

**Brennpunkt Klima Schweiz**  
Grundlagen, Folgen und Perspektiven

**Herausgeber**

Akademien der Wissenschaften Schweiz  
Haus der Akademien  
Laupenstrasse 7, Postfach, 3001 Bern  
[www.akademien-schweiz.ch](http://www.akademien-schweiz.ch)

**Ein Projekt der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)**

ProClim – Forum für Klima und globale Umweltveränderungen  
+41 31 306 93 50, [info@proclim.ch](mailto:info@proclim.ch), [www.proclim.ch](http://www.proclim.ch)

**Wissenschaftlicher Beirat**

Kuratorium ProClim

mit Unterstützung  
des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung (OcCC)  
und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

ISSN (print) 2297-1564

ISSN (online) 2297-1572

**Redaktion**

Sanja Hosi, Martina Mittler

**Redaktionelle Mitarbeit**

Hannah Ambühl, Sarah Arnold, Linus Cadotsch, Michael Herger, Martin Kohli,  
Christoph Kull, Gabriele Müller-Ferch, Urs Neu, Christoph Ritz, Karin Ammon

**Lektorat**

Lucie Stooss

**Übersetzung**

Jean-Jacques Daetwyler, Sciencepress  
Zieltext AG

**Gestaltung**

Olivia Zwygart

**Titelbild/Bildmontagen**

Ruth Schürmann (Archiv BAFU, Matthias Hust, Privatarchiv)

**Druck**

Vögel AG, Langnau i. E.

1. Auflage, 2016 (3500 Ex. deutsch/600 Ex. französisch)  
Der Bericht kann kostenlos bezogen werden bei ProClim  
oder unter [www.akademien-schweiz.ch/publikationen](http://www.akademien-schweiz.ch/publikationen).  
© Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016

**Zitiervorschlag**

Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016)  
Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven.  
Swiss Academies Reports 11 (5)

Bericht in elektronischer Form und Zusatzmaterial verfügbar auf  
[www.proclim.ch/brennpunkt](http://www.proclim.ch/brennpunkt)

sc | nat 

Swiss Academy of Sciences  
Akademie der Naturwissenschaften  
Accademia di scienze naturali  
Académie des sciences naturelles

# Klima Schweiz – Folgen und Risiken

## Infrastrukturen



- ▲ Ist die Schweiz für stärkere Wetterereignisse gewappnet? Spitäler und Rettungs- oder Sicherheitsdienste könnten in Zukunft bei Wetterextremen stärker gefordert sein als bisher. (Kap. 2.12)
- ▲ Eine von fossilen Energieträgern abhängige Welt benötigt andere Infrastrukturen (Strassenausbauten, Flughäfen, Stromnetze) als eine CO<sub>2</sub>-freie Welt. Daher können sich heutige Infrastrukturinvestitionen später als unrentabel herausstellen und Arbeitsplätze gefährden. (Kap. 2.12)
- ▲ Infrastrukturen wie Skilifte oder Lawinverbauungen, die heute auf Permafrostböden stehen, können ihren stabilen Untergrund verlieren. (Kap. 2.3/2.11)

## Städte und Siedlungen



- ▲ Heisse Sommer verwandeln Städte in Wärmeinseln. Die Hitzebelastung in unseren Städten ist eine der wichtigen Herausforderungen des Klimawandels. Im Sommer 2003 gab es wegen der Hitze rund 1000 vorzeitige Todesfälle. (Kap. 2.12/2.13/2.15)
- ▲ Siedlungen und Bauten werden vermehrt durch Hochwasser gefährdet sein. Die meisten grossen Städte sind nahe an Gewässern gebaut. (Kap. 2.4/2.12/2.13)

## Wälder und Felder



- ▲ Die Fichte droht aus dem Mittelland zu verschwinden, und auch in den Schutzwäldern im Gebirge ist sie gefährdet: Der wichtigste Baum der Schweizer Waldwirtschaft reagiert empfindlich auf Trockenheit und leidet unter der beschleunigten Vermehrung des Borkenkäfers. (Kap. 2.9)
- ▲ Der Anbau von Kulturen wie Winterweizen und Kartoffeln wird unter den wärmeren Bedingungen erschwert. Mais und Reben gedeihen dagegen bei genügend Feuchtigkeit besser als heute. (Kap. 2.10)
- ▲ Schädlinge, wie z.B. der Apfelwickler, haben zukünftig zwei bis drei Generationen pro Jahr, anstatt wie heute eine bis zwei. (Kap. 2.10)

## Wasserressourcen



- ▲ Die sommerliche Wasserknappheit betrifft alle, die Wasser nutzen, speziell die Landwirtschaft, die vermehrt auf Wasser zur Bewässerung angewiesen ist. Damit nehmen Interessenskonflikte um die Wassernutzung zu. (Kap. 1.8/2.4/2.10/2.11)
- ▲ Die Abnahme von Gletschern und Schnee als natürliche Wasserspeicher erhöht den Bedarf an künstlichen Speichern zur Mehrzwecknutzung. (Kap. 2.4/2.11)

- ▲ Folgen und Risiken
- ★ Minderung
- Anpassung



# Handlungsfelder

Aktives Handeln ist gefragt, denn die Hauptursache des Klimawandels ist die Verbrennung von Erdöl, Gas und Kohle. Soll die Erderwärmung, wie von der Weltgemeinschaft vereinbart, auf unter zwei Grad Celsius begrenzt werden, müssen wir den Ausstoss von Treibhausgasen rasch vermindern. Mittelfristig müssen die Emissionen netto Null betragen. Wir haben viele Möglichkeiten, klimabedingte Risiken abzuschwächen, Chancen zu nutzen und für eine klimaverträgliche Gesellschaft und Wirtschaft zu sorgen.

**Minderung:** Wir nehmen Einfluss auf den Klimawandel, indem wir Treibhausgasemissionen vermindern oder – noch besser – vermeiden. Damit drosseln wir den Temperaturanstieg.

Minderung

**Anpassung:** Wir können auf die Herausforderung «Klimawandel» reagieren, indem wir Risiken minimieren und Chancen nutzen.

Anpassung



## Pendeln und reisen

- ★ Weniger Arbeitswege: Dank moderner Telekommunikation sind Arbeiten zu Hause und Videokonferenzen möglich. (Kap. 3.4)
- ★ Mehr Velo fahren und zu Fuss gehen machen fit und verringern den motorisierten Verkehr. (Kap. 2.15/3.8)
- ★ Gute Raumplanung, kompakte Städte: Wo Wohnen, Einkaufen, Arbeiten und sich Erholen nahe beieinander liegen, sind die Transportwege kurz. (Kap. 3.8)
- ★ Weniger Flugreisen, dafür längere Aufenthalte oder Ferien in der Schweiz vermindern Reisezeit und Reisestress. (Kap. 3.5)
- ★ Beim Autokauf unterstützt die Wahl emissionsarmer und sparsamer Modelle mit nur so viel Leistung wie tatsächlich benötigt die Energieeffizienz. (Kap. 3.5)





## Wohnen und heizen

- Parks, schattenspendende Bäume und offene Wasserflächen mindern den Wärmeinsel-Effekt und tragen so zur Lebensqualität in Städten bei. (Kap. 3.8)
- ★ Gut isolierte Gebäude mindern den Heizbedarf und beugen gleichzeitig im Sommer Hitzestau vor. Klimakompatibles Bauen bedeutet aber mehr als Isolation. So soll es z.B. auch zur Verbesserung der natürlichen Durchlüftung in Städten beitragen. (Kap. 3.4/3.8)
- ★ Solaranlagen, Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung sowie Fernwärmenetze können Öl- und Gasheizungen ersetzen. (Kap. 3.4)



## Energie nutzen

- ★ Politische Vorschriften zu CO<sub>2</sub>-Ausstoss und Energiekonsum, Preissignale und die Berücksichtigung der externen Kosten können die CO<sub>2</sub>-freie Energiebeschaffung und -verwendung fördern. (Kap. 3.4)
- ★ Energieetiketten auf Produkten oder Gebäuden motivieren private Haushalte, in energieeffiziente Geräte und Anlagen zu investieren. (Kap. 3.3)
- ★ Verhaltensänderungen können die Energienachfrage verringern, bspw. durch das Ausschalten von elektronischen Geräten bei Nichtgebrauch. (Kap. 3.3)
- ★ Die an einem Ort eingesparte Energie wird oftmals in gleicher oder sogar grösserer Menge anderswo verbraucht. Wer diesen Effekt erkennt, kann ihn vermeiden. (Kap. 3.3)



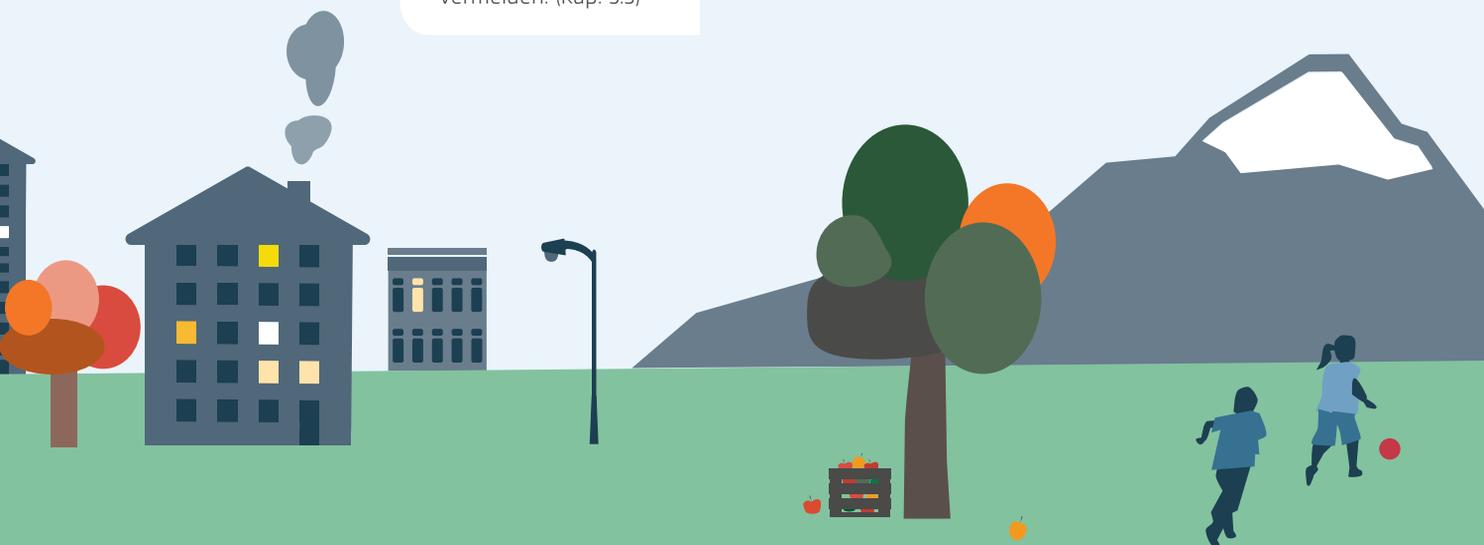
## Essen und trinken

- Wasser fürs Feld intelligent verteilen und sparen: Wird der Boden schonend bearbeitet, hält er Wasser besser zurück, und Winterkulturen wie Winterraps oder -gerste verbrauchen im Anbau weniger Wasser. Im zentralen und westlichen Mittelland werden zunehmend verlustarme Bewässerungssysteme geplant. (Kap. 2.10)
- ★ Wir alle können weniger Nahrungsmittel wegwerfen, auf eine fleischärmere Ernährung umstellen oder den Gesamtkonsum mässigen und damit auf einfache Art etwas zur CO<sub>2</sub>-Minderung beitragen. (Kap. 2.10)



## Gesund sein

- Mit Hitze umgehen lernen: Bei heissem Wetter genügend trinken, die Sonne meiden und nach dem Sport den Wasser- und Salzhaushalt ausgleichen. (Kap. 2.15)
- Sich informieren über Ausbreitung von Krankheiten, z.B. wie man sich schützen kann, wenn Mücken neue Krankheiten in der Schweiz übertragen, oder wo Zecken neue Gebiete besiedeln. (Kap. 2.15)



Die Schweiz reagiert sehr empfindlich auf den Klimawandel. Im Vergleich zum globalen Mittel ist die Erwärmung im Alpenraum rund doppelt so stark. Der Natur- und Kulturraum Schweiz ist in vielfältiger Weise von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen.



### Flüsse und Seen

- ▲ Trockenere Sommer mit weniger Abfluss häufen sich. Dafür sind die abnehmenden sommerlichen Niederschlagsmengen und der bedeutend kleinere Anteil an Wasser aus der Schnee- und Eisschmelze verantwortlich. (Kap. 1.7/2.4)
- ▲ Die Abflussmengen im Winter nehmen eher zu. Die winterlichen Niederschläge fallen häufiger als Regen und tragen direkt zum Abfluss bei. (Kap. 1.7/2.4)
- ▲ Durch die höheren Temperaturen verlängert sich die Hochwasser-saison, und durch die Intensivierung der Starkniederschläge nehmen die Spitzenabflüsse zu. (Kap. 1.8/2.4)

### Tiere und Pflanzen

- ▲ Viele Tiere und Pflanzen, denen es zu warm oder zu trocken wird, wandern in die Höhe, mit dem Risiko, auf beengte Lebensräume mit mehr Konkurrenz zu treffen. (Kap. 2.7)
- ▲ Einige Arten können ihren Lebensraum nur langsam verschieben oder sie besiedeln flache Gegenden, wo es keinen Ausweg in günstigere Lebensräume gibt. (Kap. 2.8)
- ▲ Der jahreszeitliche Rhythmus der Tier- und Pflanzenwelt verändert sich und kann das Zusammenspiel der Arten stören: Insekten verpassen die Blütezeit. (Kap. 2.8)



### Berge, Schnee und Eis

- ▲ Die Schweizer Gletscher verschwinden. Bis zum Ende des Jahrhunderts dürfte der grösste Teil wegschmelzen. (Kap. 1.9/2.3/2.14)
- ▲ Im Hochgebirge entsteht eine neue Landschaft von Fels, Schutt, spärlicher Vegetation und vielen meist kleineren Seen. Letztere erhöhen das Naturgefahrenpotenzial, bieten aber auch Nutzungsmöglichkeiten. (Kap. 2.3/2.5)
- ▲ Die Schneesaison wird sich in Zukunft um mehrere Wochen verkürzen und die Schneegrenze um mehrere hundert Meter ansteigen. (Kap. 2.3/2.11)
- ▲ Permafrost im Hochgebirge taut langfristig bis in tiefere Schichten auf, was vermehrte Steinschläge und Felsstürze zur Folge haben kann. (Kap. 2.3/2.5/2.6)



### Wetterextreme

- ▲ Es wird heisser: Im Sommer ist mit häufigeren und längeren Hitzeperioden und mit intensiveren Hitzetagen zu rechnen. Dieser Trend wird bereits heute beobachtet. (Kap. 1.8)
- ▲ Starkniederschläge: In Zukunft wird erwartet, dass die Starkniederschläge häufiger und heftiger werden, vermehrt Murgänge und Erdbeben auslösen und die Hochwassergefahr erhöhen. (Kap. 1.8/2.4)
- ▲ Das Trockenheitsrisiko steigt: Insgesamt werden für den Sommer weniger Regentage sowie längere Trockenperioden vorausgesagt. (Kap. 1.8)





# **Brennpunkt Klima Schweiz**

## **Grundlagen, Folgen und Perspektiven**

# Inhaltsverzeichnis

Editorial	11
Synthese	13
Teil 1: Physikalische Grundlagen	21
Einführende Erläuterungen	22
Wozu braucht es Klimaszenarien?	
«Udenkbare» Hochwasserereignisse in Praxis und Wissenschaft	23
1.1 Einleitung	28
1.2 Das vergangene Klima	32
1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima	34
1.4 Klimamodelle	36
1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen	38
1.6 Temperatur	40
1.7 Wasserkreislauf	46
1.8 Klima- und Wetterextreme	52
1.9 Ozean und Kryosphäre	60
Teil 2: Folgen und Anpassung	69
Herausforderungen für Forschung, Praxis und Gesellschaft im Umgang mit klimabedingten Naturrisiken – Fallbeispiel Haslital (Kanton Bern)	70
2.1 Einleitung	74
2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept	77
2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost	80
2.4 Wasser	84
2.5 Dynamik von polaren und hochalpinen Landschaften	88
2.6 Naturgefahren ausgelöst durch ein verändertes Klimasystem: Prozessketten und komplexe Risiken	92
2.7 Alpine Ökosysteme	96
2.8 Biodiversität und Ökosystemleistungen	100
2.9 Wald	106
2.10 Landwirtschaft	111
2.11 Tourismus	117
2.12 Bauten und Infrastrukturen	121
2.13 Urbaner Raum	126
2.14 Auswirkungen des Klimawandels auf das Energiesystem der Schweiz	129
2.15 Gesundheit	132
2.16 Globale Zusammenhänge und Migration	136
2.17 Versicherungs- und Finanzindustrie	139
2.18 Strategien und Massnahmen des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel	144

<b>Teil 3: Minderung</b>	<b>149</b>
Dekarbonisierung – Transformation zur Klimaverträglichkeit	150
3.1 Einleitung	154
3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen	156
3.3 Verhaltensänderungen	164
3.4 Energie	168
3.5 Verkehr	174
3.6 Technische Aspekte	178
3.7 Land- und Forstwirtschaft und andere Landnutzung	181
3.8 Urbane Strategien zum Klimawandel	186
<b>Teil 4: Klimapolitik</b>	<b>191</b>
4.1 Einleitung	192
4.2 Schweizer Klimapolitik	194
4.3 Entstehung und Entwicklung einer Klimapolitik	198
4.4 Klimapolitik weltweit: Erfahrungen mit klimapolitischen Massnahmen	202
4.5 Internationale Kooperation	205
Gutachterinnen und Gutachter	210
Referenzierung IPCC	211

## Editorial



Das Jahr 2015 war auf globaler Ebene mit Abstand das bisher wärmste Jahr seit Beginn der Messungen um 1880. Auch in der Schweiz wurden 2015 die höchsten Jahresmitteltemperaturen seit Messbeginn 1864 verzeichnet. Ebenso war jedes der letzten fünf Jahrzehnte wärmer als das jeweils vorhergehende. Der gegenwärtige Klimawandel manifestiert sich nicht nur in den Datenreihen, sondern auch zunehmend in den weltweiten Ökosystemen und hat Auswirkungen auf die Gesellschaften. Die internationale Forschungsgemeinschaft hat im Fünften IPCC-Sachstandsbericht die Ergebnisse der aktuellen Forschung zusammengetragen. Diese Fakten zeigen eindrücklich auf, wie sich unsere Umwelt aufgrund des Klimawandels weltweit bereits verändert hat und welche Emissionsminderungen anzustreben sind, um die in Zukunft zu erwartenden – und für die meisten Gesellschaften langfristig überwiegend negativen – Auswirkungen möglichst gering zu halten.

Zahlreiche Fachleute aus der Schweizer Forschungsgemeinschaft haben im vorliegenden Bericht, auf Initiative von OcCC und ProClim, die für die Schweiz relevanten Ergebnisse aus dem neusten IPCC-Sachstandsbericht zusammengetragen und mit weiteren für die Schweiz zentralen oder auf die Schweiz bezogenen Forschungsergebnissen erweitert. Die Fakten sprechen eine klare Sprache: Der Klimawandel wird auch die Schweiz nicht kalt lassen.

Mit dem erfolgreichen Abschluss der internationalen Klimaverhandlungen in Paris unter der Schirmherrschaft der UNO im Dezember 2015 ist ein erstes wichtiges Etappenziel auf internationaler Ebene erreicht worden, um den sich stellenden Herausforderungen zu begegnen. Mit dem Ziel, den Anstieg der globalen Erwärmung auf weniger als zwei Grad Celsius zu begrenzen und diese Bemühungen mit einer Begrenzung auf einen Temperaturanstieg von maximal 1,5 Grad Celsius sogar noch zu verstärken, sind massive und kontinuierliche Emissionsminderungen sowie schliesslich eine vollständige Abkehr von der Verbrennung fossiler Energien verbunden. Doch was bedeuten diese Ziele für Gesellschaft, Wirtschaft und Politik? Hier ist die Wissenschaft weiterhin gefordert, klar und verständlich zu kommunizieren und Antworten in allen Bereichen zu liefern. Sicher ist, dass grosse Anstrengungen nötig sind, um diese Ziele zu erreichen – auch in der Schweiz.

Das nationale Ziel der Schweiz, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 50 Prozent (30 Prozent im Inland, 20 Prozent im Ausland) gegenüber dem Jahr 1990 zu mindern, ist ein erster Schritt. In einem nächsten Schritt sollen die Emissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts dann gegen Null gehen. Dies bedingt eine grundlegende Transformation von Gesellschaft und Wirtschaft.

All die geplanten Investitionen mit langen Investitionszyklen und die geplanten grossen Infrastrukturvorhaben müssen bereits heute bezüglich ihrer Klimaverträglichkeit kritisch hinterfragt werden. Gesellschaft, Wirtschaft und Politik haben demnach künftig die Klimathematik in nahezu allen Fragestellungen zu berücksichtigen, um diesen Wandel erfolgreich meistern zu können. Hierzu müssen denn auch die notwendigen Massnahmen auf allen politischen Ebenen mehrheitsfähig werden. Zudem muss ein Bewusstsein für die Dringlichkeit der Problematik geschaffen werden.

ProClim und OcCC danken der Schweizer Forschungsgemeinschaft für das Zusammenstellen der gewichtigen Fakten und das Aufzeigen der Dringlichkeit der Problematik sowie möglicher Lösungsansätze zur drastischen Emissionsminderung und zur Anpassung an die Klimaänderung. Die Wissenschaft ruft damit die diversen Akteure auf allen politischen Ebenen auf, die erforderlichen Massnahmen konsequent und vor dem Hintergrund der Förderung des Allgemeinwohles anzugehen.

*NR Dr. Kathy Riklin (OcCC)*

*Prof. Dr. Heinz Gutscher (ProClim)*



# Synthese





Klimabeobachtungen und die Ergebnisse der Forschung zeigen klar und unmissverständlich auf, wie sich das Klima bereits verändert hat, welche Folgen bereits klar sichtbar sind und in welche Richtung sich der Wandel fortsetzt. Die mit der Klimaänderung verbundenen Problemfelder sind weitgehend identifiziert und Lösungsansätze vorhanden. Es lassen sich bereits heute konkrete Handlungsempfehlungen für die Schweiz ableiten (siehe strategische Empfehlungen zur Klimapolitik 2015 des OcCC). Die Auswirkungen werden sich in den kommenden Jahrzehnten verstärken und die Gesellschaft und Wirtschaft vor grosse Herausforderungen stellen:

- Seit Beginn der systematischen Messungen (1864) bis heute (2016) hat sich in der Schweiz die Durchschnittstemperatur um etwa 1,8 Grad Celsius erhöht (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40), global gesehen sind es etwa 0,85 Grad Celsius. Die Hauptursachen für die Erwärmung sind die Nutzung fossiler Energieträger, die Zementproduktion und Landnutzungsänderungen durch den Menschen (z.B. Entwaldung) sowie der damit verknüpfte Ausstoss von CO<sub>2</sub> und weiteren Treibhausgasen. Aufgrund der zurzeit steigenden Treibhausgasemissionen schreitet der menschengemachte Klimawandel auch künftig weiter fort. Die verursachten Veränderungen sowie das veränderte Klima werden über Jahrhunderte bestehen bleiben.
- Mit zunehmender Erwärmung steigen die Risiken für Ökosysteme und die Gesellschaft. Den daraus entstehenden Gefahren kann nur beschränkt mit Anpassungsmassnahmen begegnet werden. Ausserdem sind diese mit zunehmend hohen Kosten verbunden.
- Die grössten direkten Herausforderungen des Klimawandels für die Schweiz sind einerseits Extreme wie Hitzewellen, Trockenperioden oder Starkniederschläge sowie weitere damit in Zusammenhang stehende Naturgefahren. Andererseits sind es schleichende – zum Teil irreversible – Veränderungen der Landschaften und Ökosysteme wie Gletscherschwund oder Veränderungen in der Biodiversität, der Wasserqualität sowie der Auswirkungen durch Schädlinge und Krankheiten.
- Diese Veränderungen wirken sich direkt auf die Gesellschaft (z.B. Gesundheit) und die Wirtschaft (z.B. Tourismus) aus und verursachen bereits heute Kosten. Der finanzielle Aufwand zur Abwendung und Minimierung von Schäden sowie die Risiken werden aufgrund der ablaufenden Veränderungen mit zunehmendem Klimawandel weiter ansteigen.
- Die Schweiz ist wirtschaftlich stark international vernetzt. Daher wird sie auch von indirekten Klimafolgen auf globaler Ebene betroffen sein, beispielsweise im Aussenhandel oder von Migrationsfolgen.
- Die Frage stellt sich somit nicht, ob die Klimaänderung Auswirkungen auf die Schweiz hat, sondern wie sich die Auswirkungen lokal manifestieren und welche Risiken und Kosten für einzelne Gebiete und Branchen entstehen. Ein Verständnis der lokalen Auswirkungen ist der Schlüssel für eine kosteneffiziente Anpassung, die räumlich wie auch fachlich koordiniert zu erfolgen hat. Zur Priorisierung von Massnahmen ist eine detaillierte, gesamtwirtschaftliche Sicht auf die bereits anfallenden und künftig zu erwartenden Aufwände nötig.



