unsicherer wird – aufgrund der relativ grösseren natürlichen Variabilität – die Bestimmung der Trends des Klimawandels. Dennoch lassen Temperaturmessreihen in der Schweiz – genauso wie auf der globalen und kontinentalen Skala – keinen Zweifel über den stattfindenden Klimawandel zu: Die Erwärmung in der Schweiz ist eindeutig.

Übers Jahr gemittelt ist die Durchschnittstemperatur in der Schweiz seit Messbeginn im Jahre 1864 um zirka 1,8

Grad Celsius angestiegen. Dies entspricht einer durchschnittlichen Zunahme von 0,12 Grad Celsius pro Jahrzehnt (MeteoSchweiz 2015). Der Temperaturanstieg verlief aber zeitlich nicht linear: Über die letzten Jahrzehnte ist die Temperatur viel stärker angestiegen, seit 1961 um rund 0,37 Grad Celsius pro Jahrzehnt. So haben sich Jahre mit einer stark überdurchschnittlichen Temperatur ab Ende der 1980er-Jahre gehäuft: Von den 20 wärmsten Jahren seit Messbeginn im Jahre 1864 sind 17 seit 1990 aufgetreten. Das Jahr 2015 war dabei in der Schweiz das wärmste Jahr seit Messbeginn. Zudem zeigt sich, dass die Temperatur über der Schweiz in den letzten 50 Jahren rund 1,6 Mal stärker angestiegen ist als die mittlere Temperatur über allen Landmassen der Nordhemisphäre.

Regional und saisonal aufgeschlüsselt sind die langfristigen Temperaturtrends relativ einheitlich und somit ähnlich wie die Trends im gesamtschweizerischen Jahresmittel. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung sind die gemessenen Trends jedoch von starken Jahr-zu-Jahr-Schwankungen überlagert, wie am Beispiel der Nordostschweiz in Abbildung 1.11 gezeigt wird. Ins Auge stechen beispielsweise der kalte Winter 1962/1963 oder der Hitzesommer 2003 mit saisonalen Temperaturabweichungen um mehrere Grad Celsius vom langjährigen Durchschnittswert des hier verwendeten Referenzzeitraums 1980–2009.