Die internationale Politik hat im Rahmen der 21. Klimakonferenz in Paris (2015) ein für alle Staaten rechtlich bindendes Abkommen verabschiedet; dieses bezweckt, den globalen Anstieg der Temperaturen auf deutlich weniger als zwei Grad Celsius zu begrenzen und die Auswirkungen des Klimawandels zu beschränken. Dies bedingt eine konsequente und drastische Absenkung der Treibhausgasemissionen in allen Tätigkeiten und Prozessen in unserer Gesellschaft. Um die bereits vorhandenen und künftig zu erwarteten Auswirkungen zu limitieren, braucht es daher umgehend zielführende Lösungen in den Bereichen Minderung und Anpassung:

- Gegenwärtig entwickelt sich der Klimawandel noch entlang eines Emissionspfades der – falls nichts geändert wird – weit über die beschlossene Erwärmungsgrenze hinausschiessen wird.
  - Jegliche Stabilisierung der globalen Temperatur – unabhängig von der angestrebten maximalen Erwärmung – kann nur erfolgen, wenn letztlich die Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen global auf Null reduziert werden. Folglich ist ein kompletter Ersatz aller fossiler Energieträger in allen Sektoren nötig (Elektrizität, Verkehr, Industrie, Infrastruktur und Gebäude); ein Grossteil der noch vorhandenen fossilen Energiereserven darf somit gar nicht zu Verbrennungszwecken gefördert werden. Bei den globalen Emissionen muss eine baldige Trendwende einsetzen, um die Klimaziele noch erreichen zu können.
  - Minderung und Anpassung unter Beteiligung aller Staaten sind zentral zur Lösung des globalen Klimaproblems. Zwar tragen wenige Nationen mit ihren hohen Emissionen bislang die Hauptverantwortung für die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration, aber letztlich kann und muss jeder Staat seinen Beitrag zur Verbesserung der Situation leisten, seine CO<sub>2</sub>-Emissionen mindern und schliesslich unterbinden. Da den von den Folgen am stärksten betroffenen Ländern die Ressourcen fehlen für eine CO<sub>2</sub>-arme Entwicklung, sind sie auf die Hilfe der industrialisierten Länder angewiesen.
  - Heutiges Nichthandeln reduziert den Handlungsspielraum und verursacht später höhere Kosten sowohl im Bereich der Anpassung als auch der Minderung; Es werden zunehmend ambitioniertere Minderungsschritte notwendig, um das gesteckte Ziel noch einhalten zu können. Bleiben die Massnahmen ungenügend, wird die Erwärmung weit über das gesetzte Temperaturziel hinausgehen.
- Während für die Erarbeitung und Umsetzung von Minderungsstrategien vor allem die nationale und internationale Ebene gefordert ist, ist zur Realisierung von Anpassungsmassnahmen verstärktes Engagement und Zusammenarbeit der Akteure auf lokaler Ebene nötig, auch in der Schweiz.



Eine ambitionierte Schweizer Klimapolitik, welche die international vereinbarten Klimaziele respektiert, weist die schweizerische Gesellschaft und Wirtschaft auf einen nachhaltigen, zukunftsfähigen Weg:

- Ein Wandel hin zu einem nachhaltigen Umgang mit der Umwelt wird unumgänglich sein, auf internationaler wie auch nationaler Ebene; die Klimapolitik stellt in diesem Zusammenhang einen Schlüsselfaktor dar. In der Schweiz gibt es ausgezeichnete intellektuelle, wirtschaftliche und technische Voraussetzungen und die entsprechenden staatlichen Strukturen, sich für diesen Wandel erfolgreich zu engagieren und voranzugehen. Sie kann ihr Engagement zudem verstärken, indem sie sich für global griffige Massnahmen in internationalen Verhandlungen einsetzt wie der Klimakonvention der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder dem Handelsrecht der Welthandelsorganisation (WTO).
- Schweizer Firmen, Produkte und Technik verursachen im Ausland Treibhausgasausstoss, können aber auch zur Minderung beitragen, beispielsweise durch Technologietransfers oder Exporte emissionsarmer Techniken. Schweizer Firmen sind somit gefordert, den Klimawandel in ihre langfristigen Strategien einzubeziehen. Minderungs- und Anpassungsmassnahmen im In- und Ausland können für die Schweiz zunehmend von wirtschaftlichem Interesse sein, kann hierfür doch auch neue, zukunftsweisende Technik entwickelt und vertrieben werden.
- Um diese sich bietenden Chancen rechtzeitig zu nutzen, muss die Schweiz international vernetzt und innovativ bleiben. Damit kann sie vorausschauend im Interesse einer global nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung und damit auch ihrer Wohlfahrt handeln.



Die Herausforderung Klimawandel muss im Kontext mit anderen Herausforderungen für Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt gesehen werden. Umsichtiges Handeln und der Einbezug der verschiedenen Perspektiven ermöglicht es, die aktuellen und sich verschärfenden Probleme zu meistern. Die heutigen Gesellschaften erhalten damit ihre solide Lebensgrundlage und übergeben den nachfolgenden Generationen eine möglichst intakte Umwelt, die ihnen Handlungs- und Gestaltungsspielräume gewährt, ohne dass sie dabei grosse Altlasten aus der heutigen Zeit übernehmen müssen:

- 2015 lebten rund 7,3 Milliarden Menschen auf der Erde. Diese Zahl wird sich bis 2050 wahrscheinlich auf rund 9,3 Milliarden und bis 2100 möglicherweise auf über 10 Milliarden erhöhen. Besonders in Schwellen- und Entwicklungsländern findet ein rasantes Wachstum statt.
- Bereits um 2050 dürften rund 70 Prozent der Erdbewohner in urbanisierten Räumen leben und an der wirtschaftlichen Entwicklung teilhaben, was ihren Ressourcenverbrauch möglicherweise stark erhöhen wird. Damit ist klar, dass die Bereiche Infrastrukturen und Gebäude, Energiebereitstellung, Mobilität, Transport und Industrie eine Schlüsselrolle bei der künftigen Emissionsentwicklung einnehmen. Falls diese Entwicklungen vorausschauend geplant und mittels effizienter Techniken umgesetzt werden, bieten sie eine Chance für eine möglichst emissionsarme und nachhaltige Entwicklung.
- Auch Landnutzungsänderungen weltweit (Entwaldung, Nahrungsmittelproduktion etc.) steuern einen massgeblichen Emissionsanteil bei, den es zu mindern gilt. Verschärft werden die aktuellen Probleme dadurch, dass ein Grossteil der sich stark wandelnden Gebiete mit schwierigen politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu kämpfen hat, die Auswirkungen des Klimawandels immer stärker zu spüren bekommt und damit auch Anpassungsmassnahmen umsetzen muss.
- Diese sich global abzeichnende Bevölkerungs- und Gesellschaftsentwicklung erfordert, dass klima- und ressourcenschonende Technik zum Einsatz kommt und eine Transformation hin zu einem nachhaltigen Lebensstil stattfindet. Die Industrienationen sind somit gefordert, nicht nur innerhalb der eigenen Grenzen den Transformationsprozess umzusetzen, sondern auch aktiv Unterstützung, Knowhow und Finanzmittel bereitzustellen, um diese Generationenaufgabe auf globaler Ebene voranzutreiben. Konkret gilt es unter anderem, innerhalb von 30 bis 50 Jahren den weltweiten Gebäudebestand auf minimalen Energiebedarf zu trimmen, was für viele Industrieländer die frühzeitige Abschreibung sehr hoher Geldsummen bedingt. Zudem müssen die fossilen Energieträger in den Sektoren Elektrizität und Verkehr gleichzeitig deutlich reduziert werden, was bei den vorhandenen teuren Infrastrukturen ebenfalls kostspielig ist und lange Zeit beanspruchen wird. Deswegen ist die Kostenwahrheit entlang der gesamten Energieumwandlungskette vordringlich, das heisst die Internalisierung externer Kosten sowie ein stetig zunehmender CO<sub>2</sub>-Preis.
- Zum Klimaschutz ist ein Ausstieg aus den fossilen Energien nötig beziehungsweise für die noch nicht industrialisierten Länder ein Überspringen des fossilen Zeitalters angezeigt. Um dies zu ermöglichen, braucht es staatliche Strukturen, die entsprechende günstige politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen setzen.
- Schliesslich braucht es, um einen zukunftsfähigen Weg für die globale, gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung zu finden, eine Transformation zu einem nachhaltigen Lebensstil auf Ebene des Individuums. Bewusster und nachhaltig zu leben bedeutet nicht, auf alles zu verzichten; vielmehr kann dies zu höherer Lebensqualität führen, da momentan zunehmende Beeinträchtigungen wie beispielsweise durch den Verkehr wieder abnehmen können.



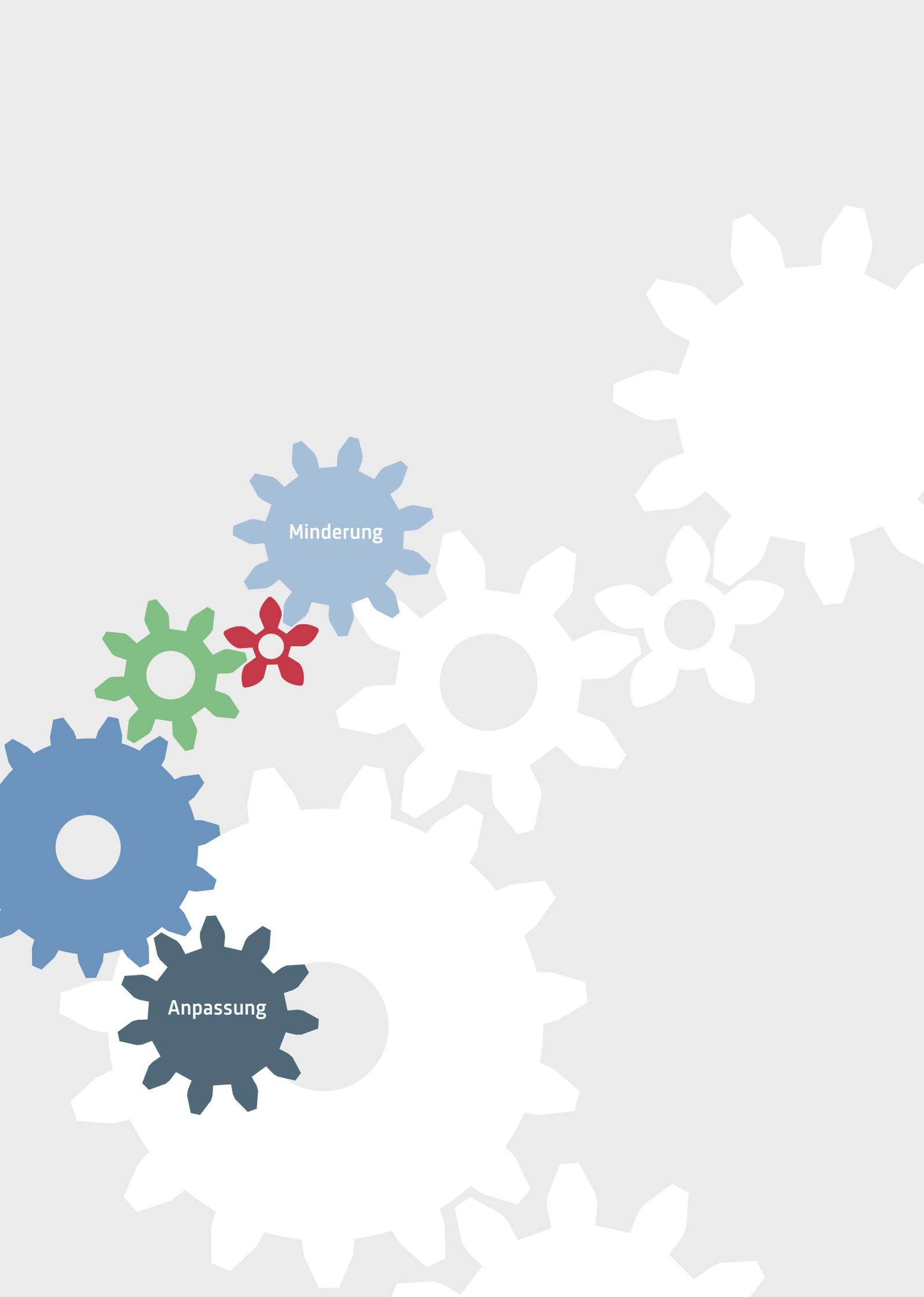
Will die Schweiz einen mit den internationalen Klimazielen kompatiblen Pfad einhalten, muss sie jetzt unterschiedene und eingreifende Schritte für eine Abkehr vom Verbrauch fossiler Energien einleiten und den Elektrizitätsbedarf CO<sub>2</sub>-frei halten. Zudem soll sie sich weiterhin und glaubwürdig international für eine ambitionierte, zielführende Klimapolitik einsetzen. Unabhängig davon sind auch in der Schweiz Anpassungsmassnahmen an die Hand zu nehmen. Hierzu braucht es ein durch die Wissenschaften umfassend gestütztes Verständnis der lokalen Situation sowie der spezifischen Auswirkungen. Ebenso

sind Kostentransparenz gefordert sowie politische Mechanismen, welche die kantonale, regionale und lokale Ebene verbindlich zum Handeln verpflichten. Nur eine solide und einheitliche Datenbasis über die Vergangenheit und die zu erwartende Klimaänderung ermöglicht das Abwägen und Priorisieren entsprechender Massnahmen. Zudem gilt es speziell in einer direkten Demokratie, die Bürger von der Wichtigkeit der sich stellenden Herausforderungen zu überzeugen und positiv besetzte Bilder für den notwendigen Wandel aufzuzeigen.

Um mehrheitsfähige Allianzen für den jetzt erforderlichen langwierigen politischen Prozess zu bilden, ist es nun dringlich, die genannten Themen prioritär auf die Agenda aller Bürger, aller Politiker, sämtlicher Parteien und jedes Verbandes zu setzen. Konkrete Handlungsempfehlungen zeigt das Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) in seinen strategischen Empfehlungen zur Klimapolitik 2015 auf.

Die Synthese wurde gemeinsam erarbeitet von Prof. Dr. Christof Appenzeller (MeteoSchweiz und ETH Zürich), Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos (ETH Zürich), Prof. Dr. David Bresch (ETH Zürich), Andrea Burkhardt (BAFU), Prof. Dr. Andreas Fischlin (ETH Zürich), Prof. Dr. Heinz Gutscher (Universität Zürich, Präsident ProClim-Kuratorium), Prof. Dr. Martin Hoelzle (Universität Freiburg), Prof. Dr. Fortunat Joos (Universität Bern), Prof. Dr. Peter Knoepfel (Universität Lausanne), Prof. Dr. Reto Knutti (ETH Zürich), Dr.

Pamela Köllner (BAFU), Prof. Dr. Christian Körner (Universität Basel), Dr. Christoph Kull (OcCC), Prof. Dr. Peter Messerli (Universität Bern), Prof. Dr. Martine Rebetez (Universität Neuenburg und WSL), Dr. Kathy Riklin (Präsidentin OcCC), Prof. Dr. Renate Schubert (ETH Zürich), Prof. Dr. Thomas Stocker (Universität Bern), Prof. Dr. Philippe Thalmann (ETH Lausanne), Prof. Dr. Rolf Weingartner (Universität Bern).



Minderung

Anpassung



# Teil 1: Physikalische Grundlagen

## Autorinnen und Autoren

### Prof. Dr. Stefan Brönnimann

Professor für Klimatologie, Geographisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

### Dr. Andreas M. Fischer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bereich Analyse und Prognose, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich-Flughafen

### Dr. Erich M. Fischer

Leitender Forscher, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### PD Dr. Christian Huggel

Leitender Forscher, Klimafolgen, Risiken und Anpassung, Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich

### Prof. Dr. Reto Knutti

Professor für Klimaphysik, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Peter Mani

Fachexperte Naturgefahren und Mitglied der Geschäftsleitung, geo7 AG, Geowissenschaftliches Büro, Bern

### Dr. Christoph Marty

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Schnee und Permafrost, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos Dorf

### Dr. Urs Neu

Stv. Geschäftsleiter, ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

### Dr. Jeannette Nötzli

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Schnee und Permafrost, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos Dorf  
Bis Juli 2015: Oberassistentin, Gruppe Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich

### Dr. Frank Paul

Leitender Forscher, Gruppe Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich

### Dr. Gian-Kasper Plattner

Stab Direktion, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf  
Bis Dezember 2015: Forscher, Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern  
Bis Dezember 2015: Wissenschaftlicher Direktor, Sekretariat IPCC Arbeitsgruppe I, Universität Bern

### Dr. Joeri Rogelj

Forschungsstipendiat, Energieprogramm, Internationales Institut für angewandte Systemanalyse (IIASA), Laxenburg  
Bis Juni 2014: Postdoktorand, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Prof. Dr. Christoph Schär

Professor für Klima und Wasserkreislauf, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne

Professorin für Land-Klima Dynamik, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Prof. Dr. Thomas F. Stocker

Professor für Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern  
Ko-Vorsitzender Arbeitsgruppe I  
Fünfter IPCC-Sachstandsbericht



## Einführende Erläuterungen

### Wahrscheinlichkeitsangaben im vorliegenden Bericht

In diesem Bericht werden zum Teil für einzelne Ergebnisse des IPCC die im IPCC-Sachstandsbericht benutzten Angaben zur Wahrscheinlichkeit eines Befundes verwendet (dies betrifft Wahrscheinlichkeitsangaben in kursiver Schrift in diesem Bericht). Die Angabe bezeichnet die ge-

<i>praktisch sicher</i>	99–100% Wahrscheinlichkeit
<i>sehr wahrscheinlich</i>	90–100%
<i>wahrscheinlich</i>	66–100%
<i>ebenso wahrscheinlich wie nicht</i>	33–66%
<i>unwahrscheinlich</i>	0–33%
<i>sehr unwahrscheinlich</i>	0–10%
<i>besonders unwahrscheinlich</i>	0–1%

schätzte Wahrscheinlichkeit, dass sich der tatsächliche Wert bzw. Sachverhalt im angegebenen Wertebereich befindet bzw. dem angegebenen Sachverhalt entspricht. Dabei entsprechen die verwendeten Ausdrücke in kursiver Schrift folgenden Wahrscheinlichkeitsbereichen:

### Fünfter IPCC-Sachstandsbericht

Ein Teil der Aussagen in diesem Bericht bezieht sich auf den Fünften Sachstandsbericht des IPCC, der in drei Bänden in den Jahren 2013 (Band I) und 2014 (Band II und III) veröffentlicht worden ist.<sup>1</sup>

- Band I (Wissenschaftliche Grundlagen) präsentiert im Rahmen einer globalen Beurteilung der Klimawissenschaft klare und belastbare Schlussfolgerungen. Die Resultate bestätigen und erweitern unser wissenschaftliches Verständnis des Klimasystems und der Rolle von Treibhausgasemissionen.
- Band II (Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit) konzentriert sich darauf, warum der Klimawandel bedeutsam ist, und betrachtet diese Frage sowohl auf globaler (Berichtsteil A) als auch auf regionaler Ebene (Berichtsteil B). Er behandelt bereits aufgetretene Auswirkungen und die Risiken von zukünftigen Auswirkungen.
- Band III (Minderung des Klimawandels) bietet eine umfassende Beurteilung aller möglichen Optionen (technisch oder durch Verhaltensänderungen) für die Verminderung des Klimawandels in den Sektoren Energie, Transport, Gebäude, Industrie und Landnutzung und bewertet die Politikoptionen auf den verschiedenen Regierungsebenen von der lokalen bis zur internationalen Skala.

### Der IPCC

Der IPCC (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) wurde 1988 als zwischenstaatliches Gremium gemeinsam von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Er stellt den politischen Entscheidungsträgern die zuverlässigsten objektiven, wissenschaftlichen und technischen Gutachten zur Verfügung. Seit 1990 ist diese Reihe von IPCC-Sachstandsberichten, Sonderberichten, Technischen Dokumenten, Methodikberichten und anderen Produkten zu einem Standard-Nachschlagewerk geworden. Der Fünfte Sachstandsbericht des IPCC stellt eine wichtige Informationsgrundlage für die politischen Entscheidungsträger in der ganzen Welt dar und unterstützt diese beim Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels. Die Erarbeitung dieser Berichte wurde durch das Engagement und den ehrenamtlichen Einsatz von vielen hundert Expertinnen und Experten weltweit ermöglicht, die eine breite Auswahl an Disziplinen repräsentieren.

### Was ist «Klimaschutz»?

Der Begriff «Klimaschutz» bezeichnet nach Duden «die Gesamtheit der Massnahmen zur Vermeidung unerwünschter Klimaänderungen». Dieser Begriff wird nur im deutschen Sprachraum verwendet. Der IPCC verwendet keinen analogen (englischen) Begriff.

<sup>1</sup> [www.ipcc.ch/report/ar5](http://www.ipcc.ch/report/ar5)

## Wozu braucht es Klimaszenarien? «Undenkbares» Hochwasserereignisse in Praxis und Wissenschaft

Die Vergangenheit zeigt, dass man bei Extremereignissen auch an das «Undenkbares» denken muss. Bei solchen Fragestellungen sind Praxis und Wissenschaft gleichermaßen gefordert, und eine Zusammenarbeit ist unabdingbar. So sind zur Bewertung extremer Risiken, zum Beispiel verursacht durch extrem seltene Ereigniskombinationen mit massiven Auswirkungen, neue Methoden zu entwickeln. Diese müssen sowohl vergangene Ereignisse als auch den Klimawandel berücksichtigen.

*Peter Mani (geo7 AG), Christoph Schär (ETH Zürich)*

### Einleitung

Die grossen Hochwasserereignisse in den letzten Jahren (1999, 2005, 2007) hatten riesige Schäden zur Folge (Hilker et al. 2009). Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass auch noch grössere Ereignisse möglich wären. So verursachte im Jahr 1480 eine intensive Schneeschmelze nach einem schneereichen Winter, gefolgt von einem dreitägigen Starkniederschlag, ein Rekordhochwasser (Pfister & Wetter 2011). Das «Jahr ohne Sommer», verursacht durch den Ausbruch des Vulkans Tambora, führte dazu, dass im Frühling 1817 drei Schneepakete abschmolzen, was am Bodensee zum höchsten je gemessenen Seepiegel führte – und dies während 89 Tagen (Kobelt 1926; Pfister 1999). Die Studie von geo7 et al. (2007) zu Extremhochwassern im Einzugsgebiet der Aare zeigt, dass solche Extremereignisse auch in Zukunft möglich sind und diese potenziell weitreichende Folgen für die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt haben.

Solche Ereignisse betreffen häufig grosse Gebiete und bedrohen neben Siedlungsräumen auch lebenswichtige Infrastrukturen wie Spitäler, Wasserversorgungen, Verkehrs- und Kommunikationsverbindungen sowie kritische Strukturen wie Kernkraft- und Stauwerke. Daraus resultieren grosse Herausforderungen, dies umso mehr, als zwischen Ende des 19. Jahrhunderts und den 1970er-Jahren Katastrophen in der Schweiz selten waren (Pfister 2009), was zu einem falschen Sicherheitsgefühl und einer ungenügenden Sensibilität gegenüber selten vorkommenden Ereignissen führte.

Extreme Hochwasserereignisse können durch kurzzeitige extreme Starkregen, aber auch durch langanhaltende Niederschlagsperioden ausgelöst werden. Gelangt das hydrologische System durch solche Belastungen aus dem Gleichgewicht, kann dies zu Kippeffekten oder Rückkopplungen führen. So verringert die Ablagerung von Geschiebe in einem Gerinne die Abfluss- und damit Transportkapazität, wodurch sich wiederum mehr Geschiebe ablagern kann. Solche Situationen können durch die Veränderun-

gen, die als Folge des Klimawandels zu erwarten sind, häufiger oder verstärkt auftreten. Dies hat zur Folge, dass beobachtete Zeitreihen aus der Vergangenheit ihren Wert als Massstab für die Zukunft verlieren. Sie müssen daher mit den Erkenntnissen aus den Klimaszenarien kombiniert und neu gewichtet werden.

Dass auch extrem seltene Ereignisse durchaus eintreten können, zeigt die Reaktorkatastrophe von Fukushima: Am 11. März 2011 ereignete sich vor der Ostküste der japanischen Hauptinsel das schwerste Erdbeben seit Beginn entsprechender Aufzeichnungen. Der dadurch verursachte Tsunami verwüstete weite Küstenabschnitte, forderte mehr als 20 000 Todesopfer und beschädigte rund eine Million Gebäude (GRS 2015). Der Tsunami zerstörte auch wichtige Sicherheitssysteme des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi, worauf es in vier Reaktorblöcken zur Kernschmelze kam. Rund 150 000 Menschen wurden evakuiert – die Behebung der Folgen wird noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Auch in der Schweiz können extrem seltene Ereignisse, insbesondere Hochwasserereignisse, gravierende Konsequenzen haben: Die meisten grösseren Städte liegen direkt an Flüssen, und alle Kernkraftwerke liegen an den Ufern von Aare oder Rhein. Die Analyse von seltenen Hochwasserereignissen hat deshalb im Nachgang zu Fukushima auch in der Schweiz an Aktualität gewonnen.

### Projekt EXAR: Beurteilung von Folgewirkungen sehr seltener Hochwasserereignisse

Ein Projekt in der Schweiz, das mit bestehenden Messreihen, Analysen von historischen Hochwasserereignissen sowie aus Resultaten von Klimasimulationen neue Grundlagen für die Beurteilung der Folgewirkungen von sehr seltenen Hochwasserereignissen schafft, ist EXAR (Gefahrengrundlagen für Extremhochwasser an Aare und Rhein). Dieses wurde von den Bundesämtern für Umwelt (BAFU), für Energie (BFE), für Bevölkerungsschutz (BAPS) so-



Abbildung 1.1: Das Hochwasser vom August 2005 richtete unter anderem in Oey/BE grosse Schäden an. Schweizweit verursachte das Hochwasser Kosten in der Höhe von drei Milliarden Franken. (Quelle: Fritz Schürch)

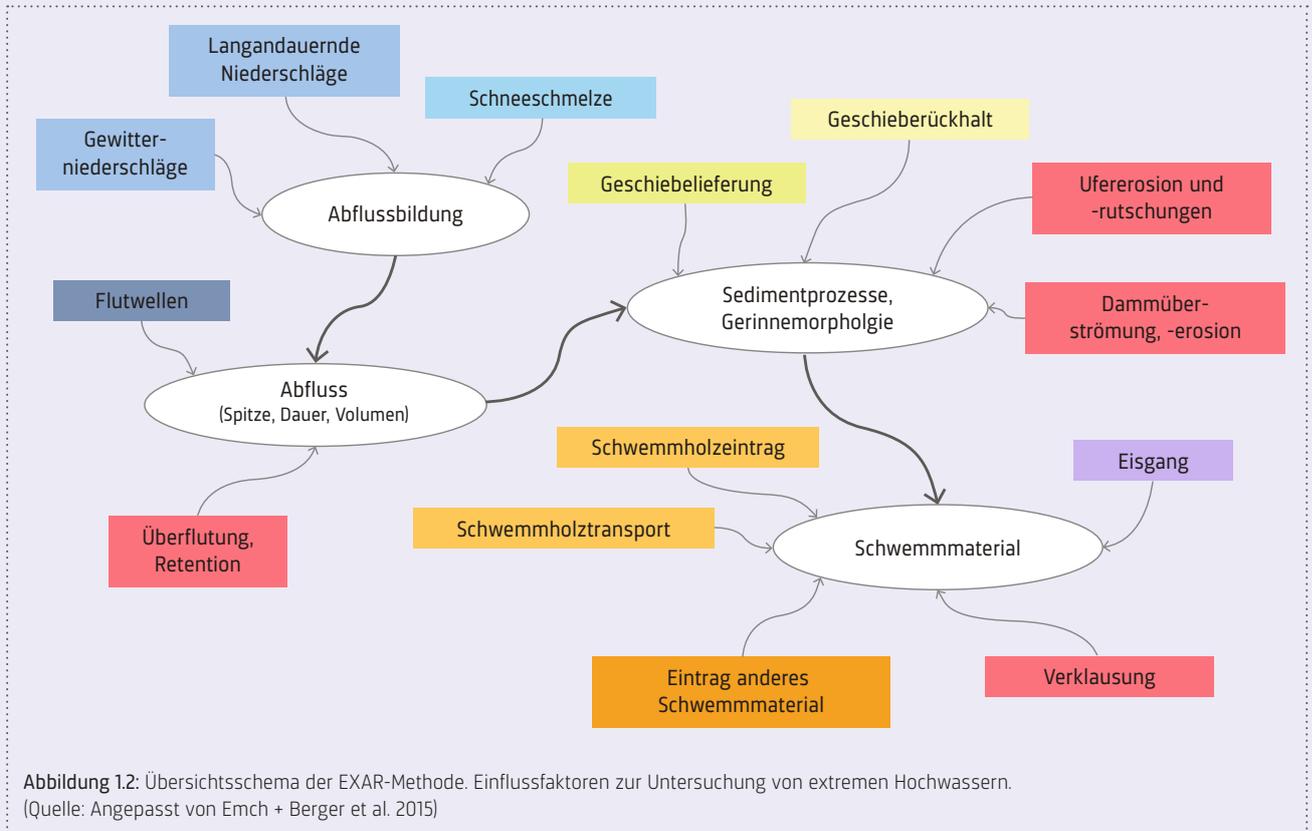
wie vom Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) initiiert.

In einer ersten Phase entwickelten praxisnahe Ingenieur- und Beratungsunternehmen mit einer wissenschaftlichen Expertengruppe eine Methode, um extreme Hochwasser im Hinblick auf ihre Abflussspitzen, Dauer, Abflussvolumen, Auswirkungen auf die Flussmorphologie und den Einfluss von Schwemmgütern zu analysieren (Abb. 1.2). Da es sich dabei um sehr seltene Ereignisse handelt, die auch nur alle 10 000 Jahre auftreten können, sind neben den quantitativen Werten zu den Ereignisgrössen auch Aussagen zu den Unsicherheiten von zentraler Bedeutung. Dabei ist die natürliche, systembedingte Variabilität wie auch die Modellunsicherheit zu berücksichtigen. In einer zweiten Phase werden nun mit der entwickelten Methode die Analysen durchgeführt.

## Einfluss des Klimawandels

Die meteorologischen Bedingungen, die zu Starkniederschlägen und Hochwasserereignissen führen, werden letztendlich durch das globale Klimasystem bestimmt. Im Alpenraum sind die grossräumige Verteilung von Temperatur und Luftfeuchte, die Position und Intensität von Tiefdruckgebieten und ihre Zugbahnen sowie temperaturbedingte Veränderungen in der Schneehydrologie entscheidend. Deren Auswirkungen auf das Sommerklima sind dabei besonders wichtig, denn viele Schweizer Gewässer haben die Hochwasserspitzen in der warmen Jahreszeit. Es sind jedoch auch Veränderungen im Winterhalbjahr zu berücksichtigen, da infolge der Erwärmung im Winter der Niederschlag vermehrt in Form von Regen statt Schnee fallen wird.

Der klassische Ansatz, um solche Fragen zu behandeln, verwendet eine Modellkette aus globalen und regiona-



len Klimamodellen, die durch Emissionsszenarien angetrieben werden. Diese Kette kann in einem letzten Schritt auch hydrologische Modelle antreiben. Seit etwa 10 Jahren sind die Klimamodelle in qualitativer Übereinstimmung und sagen für den Sommer eine Reduktion der mittleren Niederschlagstätigkeit in Zentraleuropa voraus (CH2011 2011; Rajczak et al. 2013). Gleichzeitig nehmen laut den Modellen die täglichen Niederschlagsspitzen leicht und die stündlichen Niederschlagsspitzen deutlich zu (Ban et al. 2015; Giorgi et al. 2016). Diese Zunahme betrifft konvektive Ereignisse – also Gewitter und Schauer und ist auch in den Beobachtungen der letzten Jahrzehnte sichtbar (Scherrer et al. 2016). Bis anhin haben Studien dieser Art jedoch nur vergleichsweise häufige Ereignisse mit einer Rückkehrperiode von maximal 50 bis 100 Jahren analysiert.

Hinweise auf die Entwicklung des Hochwassergeschehens im Zuge des Klimawandels lassen sich auch aus der Vergangenheit gewinnen, sofern es gelingt, entsprechende Indizes über lange Zeiträume aus natürlichen Klimaarchiven abzuleiten. Kürzlich wurde die Häufigkeit grossräumiger sommerlicher Überschwemmungen für die letzten 2500 Jahre rekonstruiert, basierend auf Sedimenten von 10 Seen im Alpenraum (Abb. 1.3) (Glur et al. 2013). Die Resultate zeigen, dass grossräumige Hochwasser in vergleichsweise kühlen Sommern häufiger auftauchen. Dies

stimmt mit früheren Studien überein, die eine erhöhte Häufigkeit von schweren Überschwemmungen in der kleinen Eiszeit und eine reduzierte Häufigkeit in der mittelalterlichen Warmzeit gefunden hatten (Schmocker-Fackel et al. 2010). Dieses Resultat ist qualitativ auch mit der von den Klimamodellen projizierten Abnahme der sommerlichen Niederschläge konsistent, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass es sich bei der projizierten Zunahme von Starkniederschlägen um kurzzeitige und meist kleinräumige Ereignisse handelt, und nicht um grossräumige Ereignisse wie etwa die sommerlichen Überschwemmungen vom August 2005. Das würde also bedeuten, kurzzeitige, kleinräumige Ereignisse werden häufiger, während stärkere, grossräumige abnehmen könnten.

### Zukünftige Herausforderungen

Obwohl sich ein qualitatives Verständnis der Sensitivität des Sommerklimas und seiner Starkniederschläge (grossräumige Niederschlagsabnahme gekoppelt mit Intensitätszunahme) abzuzeichnen beginnt, bestehen noch grosse Unsicherheiten. Insbesondere ist hervorzuheben, dass vertrauenswürdige quantitative Aussagen erst für relativ häufige Ereignisse mit Rückkehrperioden von weniger als 100 Jahren möglich sind, selbst wenn der Klimawandel

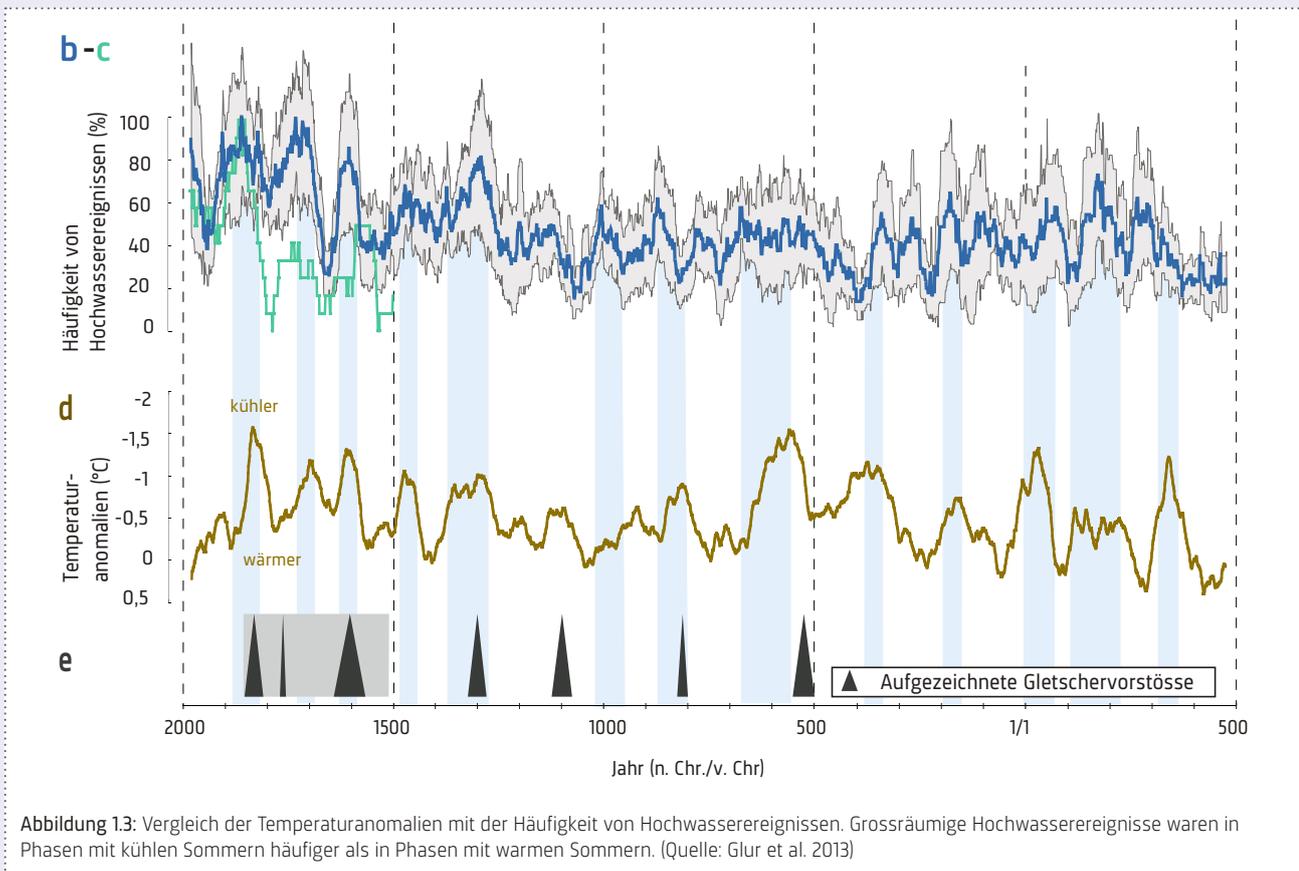


Abbildung 1.3: Vergleich der Temperaturanomalien mit der Häufigkeit von Hochwasserereignissen. Grossräumige Hochwasserereignisse waren in Phasen mit kühlen Sommern häufiger als in Phasen mit warmen Sommern. (Quelle: Glur et al. 2013)

vernachlässigt wird. Offene Fragen stellen sich in folgenden Bereichen:

- Hydrometeorologische Ereignisketten: Darunter versteht man eine Kombination von hydrologisch relevanten seltenen Ereignissen. Ein Beispiel ist das in der Einleitung beschriebene Zusammentreffen der Akkumulation von Schnee über zwei Winter und einen Sommer im Zusammenhang mit dem Tambora-Ausbruch, gefolgt von einer intensiven Schneeschmelze und Starkniederschlägen.
- Schneehydrologie: Die Zunahme von Regen auf Kosten von Schneefall ist primär temperaturgetrieben und kann einen grossen Einfluss auf die Abflussbildung haben (BAFU 2012). Schnee hat aufgrund seiner Wasserspeicherkapazität oft einen dämpfenden Effekt auf die Abflussbildung. Mit dem Anstieg der Schneefallgrenze werden gewisse Hochwasserszenarien wahrscheinlicher werden.
- Interne Variabilität im Klimasystem: Änderungen von natürlichen Schwankungen wie der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen (auf einer Zeitskala von Tagen bis zu Jahren) könnte die Häufigkeit von extrem seltenen Ereignissen entscheidend beeinflussen. Nebst der interannuellen (Jahr-zu-Jahr) Variabilität sind auch kurze Zeitskalen wichtig. Ändert sich beispielsweise die Persistenz von Wetterlagen, kann dies zu langanhaltenden Niederschlägen oder Trockenperioden führen.

## Fazit

In den letzten zehn Jahren sind in der Modellierung des Klimasystems wesentliche Fortschritte erzielt worden, auch im Bereich der Extremereignisse. Ein Projekt wie EXAR wäre daher vor zehn Jahren noch kaum denkbar gewesen, da insbesondere die Unsicherheiten in den Modellresultaten noch kaum quantifiziert waren. Auch die hydrologische Modellierung hat grosse Fortschritte gemacht und erlaubt heute die Simulation von komplexen Ereignisketten. Damit können heute wichtige Informationen auch zu sehr seltenen Ereignissen skizziert werden. Nach wie vor gibt es jedoch grosse Herausforderungen, beispielsweise im Zusammenhang mit Veränderungen in der Variabilität oder bei der Betrachtung einer unerwarteten Abfolge mehrerer Ereignisse.

Bei all dem darf jedoch nicht vergessen werden, dass es keine absolute Sicherheit gibt und es immer auch «unknown unknowns» geben wird, das heisst unbekannte Faktoren oder Entwicklungen, derer man sich nicht einmal bewusst ist. Dies entbindet jedoch niemanden davon, die bestehenden Abschätzungen als Orientierungshilfe zu nutzen.

## Referenzen

- BAFU (2012) **Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer**. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1217: 76 pp.
- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) **Evaluation of the convection-resolving regional climate modelling approach in decade-long simulations**. Journal of Geophysical Research 119: 7889–7907.
- 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
- Emch + Berger, geo7, HydroCosmos (2015) **Extreme flooding events Aare-Rhein (EXAR)**. Methodology report.
- Geo7, IUB Ingenieur Unternehmung, Hunziker, Zarn & Partner, Emch+Berger (2007) **Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare**. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern.
- Giorgi F, Torma C, Coppola E, Ban N, Schär C, Somot S (2016) **Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming**. Nature Geoscience 9: 584–589.
- Glur L, Wirth SB, Büntgen U, Gilli A, Haug GH, Schär C, Beer J, Anselmetti FS (2013) **Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years**. Scientific Reports 3: 2770.
- GRS (2015) **Fukushima Daiichi – Unfallablauf, radiologische Folgen**. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (4th ed.).
- Hilker N, Badoux A, Hegg C (2009) **The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007**. Natural Hazards and Earth System Sciences 9: 913–925.
- Kobelt K (1926) **Die Regulierung des Bodensees. Hochwasserschutz, Kraftwerknutzung und Schifffahrt**. Bern.
- Pfister C (1999) **Wetternachhersage: 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)**. Haupt Verlag, Bern.
- Pfister C (2009) **Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins**. GAIA 3: 239–246.
- Pfister C, Wetter O (2011) **Das Jahrtausendhochwasser von 1480 an Aare und Rhein**. Berner Zeitschrift für Geschichte und Heimatkunde 73: 41–49.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region**. Journal of Geophysical Research Atmospheres 118: 3610–3626.
- Scherrer SC, Fischer EM, Posselt R, Liniger MA, Croci-Maspoli M, Knutti R (2016) **Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121: 2626–2637.
- Schmocker-Fackel P, Naef F (2010) **Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500**. Hydrology and Earth System Sciences 14: 1581–1594.

## 1.1 Einleitung

«Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig» und «der menschliche Einfluss auf das Klimasystem ist klar». Diese Hauptaussagen im Fünften IPCC-Sachstandsbericht bringen nicht nur das Kernproblem auf einen kurzen Nenner, sondern zeigen auch auf, dass die jahrzehntelange Forschung und Beobachtung des Klimasystems zu klaren Erkenntnissen geführt hat, auch wenn es immer noch zahlreiche offene Fragen gibt.

*Urs Neu (ProClim/SCNAT)*

### Die Temperaturen steigen – und wir wissen warum

Die Erdoberfläche hat sich im globalen Mittel seit mehreren Jahrzehnten aussergewöhnlich stark erwärmt (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40) – und wir wissen warum. Die zunehmenden Emissionen an Treibhausgasen in die Atmosphäre durch die Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe – insbesondere von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sowie die Abholzung tropischer Regenwälder und Landnutzung – verändert den Strahlungshaushalt der Erde. Treibhausgase wie Kohlendioxid, Wasserdampf, Methan oder Lachgas haben in der Atmosphäre eine vergleichbare Wirkung wie die Fenster in einem Glashauss – sie verhindern eine effiziente Abstrahlung –, auch wenn der physikalische Prozess ein anderer und komplexer ist. Dieser Prozess ist wissenschaftlich gut erforscht, so dass seine Wirkung verlässlich abgeschätzt werden kann. Wir wissen auch, dass diese Klimaentwicklung aussergewöhnlich ist: Das erkennen wir zum Beispiel daran, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Erdatmosphäre in den letzten 800 000 Jahren den Wert von 280 ppm (parts per million) kaum übertroffen hat – aber im Rahmen des aktuellen Anstiegs im April 2014 erstmals die Marke von 400 ppm überschritten hat und somit über 40 Prozent höher liegt (Abb. 1.4).

### Komplexe Rückkopplungen

Das Klimasystem besteht nicht nur aus der Atmosphäre, sondern wird auch vom Ozean, Eis und Schnee, dem Boden, der Vegetation und den vom Mensch bewirtschafteten Landflächen beeinflusst. Diese Komponenten stehen in einem ständigen Austausch mit der Atmosphäre. Ändert sich einer dieser Teile, so ändern sich die anderen auch. Das führt dazu, dass eine Erwärmung der Atmosphäre im ganzen System Änderungen bewirkt, die sich wiederum auf das Gesamtsystem auswirken. Es kommt also zu einer Reihe von Rückkopplungen, welche die ursprüngliche Änderung abschwächen oder verstärken können.

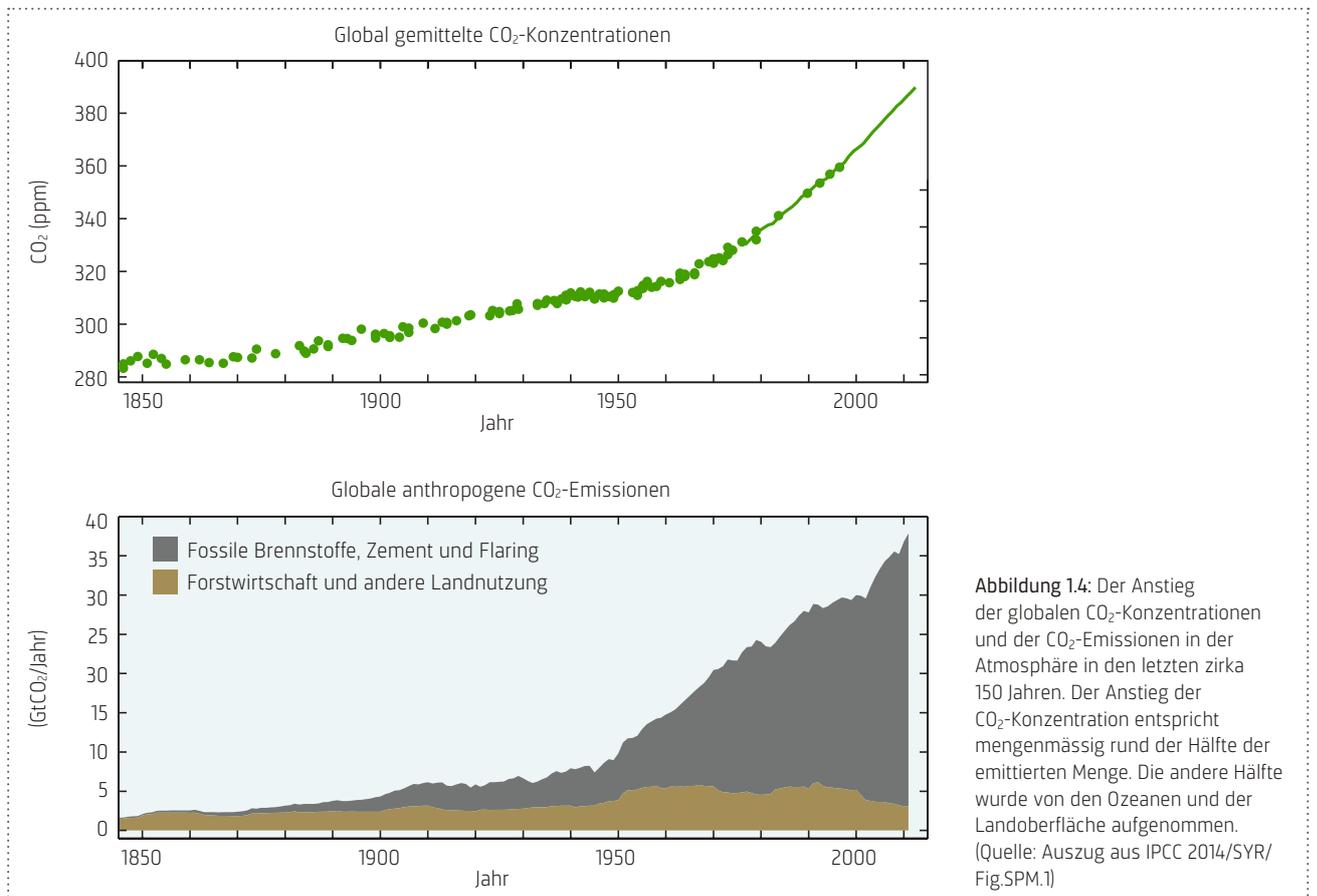
Ein Beispiel für solche Rückkopplungen ist, dass eine Erwärmung zu einer Erhöhung des Wasserdampfgehaltes

in der Luft führt und – weil Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas ist – die Erwärmung verstärkt. Dieser Effekt ist gut bekannt. Ein zweites Beispiel sind die Wirkungen von Wolken: Stärkere Verdunstung und mehr Wasser in der Luft verändern auch die Wolkenbedeckung, allerdings ist nicht klar, wie genau. Hohe Wolken verstärken die Erwärmung (sie sind dünn und wirken wie Treibhausgase), tiefliegende Wolken wirken kühlend (sie reflektieren die Sonnenstrahlung). Die wärmenden Effekte überwiegen wahrscheinlich, aber die Unsicherheiten sind beträchtlich.

Das Grundprinzip ist also bekannt – je mehr Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen, desto stärker wird die Erwärmung. Den genauen Betrag kennen wir zwar nicht, aber einen ungefähren Bereich, das sind etwa zwischen zwei bis vier Grad Celsius Erwärmung bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Beobachtungen aus der jüngeren Vergangenheit (s. a. Kap. 1.2 Das vergangene Klima, S. 32) zeigen die Wirkung der vom Menschen verursachten Emissionen, jene aus der fernen Vergangenheit zeigen uns, wie sich Veränderungen im Klimasystem auswirken können und erlauben uns, die beobachteten und erwarteten Veränderungen in einen historischen Kontext zu stellen.

### Natürliche Schwankungen und menschlicher Einfluss

Das Klima hat sich im Verlaufe der Erdgeschichte immer wieder verändert (s. a. Kap. 1.2 Das vergangene Klima, S. 32): Je nach Einflussfaktor auf einer Zeitskala von vielen Millionen Jahren (aufgrund der Verschiebung der Kontinente), von 10 000 bis 100 000 Jahren (Veränderung der Erdbahnparameter) oder von zirka 10 bis 1000 Jahren (Veränderung der Sonneneinstrahlung oder der Vulkanaktivität). Veränderungen in der Grössenordnung der zurzeit ablaufenden Erwärmung dauerten dabei deutlich länger, als dies heute der Fall ist. Zum letzten Mal auf globaler Skala 1 bis 1,5 Grad Celsius wärmer als heute war es in der letzten Zwischeneiszeit vor rund 120 000 Jahren. Der Meeresspiegel lag damals zwischen fünf und zehn



Meter höher als heute. Vor drei Millionen Jahren war es zum letzten Mal global rund drei Grad Celsius wärmer als heute (etwa das, was wir bei einem mittleren Emissionszenario bis Ende des Jahrhunderts erwarten), wobei damals der Meeresspiegel rund 20 Meter höher lag als heute. Dieser Zustand entwickelte sich jedoch sehr wahrscheinlich über einen viel längeren Zeitraum, als wir das bei der zurzeit ablaufenden Entwicklung erwarten.

Sowohl das globale wie auch das regionale Klima unterliegen natürlichen Schwankungen auf einer Zeitskala von Jahr-zu-Jahr bis zu wenigen Jahrzehnten (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). Diese Schwankungen sind zum einen Teil Folge von externen Einflussfaktoren wie beispielsweise Schwankungen der Sonnenaktivität oder Vulkanausbrüchen sowie von internen Schwankungen im Klimasystem, wie dem El Niño/La Niña-Phänomen im tropischen Pazifik. Ein wesentlicher Teil dieser Schwankungen hat jedoch einen zufälligen Charakter – solche Schwankungen sind deshalb bisher schwer vorauszusagen. Diese natürliche Variabilität kann von Jahr zu Jahr beziehungsweise über einige Jahrzehnte regional viel dominanter sein als die Auswirkungen der Erwärmung des Klimasystems. Deshalb braucht es oft einige Jahrzehnte, bis der langfristi-

ge Trend des menschverursachten Klimawandels auch regional aus den natürlichen Schwankungen deutlich zum Vorschein kommt.

### Wo liegt das Problem?

Weshalb aber ist eine Erwärmung des Klimasystems ein Grund zur Sorge? Wir bewegen uns, wenn wir die Erdgeschichte anschauen, ja eigentlich gar nicht in einer neuen Situation. Das stimmt grundsätzlich nur, wenn die Auswirkungen auf den Menschen und die heutigen Ökosysteme ausgeblendet werden. Mit der Erwärmung werden sich alle Grössen ändern, die durch die Temperatur beeinflusst sind. Klimawandel ist deshalb ein Ressourcenproblem, wenn wir erkennen, dass auch der Wasserkreislauf stark betroffen sein wird, Extremereignisse die Nahrungproduktion beeinflussen und durch den Anstieg des Meeresspiegels Land verloren geht, um nur einige Beispiele zu nennen.