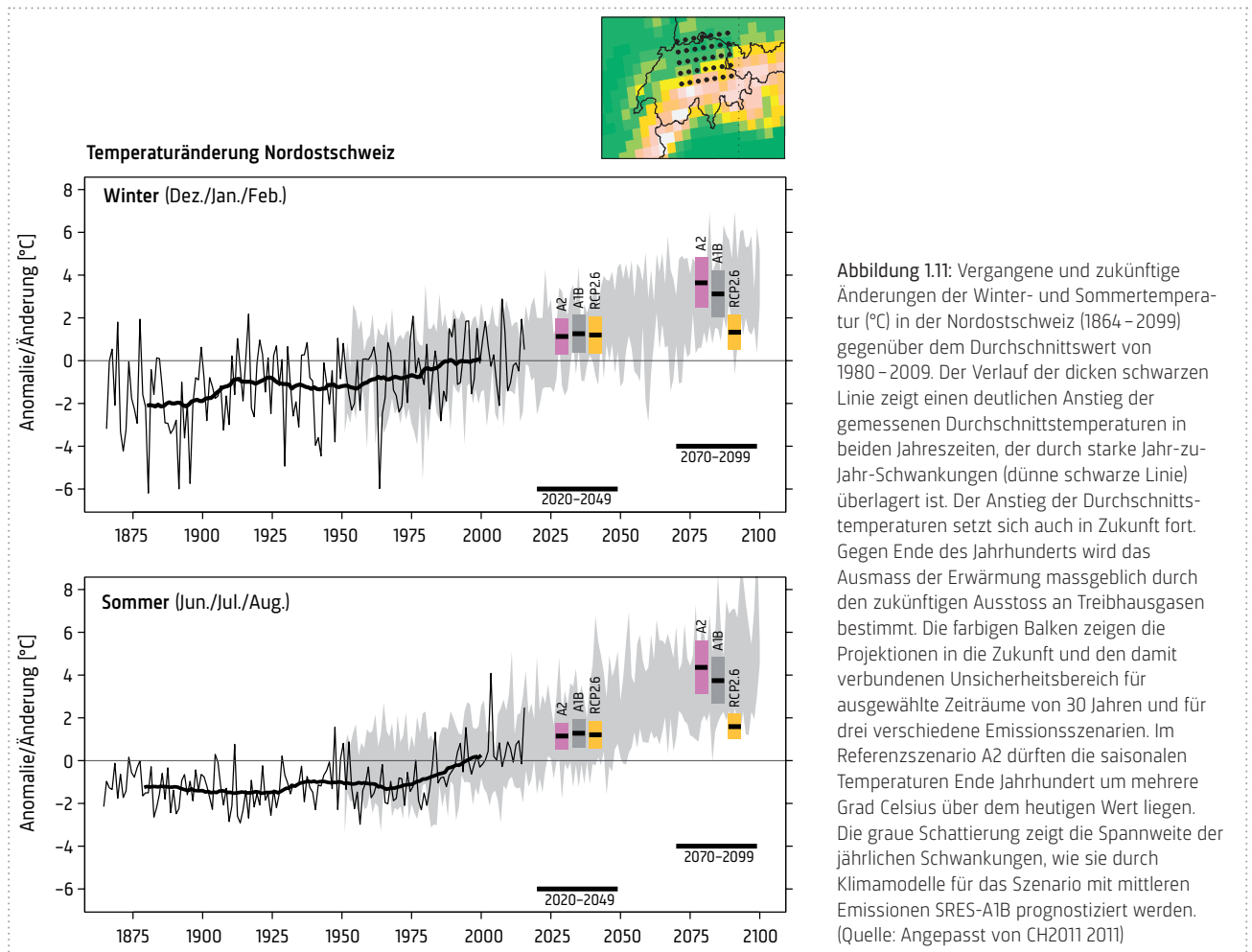
Projektionen für die Schweiz

Lokale Faktoren beeinflussen das lokale Klima

Das zukünftige Schweizer Klima wird zum einen von regionalen und globalen Trends beeinflusst, zum anderen spielen aufgrund der komplexen Topographie vermehrt lokale Faktoren eine gewichtige Rolle. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, kommen feiner aufgelöste, regionale Klimamodelle zum Einsatz. Für die nationale Abschätzung des zukünftigen Schweizer Klimas «CH2011» wurden eine Vielzahl solcher Modelle ausgewertet (CH2011 2011; Fischer et al. 2015). Diese zeigen, dass die gesamtschweizerischen Temperaturen im Lauf des 21. Jahrhunderts signifikant ansteigen und vom heutigen und vergangenen Zustand abweichen dürften. Zusammen mit diesen Änderungen ist auch mit häufigeren, intensiveren und länger anhaltenden Wärmeperioden und sommerlichen Hitzewellen zu rechnen, während die Zahl der kalten Wintertage und -nächte abnehmen dürfte (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

Gemäss CH2011 (2011) werden die Temperaturen im Sommer etwas stärker ansteigen als in den übrigen Jahreszeiten. Die regionalen Unterschiede sind eher gering. Die Modelle deuten aber auf leicht stärkere Erwärmungen

¹ Die wahrscheinlichen Unsicherheitsbereiche für ein bestimmtes Szenario ergeben sich durch die Verwendung mehrerer Klimamodelle mit unterschiedlicher Klimasensitivität.