In diesem Sinne ist der Ausdruck «Klimaschutz», der für Massnahmen gegen den Klimawandel verwendet wird, umfassend als Schutz unserer Lebensbedingungen, der Ressourcensicherheit und der Ökosystemdienst-

leistungen, die alle durch den Klimawandel beeinflusst sind, zu verstehen. Es geht also nicht darum, das Klima zu schützen, sondern vielmehr darum, *die menschliche Gesellschaft vor den unerwünschten Auswirkungen des Klimawandels zu schützen*. Die Natur wird sich zweifellos an die neuen Bedingungen anpassen. Für unsere Gesellschaft, oder zumindest grosse Teile davon, kann dies jedoch eine immense Herausforderung sein. Mit zunehmendem Klimawandel erreichen wir Grenzen, wo eine Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels nicht mehr möglich sein wird, weil durch den Wandel die Ressourcen knapp geworden sind oder nicht mehr zur Verfügung stehen. Man stelle sich nur einmal eine geographische Karte mit einem 5 Meter höheren Meeresspiegel vor, von 20 Metern gar nicht zu sprechen.

Der Klimawandel äussert sich nicht nur in einer Änderung der Temperatur, sondern auch bei anderen Grössen wie Niederschlag, Verdunstung, Wind- oder Ozeanströmungen. Auch werden nicht nur die Mittelwerte, sondern auch die zeitliche und räumliche Verteilung dieser Grössen beeinflusst, insbesondere auch die Extremwerte oder Extremereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge oder Trockenheit. Die Änderung all dieser Grössen wirkt sich dann auf viele Bereiche unseres Lebens und auf unsere Umgebung aus, z. B. auf die Tier- und Pflanzenwelt, Schneebedeckung, Gletscher, Permafrost und viele mehr. Diese Auswirkungen werden in Teil 2: Folgen und Anpassung, S. 69 beschrieben.

## Die zukünftige Entwicklung

Die zu erwartende Entwicklung des Klimas ist für die nächsten paar Jahrzehnte praktisch vorgegeben. Dazu trägt die verzögerte Reaktion des Klimasystems auf die Änderungen im Strahlungshaushalt bei, da vor allem die Anpassung der Temperatur der Ozeane an die neuen Verhältnisse Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauert. Der Hauptgrund ist jedoch, dass die Emissionen kurzfristig stark durch unsere Infrastruktur und Gesellschaft bestimmt sind, und wir diese nur langfristig deutlich ändern können (Matthews & Solomon 2013). Da die langfristige Entwicklung der Emissionen nicht bekannt ist, arbeitet die Klimaforschung mit verschiedenen Szenarien, die unterschiedliche Entwicklungen dieser Emissionen repräsentieren (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38). Klar ist, dass die heutigen Emissionen, vor allem des langlebigen Kohlendioxids, sich noch Jahrhunderte bis Jahrtausende auswirken werden. Die Möglichkeiten zur Verminderung der Emissionen und damit zur Eindämmung des Klimawandels sind das Thema in Teil 3: Minderung.

## Vieles ist bekannt – es bleiben offene Fragen

Die Genauigkeit, mit welcher die Entwicklungen der erwähnten Klimaphänomene abgeschätzt werden kann, ist sehr unterschiedlich. Sie ist vor allem abhängig von der Komplexität der damit verbundenen physikalischen Prozesse und der Anzahl der beteiligten Faktoren. Vergleichsweise gut abschätzbar, beziehungsweise in Klimamodellen simulierbar, sind beispielsweise (s. a. Kap. 1.4 Klimamodelle, S. 36) globale Mittelwerte – diese werden primär von der Strahlungsbilanz und physikalischen Grundgesetzen bestimmt, wie zum Beispiel die Aufnahmekapazität von Wasser durch die Luft – sowie die Temperatur und damit verbundene Extremwerte wie Hitzewellen oder Hitzetage. Grund dafür ist, dass die Temperatur relativ gleichförmig verteilt ist und Messungen deshalb für relativ grosse Flächen repräsentativ sind.

Vergleichsweise schwierig sind Aussagen zu:

- Regionalem Klimawandel: Dieser wird primär durch die Verteilung der Wärme und die Veränderung der Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean sowie Landprozesse und Eisbedeckung beeinflusst, die viel schwieriger zu bestimmen sind als globale Grössen;
- Phänomenen, die mit Änderungen der Windströmungsmuster oder natürlichen Schwankungen wie El Niño verbunden sind: Diese werden in der Mehrheit von den Klimamodellen bisher noch nicht befriedigend erfasst;
- Phänomenen, die mit dem Wasserkreislauf verbunden sind, zum Beispiel Wolken: Das Wasser ist sehr kleinräumig verteilt; lokale Messungen sind wenig repräsentativ; viele Phänomene sind kleiner als die räumliche Auflösung der Klimamodelle.

## Unterschiedliche Vorhersagbarkeit von Veränderungen

In der Schweiz ist der Klimawandel in einigen Grössen bereits heute klar sichtbar. Dies betrifft vor allem diejenigen Bereiche, in denen die Temperatur relevant ist. Es sind dies die Temperatur selber (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40) sowie die Schmelzprozesse im Gebirge, vor allem bei den Gletschern und beim Permafrost sowie in der Schneebedeckung (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80). Im Bereich des Wasserkreislaufs (s. a. Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46) und der Extremereignisse (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52) sind, wie bereits erwähnt, die natürlichen Schwankungen so gross und die Prozesse so kleinräumig, dass die Aussagen sowohl zu den beobachteten Trends als auch zur zukünftigen Entwicklung zwangsläufig viel unsicherer sind.

Es gibt jedoch einige physikalische Prozesse und Phänomene, die gewisse Veränderungen bei den Niederschlä-

gen, inklusive den damit verbundenen Extremen, als sehr wahrscheinlich erscheinen lassen und auch in den Resultaten der Klimamodelle relativ klar heraustreten. Es sind dies zum Beispiel:

- Eine Tendenz zur Ausdehnung der Subtropen in Richtung Pol: Die im Sommer/Herbst sehr trockene mediterrane Klimazone dehnt sich nach Norden aus und erfasst immer mehr auch die Schweiz. Eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme der Intensität und Dauer von Trockenphasen im Sommer/Herbst sind eine Folge davon. Die Klimamodelle weichen in der Stärke dieser Entwicklung beträchtlich voneinander ab.
- Die Erhöhung des Wassergehalts in der Atmosphäre: Dies äussert sich in einer Zunahme der globalen Niederschläge. Die Veränderungen erfolgen jedoch in speziellen geographischen Mustern mit trockeneren Subtropen und nasseren hohen Breitengraden. Die Schweiz befindet sich damit bezüglich Niederschlagsmengen an der Grenze zwischen einer Zunahme im Norden und einer Abnahme im Süden. Das bedeutet, dass sich die jährliche Niederschlagssumme nur wenig ändert, sich jedoch saisonale Unterschiede ergeben können. Die Klimamodelle projizieren für die gesamte Schweiz eine Abnahme der mittleren Niederschläge im Sommer und für Teile der Schweiz eine Zunahme in den anderen Jahreszeiten.

Eine relativ grosse Unbekannte in der Entwicklung des regionalen Klimas sind Veränderungen in der Zirkulation in den mittleren Breiten und die Auswirkungen der raschen Erwärmung der Arktis im Vergleich zu den Tropen und die damit verbundenen Änderungen der Nord-Süd-Differenz der Temperatur. Da die Strömung in der Atmosphäre im Wesentlichen durch diese Differenz angetrieben wird, könnte dessen Änderung spürbare Auswirkungen auf die Art und Häufigkeit der Windmuster haben. Zurzeit werden in der Wissenschaft verschiedene mögliche Prozesse diskutiert, doch zeichnen sich bisher noch keine klaren Ergebnisse ab. Ein möglicher Effekt wäre, dass gleiche oder ähnliche Wetterlagen länger anhalten und allein durch ihre Dauer extreme Bedingungen, wie Austrocknung oder Vernässung und Hoch- beziehungsweise Tiefstände von Wasserpegeln (Seen, Flüsse, Grundwasser) hervorrufen könnten.

## Gewisse Veränderungen betreffen die Schweiz überdurchschnittlich – andere kaum

Aufgrund ihrer Topographie ist die Schweiz von Phänomenen im Zusammenhang mit der Gletscherschmelze, dem Auftauen von Permafrost und der Reduktion des Schneefalls überdurchschnittlich betroffen. Dabei spielt der so genannte Albedo-Effekt im Alpenraum eine wichtige Rolle: Aufgrund der schwindenden Schneedecke wird vom Boden mehr Wärme absorbiert und damit die Erwärmung verstärkt. Grund dafür ist, dass heller Schnee den grössten Teil der Einstrahlung reflektiert, während dunkler Boden die Strahlung mehrheitlich aufnimmt. Im Sommer spielen auch Rückkopplungen mit dem Bodenfeuchtegehalt für Hitzeextreme eine wichtige Rolle: Bei trockenen Böden führt die Energie, die normalerweise für die Verdunstung verwendet wird, zu einer zusätzlichen Erhöhung der Lufttemperatur. Von mittleren Niederschlagsveränderungen ist die Schweiz hingegen weniger betroffen als zum Beispiel viele Entwicklungsländer in den Tropen und Subtropen. Eine Ausnahme bildet der Sommer, wo die Abnahme der Niederschläge substantiell sein könnte (bis gegen 30 Prozent). Keine direkten lokalen Folgen haben hierzulande Veränderungen im Ozean (s. a. Kap. 1.9 Ozean und Kryosphäre, S. 60), insbesondere der Anstieg des Meeresspiegels, der in betroffenen Regionen enorme Auswirkungen hat und bereits mittelfristig ganze Inseln verschwinden lässt oder unbewohnbar macht und längerfristig an der Küste liegende Millionenstädte wie New York oder Mumbai bedroht. Diese Veränderungen können jedoch indirekte Auswirkungen auf die Schweiz haben, weil dadurch zum Beispiel in armen Regionen Krisen und Probleme ausgelöst werden können, die den Migrationsdruck auf die Schweiz erhöhen (s. a. Kap. 2.16 Globale Zusammenhänge und Migration, S. 136).

### Referenzen

- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- Matthews D, Solomon S (2013) *Irreversible does not mean unavoidable*. *Science* 340: 438–439.

## 1.2 Das vergangene Klima

Um die heutige Klimaänderung einordnen zu können, braucht es die Analyse des vergangenen Klimas. Dies ist mit Hilfe von frühinstrumentellen Messungen, historischen Dokumenten, Baumringen, Seesedimenten oder Eisbohrkernen möglich. Die Klimarekonstruktionen zeigen zum Beispiel, dass in der Schweiz die Sommertemperaturen in den letzten 25 Jahren deutlich oberhalb der Bandbreite der letzten 330 Jahre lagen.

*Stefan Brönnimann (Universität Bern)*

Analysen des vergangenen Klimas sind unabdingbar, um die heute ablaufenden klimatischen Veränderungen einordnen zu können. So zeigen Messungen an Eisbohrkernen, dass die Konzentrationen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas heute höher sind als jemals während der letzten 800 000 Jahre. Der Vergleich der heute gemessenen Temperaturen mit Klimarekonstruktionen belegt, dass die Jahresmitteltemperatur der Nordhemisphäre der Periode 1983–2012 *sehr wahrscheinlich*<sup>1</sup> höher war als während jeder anderen Dreissigjahresperiode der letzten 800 Jahre, *wahrscheinlich* auch der letzten 1400 Jahre. Auf kontinentaler Skala kamen im Mittelalter vermutlich jedoch jahrzehntelange Phasen vor, die so warm waren wie gewisse Phasen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (IPCC 2013/WGI/Chap.5). Seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist der Meeresspiegel schneller angestiegen als im Mittel über die letzten 2000 Jahre (IPCC 2013/WGI/SPM). Bei Dürren und Hochwassern, wo auch nicht-klimatische Faktoren eine Rolle spielen, ist die Situation weniger eindeutig: In den letzten tausend Jahren kamen Dürren vor, die stärker waren und länger dauerten als die seit 1900 beobachteten. Die heutigen Hochwassermagnituden in Europa sind im Kontext der letzten 1000 Jahre nicht ungewöhnlich (IPCC 2013/WGI/Chap.5).

### Temperatur und Niederschlag in der Schweiz

Für die Schweiz und den Alpenraum liegen mehrere jährlich aufgelöste Temperatur- und Niederschlagsrekonstruktionen vor (Abb. 1.6). Sie basieren auf frühinstrumentellen Messungen, historischen Dokumenten, Baumringen, Seesedimenten und anderen Quellen (Pfister 1999; Casty et al. 2005; Büntgen et al. 2006; Trachsel et al. 2012). Demnach sind die Sommertemperaturen seit dem Höhepunkt der «Kleinen Eiszeit» im ausgehenden 17. Jahrhundert um mehr als zwei Grad Celsius angestiegen, wobei der grösste Teil des Anstiegs nach 1975 erfolgte. Im frühen 19. Jahrhundert – unter anderem als Folge zweier Vulkanausbrüche – lag die Temperatur deutlich unterhalb des Schwankungsbereichs der letzten 330 Jahre. In den letz-

ten 25 Jahren, insbesondere in den Sommern 2003 und 2015, lag die Temperatur hingegen deutlich oberhalb der früheren Bandbreite. Auffallend im Vergleich der letzten Jahrhunderte ist auch das gänzliche Fehlen kalter Sommer seit 1980.

Die Sommerniederschläge weisen beträchtliche Schwankungen von Jahr zu Jahr auf, teils auch Schwankungen über mehrere Jahre. Sie zeigen aber keine längerfristigen Veränderungen.

### Extremereignisse in der Schweiz

Wetterextreme wie Hitzetage haben in der Schweiz seit Messbeginn zugenommen (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52). Die Häufigkeit von Ereignissen wie Überschwemmungen und Stürmen, die sich anhand von historischen Dokumenten und frühen Messungen noch weiter zurück rekonstruieren lässt (Abb. 1.6; Wetter et al. 2011; Stucki et al. 2014), zeigt aber auch starke Schwankungen über mehrere Jahrzehnte. In der Vergangenheit lassen



Abbildung 1.5: Hochwasser 1852 in Basel: Aufgrund solcher historischer Dokumente lässt sich die Häufigkeit von Hochwasserereignissen in der Vergangenheit untersuchen (Wetter et al. 2011). (Quelle: Staatsarchiv Basel-Stadt, BILD 13, 323)

<sup>1</sup> S. a. Wahrscheinlichkeitsangaben von IPCC, S. 22

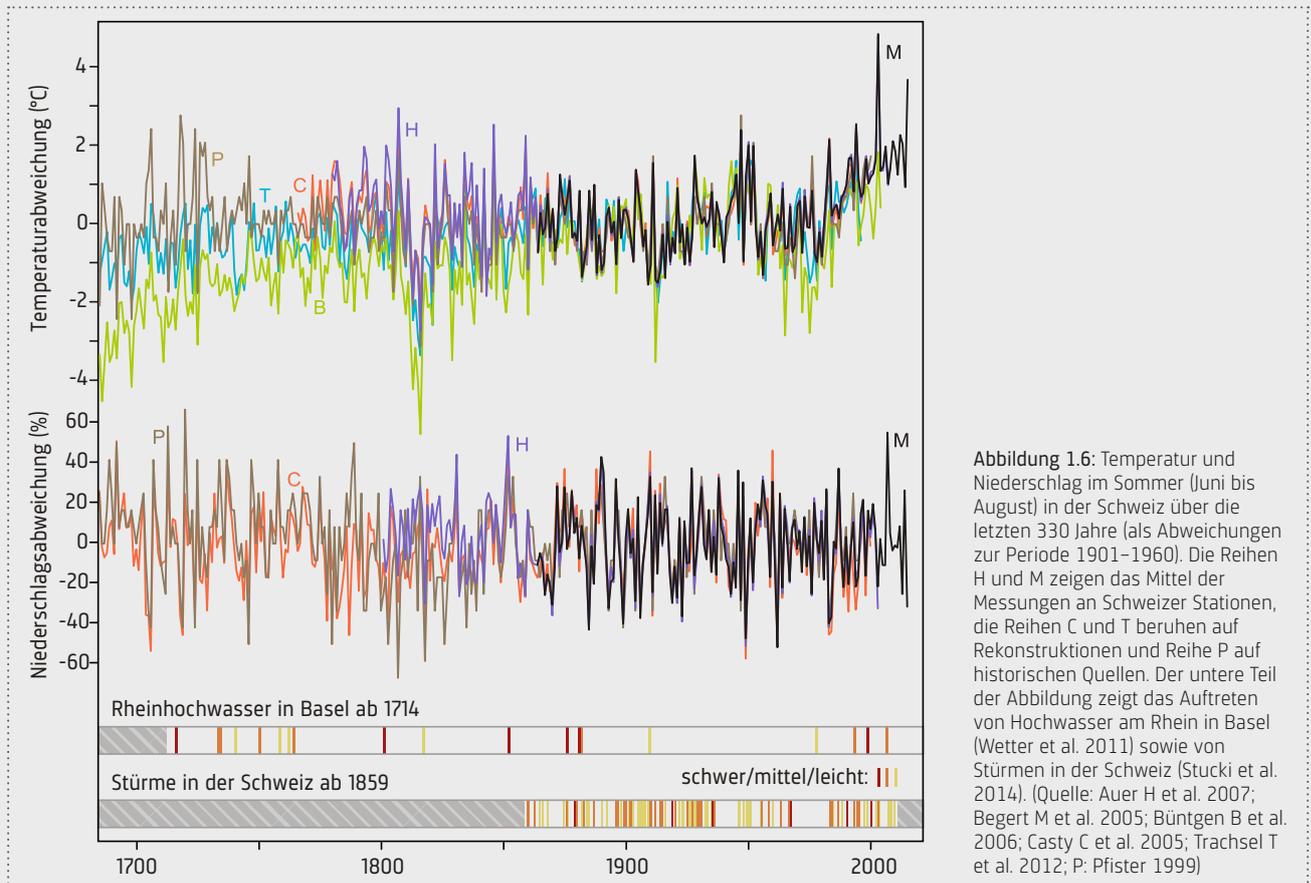


Abbildung 1.6: Temperatur und Niederschlag im Sommer (Juni bis August) in der Schweiz über die letzten 330 Jahre (als Abweichungen zur Periode 1901–1960). Die Reihen H und M zeigen das Mittel der Messungen an Schweizer Stationen, die Reihen C und T beruhen auf Rekonstruktionen und Reihe P auf historischen Quellen. Der untere Teil der Abbildung zeigt das Auftreten von Hochwasser am Rhein in Basel (Wetter et al. 2011) sowie von Stürmen in der Schweiz (Stucki et al. 2014). (Quelle: Auer H et al. 2007; Begert M et al. 2005; Büntgen B et al. 2006; Casty C et al. 2005; Trachsel T et al. 2012; P: Pfister 1999)

sich immer wieder Phasen mit selteneren und solche mit häufigeren Überschwemmungen und Stürmen nachweisen, so im späten 19. Jahrhundert und wiederum seit den 1980er-Jahren. Zwischen ungefähr 1935 und 1985 kamen dagegen nur wenige Überschwemmungen und Stürme vor. Dieses Phänomen wird als «Katastrophenlücke» bezeichnet (Pfister 2009) und beeinflusste den Umgang mit Naturkatastrophen in der Schweiz.

## Referenzen

- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Mauget M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E (2007) HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27: 17–46.
- 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.
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J (2006) Alpine summer temperature variations in the European Alps, AD 755–2004. *Journal of Climate* 19: 5606–5623.
- Casty C, Handorf D, Sempf M (2005) Combined winter climate regimes over the North Atlantic/European sector 1766–2000. *Geophysical Research Letters* 32: L13801.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1). Summary for Policymakers (SPM)*. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1). Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives»*. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Pfister C (1999) *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*. Haupt Verlag, Bern.
- Pfister C (2009) The «Disaster Gap» of the 20th Century and the Loss of Traditional Disaster Memory. *GAIA* 18: 239–246.
- Stucki P, Brönnimann S, Martius O, Welker C, Imhof M, Wattenwyl N von, Philipp N (2014) A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 2867–2882.
- Trachsel M, Kamenik C, Grosjean M, McCarroll D, Moberg A, Brázdil R, Büntgen U, Dobrovolný P, Esper J, Frank DC, Friedrich M, Glaser R, Larocque-Tobler I, Nicolussi K, Riemann D (2012) Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps. AD 1053–1996. *Quaternary Science Reviews* 46: 66–79.
- Wetter O, Pfister C, Weingartner R, Luterbacher J, Reist T, Trösch J (2011) The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal* 56: 733–758.

## 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima

Die langfristige menschengemachte Klimaänderung wird von kurzfristigen natürlichen Schwankungen des Klimas überlagert, die sich kaum voraussagen lassen. Diese natürliche Variabilität über Jahre bis Jahrzehnte ist für einen grossen Teil der Unsicherheit verantwortlich, die bei Voraussagen für einzelne Orte, für kurzfristige Zeitspannen und besonders für Variablen des Wasserkreislaufs und für Extremereignisse herrscht. Auch wenn diese Unsicherheit durch die natürliche Variabilität weiterhin bestehen bleibt, wird sie immer kleiner im Verhältnis zu den immer stärker werdenden menschengemachten Veränderungen.

*Reto Knutti (ETH Zürich)*

### Wetter versus Klima

Wetterlagen lassen sich nur für einige Tage klar voraussagen. Grund dafür ist, dass die Atmosphäre chaotisch ist. Das bedeutet, dass kleinste Unsicherheiten in den Modellen oder in den Messungen, die für die Wettervorhersage verwendet werden, anwachsen und damit langfristige Prognosen der exakten Abfolge, zum Beispiel von Hoch- und Tiefdruckgebieten sowie sonnigen und regnerischen Perioden, verunmöglichen. Die Statistik des Wetters und deren Veränderung in der Zukunft lassen sich jedoch bestimmen. So ist der Sommer in Rom heisser und trockener als in Hamburg, auch wenn wir das Wetter in Hamburg zum Beispiel für einen bestimmten Tag im Sommer des nächsten Jahres nicht voraussagen können. Voraussagen des Klimas, das heisst der Statistik des Wetters, sind Aussagen über die mittlere Temperatur, die Häufigkeit von Hitzetagen oder Tagen mit Schneefall, aber nicht Voraussagen für bestimmte Tage.

### Klimavariabilität macht Teil der Unsicherheit aus

Trotzdem sind das Wetter und – auf längeren Zeitskalen – die Kopplung von Atmosphäre und Ozean für die Klimaänderung wichtig. Die langfristige menschengemachte Veränderung wird überlagert von kurzfristiger Variabilität (Wetter), die sich für die kommenden Jahre und Jahrzehnte nicht voraussagen lässt. Langfristig (mehr als zehn Jahre) und gemittelt über grosse Kontinente ist der Beitrag der kurzfristigen Variabilität klein. Die kurzfristige Variabilität macht jedoch einen grossen Teil der Unsicherheit aus, wenn es um Voraussagen für einzelne Orte oder für Zeitspannen von Jahren bis Jahrzehnten für den Wasserkreislauf und für Extremereignisse geht.

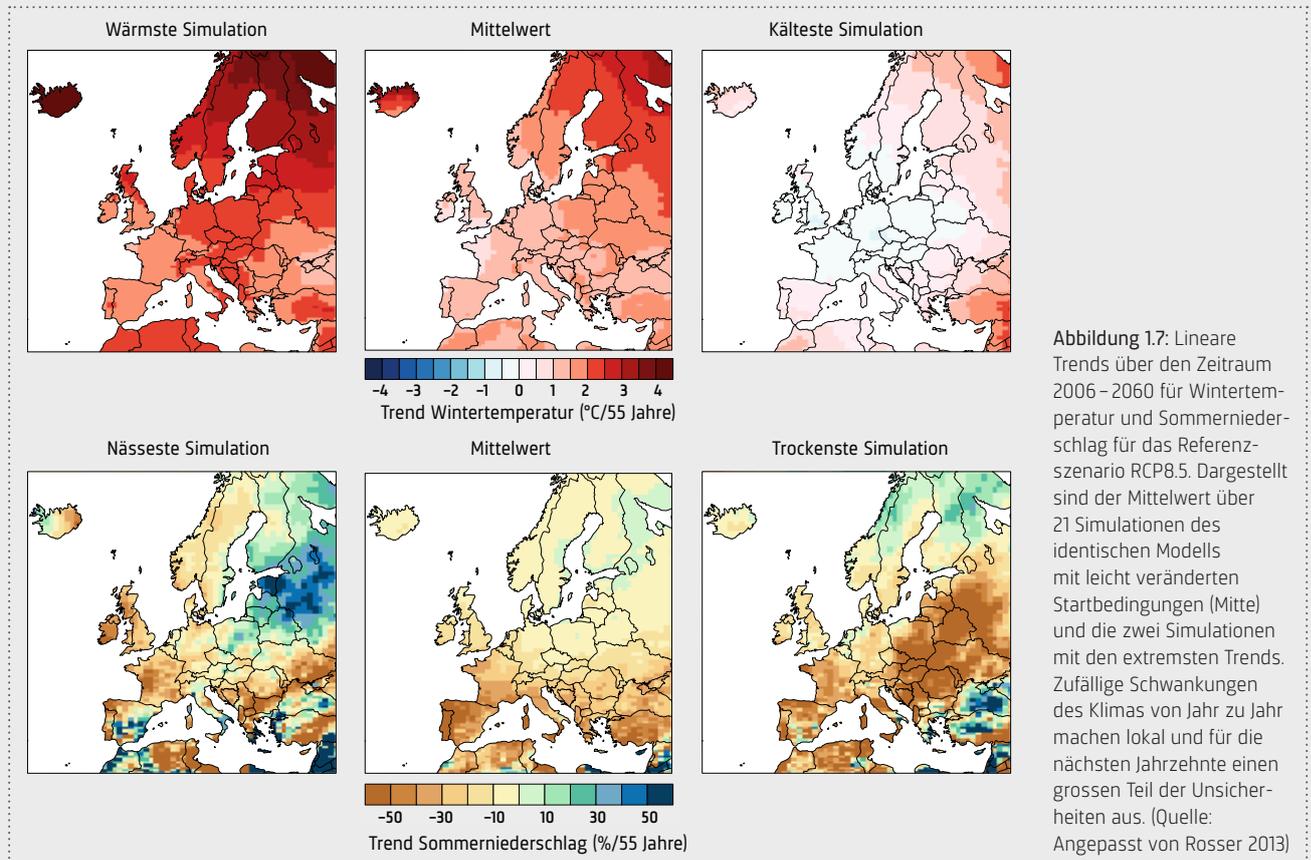
### Herausforderung für Klimamodellierung

Die Klimavariabilität ist damit eine Herausforderung sowohl für die Zuordnung vergangener Trends zum menschengemachten Klimawandel als auch für die Voraussage des lokalen Klimas über die nächsten Jahrzehnte. So können zum Beispiel extreme Niederschläge an einem Ort über mehrere Jahrzehnte abnehmen und später wieder zunehmen, ohne dass dies einen externen Grund, das heisst einen Grund ausserhalb der natürlichen Variabilität, haben muss. Die Abschwächung der Erwärmung im Zeitraum von 1998–2013 ist zum Teil durch zufällige Variationen im tropischen Pazifik zu erklären. Ebenso ist ein Teil der starken Meereisabnahme in der Arktis und die Häufung von kalten Wintern in der Nordhemisphäre über die letzten Jahre wahrscheinlich zufällig, das heisst alleine bedingt durch die natürliche Variabilität der Atmosphäre.

Die langfristige Zunahme über das ganze Jahrhundert in der globalen Temperatur, die langfristige Abnahme des arktischen Meereises und die Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs hingegen sind weit grösser als die erwartete natürliche Variabilität und können dem Menschen zugeordnet werden. Beobachtete Trends müssen also immer im Kontext der natürlichen Variabilität der entsprechenden Grösse betrachtet werden, bevor Schlüsse über Ursachen gezogen werden. Die natürliche Variabilität ist auch in Rekonstruktionen des Klimas und Messreihen über das 20. Jahrhundert gut erkennbar (s. a. Kap. 1.2 Das vergangene Klima, S. 32).

### Klimazukunft: Beitrag des Menschen übersteigt natürliche Variabilität

Für die Zukunft bedeutet die Klimavariabilität, dass der Mittelwert über mehrere Simulationen von Klimamodellen nur eine beste Schätzung des externen Antriebs durch Mensch, Sonne, Vulkane etc. darstellt. Dieser externe Einfluss wird überlagert von kurzfristigen Schwankungen, die kaum voraussagbar sind. Abbildung 1.7 illustriert dies



am Beispiel eines regionalen Klimamodells über Europa, das 21-mal mit ganz leicht veränderten Anfangsbedingungen und damit mit einer anderen Abfolge des täglichen Wetters die nächsten Jahrzehnte simuliert hat. Das Modell und das Szenario (und damit die externen Antriebe) sind identisch, weshalb die Spannbreite nur durch interne Variabilität zu erklären ist.

Die Abbildung 1.7 zeigt die erwartete Änderung der Wintertemperatur als Trend für die Jahre 2006–2060 (beste Schätzung, Mittelwert der Simulationen) und die wärmste und kälteste Simulation sowie den Trend des Sommerniederschlags (beste Schätzung, nässeste und trockenste Simulation). Über ganz Europa ist eine Erwärmung und Abnahme des Niederschlags wahrscheinlich, aber an einigen Orten werden die effektiven Trends von der erwarteten Veränderung deutlich abweichen. Verantwortlich dafür ist zum grössten Teil die nicht voraussagbare Abfolge von Wettermustern und nicht Fehler in den Klimamodellen.

Während die Unsicherheiten in Klimamodellen im Prinzip durch bessere Modelle reduziert werden können, wird der Beitrag der natürlichen Variabilität zur Unsicherheit in absoluten Zahlen etwa konstant bleiben – im Verhältnis

zum immer stärker werdenden menschengemachten Signal wird der Beitrag der natürlichen Variabilität jedoch immer kleiner.

## Referenzen

- Deser C, Knutti R, Solomon S, Phillips AS (2012) **Communication of the role of natural variability in future North American climate**. *Nature Climate Change* 2: 775–779.
- Fischer EM, Beyerle U and Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes**. *Nature Climate Change* 3: 1033–1038.
- Hawkins E, Sutton R (2009) **The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions**. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90: 1095–1107.
- 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](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Rosser S (2013) **Limits of regional predictability due to internal variability**. Master thesis, Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Switzerland.

## 1.4 Klimamodelle

Computermodelle werden eingesetzt, wenn gezielte Experimente nicht möglich, zu teuer oder nicht vertretbar sind. In der Klimaforschung sind Modelle die einzige Möglichkeit, um quantitative Aussagen zum Klima der nächsten Jahrzehnte machen zu können. Modelle werden aber auch verwendet, um Prozesse zu verstehen, das Klima der Vergangenheit zu simulieren und die Rolle des Menschen in der Klimaänderung zu verstehen. Da viele Klimamodelle enorme Rechenleistungen benötigen, sind sie auch mit den stärksten Hochleistungsrechnern immer ein Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung, Komplexität der beschriebenen Prozesse sowie Anzahl der Simulationen.

*Reto Knutti (ETH Zürich)*

Klimamodelle, oder allgemeiner Modelle des Systems Erde, basieren auf den Grundprinzipien der Physik, der Chemie, der Biologie und der Biogeochemie. So bleiben zum Beispiel Masse, Energie und Impuls erhalten, was die Bewegung von Luft und Wasser auf der rotierenden Erde bestimmt. Die Grundprinzipien werden mit den entsprechenden Gleichungen dargestellt und auf Hochleistungsrechnern möglichst präzise gelöst. Im Unterschied zu empirischen oder statistischen Modellen, die in Daten nach Strukturen suchen, steht also bei der Klimamodellierung die quantitative Beschreibung der Prozesse im Vordergrund.

Einige Prozesse, zum Beispiel kleinskalige oder biologische Prozesse, müssen allerdings vereinfacht beschrieben werden, weil entweder die Prozesse in quantitativer Hinsicht noch ungenügend verstanden sind oder die Rechenleistung nicht ausreicht, um sie explizit zu simulieren. Beispiele dafür sind die Wolkenbildung oder das Wachstum von Pflanzen. Für solche Prozesse gibt es verschiedene plausible Vereinfachungen, die mit den Beobachtungen alle ähnlich gut übereinstimmen. Dass es verschiedene Möglichkeiten der Vereinfachung gibt, ist ein Grund dafür, dass es viele verschiedene Klimamodelle gibt. Ein weiterer Grund ist, dass je nach Fragestellung andere Modelltypen besser geeignet sind. So werden zum Prozessverständnis auch idealisierte Modelle eingesetzt oder für Simulationen über lange Zeiträume in der Vergangenheit einfachere Modelle mit mehr Erdsystemkomponenten (z. B. Eisschilder oder Sedimentprozesse).

### Klimamodelle benötigen enorme Rechenleistung

Einige Prozesse, wie die Simulation von Wettersystemen, können mit einer höheren räumlichen Auflösung (einem engmaschigeren Gitter) genauer beschrieben werden. So zeigt Abbildung 1.8 Simulationen mit horizontalen Gitterweiten von etwa 200 Kilometern, 100 Kilometern und zehn Kilometern. In allen Fällen sind Hoch- und Tief-

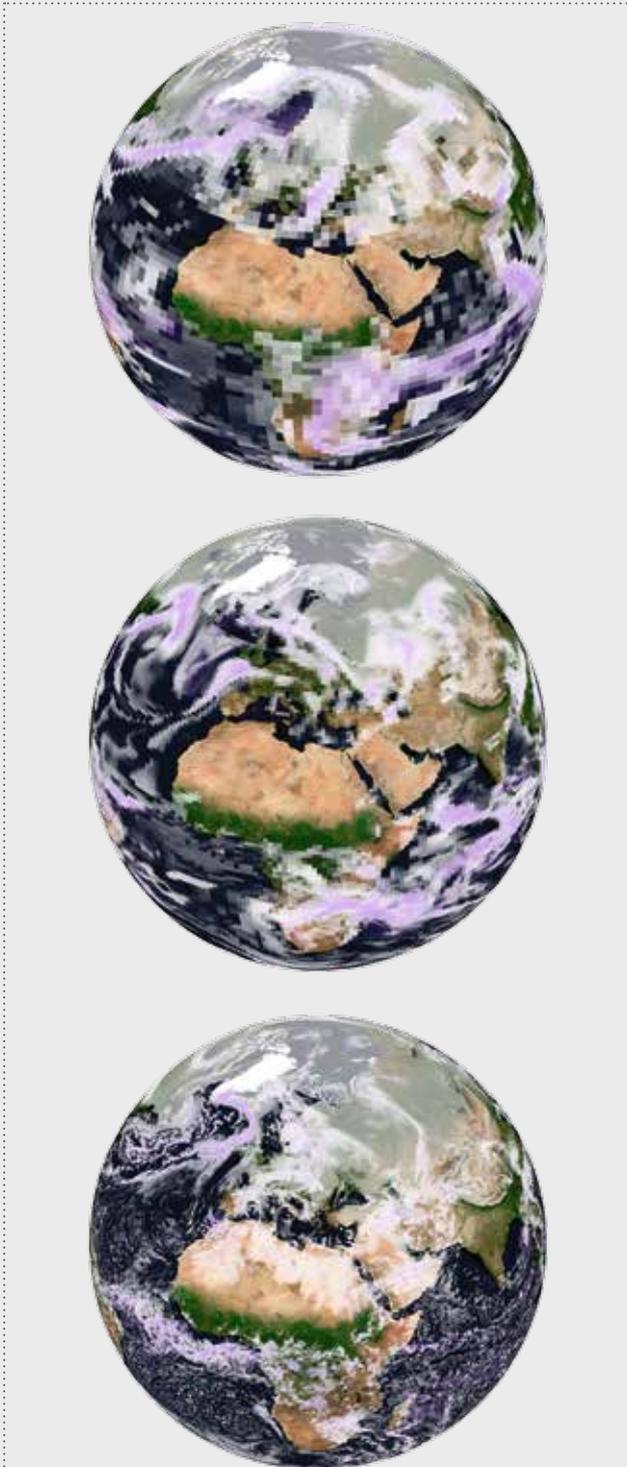
druckgebiete und Gebiete mit Niederschlag sichtbar; aber für kleinräumige Voraussagen sind höhere Auflösungen natürlich besser geeignet. Sie beschreiben die Wolken realistischer und berücksichtigen zum Beispiel die Topografie der Alpen. Allerdings benötigt die Simulation mit zehn Kilometern Auflösung mehr als die tausendfache Rechenleistung der Auflösung mit 200 Kilometern (Abb. 1.8, oben). Simulationen sind daher auch mit den stärksten Hochleistungsrechnern immer ein Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung, Komplexität der beschriebenen Prozesse, Anzahl und Länge der Simulationen sowie Grösse des Rechengebiets.

### Verschiedene Faktoren beeinflussen Qualität der Voraussagen

Globale Simulationen für die nächsten hundert Jahre haben aktuell meist eine Auflösung von rund 100 bis 200 Kilometern. Regionale Klimamodelle, die nur Europa simulieren und am Rand durch Daten eines globalen Modells angetrieben werden, haben eine Auflösung von meist 12 oder 25 Kilometern. Um realitätsnahe regionale Klima-projektionen zu erstellen, sind meist sowohl globale wie auch regionale Simulationen notwendig.

Eine weitere Verfeinerung der Modelle ist aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse. Aktuell wird daran gearbeitet, Niederschläge von Gewittern und die dazugehörigen Wechselwirkungen explizit zu berechnen (wie das heutzutage bei Wettervorhersagen bereits möglich ist).

Nebst der horizontalen Auflösung gibt es zahlreiche andere Faktoren, welche die Modellqualität beeinflussen. Bei globalen Modellen spielt insbesondere die Wechselwirkung mit anderen Komponenten des Klimasystems – Ozean, Meereis, Landoberflächen, Permafrost, Atmosphärenchemie, terrestrische und marine Ökosysteme sowie biogeochemische Kreisläufe – eine zentrale Rolle.



**Abbildung 1.8:** Ähnlich wie bei einem Kamerasensor mit mehr Pixel werden bei einem Klimamodell mit feinerer Gitterauflösung feinere Strukturen des Wetters aufgelöst. Dabei steigt allerdings der Rechenaufwand massiv an. Die Bilder zeigen Momentaufnahmen der simulierten Verteilung von Wolken (weiss) und Niederschlag (violett) mit einer Gitterweite von zwei Grad (ca. 200 Kilometer), ein Grad (ca. 100 Kilometer) und ein Achtel Grad (ca. 10 Kilometer). Modell: NCAR CESM. Bodenoberfläche: NASA Blue Marble Next Generation. (Quelle: ETH Zürich/NASA [vimeo.com/climatesciencevisuals])

## Umgang mit Unsicherheiten

Klimaprojektionen sind quantitative Voraussagen zum künftigen Klima für bestimmte Emissionsszenarien, das heisst für verschiedene Annahmen dazu, wie sich Gesellschaft, Wirtschaft und Technik künftig entwickeln könnten. Unsicherheiten bei Klimavoraussagen entstehen durch die Wahl dieser Emissionsszenarien (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38), durch Vereinfachungen in den Modellen und durch interne Klimavariabilität. Der Beitrag der Modellunsicherheit kann abgeschätzt werden, indem – wie im vorliegenden Bericht – die Resultate von mehreren existierenden Klimamodellen verglichen werden und daraus eine Unsicherheit abgeschätzt wird. Die so geschätzte Unsicherheit ist eine Kombination der Modellunsicherheit und der natürlichen Variabilität. Die Unsicherheit auf Grund von natürlicher Variabilität allein lässt sich bestimmen, indem mehrere Simulationen mit demselben Modell und leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgeführt werden (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34).

## 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen

Es ist kaum vorauszusagen, wie sich Technik, Wirtschaft, Gesellschaft und ihre Werte und Politik entwickeln oder wie der Mensch auf die Klimaänderung reagieren wird. Deshalb behilft sich die Forschung mit Szenarien. Sie ermöglichen es, verschiedene Entwicklungen der Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf Klima und Gesellschaft zu bestimmen und zu vergleichen. Für die verschiedenen Szenarien lässt sich jeweils auch der totale Strahlungsantrieb (Radiative forcing) berechnen, der die Stärke des menschlichen Eingriffs in das Klimasystem charakterisiert.

Reto Knutti (ETH Zürich), Joeri Rogelj (IIASA Laxenburg)

Wie der Mensch auf die Klimaänderung reagieren wird, ist mit naturwissenschaftlichen Methoden nicht voraussagbar. Ebenso schwierig sind Voraussagen über technische Entwicklungen und ihre Verbreitung, politische Massnahmen oder internationale Vereinbarungen. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, werden Szenarien verwendet. Sie ermöglichen es, verschiedene Entwicklungen der Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Klima und die Gesellschaft zu bestimmen und zu vergleichen.

Die Szenarien sollen sich möglichst stark voneinander unterscheiden – aber jedes Szenario muss plausibel sein und eine in sich konsistente Entwicklung von politischen Entscheidungen, technischem Fortschritt, Bevölkerungswachstum, Energieverbrauch und wirtschaftlicher Entwicklung beschreiben.

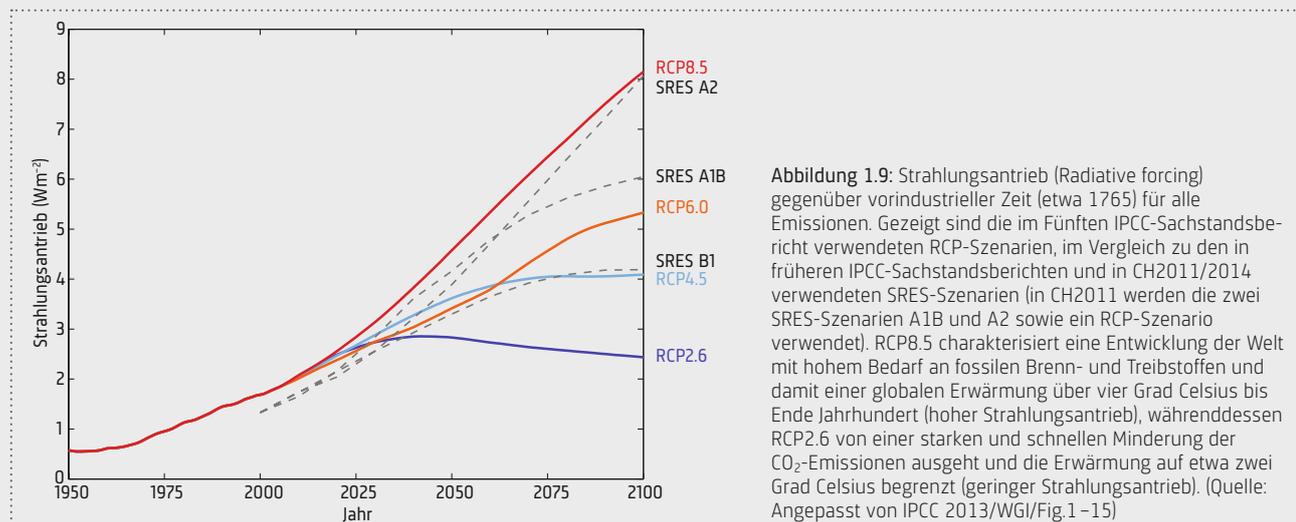
Berechnet werden die Szenarien mit sogenannten «Integrated Assessment Modellen» (IAM), die unter anderem das Energiesystem, die Technik, den Handel und die Landwirtschaft beschreiben. In die Modelle müssen dafür Annahmen einfließen, zum Beispiel zur Trägheit der

Wirtschaft und der sozialen und technischen Entwicklung. Damit werden dann die kostengünstigsten Pfade der Weltentwicklung für Szenarien mit tiefen und hohen Emissionen bestimmt.

### Szenarien: «Was wäre wenn»

Szenarien ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz werden oft als **Referenzszenarien** bezeichnet – wobei letzteres nicht bedeutet, dass alles auf dem heutigen Stand bleibt. Verbesserungen der Energieeffizienz und eine deutliche Zunahme der CO<sub>2</sub>-freien Energieerzeugung zum Beispiel können auch in den Referenzszenarien angenommen werden, soweit diese wirtschaftlich rentabel sind. Nicht jede Verbesserung der Effizienz und jeder Zuwachs alternativer Energie ist eine Folge von politischen Massnahmen zum Klimaschutz, viele technische Entwicklungen zum Beispiel sind marktgetrieben, weil sich damit Geld verdienen lässt.

Im Gegensatz dazu wird in den **Verminderungsszenarien** eine Begrenzung der Klimaänderung vorgeschrieben. Das



Szenario	RCP-Szenario	Charakteristika	Entwicklungspfad	entsprechende SRES-Szenarien
Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario)	RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine expliziten Klimaschutzmassnahmen</li> <li>Verbesserung der Energieeffizienz und Zunahme von CO<sub>2</sub>-freier Energieerzeugung soweit wirtschaftlich rentabel.</li> </ul>	steigend <ul style="list-style-type: none"> <li>Erwärmung im Jahr 2100: 4 –5 °C relativ zum vorindustriellen Niveau</li> <li>Strahlungsantrieb: 8,5 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2100</li> <li>CO<sub>2</sub>-Äquivalent: 1370 ppm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SRES-A1F1</li> <li>SRES-A1B und SRES-A2: auch Szenarien mit hohem CO<sub>2</sub>-Ausstoss, dieser ist jedoch etwas geringer als beim Szenario SRES-A1F1 und RCP8.5, aber weit über dem Ausstoss in Stabilisierungsszenarien.</li> </ul>
Szenario mit schwacher Emissionsminderung (kurz: Stabilisierungsszenario)	RCP4.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Senkung der Treibhausgasemissionen im Laufe des 21. Jahrhunderts, aber unzureichend, um den globalen Temperaturanstieg vor dem Jahr 2100 zu stabilisieren.</li> </ul>	steigend <ul style="list-style-type: none"> <li>Erwärmung im Jahr 2100: ~2,5 °C relativ zum vorindustriellen Niveau</li> <li>Strahlungsantrieb: 4,5 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2100</li> <li>CO<sub>2</sub>-Äquivalent: 650 ppm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SRES-B1 ist sehr ähnlich, wenn man den Verlauf der Erwärmung bis 2100 betrachtet.</li> </ul>
Szenario mit starker Emissionsminderung (kurz: Verminderungsszenario)	RCP2.6 (oder: RCP3PD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Starke Senkung der Treibhausgasemissionen im Laufe des 21. Jahrhunderts.</li> <li>Erhöhte Verbesserung der Energieeffizienz und Zunahme von CO<sub>2</sub>-freier Energieerzeugung, ohne das wirtschaftliche Wachstum zu gefährden.</li> </ul>	Peak und Rückgang <ul style="list-style-type: none"> <li>Erwärmung im Jahr 2100: ~1,5 °C relativ zum vorindustriellen Niveau</li> <li>Strahlungsantrieb: 3 W/m<sup>2</sup> vor dem Jahr 2100 danach sinkend auf 2,6 W/m<sup>2</sup> bis im Jahr 2100</li> <li>CO<sub>2</sub>-Äquivalent: 490 ppm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein vergleichbares SRES-Szenario verfügbar.</li> </ul>

**Tabelle 1.1:** Die Klimaforschung arbeitet mit Szenarien, um verschiedene Entwicklungen der Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf Klima und Gesellschaft zu bestimmen und zu vergleichen. Im vorliegenden Bericht werden (analog zu den IPCC-Sachstandsberichten) RCP- oder SRES-Szenarien diskutiert. Die RCP-Szenarien wurden für den Fünften IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2013/WGI) eingeführt. Davor wurden die SRES-Szenarien verwendet, die noch keine Klimaschutzmassnahmen enthielten. Einige der heutigen RCP-Szenarien können hinsichtlich der Temperaturentwicklung (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) ungefähr den früheren SRES-Szenarien zugeordnet werden (siehe letzte Tabellen-Spalte und Rogelj et al. 2012). (Quelle: Angepasst von Moss et. al 2010)

IAM-Modell bestimmt dann den Emissionspfad mit den tiefsten Kosten und den effizientesten Mix von Technik und Energie. Dabei wird berücksichtigt, dass sich Technik nicht beliebig schnell und breit einsetzen lässt, dass existierende Infrastruktur nur mit zusätzlichen Kosten vorzeitig ersetzt werden kann und dass das Investitionsvolumen nicht zu gross wird. Je ambitionierter das Klimaziel, desto stärkere zusätzliche Massnahmen zur Emissionsminderung von Treibhausgasen gegenüber den Referenzszenarien sind nötig. Ob diese politisch möglich oder wahrscheinlich sind, ist nicht Gegenstand der Szenarien. Die Szenarien sind stattdessen im Sinne von «Was wäre wenn ...» zu interpretieren. Sie präsentieren der Gesellschaft und Politik eine Auswahl von möglichen alternativen Zukunftsentwicklungen.

## Strahlungsantrieb: Stärke des menschlichen Eingriffs

Die «Integrated Assessment Modelle» berechnen aus der Entwicklung der Wirtschaft die Emissionen von Treibhausgasen (CO<sub>2</sub>, Methan, N<sub>2</sub>O, halogenierte Kohlenwasserstoffe und SF<sub>6</sub>), Aerosolen und anderen Luftschadstoffen. Daraus ergibt sich ein totaler Strahlungsantrieb (Radiative forcing, die Änderung der globalen Strahlungsbilanz), der die Stärke des menschlichen Eingriffs in das Klimasystem charakterisiert. Abbildung 1.9 zeigt die im Fünften Sachstandsbericht des IPCC verwendeten Szenarien (RCP genannt: Representative Concentration Pathways); die Spannweite

reicht dabei von einem Strahlungsantrieb von 2,6 W/m<sup>2</sup> bis 8,5 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2100. Dabei gilt: je höher der Wert, desto stärker die Klimaänderung.

Die Szenarien schreiben im Wesentlichen die Konzentrationen der Gase vor, woraus die Klimamodelle die nötigen Emissionsminderungen berechnen (s.a. Kap. 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen, S. 156). Mit welchen Techniken die Emissionen gemindert werden, ist nicht vorgeschrieben. Damit kann ein bestimmtes RCP-Szenario und eine dazugehörige Klimaänderung mit verschiedenen Kombinationen von Massnahmen im In- und Ausland, verschiedenen Techniken und verschiedenen politischen Instrumenten erreicht werden. Zum Vergleich sind in der Abbildung die in früheren Berichten verwendeten SRES-Szenarien gezeigt; diese beinhalten keine Massnahmen zum Klimaschutz.

### Referenzen

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

Moss RH, Edmond JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. *Nature* 436: 747–756.

Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R (2012) *Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates*. *Nature Climate Change* 2: 248–253.