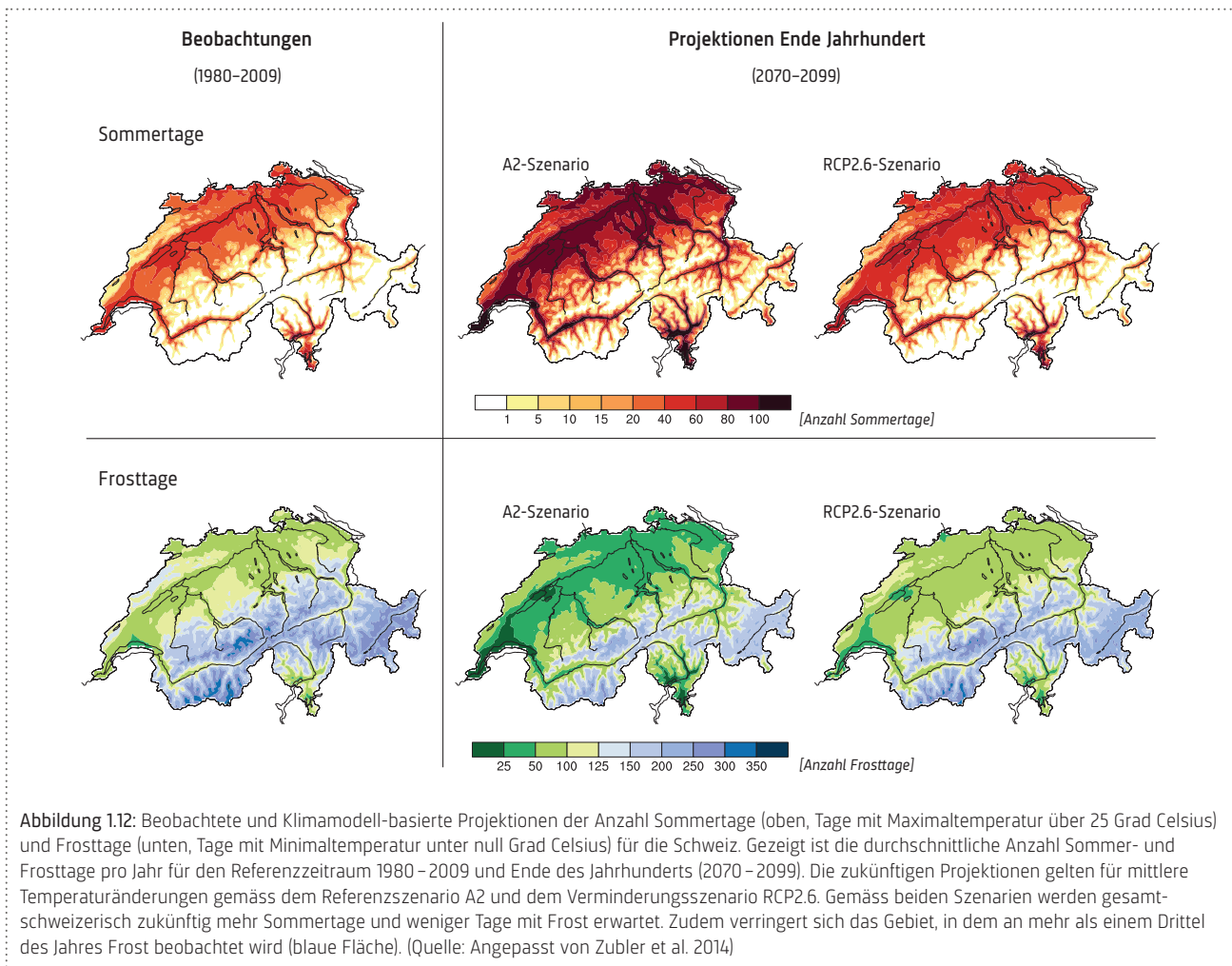
in höheren Lagen sowie in der Südschweiz hin. Deutlich unterscheiden sich die Temperaturänderungen je nach Vorhersagezeitraum, der betrachtet wird, und je nach Annahme zum zukünftigen Ausstoss der Treibhausgase. Dies wird in Abbildung 1.11 am Beispiel der Nordostschweiz für Winter und Sommer aufgezeigt. Allgemein gilt für die Schweiz:

- Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird das Schweizer Klima massgeblich durch den zukünftigen Ausstoss von Treibhausgasen beeinflusst.
- Ohne internationale Anstrengungen zur Minderung der Treibhausgasemissionen werden Ende des Jahrhunderts die zukünftigen Mitteltemperaturen *sehr wahrscheinlich* in allen Jahreszeiten um mehrere Grade über dem langjährigen Durchschnitt von 1980–2009 liegen (violette Balken im Beispiel der Nordostschweiz). Im Jahresmittel zeigen die Modellprojektionen für das Referenzszenario SRES-A2 gesamtschweizerisch eine Erwärmung zwischen 2,9 und 5,1 Grad Celsius.
- Selbst wenn es auf internationaler Ebene gelingt, die Emissionen stark zu mindern, wie im Verminderungsszenario RCP2.6 angenommen, ist hierzulande bis zum