## 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, <sup>neu</sup> 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:

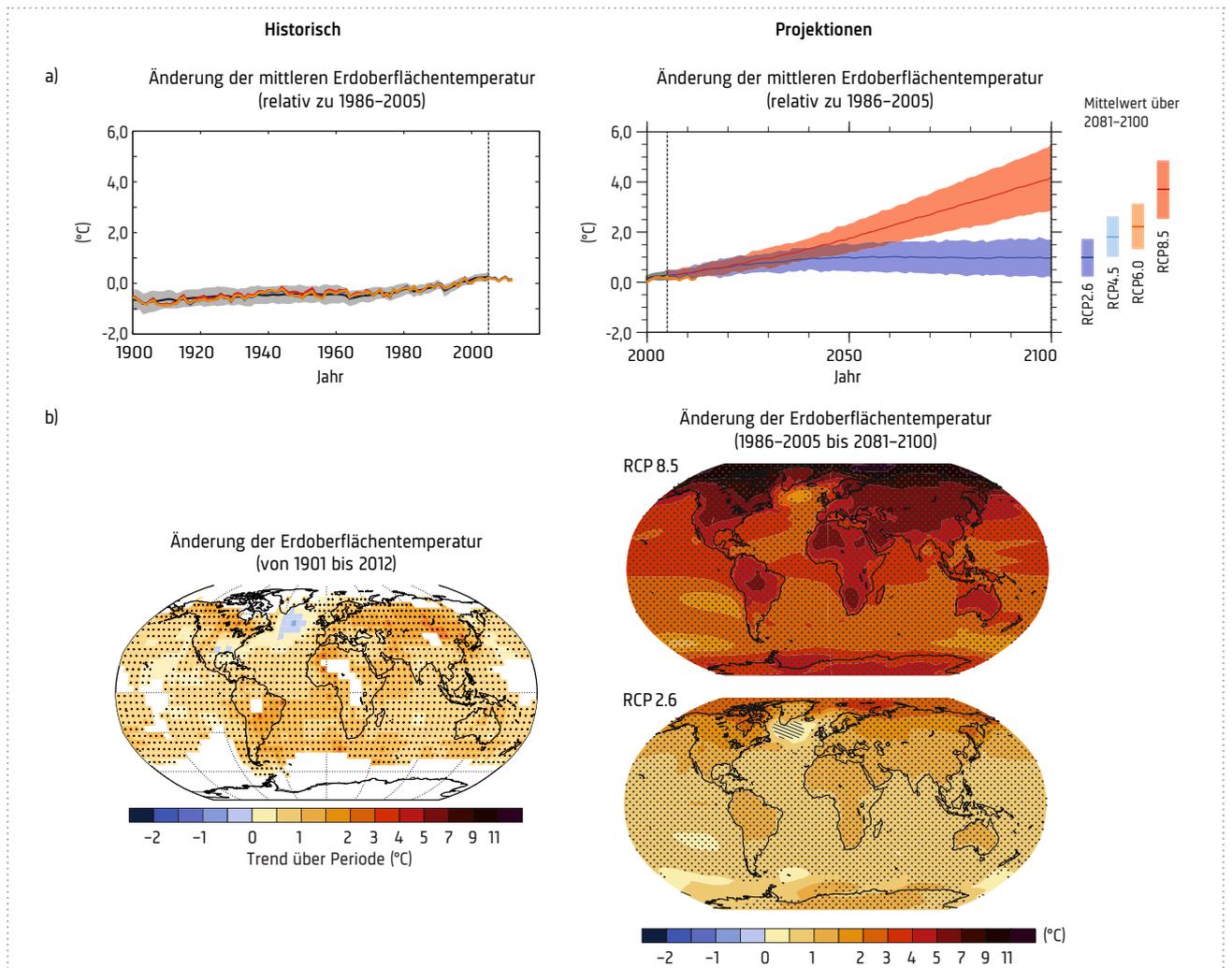
- Global: Ein Grossteil der beobachteten globalen Erwärmung ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen, vor allem auf die Emission von Treibhausgasen, insbesondere CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas durch die Verbrennung fossiler Treibstoffe oder durch Änderungen in der Landnutzung und der Abholzung von Wäldern. So ist es *äusserst wahrscheinlich*, dass der durch den Menschen verursachte Anstieg der Treibhausgaskonzentration (vor allem CO<sub>2</sub>) 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

#### CO<sub>2</sub>-Emissionen entscheiden über Ausmass der Erwärmung

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



**Abbildung 1.10:** Beobachtete und modellierte Änderungen der Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 1900 bis 2100. (a) Zeitlicher Verlauf der Änderungen der globalen Jahresmitteltemperatur. (b) Räumliches Muster der Änderungen der Jahresmitteltemperatur. Der Anstieg der globalen Jahresmitteltemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts beträgt knapp 0,9 Grad Celsius. Die Änderungen für dieses Jahrhundert könnten um ein Vielfaches grösser werden. Die zukünftige Erwärmung ist stark abhängig vom zukünftigen Verlauf der Treibhausgasemissionen. Die Mittelwerte über die Periode 2081–2100 und dazugehörige Unsicherheiten sind für alle RCP-Szenarien als horizontale Linien und farbige vertikale Balken dargestellt. Die Erwärmung ist nicht gleich ausgeprägt in allen Regionen der Erde: Der Anstieg der Temperatur über den Kontinenten ist in den meisten Regionen stärker als über den Ozeanen. Über der Arktis ist die beobachtete und projizierte Zunahme der Temperatur besonders ausgeprägt. In den gepunkteten Regionen sind die Veränderungen gross im Vergleich zur natürlichen Variabilität, während in den schraffierten Regionen die natürlichen Schwankungen dominieren werden. (Quelle: Kombinierte Informationen aus Abbildungen SPM.1, SPM.7 und SPM.8 von IPCC 2013/WGI/SPM)

Szenarien zur Entwicklung der Emissionen von CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>-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 Vulkanausbrüche 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):<sup>1</sup>

- **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 CO<sub>2</sub>-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

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

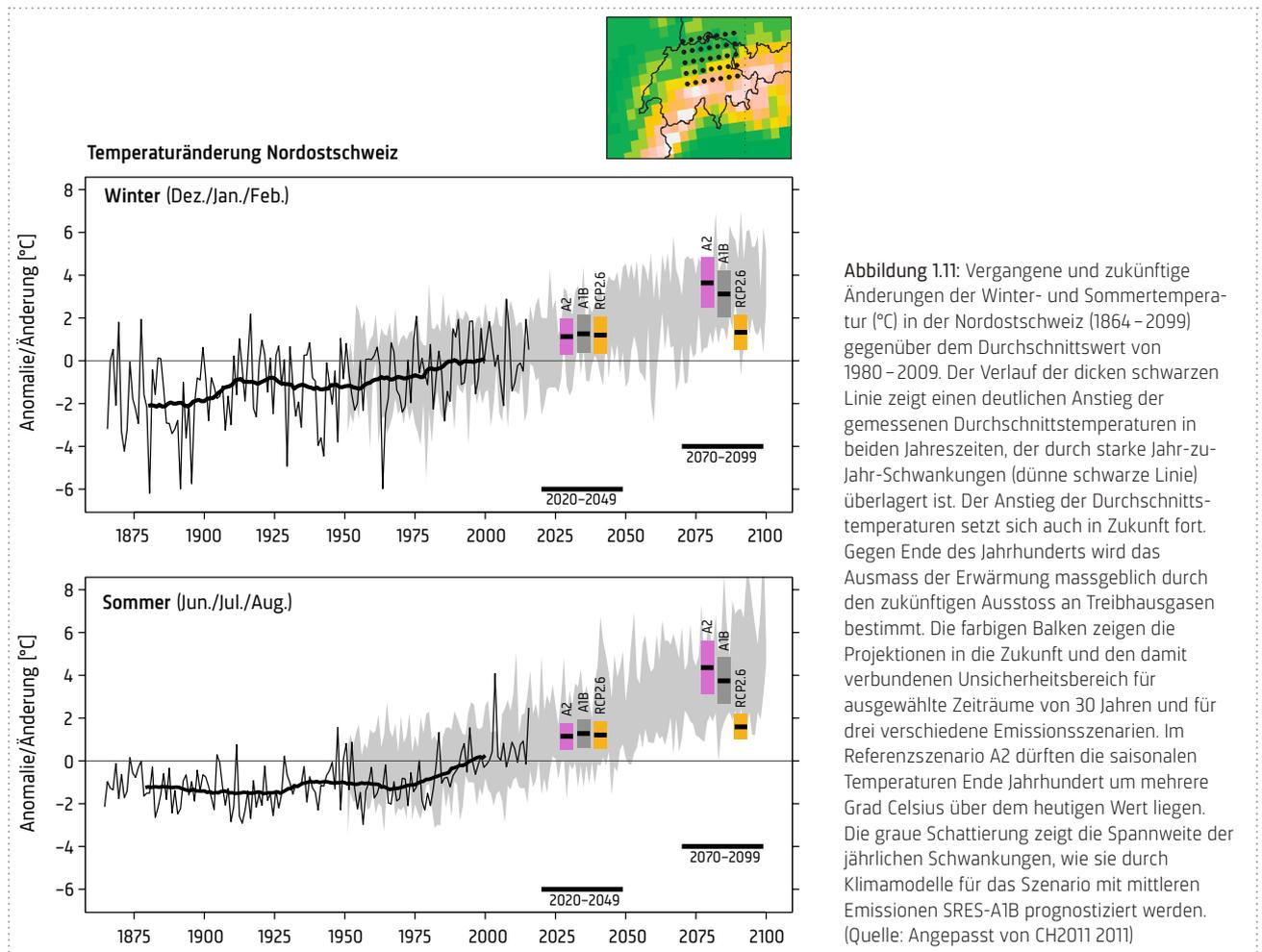


Abbildung 1.11: Vergangene und zukünftige Änderungen der Winter- und Sommertemperatur (°C) in der Nordostschweiz (1864–2099) gegenüber dem Durchschnittswert von 1980–2009. Der Verlauf der dicken schwarzen Linie zeigt einen deutlichen Anstieg der gemessenen Durchschnittstemperaturen in beiden Jahreszeiten, der durch starke Jahr-zu-Jahr-Schwankungen (dünne schwarze Linie) überlagert ist. Der Anstieg der Durchschnittstemperaturen setzt sich auch in Zukunft fort. Gegen Ende des Jahrhunderts wird das Ausmass der Erwärmung massgeblich durch den zukünftigen Ausstoss an Treibhausgasen bestimmt. Die farbigen Balken zeigen die Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Emissionsszenarien. Im Referenzszenario A2 dürften die saisonalen Temperaturen Ende Jahrhundert um mehrere Grad Celsius über dem heutigen Wert liegen. Die graue Schattierung zeigt die Spannweite der jährlichen Schwankungen, wie sie durch Klimamodelle für das Szenario mit mittleren Emissionen SRES-A1B prognostiziert werden. (Quelle: Angepasst von CH2011 2011)

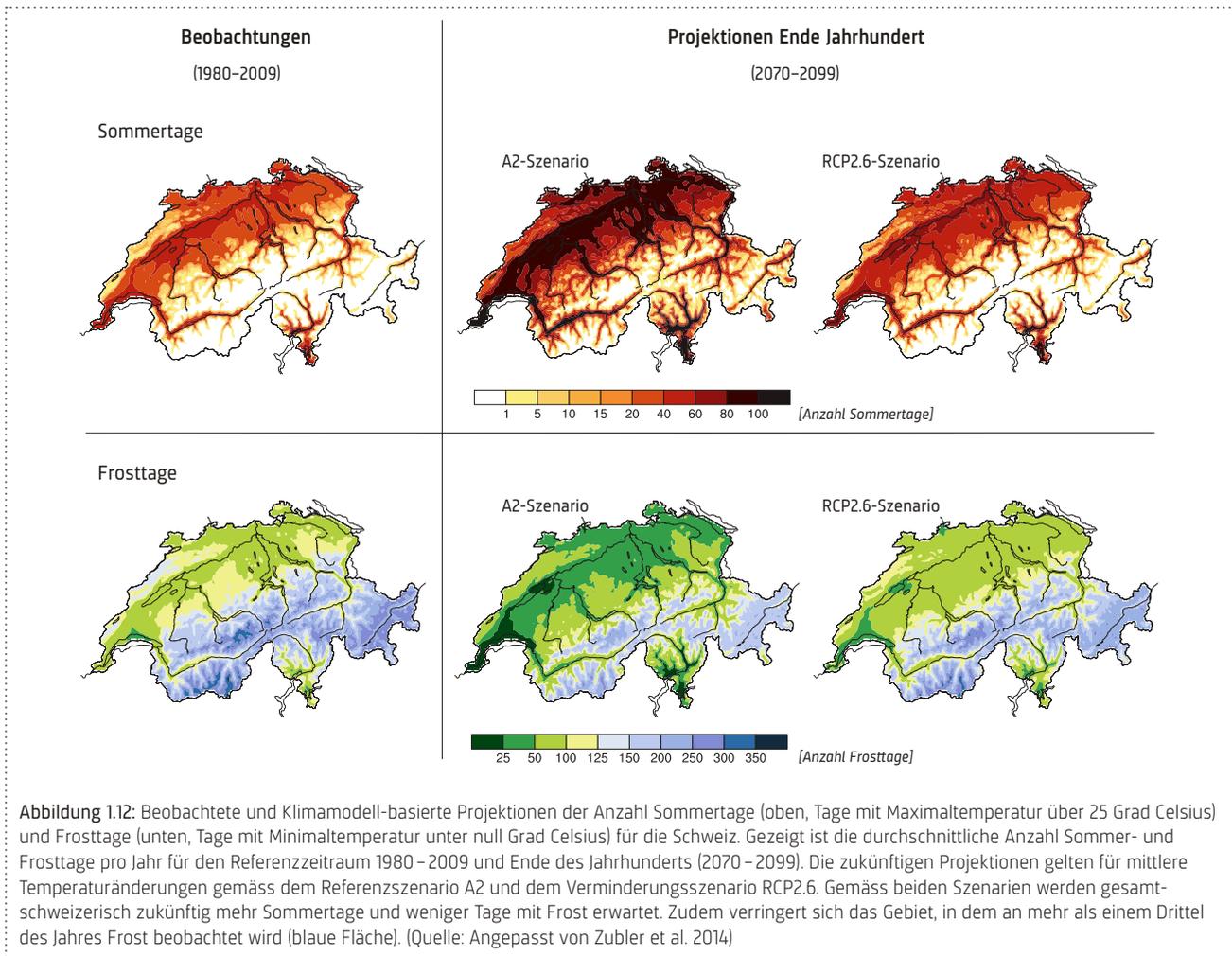
in höheren Lagen sowie in der Südschweiz hin. Deutlich unterscheiden sich die Temperaturänderungen je nach Vorhersagezeitraum, der betrachtet wird, und je nach Annahme zum zukünftigen Ausstoss der Treibhausgase. Dies wird in Abbildung 1.11 am Beispiel der Nordostschweiz für Winter und Sommer aufgezeigt.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

## 1.7 Wasserkreislauf

Die globale Erwärmung der Atmosphäre beeinflusst den Wasserkreislauf entscheidend: Der Wassergehalt in der Atmosphäre erhöht sich und der Wasserkreislauf beschleunigt sich, was sich in einer Zunahme der globalen Niederschläge und der globalen Verdunstung zeigt. Die Veränderungen erfolgen in speziellen geographischen und saisonalen Mustern, die sich mit fortschreitender Erwärmung immer deutlicher zeigen. Bis Ende des Jahrhunderts werden die Niederschläge in Europa im Norden zunehmen und im Süden abnehmen. Die Schweiz befindet sich im Übergangsbereich dieser zwei Niederschlagszonen. Die Änderungen im Niederschlag werden wesentlich durch diese grossräumigen Entwicklungen bestimmt. Die Klimamodelle projizieren für die gesamte Schweiz eine Abnahme der mittleren Niederschläge im Sommer und für Teile der Schweiz eine Zunahme in den anderen Jahreszeiten, wobei diese Trends von kurz- und mittelfristigen natürlichen Schwankungen überlagert und für einige Jahrzehnte dominiert werden. Wie ausgeprägt diese Veränderungen bis zum Ende des Jahrhunderts ausfallen, hängt stark von der künftigen Belastung durch Treibhausgase und Aerosole (Feinstaub) ab.

*Christoph Schär (ETH Zürich), Andreas M. Fischer (MeteoSchweiz)*

### Globale Beobachtungen

Aus theoretischen Arbeiten ist seit langem bekannt, dass die globale Erwärmung der Atmosphäre den Wasserkreislauf entscheidend beeinflusst. Insbesondere ist zu erwarten, dass sich parallel zur Erwärmung der atmosphärische Wassergehalt erhöht und der ganze Wasserkreislauf beschleunigt wird (Zunahme der globalen Niederschläge und Verdunstung). Diese Veränderungen erfolgen jedoch nicht gleichmässig, sondern sie haben spezifische geographische und saisonale Muster.

### Wassergehalt der Atmosphäre hat zugenommen

Konsistent mit diesen Erwartungen zeigen die Beobachtungen von Bodenstationen und Wetterballonen eine signifikante Zunahme des absoluten<sup>1</sup> atmosphärischen Wassergehalts seit 1970 sowohl über Land als auch über den Ozeanen. Die Beobachtungen stimmen überein mit dem Clausius-Clapeyron-Effekt, der besagt, dass die absolute Feuchte um sechs bis sieben Prozent pro Grad Celsius Erwärmung zunimmt. Im globalen Mittel wird der atmosphärische Wassergehalt auch stark durch grossräumige natürliche Variabilität und Temperatur bestimmt (z. B. El Niño). In Phasen mit nur kleiner Erwärmung (insbesondere in der Periode 2000–2012) ist die Zunahme des atmosphärischen Wassergehalts kleiner und statistisch nicht signifikant.

Viele Studien der grossräumigen Niederschläge in den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre

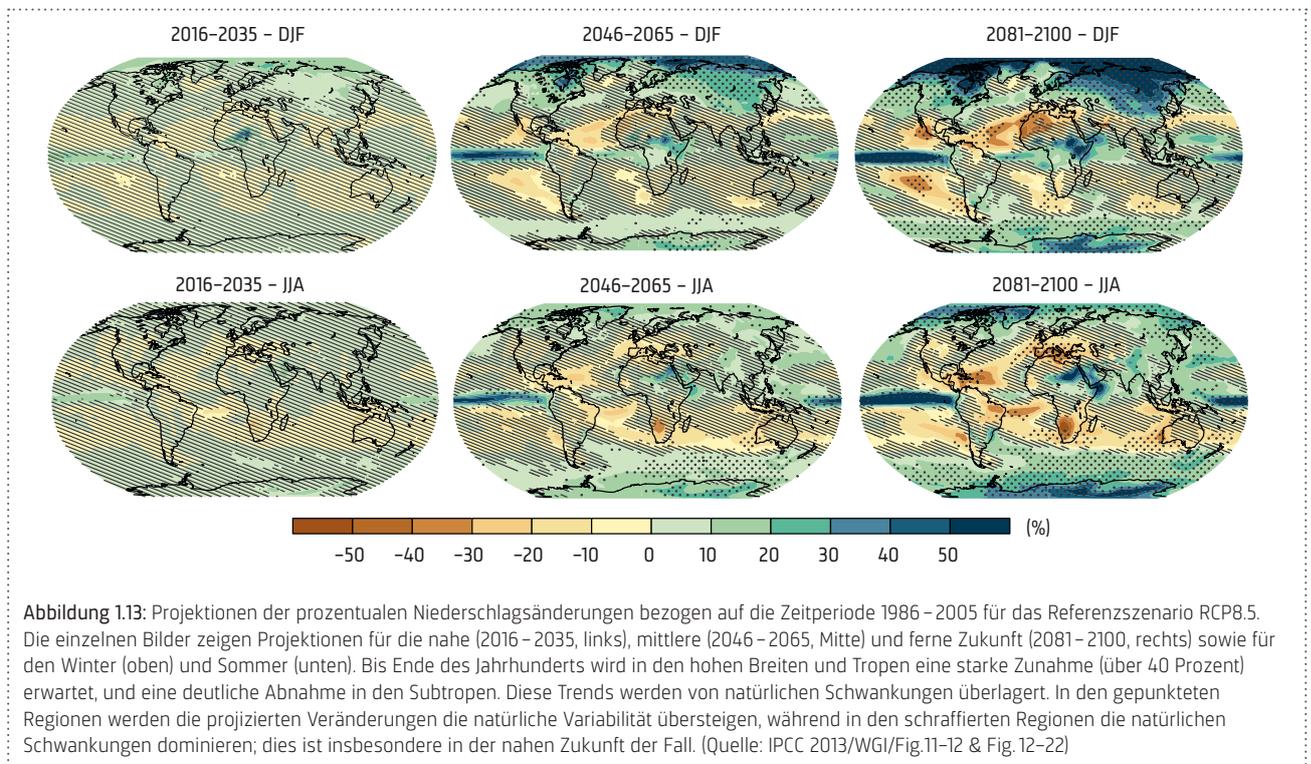
zeigen für die letzten Dekaden eine Tendenz zur Zunahme. Ein statistisch signifikantes Signal zeigt sich für die Landflächen der nördlichen mittleren Breiten (30–60 Grad Nord) für die letzten 50 bis 100 Jahre. In vielen anderen Regionen sind die Trends weniger deutlich beziehungsweise widersprechen sich verschiedene Studien und Datensätze.

Die Verdunstung entwickelt sich im globalen Mittel parallel zum Niederschlag, da der in der Atmosphäre gespeicherte Wassergehalt klein ist. Aus Überlegungen zur globalen Energiebilanz ist davon auszugehen, dass im 20. Jahrhundert ein Anstieg der Verdunstung über den Ozeanen stattgefunden hat; direkte Beobachtungen für diesen Trend fehlen jedoch. Es gibt auch keine klaren Hinweise auf eine systematische langfristige Veränderung der globalen Verdunstung über Land.

### Flüsse mit veränderten Abflüssen

Es gibt zahlreiche Studien über die Wasserführung von Flüssen. Aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsnetze und der Beeinflussung durch Flussverbauungen, Landnutzungsänderungen und Urbanisierung ist es schwierig, ein langfristiges globales Bild dieser Veränderungen zu gewinnen. Für Europa zeigen Einzugsgebiete mit naturnahen Abflussverhältnissen ein systematisches geographisches Muster in den letzten Dekaden (Daten im Zeitfenster 1962–2004), mit eher abnehmendem Abfluss in südlichen und östlichen Regionen und eher zunehmendem Abfluss in nördlichen und westlichen Regionen (Stahl et al. 2010).

<sup>1</sup> Relative atmosphärische Feuchte: Wird gemessen in Prozent und bezeichnet den Feuchtegehalt der Luft relativ zur Sättigung, die mit dem Clausius-Clapeyron-Effekt parallel zur Temperatur zunimmt. Absolute atmosphärische Feuchte: Wird gemessen in Gramm Wasser pro Kilogramm Luft und bezeichnet den Wassergehalt einer Luftmasse.



## Globale Projektionen

Die Projektionen des Wasserkreislaufes stützen sich auf dieselben Modelle wie jene der Temperatur. Die langfristigen Projektionen der Niederschläge bis zum Jahr 2100 zeigen ein Muster mit Niederschlagszunahmen in den Tropen und den mittleren und hohen Breiten sowie eine Niederschlagsabnahme in den Subtropen (Abb. 1.13). Dieses Muster ist ein stabiles Phänomen in Klimaprojektionen und stimmt auch quantitativ gut mit den Projektionen des vorherigen IPCC-Berichts (IPCC 2007) überein. In Europa zeigen die Projektionen eine Zunahme im Norden und eine Abnahme im Süden, wobei die Schweiz im Übergangsbereich dieser zwei Zonen liegt. Dieses Muster verschiebt sich mit dem Gang der Jahreszeiten, im Winter nach Süden, im Sommer nach Norden.

## Veränderungen der Niederschlagsverteilung

Die Veränderungen im Muster der Niederschläge werden sich mit dem Verlauf der globalen Erwärmung immer deutlicher zeigen; bis zum Ende des Jahrhunderts werden die Veränderungen in einigen Regionen die natürliche Variabilität übersteigen (Abb. 1.13) (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). In der nahen Zukunft wird das Niederschlagsverhalten jedoch durch natürliche Schwankungen dominiert, die das Klimasignal zum Teil abschwächen oder verstärken kön-

nen. Beträchtliche (negative) Abweichungen von den projizierten Veränderungen für Zeiträume von einigen Jahren sind als Folge von Vulkanausbrüchen denkbar. Auch der vom Menschen verursachte Ausstoss von Aerosolen (Feinstaub) kann Veränderungen in den grossräumigen Niederschlägen auslösen. Eine Verringerung der Sonneneinstrahlung durch Vulkanausbrüche oder die menschgemachte Feinstaubbelastung führen im Allgemeinen zu einer Abnahme der globalen Niederschlagstätigkeit.

Die projizierten Veränderungen der Verdunstung umfassen eine generelle Zunahme in den meisten Regionen. Diese sind verursacht durch eine Zunahme der an der Erdoberfläche verfügbaren Energie (durch kurzwellige Sonneneinstrahlung und langwellige atmosphärische Rückstrahlung). Ob eine Zunahme der Verdunstung über dem Land stattfindet, hängt jedoch auch von der Verfügbarkeit von Wasser ab (Bodenfeuchte, Grundwasser, Oberflächengewässer). Eine Austrocknung des Bodens, wie zum Beispiel im europäischen Sommer 2003, kann zu einer Verringerung der Verdunstung führen.

## Subtropen: Bodenwasser-Gehalt und Abflüsse gehen langfristig zurück

Weitere Komponenten des Wasserkreislaufes werden betroffen sein. Für viele Landregionen wird eine Abnahme der relativen Feuchte erwartet (aber eine Zunahme

der absoluten Feuchte). Bis zum Ende des Jahrhunderts wird in grossen Teilen der Subtropen eine Verringerung des Bodenwassergehalts als wahrscheinlich erachtet. Dies betrifft zum Beispiel Teile von Nordwest-Afrika und des Mittelmeerraums. In diesen Regionen wird auch ein Rückgang der Abflüsse erwartet. Wie beim Niederschlag handelt es sich bei diesen Veränderungen um langfristige Trends, kurzfristig können auch natürliche Schwankungen dominieren. Für Südeuropa wird mittelfristig eine Zunahme der Wassernutzung für Bewässerungszwecke erwartet, was den klimabedingten Rückgang der Abflüsse verstärkt.

## Beobachtungen zur Schweiz

Über einem vergleichsweise kleinen Gebiet wie der Schweiz sind aufgrund grosser natürlicher Schwankungen langfristige Niederschlagstendenzen schwierig zu erkennen. Gesamtschweizerisch betrachtet zeigen sich zum heutigen Zeitpunkt keine eindeutigen Trends im mittleren Jahresniederschlag. Die Variationen des Niederschlags sind aber stark von regionalen Einflüssen und vom Jahresgang geprägt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich in der Schweiz ein nordalpines und ein südalpines Niederschlagsregime gegenüberstehen, beide mit ihren spezifischen Eigenheiten. Dies zeigt sich in der langfristigen Entwicklung des Jahresniederschlags seit Messbeginn 1864, bei der für das Schweizer Mittelland eine Niederschlagszunahme von 7,8 Prozent pro 100 Jahre beobachtet wird (MeteoSchweiz 2015). Für die Südschweiz ist keine solche Tendenz vorhanden. Im Gegensatz dazu ist an vielen Stationen eine Zunahme von Starkniederschlägen schon heute messbar (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

### Schweizer Mittelland: Zunahme des Niederschlags im Winter

Jahreszeitlich aufgeschlüsselt zeigt sich, dass die Zunahme des Niederschlags im Schweizer Mittelland nur im Winter eindeutig ist. Seit 1864 beträgt der durchschnittliche Trend plus 22 Prozent Niederschlag pro 100 Jahre (vgl. Abb. 1.14, Nordostschweiz). Im Frühling, Sommer und Herbst sind keine eindeutigen langfristigen Trends (1864–2014) nachweisbar. Die Südschweiz zeigt weder jährlich noch saisonal statistisch signifikante Niederschlags-Trends. Wie Abbildung 1.14 verdeutlicht, werden die langfristigen Niederschlagsverläufe aber von dekadischen Schwankungen (schwankender Verlauf der dicken schwarzen Linie) sowie beträchtlichen Jahr-zu-Jahr-Schwankungen überlagert (dünne schwarze Linie).