Ende des Jahrhunderts mit einer weiteren mittleren jährlichen Erwärmung von 1,0 bis 1,9 Grad Celsius zu rechnen – annähernd so viel wie seit Beginn der Temperaturmessungen in der Schweiz im Jahr 1864.

- Für die nahe Zukunft (bis Mitte des Jahrhunderts) sind die projizierten Temperaturänderungen für beide Szenarien ähnlich (farbige Balken in Abb. 1.11); sie liegen zwischen 0,8 und 1,6 Grad Celsius. Die Gründe für die ähnlichen Projektionen sind, dass sich einerseits bis Mitte des Jahrhunderts die Szenarien bezüglich der gesamten Menge an Emissionen noch nicht stark unterscheiden und andererseits das Klimasystem mit Verzögerung reagiert.

Die genannten Temperaturänderungen gelten für Mittelwerte über 30 Jahre. Sie informieren also über Änderungen im langjährigen Durchschnitt. Positive und negative jährliche Abweichungen um diesen Mittelwert werden nach wie vor Teil des zukünftigen Klimas sein. Dies ist in Abbildung 1.11 anhand der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen in Klimasimulationen gezeigt (grau hinterlegter Bereich).



Steigende Temperaturen: Anzahl Sommertage steigt, Anzahl Frosttage sinkt

Um die Änderungen in der Temperatur fassbarer zu machen, wurden verschiedene Klimaindikatoren ausgewertet (Zubler et al. 2014). Eine mittlere Temperaturänderung Ende des Jahrhunderts von 4,0 Grad Celsius gemäss Referenzszenario SRES-A2 bedeutet beispielsweise für das Mittelland eine Verdopplung der Anzahl Sommertage (Tage mit Maximaltemperatur über 25 Grad Celsius) von heute 30 bis 50 Sommertagen auf 60 bis 100 Sommertage pro Jahr (Abb. 1.12). Im Fall des Verminderungsszenarios RCP2.6 mit einer mittleren Änderung von 1,5 Grad Celsius dürfte die zukünftige Anzahl mit 50 bis 70 Sommertagen pro Jahr deutlich tiefer liegen.

Ebenfalls wird mit zunehmender Temperatur auch ein markanter Rückgang der Frosttage erwartet: Im Mittelland von heute etwa 80 Frosttagen auf 10 bis 40 Tage im Referenzszenario SRES-A2. Im Alpenraum ist unter diesem Szenario eine Reduktion der Frosttage um bis zu 50

Prozent zu erwarten. Dies würde bedeuten, dass die Minimaltemperatur in gewissen Teilen der Alpen zukünftig an weniger als 120 Tagen unter null Grad Celsius fällt (blaue Fläche in Abb. 1.12). Wie bei der Anzahl Sommertage sind auch hier die Effekte beim Verminderungsszenario RCP2.6 weniger stark ausgeprägt.

Herausforderungen für die Klimaforschung

Bei der Beurteilung der vergangenen und zukünftigen Klimaänderung spielen natürlich bedingte Schwankungen des Klimas – ausgelöst zum Beispiel durch Sonnenvariabilität, Vulkanausbrüche oder Variationen in der Ozeanzirkulation (z.B. Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Pazifik durch El Niño) – eine wichtige Rolle. Damit einhergehende Variationen der Atmosphärenzirkulationen können die globale und regionale Temperatur über mehrere Jahre und Jahrzehnte beeinflussen und langfristige Tendenzen überlagern. Deshalb können aus kurzen Zeitreihen der Temperatur nicht

Langzeitklimatrends abgeschätzt werden. Beispielsweise beträgt die Geschwindigkeit der globalen Erwärmung über die Jahre 1998–2012 0,05 Grad Celsius pro Jahrzehnt. Sie ist deutlich kleiner als die zwischen 1951–2012 berechnete Geschwindigkeit von 0,12 Grad Celsius pro Jahrzehnt (IPCC 2013/WGI/Chap.2 und SPM).

Trends aus kurzen Zeitreihen sind stark vom betrachteten Zeitfenster abhängig: 1998 war global ein überdurchschnittlich warmes Jahr (massgeblich hervorgerufen durch ein starkes El-Niño-Ereignis), weshalb ein tiefer Trend für die Jahre 1998–2012 nicht erstaunt. Die natürliche Klimavariabilität ist von grosser Bedeutung für Zeitskalen von zehn und mehr Jahren. Deshalb wurden über die letzten Jahre grosse Anstrengungen unternommen, um die natürliche Klimavariabilität genauer verstehen und quantifizieren zu können. Für die nahe Zukunft sind natürliche Schwankungen eine der Hauptursachen für Unsicherheiten in globalen und regionalen Klimaprojektionen. Einen grossen Erkenntnisgewinn diesbezüglich verspricht man sich von Modellsimulationen, die den Anfangszustand der Ozeane in der Gegenwart berücksichtigen (IPCC 2013/WGI/Chap.11). Solche Simulationen tragen wesentlich dazu bei, natürliche Klimaschwankungen auf der saisonalen bis dekadischen Skala besser zu verstehen und deren Vorhersagbarkeit zu bestimmen und zu prüfen. Bei Projektionen für die fernere Zukunft werden Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Szenarien und Modelle wichtiger, während natürliche Klimaschwankungen eine weniger wichtige Rolle spielen (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Schweizer Messnetz: Räumliche und zeitliche Abdeckung sind einzigartig

Gegenwärtige Klimamodelle sind oft zu grobmaschig, um kleinräumige Prozesse wie beispielsweise den Einfluss der Gebirgstopographie auf Windströmungen oder lokale Austauschprozesse zwischen dem Boden und der Atmosphäre abzubilden. Solche Effekte werden in den Modellen auf der Basis semi-empirischer Daten vereinfacht beschrieben. Die Art der Beschreibung variiert von Modell zu Modell und ist eine der Hauptursachen, weshalb unterschiedliche Modelle unterschiedliche Klimaprojektionen bei gleichem Szenario liefern. Diese Unsicherheiten werden in Klimaprojektionen berücksichtigt, indem typischerweise eine Vielzahl von Klimamodellen gemeinsam ausgewertet wird.

Zentral für die Kalibration und Entwicklung von verbesserten Klimamodellen und für Abschätzungen zu langfristigen Entwicklungen bleiben qualitativ hochwertige Temperaturmessungen (Satelliten-, Ballon- und Bodenmessungen) über möglichst lange Zeiträume. Nicht

in allen Teilen der Welt ist die räumliche und zeitliche Abdeckung von Boden- und Höhenmessungen jedoch ausreichend oder die Qualität ist aufgrund von Inhomogenitäten und systematischen Messfehlern geringer. Für die Schweiz ist mit dem Messnetz der MeteoSchweiz eine einzigartige Grundlage vorhanden: Homogenisierte Temperaturmessreihen reichen an mehr als 25 Bodenmessstationen bis 1900 und teilweise bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück (Begert et al. 2005).

Referenzen

- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005) **Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000**. International Journal of Climatology, 25: 65–80.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011**. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fischer AM, Liniger MA, Appenzeller C (2015) **Climate scenarios of seasonal means: extensions in time and space**. CH2011 Extension Series No. 2, Zurich, 18 pp.
- 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 (WGII)**. Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGII)**. Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGII)**. 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 (WGII)**. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGII)**. 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 (WGII)**. Chapter 14 «Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGII)**. Technical Summary (TS). www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGII)**. Summary for Policymakers (SPM). www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- MeteoSchweiz (2015) **Klimareport 2014**. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich, 80 pp.
- Zubler EM, Scherrer SC, Croci-Maspoli M, Liniger MA, Appenzeller C (2014) **Key climate indices in Switzerland: expected changes in a future climate**. Climatic Change 123: 255–271.