## Abflüsse und Verdunstung haben sich verändert

Beobachtungen des Abflusses in natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz zeigen eine Zunahme in den kälteren Jahreszeiten (Birsan 2006). Diese Veränderungen sind stark von der mittleren Höhe und den physiogeographischen Charakteristiken der betrachteten Einzugsgebiete abhängig. Eine wichtige Rolle spielt dabei nicht nur die Zunahme der winterlichen Niederschläge, sondern auch der Anstieg der mittleren Schneefallgrenze um zirka 300 Meter in den letzten Jahrzehnten. Dadurch fällt ein immer grösserer Anteil des Niederschlags in Form von Regen und fliesst schneller ab. Die Erwärmung führt im Frühling zu einer früheren Schneeschmelze in den Voralpen/Alpen (Scherrer et al. 2013). Im Hochgebirge ist im Sommer eine verstärkte Gletscherschmelze zu beobachten, die zu einer Zunahme der Abflüsse in stärker vergletscherten Einzugsgebieten führt (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84); (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80).

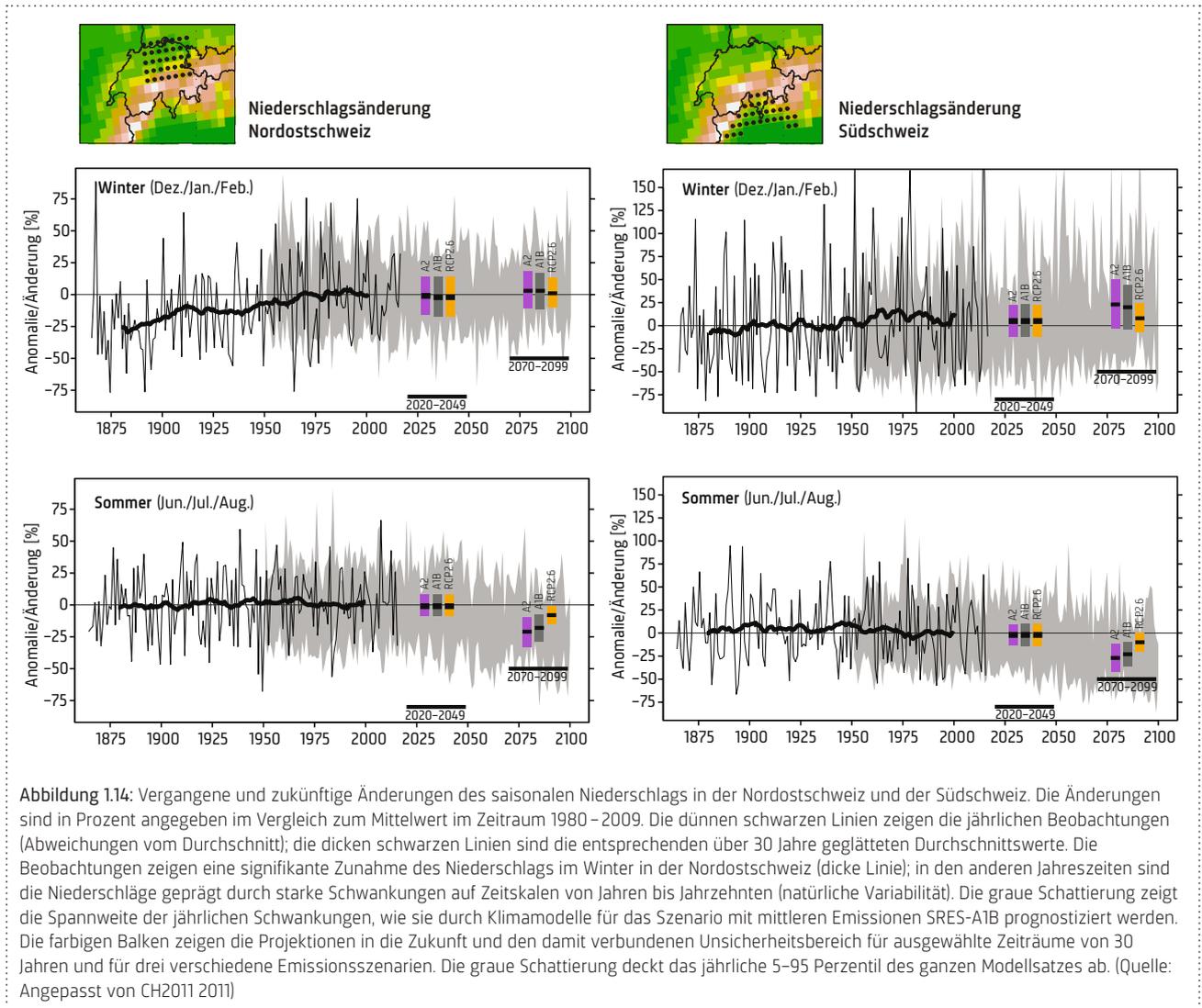
Analysen in Einzugsgebieten deuten an, dass im letzten Jahrhundert nebst den winterlichen Niederschlägen auch die sommerliche Verdunstung zugenommen hat, weshalb sich die Abflüsse im Jahresmittel trotz Niederschlagszunahme nicht wesentlich verändert haben. Es gibt aber Hinweise darauf, dass die Verdunstung auf dekadischen Zeitskalen den Veränderungen der Globalstrahlung folgt, und dass damit in den 1980er-Jahren ein Übergang von einer Abnahme zu einer Zunahme erfolgt ist.

## Projektionen für die Schweiz

Auswertungen basierend auf mehreren globalen und regionalen Klimamodellen über Europa zeigen, dass gegen Ende des Jahrhunderts ein grosser Teil Mittel- und Nordeuropas *wahrscheinlich* nasser und der Mittelmeerraum trockener werden wird. Dieses generelle Muster hängt zusammen mit der oben besprochenen globalen Entwicklung hin zu trockeneren Subtropen und nasserem hohen Breitengraden (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Die Schweiz liegt dabei in der Übergangszone dieser zwei gegensätzlichen Entwicklungen. Aufsummiert übers ganze Jahr zeigen die Modelle nur einen schwachen Trend im Niederschlag über der Schweiz. Der zukünftige Jahresniederschlag dürfte auf ähnlichem Niveau wie im heutigen Klima bleiben und die natürlichen Schwankungen bleiben eine dominierende Grösse.

### Die Sommer werden trockener

Saisonal betrachtet sind hingegen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Wesentlichen zwei Niederschlagstendenzen ersichtlich (Abb. 1.14): Erstens proj-



**Abbildung 1.14:** Vergangene und zukünftige Änderungen des saisonalen Niederschlags in der Nordostschweiz und der Südschweiz. Die Änderungen sind in Prozent angegeben im Vergleich zum Mittelwert im Zeitraum 1980 – 2009. Die dünnen schwarzen Linien zeigen die jährlichen Beobachtungen (Abweichungen vom Durchschnitt); die dicken schwarzen Linien sind die entsprechenden über 30 Jahre geglätteten Durchschnittswerte. Die Beobachtungen zeigen eine signifikante Zunahme des Niederschlags im Winter in der Nordostschweiz (dicke Linie); in den anderen Jahreszeiten sind die Niederschläge geprägt durch starke Schwankungen auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrzehnten (natürliche Variabilität). Die graue Schattierung zeigt die Spannweite der jährlichen Schwankungen, wie sie durch Klimamodelle für das Szenario mit mittleren Emissionen SRES-A1B prognostiziert werden. Die farbigen Balken zeigen die Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Emissionsszenarien. Die graue Schattierung deckt das jährliche 5–95 Perzentil des ganzen Modellsatzes ab. (Quelle: Angepasst von CH2011 2011)

zieren die Modelle in Teilen der Schweiz eine Zunahme des zukünftigen mittleren Winterniederschlags gegenüber heute; zweitens ist zu erwarten, dass der Sommerniederschlag der Schweiz im Verlauf des 21. Jahrhunderts den Bereich der heutigen dekadischen Schwankungen verlässt und die mittleren Niederschlagsmengen *wahrscheinlich* überall in der Schweiz abnehmen (CH2011 2011). Grossräumig betrachtet hängt diese Tendenz mit der erwarteten mediterranen Trockenheit zusammen, die im Sommer Zentraleuropa und den gesamten Alpenraum einschliesen wird. Aufgrund der grossen Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Niederschlags sind aber auch am Ende des Jahrhunderts noch vereinzelt Sommer mit nassen Bedingungen zu erwarten (siehe grau hinterlegter Bereich in Abb. 1.14).

Erweiterte Modellauswertungen zeigen, dass die erwartete Abnahme beim mittleren Sommerniederschlag über der Schweiz im Wesentlichen durch einen Rückgang der

Anzahl Regentage bestimmt ist. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von mehrtägigen Trockenphasen, während die durchschnittliche Niederschlagsmenge an Regentagen auf ähnlichem Niveau wie im heutigen Klima verbleibt (Fischer et al. 2015; Rajczak et al. 2013; Ban et al. 2015). Im Herbst und Frühling sind die erwarteten Änderungen kleiner und grösstenteils in der Bandbreite der natürlichen Variabilität.

Als Folge der Erwärmung nehmen die in den Alpen gespeicherten Schnee- und Eismassen stark ab (Steger et al. 2013). Zusammen mit einer saisonalen Umverteilung des Niederschlags und einer Verschiebung von festem zu flüssigem Niederschlag wird dies eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse hervorrufen. Die Abflüsse im Winter werden in den meisten Einzugsgebieten der Schweiz zunehmen. Im Sommer führen die abnehmenden Niederschläge, die grössere Verdunstung und die früher zur Nei-

ge gehende Schneeschmelze zu sinkenden Pegelständen. In den Gebieten des Mittellandes werden die Pegel bei Niedrigwasser abnehmen und die Niedrigwasserperioden länger werden. In den Alpen werden die Abflüsse in stark vergletscherten Einzugsgebieten mittelfristig noch zunehmen. Bis Ende Jahrhundert ist aber auch in diesen Gebieten mit deutlichen Abflussabnahmen im Sommer zu rechnen (BAFU 2012).

### Künftiger Treibhausgasausstoss ist entscheidend

Die sich abzeichnende Trockenheit im Sommer und die Niederschlagszunahme im Winter in Teilen der Schweiz gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2070–2099) sind beide stark abhängig von Annahmen zum zukünftigen Treibhausgasausstoss:

- **Sommer:** Bei Szenarien ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenarien) wie SRES-A2 wird die mittlere Niederschlagsmenge im Sommer je nach Region um etwa 15 bis 28 Prozent abnehmen (Abb. 1.14). Für den Fall internationaler Anstrengungen zur Minderung der globalen Treibhausgasemissionen (Verminderungsszenario RCP2.6) wird eine deutlich geringere Abnahme des Sommerniederschlags über der Schweiz erwartet (Abnahme von etwa sechs bis zehn Prozent). Wie angezeigt durch die farbigen Balken in Abbildung 1.14 können die Änderungen jedoch deutlich von den genannten Werten abweichen. So ist es beispielsweise für die Nordostschweiz gemäss Referenzszenario SRES-A2 durchaus möglich, dass die Niederschlagsmenge zwischen 10 und 33 Prozent abnimmt.
- **Winter:** Der zukünftige Verlauf der Treibhausgasemissionen bestimmt auch massgeblich das Ausmass der Niederschlagszunahme im Winter: Gemäss Referenzszenario SRES-A2 würde die Niederschlagsmenge in der Südschweiz etwa um 23 Prozent ansteigen, währenddessen der Anstieg gemäss Verminderungsszenario RCP2.6 bei etwa acht Prozent stabilisiert werden könnte, wie Abbildung 1.14 zeigt.

### Herausforderungen für die Klimawissenschaften

#### Langfristige Beobachtungsreihen

Für Aussagen zur langfristigen Niederschlagsentwicklung sind qualitativ hochwertige instrumentelle Messungen (insbesondere Boden- und Satellitenmessungen) unerlässlich, die idealerweise möglichst weit zurück in die Vergangenheit reichen. Sie stellen auch einen unabdingbaren Grundpfeiler dar für die Kalibration und Verbesserung von Klimamodellen beziehungsweise deren

Zukunftsprojektionen. In den letzten 20 Jahren wurde sehr viel Arbeit in diesem Bereich geleistet, aber in den meisten Regionen verbleiben grosse Unsicherheiten. Diese sind bedingt durch systematische Messfehler, eine oft ungenügende Anzahl homogener Langfristbeobachtungen (z.B. infolge der Verschiebung von Stationen) und durch die hohe räumliche Variabilität des Niederschlagsignals. Auch für andere Komponenten des Wasserkreislaufes spielen homogene und langfristige Beobachtungen eine wichtige Rolle. Bei den Abflüssen sind dabei auch Veränderungen der Siedlungsstruktur und der Landnutzung, aber auch Veränderungen der landwirtschaftlichen Praxis (z.B. Bewässerung) zu berücksichtigen, welche die Homogenität der Abflussreihen beeinträchtigen.

Für die Schweiz liefert das Messnetz der MeteoSchweiz lange homogene Klimamessreihen für Niederschlag, Temperatur und viele weitere Variablen (z.B. Luftdruck und Bewölkung), die für einzelne Beobachtungsstationen seit 1864 zur Verfügung stehen (Begert et al. 2005). Für das Monitoring zur Niederschlagsentwicklung in der Schweiz mit ihrer komplexen Topographie ist damit eine einzigartige Grundlage vorhanden. Für weitere Variablen des Wasserkreislaufes wie Verdunstung oder Bodenfeuchte gibt es keine langfristigen Beobachtungsreihen, die dem Anspruch einer grossräumigen Abdeckung gerecht werden (s.a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84, Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

#### Natürliche Schwankungen vorhersagen

Eine weitere Herausforderung in der Detektion systematischer Niederschlagstrends stellen natürliche Schwankungen dar. Gerade für ein kleines Gebiet wie die Schweiz spielen jährliche oder dekadische Schwankungen – ausgelöst zum Beispiel durch Änderungen im atmosphärischen Strömungsmuster über Zentraleuropa (z.B. Nordatlantische Oszillation) – eine wichtige Rolle. Diese natürlichen Schwankungen können über mehrere Dekaden langfristige Tendenzen überlagern und deren Detektion erschweren (s.a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34).

Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht wird erstmals über dekadische Klimavorhersagen berichtet, mit welchen man die dekadischen Schwankungen vorherzusagen versucht (im Gegensatz zu Klimaprojektionen spricht man hier von Klimavorhersagen). Zum Startzeitpunkt der entsprechenden Simulationen fliessen die jeweils aktuellsten weltweiten Messwerte des Ozeans mit ein. Die Resultate zeigen eine verbesserte Vorhersage – bisher aber primär für die Tropen und über dem Pazifik. Es ist ein wichtiges Anliegen, diese neue Methodik zu verbessern und ihre Grenzen besser zu bestimmen.

## Klimamodelle weiter verfeinern

Die vereinfachte Darstellung der Niederschlagsvorgänge in Klimamodellen trägt entscheidend zu Unsicherheiten in der Abschätzung der zukünftigen Änderung bei. Insbesondere müssen feinskalige, niederschlagsrelevante Prozesse aufgrund der zu groben Modellauflösung vereinfacht und mittels semi-empirischer Beziehungen beschrieben (parameterisiert) werden. Im Alpenraum ist auch die komplexe Topographie eine grosse Herausforderung. Gegenwärtig gibt es nationale und internationale Forschungsprojekte, um die Beschreibung der Niederschläge in hochauflösenden Modellen zu verfeinern.

Eine grundsätzliche Herausforderung betrifft die Projektionen des Sommerklimas. Während zum Beispiel die Wintertemperaturen sich in die Richtung des gegenwärtigen Frühlings bewegen, liegen die im Sommer erwarteten Temperaturen und Niederschläge gegen Ende des Jahrhunderts deutlich ausserhalb des natürlichen Schwankungsbereichs der Vergangenheit. Dies stellt eine grosse Herausforderung für die Klimamodelle dar, da man noch nie dagewesene Klimaregimes beschreiben muss. In diesem Bereich gibt es deshalb grosse Unsicherheit, die nebst Prozessen in der Atmosphäre insbesondere auch die Wechselwirkung mit der Hydrologie und den Landoberflächen betreffen.

## Referenzen

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) **Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?** *Geophysical Research Letters* 42: 1165–1172.
- BAFU (2012) **Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro).** Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1217: 76 pp.
- 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.
- Birsan M-V, Molnar P, Burlando P, Pfaundler M (2005) **Streamflow trends in Switzerland.** *Journal of Hydrology*, 314: 312–329.
- 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, Keller D, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2015) **Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective.** *International Journal of Climatology* 35: 3204–3219.
- IPCC (2007) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis (WGI).** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. [www.ipcc.ch/report/ar4/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://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](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- MeteoSchweiz (2015) **Klimareport 2014.** Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich, 80 pp.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region.** *Journal of Geophysical Research* 118: 3610–3626.
- Scherrer S, Wuthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R, Appenzeller C (2013) **Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009.** *International Journal of Climatology* 33: 3162–3173.
- Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jodar J (2010) **Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments.** *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 2367–2382.
- Steger C, Kotlarski S, Jonas T, Schär C (2013) **Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective.** *Climate Dynamics* 41: 735–754.

## 1.8 Klima- und Wetterextreme

Klima- und Wetterextreme waren schon immer Teil des Klimageschehens, allerdings zeichnen sich global betrachtet über die letzten Jahrzehnte deutliche Änderungen in gewissen Extremen ab. Hitzeextreme wie zum Beispiel sommerliche Hitzewellen haben zugenommen, Kälterekorde hingegen abgenommen. Auch in der Schweiz wurden mehr sehr warme Tage und weniger sehr kalte Nächte registriert. Mit weiter steigenden globalen Mitteltemperaturen werden weltweit mehr und intensivere Hitzeextreme und Starkniederschläge, aber weniger ausgeprägte Kälteextreme erwartet. Dieselbe Entwicklung – überlagert mit hoher Variabilität – wird auch für die Schweiz vorhergesagt, was ohne Anpassungsmassnahmen zu einem höheren Hochwasserrisiko führt. Klimaprojektionen zeigen zudem eine Zunahme des Trockenheitsrisikos in Mitteleuropa und im Mittelmeerraum – einschliesslich der Schweiz –, beinhalten aber noch beträchtliche Unsicherheiten. Aussagen zu den Änderungen weiterer Phänomene, wie der Häufigkeit und Intensität von Stürmen oder lokaler Phänomene wie Hagel, sind unsicher.

*Erich M. Fischer (ETH Zürich), Christoph Schär (ETH Zürich), Sonia I. Seneviratne (ETH Zürich)*

Hochwasser, Stürme, Dürren und Temperaturextreme waren schon immer Teil des Klimageschehens. Solche Klima- und Wetterextreme haben oft schwerwiegende Auswirkungen auf Infrastrukturen – durch Schäden an Gebäuden und Verkehrswegen –, auf Landwirtschaft, auf Energienachfrage und Stromproduktion sowie auf Tourismus oder Gesundheit. Aufgrund der grossen sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen drängt sich die Untersuchung der erwarteten Änderungen in Klima- und Wetterextremen und den dahinterliegenden Ursachen auf.

Auch die Anzahl Temperature rekorde – höchste oder niedrigste verzeichnete Temperaturen seit Messbeginn – deutet auf eine Veränderung hin. Ohne Klimawandel würde man erwarten, dass neue Rekorde mit fortschreitender Messdauer seltener werden und das Verhältnis von Kälte- zu Hitzerekorden etwa gleich bleibt. Entgegen dieser Erwartungen zeichnet sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts sowohl in Europa als auch in Nordamerika ein deutliches Ungleichgewicht ab: Es wurden mehr Hitzerekorde, aber deutlich weniger Kälterekorde verzeichnet als theoretisch (ohne Klimatrend) erwartet.

### Globale Beobachtungen

Es gibt zahlreiche Aufzeichnungen einschneidender Extreme der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende und deren Auswirkungen. Allerdings zeichnet sich global betrachtet über die letzten Jahrzehnte ein deutlicher Trend in gewissen Klima- und Wetterextremen ab (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.2).

#### Mehr Hitze, weniger Kälte

Seit 1950 lässt sich weltweit ein signifikanter Trend zu mehr sehr warmen und weniger sehr kalten Tagen und Nächten feststellen (Abb. 1.15) (Donat et al. 2013). Der Trend zu mehr sehr warmen Tagen hat sich auch in den letzten Jahren fortgesetzt, selbst in denjenigen, in denen die globale Mitteltemperatur nicht signifikant anstieg. Weiter sind insbesondere in Europa, Asien und Australien sommerliche Hitzewellen sowie ausserordentliche Wärmeperioden in allen Jahreszeiten häufiger und intensiver geworden.

#### Starkniederschläge haben vielerorts zugenommen

Auch Tendenzen in Starkniederschlägen haben sich deutlich anders verhalten als man aufgrund natürlicher Klimavariabilität erwarten würde. Insgesamt gibt es weltweit mehr Landgebiete, in denen Starkniederschläge zugenommen als abgenommen haben (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.2). Am zuverlässigsten feststellbar sind die Änderungen von Starkniederschlägen in Europa sowie Nord- und Zentralamerika, wo je nach Region und Jahreszeit Starkniederschläge zugenommen haben. Insgesamt sind jedoch Änderungen von Starkniederschlägen schwieriger nachzuweisen als von Temperaturextremen, weil sich Niederschlagsintensitäten über kurze Distanzen stark unterscheiden. Weiter ist beim Niederschlag die globale Verfügbarkeit zuverlässiger und ausreichend langer Zeitreihen stark limitiert.

Die beobachtete globale Zunahme von Starkniederschlägen deckt sich mit den Erwartungen aus dem Verständnis physikalischer Prozesse: Aufgrund höherer Temperaturen nimmt der Feuchtegehalt der Atmosphäre und somit auch die Intensität von Starkniederschlägen zu. Die physikali-

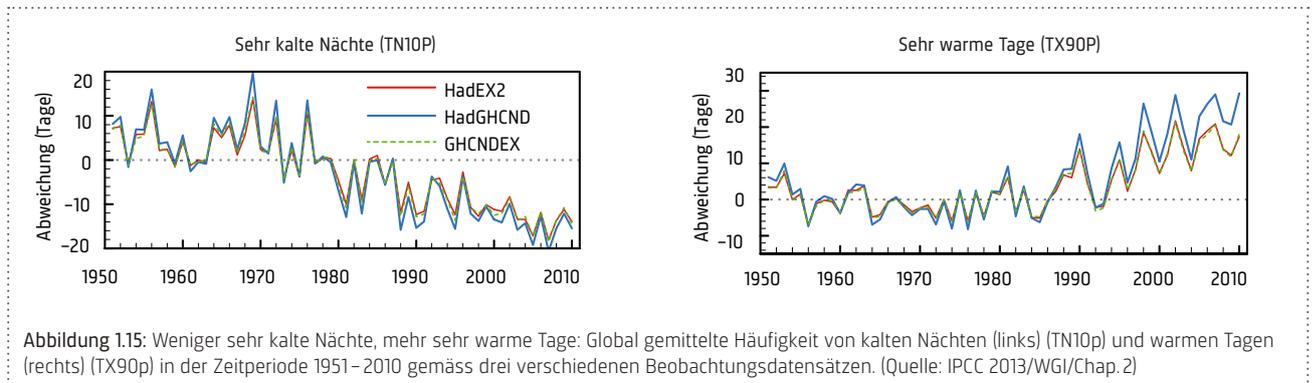


Abbildung 1.15: Weniger sehr kalte Nächte, mehr sehr warme Tage: Global gemittelte Häufigkeit von kalten Nächten (links) (TN10p) und warmen Tagen (rechts) (TX90p) in der Zeitperiode 1951–2010 gemäss drei verschiedenen Beobachtungsdatensätzen. (Quelle: IPCC 2013/WGI/Chap.2)

sche Theorie lässt eine Zunahme der Starkniederschläge um sechs bis sieben Prozent pro Grad Celsius Erwärmung erwarten (Clausius-Clapeyron-Effekt), aber eine deutlich schwächere Zunahme der mittleren Niederschläge. Es gibt auch Regionen und Jahreszeiten, für die eine Abnahme der mittleren Niederschläge und eine Zunahme der Starkniederschläge erwartet wird (s.a. Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46).

### Beobachtete Änderungen in Trockenheit sind weniger sicher

Weit schwieriger ist es, Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Dürren festzustellen (IPCC 2012/SREX/Chap. 3). Da die Änderungssignale zum Teil abhängig von der Definition einer Dürre und regional unterschiedlich sind, bleiben Aussagen zur globalen Änderung von Dürren unsicher (Sheffield et al. 2012; Trenberth et al. 2014). Da solche Unsicherheitsquellen nach dem Erscheinen des Vierten IPCC-Sachstandsberichts von 2007 neu identifiziert wurden, wurden die Aussagen zum globalen Trend in den neueren IPCC-Berichten revidiert. In gewissen Regionen lassen sich aber deutliche Änderungssignale feststellen. So hat zum Beispiel seit zirka 1950 Trockenheit im Mittelmeerraum zugenommen und in Teilen Nordamerikas abgenommen (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.2).

### Menschlicher Einfluss auf Klima- und Wetterextreme

Klima- und Wetterextreme sind meist die Folge eines Zusammenspiels vieler Faktoren wie zum Beispiel ausserordentlicher Meeresoberflächentemperaturen oder Meereisverteilung, eines speziellen atmosphärischen Zirkulationsmusters oder ungewöhnlich trockener oder nasser Böden. Zudem sind sie auch von zufälligen Entwicklungen im Klimasystem beeinflusst. Darum sind einzelne

Klima- und Wetterextreme keine direkte kausale Folge des Klimawandels. Jedoch können menschgemachte Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen durchaus die beitragenden Faktoren beeinflussen und somit die Eintrittswahrscheinlichkeit oder die Intensität von Klima- und Wetterextremen beeinflussen. So gibt es seit dem Vierten IPCC-Sachstandsbericht stärkere Evidenz, dass der menschliche Einfluss auf das Klima zur Zunahme von Hitzeextremen oder der Intensivierung der Starkniederschläge beigetragen hat.

In diversen Studien wurde untersucht, inwiefern externe Klimafaktoren, wie der menschgemachte Klimawandel, die Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner kürzlich aufgetretener Extremereignisse beeinflusst hat. Basierend auf Klimamodellen wird dazu abgeschätzt, wie sich die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses unter heutigen Bedingungen zum Beispiel von der Wahrscheinlichkeit unter vorindustriellen Bedingungen unterscheidet. So konnte gezeigt werden, dass der menschliche Einfluss die Wahrscheinlichkeit eines Hitzesommers wie im Jahr 2003 mehr als verdoppelt und die Eintrittswahrscheinlichkeit der sehr starken russischen Hitzewelle 2010 erhöht hat. Die genaue Quantifizierung dieser Effekte hängt aber von der Definition des Ereignisses und der Methodik sowie der Fragestellung ab, zum Beispiel, ob der menschliche Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit oder auf die Intensität eines Ereignisses abgeschätzt wird.

### Globale Projektionen

Steigende atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen werden auch in Zukunft die Häufigkeit und Intensität gewisser Wetterextreme beeinflussen.

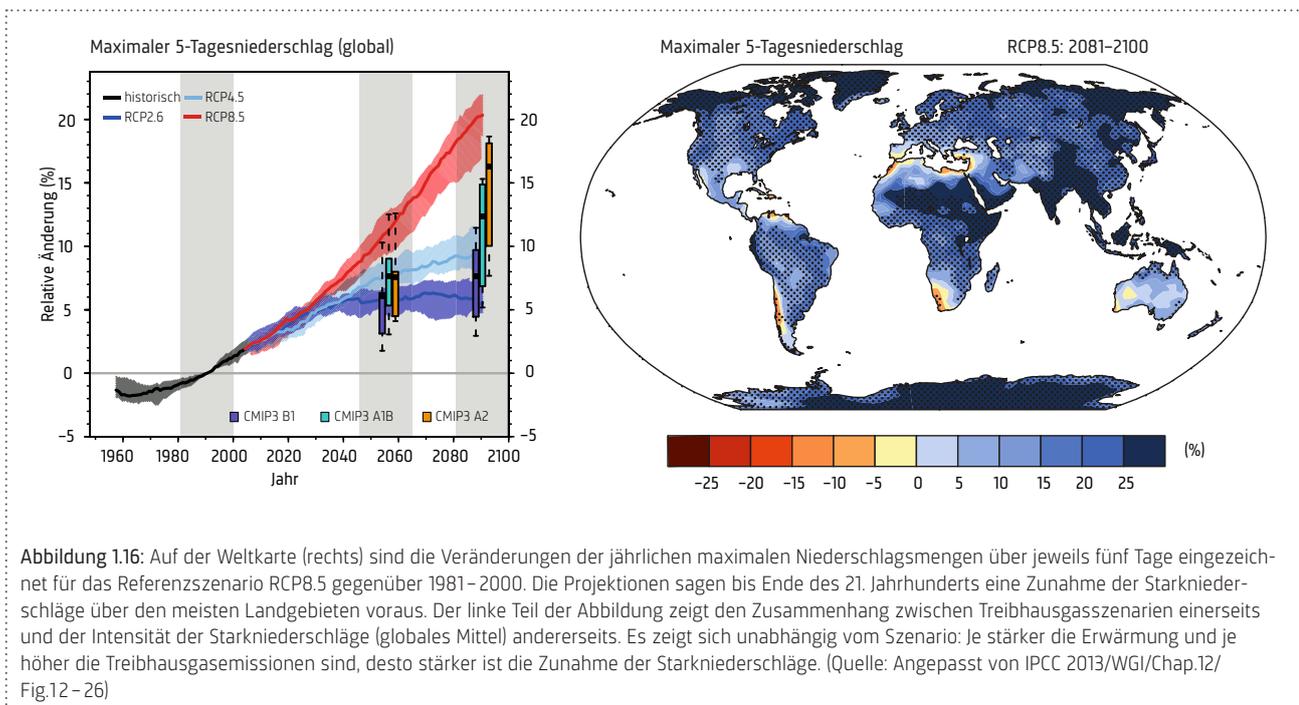


Abbildung 1.16: Auf der Weltkarte (rechts) sind die Veränderungen der jährlichen maximalen Niederschlagsmengen über jeweils fünf Tage eingezeichnet für das Referenzszenario RCP8.5 gegenüber 1981–2000. Die Projektionen sagen bis Ende des 21. Jahrhunderts eine Zunahme der Starkniederschläge über den meisten Landgebieten voraus. Der linke Teil der Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Treibhausgasszenarien einerseits und der Intensität der Starkniederschläge (globales Mittel) andererseits. Es zeigt sich unabhängig vom Szenario: Je stärker die Erwärmung und je höher die Treibhausgasemissionen sind, desto stärker ist die Zunahme der Starkniederschläge. (Quelle: Angepasst von IPCC 2013/WGI/Chap.12/ Fig.12 – 26)

## Künftig mehr Hitze- und weniger Kälteextreme

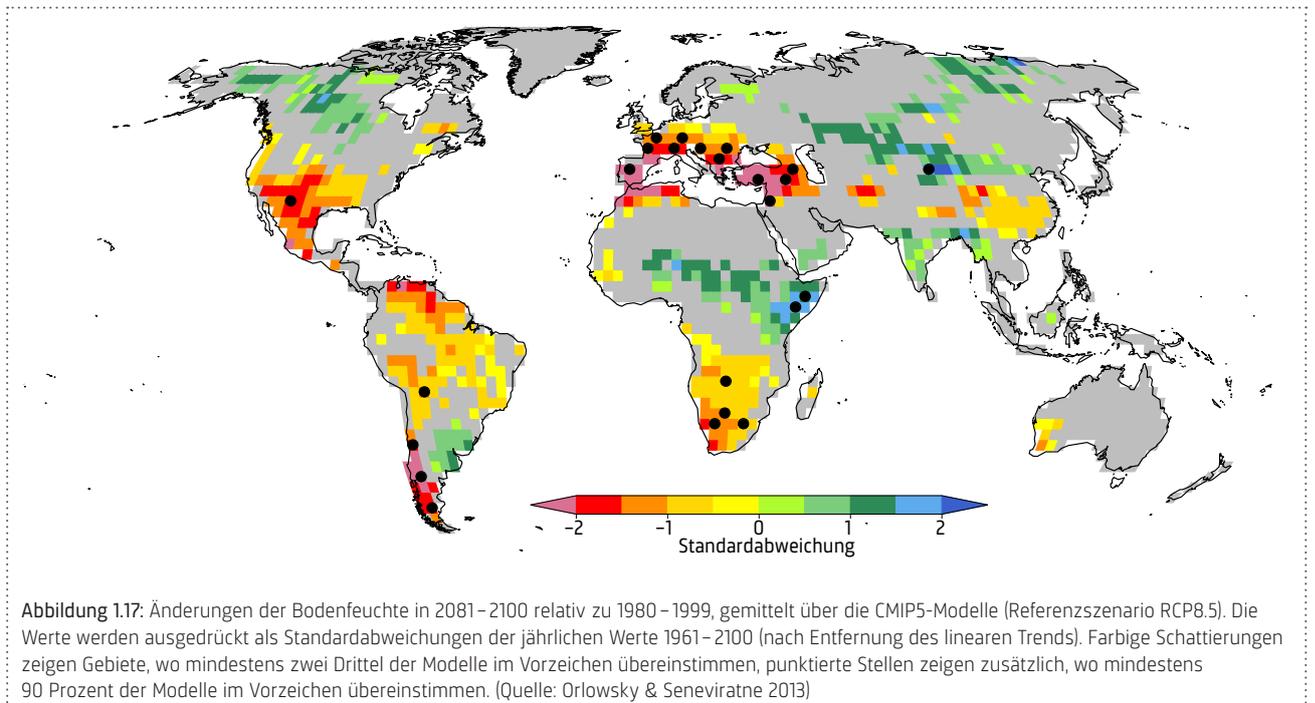
Es ist *praktisch sicher*, dass mit steigenden globalen Mitteltemperaturen in den meisten Gebieten weltweit auch mehr Hitze- und weniger Kälteextreme auftreten werden (IPCC 2013/WGI/Chap. 11 und Chap. 12). Häufigere, längere und intensivere sommerliche Hitzewellen sowie ausserordentliche Wärmeperioden in anderen Jahreszeiten werden erwartet. Hitzeextreme, die heute im Durchschnitt nur alle 20 Jahre auftreten, werden Ende des Jahrhunderts zumindest doppelt so häufig und in gewissen Regionen sogar nahezu jährlich erwartet, falls die Emissionen dem Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) RCP8.5 folgen (IPCC 2013/WGI/Chap. 12).

Umgekehrt könnten heutige 20-jährige Kälteextreme in der Zukunft rar werden. Insbesondere über hohen geographischen Breiten werden die Temperaturen von Kälteextremen stärker steigen (Kälteextreme werden weniger kalt) als die Mitteltemperaturen. Nichtsdestotrotz werden aufgrund der hohen Variabilität des Winterwetters auch in Zukunft von Zeit zu Zeit winterliche Kältewellen erwartet.

## Unterschiedliche Einflüsse auf Starkniederschläge in naher und ferner Zukunft

Für die Trends von Starkniederschlägen ist es wichtig, die nahe und ferne Zukunft (nächste Dekaden beziehungsweise Zeitraum bis zum Ende des Jahrhunderts) voneinander zu unterscheiden. Für die ferne Zukunft dominiert der Einfluss der Treibhausgase, während Veränderungen in der nahen Zukunft, das heisst in den nächsten Jahren, durch die natürliche Variabilität dominiert werden (IPCC 2013/WGI/Chap. 11; Fischer et al. 2013) (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). Die Bedeutung der natürlichen dekadischen Variabilität ist stark abhängig von der Region (z. B. Tropen versus mittlere Breiten), der horizontalen Skala (regional versus kontinental), dem betrachteten Parameter (Temperatur versus Niederschlag) und dem betrachteten Extrem (zum Beispiel tägliche versus saisonale Extreme).

Klimamodelle sagen für das Ende des Jahrhunderts übereinstimmend eine Zunahme von Starkniederschlägen in den Tropen und den mittleren und hohen Breiten vorher (Abb 1.16). Mit höheren Treibhausgasemissionen werden entsprechend den höheren globalen Temperaturen auch die Starkniederschläge stärker zunehmen (Abb. 1.16). Aufgrund von physikalischem Prozessverständnis und Modellsimulationen wird erwartet, dass die Intensität von Starkniederschlägen im Allgemeinen stärker zunimmt als die entsprechenden jährlichen Niederschlagsmengen.



### Künftig höheres Trockenheitsrisiko in Zentral- und Südeuropa

Klimaprojektionen zeigen, dass insbesondere in Südeuropa, aber im Sommer auch in Zentraleuropa, der Klimawandel zu einem Rückgang der Niederschlagssummen und zu erhöhter Verdunstung führt (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.12; Orłowsky & Seneviratne 2013). Diese Änderungen verursachen eine stärkere Austrocknung von Böden und damit ein erhöhtes Risiko von Bodenfeuchte-Dürren (Abb. 1.17), die für Ökosysteme und Landwirtschaft kritisch sind. Aber die Projektionen für Änderungen der Trockenheit sind viel weniger robust als diejenigen für Hitzeextreme und Starkniederschläge und die Modelle weichen mehr voneinander ab.

### Phänomene mit unsicherer Projektion

Änderungen anderer Phänomene wie tropischer Wirbelstürme gelten als unsicher. Basierend auf Modellvorhersagen und physikalischem Prozessverständnis ist zu erwarten, dass nicht mit mehr, aber mit intensiveren Wirbelstürmen zu rechnen ist. Das bedeutet, dass die intensivsten tropischen Wirbelstürme höhere Maximalwindgeschwindigkeiten und Niederschlagsintensitäten mit sich bringen.

Schliesslich gibt es einige Phänomene – zum Beispiel Hagelereignisse, Tornados oder Wasserhosen –, für welche zum Teil zwar wissenschaftliche Hinweise für Änderungen, aber keine zuverlässigen Projektionen erstellt werden können. Die Gründe dafür sind unzureichende Messungen sowie die zugrundeliegenden komplexen und oft sehr lokalen physikalischen Prozesse, die immer noch nicht im Detail verstanden sind.

### Beobachtungen zur Schweiz

Die Schweiz wurde in den vergangenen beiden Jahrzehnten von zahlreichen Klima- und Wetterextremen heimgesucht wie zum Beispiel den Starkniederschlägen im August 2005, der ausserordentlichen Hitze und Trockenheit im Sommer 2003, dem Sturm Lothar im Jahr 1999 oder dem im Vergleich zu den letzten Jahrzehnten (aber nicht im Vergleich zum letzten Jahrhundert) sehr kalten Wintern 2005/2006 und 2009/2010.

Auf der Skala der Schweiz sind Änderungssignale in Klima- und Wetterextremen von starker natürlicher Variabilität überlagert (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). Deshalb ist der Nachweis einer Veränderung von Klima- und Wetterextremen insbesondere über vergleichsweise kleinen Flächen wie der Schweiz besonders schwierig.

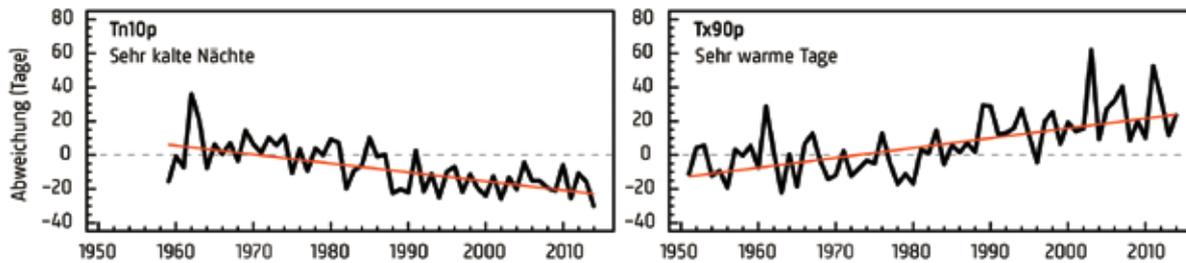


Abbildung 1.18: Mehr sehr warme Tage, weniger sehr kalte Nächte auch in der Schweiz: Abweichung von kalten Nächten (TN10p, links) und warmen Tagen (TX90p, rechts) für die Zeitperiode 1951–2014 (Tx90p) und 1959–2014 (TN10p), für welche homogenisierte Messdaten verfügbar sind, gegenüber der Referenzperiode 1961–1990. Gezeigt wird das Mittel über 12 Stationen aller Klimaregionen. Verwendet werden homogenisierte Daten. Der Verlauf und die Trends sind für alle Stationen sehr ähnlich. Der mittlere Trend (nach Mann-Kendall) beträgt  $-5,3$  Tage/10 Jahre für TN10p resp.  $+5,7$  Tage/10 Jahre für TX90p. (Quelle: Rebekka Posselt, angepasst von Scherrer et al. 2016)

## Mehr und heissere Hitze- und weniger Kältetage

Nichtsdestotrotz ist auch in der Schweiz an den meisten Stationen ein Trend zu mehr und intensiveren Hitzetagen (Scherrer et al. 2016) und weniger Kältetagen feststellbar (Abb. 1.18) (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40). Ein räumlicher Vergleich zeigt, dass der Trend zu intensiveren Hitzetagen über Mitteleuropa in einem globalen Kontext sogar besonders ausgeprägt ist und weltweit nahezu einmalig für dicht besiedelte Gebiete (Donat et al. 2013). Weiter hat konsistent mit der globalen Veränderung auch in der Schweiz die Häufigkeit und Intensität der Starkniederschläge an der Mehrheit der Stationen zugenommen (Scherrer et al. 2016) (s. a. Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46).

Für viele andere Arten von Klima- und Wetterextremen in der Schweiz – wie Dürren, Windstürme, Hagelereignisse, starke Schneefallereignisse und Wasserhosen oder Tornados – sind keine signifikanten Änderungen wissenschaftlich dokumentiert.

## Projektionen für die Schweiz

### Tage und Nächte mit hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit nehmen zu

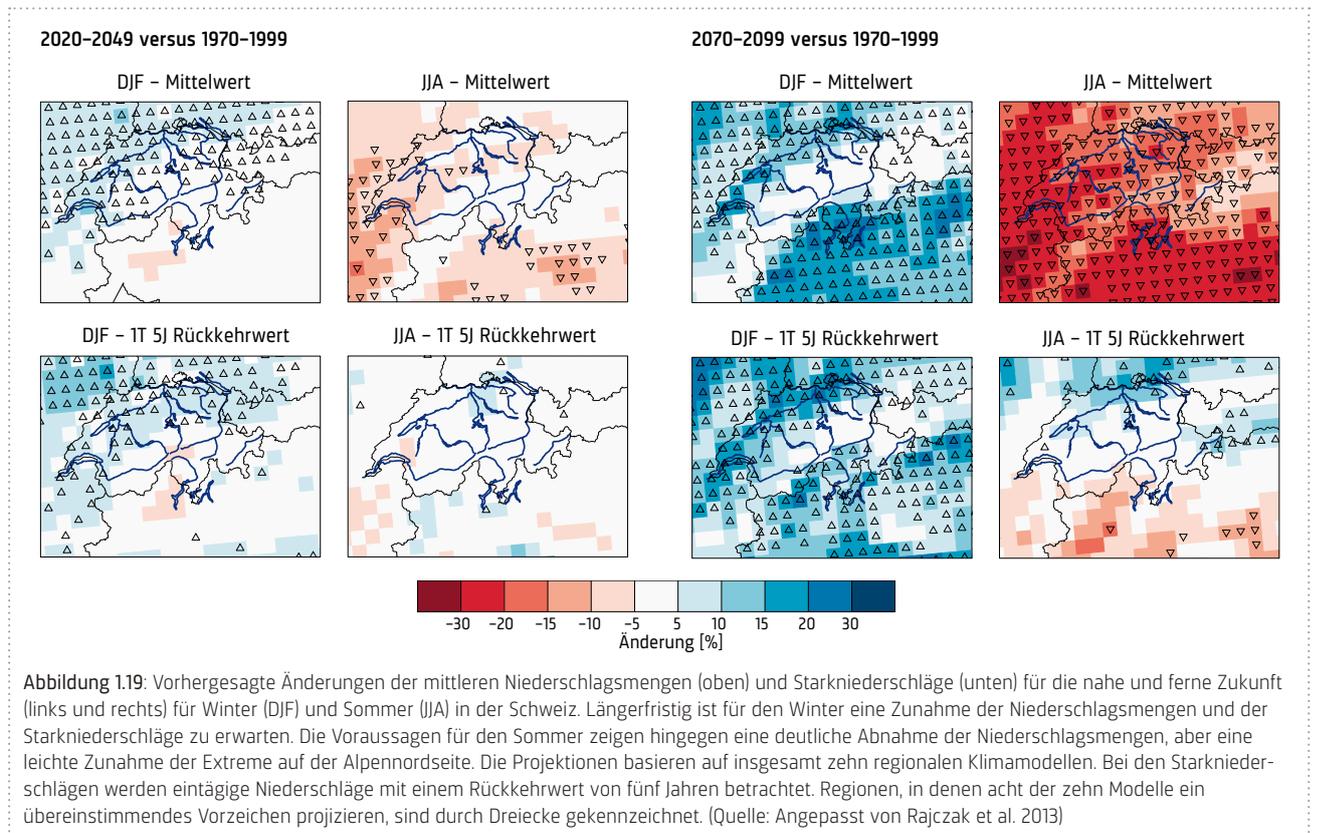
Eine Änderung von Temperaturextremen wird auch für die Schweiz erwartet. Wie in der Vergangenheit dürften sich auch in Zukunft über Mitteleuropa insbesondere Hitzeextreme stärker intensivieren als anderswo. Grund dafür ist, dass gemäss der Mehrheit der Modellprojektionen insbesondere in Mitteleuropa die sommerliche Temperaturvariabilität in Zusammenhang mit einer Änderung der Bodenfeuchte zunimmt (IPCC 2012/SREX/Chap.3). Dies hat zur Folge, dass die Temperaturen von Hitzeextremen stärker steigen als die entsprechenden Mitteltemperaturen.

Als Folge der zunehmenden Hitze und steigenden absoluten atmosphärischen Feuchte nimmt auch der Hitzestress für Mensch und Tier zu. Nächte und Tage mit hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit stehen in engem Zusammenhang mit erhöhter Krankheitshäufigkeit und Sterblichkeit. Insbesondere in tiefen Lagen wie dem Mittelland oder Tessin wird eine deutliche Zunahme des Hitzestresses erwartet.

### Trend zu häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen

Konsistent mit den globalen Vorhersagen werden auch für die Schweiz häufigere und intensivere Starkniederschläge erwartet (Abb. 1.19). Im Winter nehmen die Starkniederschläge prozentual ähnlich zu wie die mittleren Niederschlagsmengen (vergleiche obere und untere Panels in Abb. 1.19). Im Sommer hingegen muss mit abnehmenden Niederschlagsmengen gerechnet werden, während sommerliche Starkniederschläge eher zunehmen. Die entsprechenden Signale dürften sich im Laufe des Jahrhunderts akzentuieren und können in mittleren Szenarien relative Veränderungen von bis zu 30 Prozent erreichen. Wie im Abschnitt zu den globalen Projektionen und in Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34 erklärt, sind dem projizierten Klimatrend natürliche Schwankungen überlagert. Deshalb ist der signifikante Nachweis der Zunahme der Starkniederschläge in der Schweiz schwierig, scheint aber bereits heute möglich zu sein; gemäss Modellen wahrscheinlich zuerst in den kälteren Jahreszeiten (vergleiche die zwei Zeitperioden in Abb. 1.19).

Anhand von Seesedimenten der letzten 2500 Jahre aus Schweizer Bergseen wurde kürzlich aufgezeigt, dass warme Sommer in der Schweiz generell auch vergleichsweise trocken sind, womit grossräumige Hochwasser in war-



men Sommern insgesamt seltener sind. Diese Resultate beziehen sich auf langfristige und grossräumige Niederschlagsereignisse. Die Resultate stehen deshalb nicht im Widerspruch zur vorhergesagten Zunahme von kurzen, kleinräumigen und intensiven Starkniederschlagsereignissen.

Die in Abbildung 1.19 gezeigten Resultate gelten für Tagesniederschläge. Kurzfristige (stündliche) Starkniederschläge nehmen gemäss hochauflösenden Simulationen deutlicher zu, aber auch für diese gilt der Clausius-Clapeyron-Effekt, also eine maximale Zunahme von sechs bis sieben Prozent pro Grad Celsius Erwärmung (Ban et al. 2015). Kurzfristige Ereignisse sind im Alpenraum besonders im Sommer von Bedeutung, wenn kurze Niederschlagsspitzen eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Sturzfluten («Flash-Floods»), Murgängen und Rutschungen spielen.

### Hochwasserrisiko nimmt zu

Da bei steigenden Temperaturen in Abhängigkeit von Jahreszeit und Höhenlage mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee fällt, nimmt ohne entsprechende Anpassungsmassnahmen das Hochwasserrisiko auch ohne steigende Starkniederschläge zu. Für gewisse Ein-

zugsgebiete wie den Rhein bei Basel äussert sich dieser Effekt besonders ausgeprägt im Winter, während für die Einzugsgebiete der Alpensüdseite wahrscheinlich herbstliche Wetterlagen betroffen sind.

### Trockenheitsrisiko steigt, aber Projektionen sind weniger sicher

Basierend auf globalen Klimaszenarien (Abb. 1.17) kann für die Schweiz abgeleitet werden, dass das Trockenheitsrisiko in Zukunft, insbesondere bezüglich Bodenfeuchte, zunehmen wird. Auch detailliertere Szenarien für die Schweiz zeigen eine Tendenz zur Abnahme der Niederschläge im Sommer (CH2011 2011; Ban et al. 2015). Aber die Modellunsicherheit bei Trockenheitsänderungen ist grösser als bei Änderungen in Temperaturextremen und Starkniederschlägen.

### Unsichere Projektionen für andere Phänomene

Für viele andere Klima- und Wetterextreme sind kleinräumige Vorhersagen mit grossen Unsicherheiten behaftet. So ist zum Beispiel unklar, ob Winterstürme wie die Stürme Lothar und Vivian, die in der Schweiz grosse Schäden verursacht haben, in Zukunft intensiver oder

häufiger werden. Es wird erwartet, dass Tiefdruckgebiete und die dazugehörigen Sturmwinde über Nordeuropa etwas intensiver und über Südeuropa schwächer werden. Die Schweiz befindet sich an der Grenze der Gebiete mit Zunahme beziehungsweise Abnahme, weshalb robuste Vorhersagen noch nicht möglich sind.

### Veränderungen bei Extremereignissen erfolgen ungleichmässig

Während die erwarteten Änderungen von Wetterextremen in der Schweiz konsistent mit der grossräumigen Entwicklung in Europa (oder für Hitzeextreme sogar weltweit) sind, werden sie generell von hoher natürlicher Variabilität überlagert sein (Fischer et al. 2013). So werden Änderungen von Extremen in der Schweiz nicht kontinuierlich erfolgen. Vielmehr ist zu erwarten, dass gewisse Extreme allenfalls mehrere Jahrzehnte kaum zunehmen, um dann sehr rasch anzusteigen – oder umgekehrt.

### Herausforderungen für die Klimaforschung

Insgesamt bleibt der Nachweis von beobachteten Änderungen von Klima- und Wetterextremen eine grosse Herausforderung. Während die Änderungen von Temperaturextremen und Starkniederschlägen relativ gut verstanden sind, gibt es andere Extreme wie Windstürme und Hagel, für die beträchtliche Unsicherheiten bestehen oder zu wenige Messreihen und wissenschaftliche Untersuchungen verfügbar sind. Auch für Trockenheit sind die Modell- und Datenunsicherheiten noch sehr gross: Zum einen existiert keine universelle Definition von Klima- und Wetterextremen, zum anderen unterscheiden sich Hitzewellen und Dürren zwischen Tropen und hohen Breiten stark voneinander. Es wäre aber falsch, aus den Unsicherheiten zu schliessen, dass sich diese Extreme in Zukunft nicht ändern werden. Ebenso wäre es irreführend zu argumentieren, dass sich aufgrund des Klimawandels jegliche Wetterextreme verstärken müssen.

Die mit grosser Zuverlässigkeit vorhergesagte weltweite Zunahme von Hitzeextremen und Starkniederschlägen könnte gravierende Folgen haben, falls nicht die nötigen Anpassungsmassnahmen ergriffen werden. Auch für Klima- und Wetterextreme, die nicht häufiger auftreten, dürfte das Schadensrisiko aufgrund höherer demographischer, ökonomischer und technischer Faktoren (höhere Bevölkerungsdichte, Wertekonzentration und Verwundbarkeit) steigen. Einem Teil dieses Risikos kann mit einer besseren Vorbereitung auf Extremereignisse und einer Anpassung an den Klimawandel begegnet werden.

### Umfassende Risikoabschätzung

Eine weitere Herausforderung ist, dass Klima- und Wetterextreme per Definition selten sind und sehr unregelmässig auftreten. Idealerweise möchte man deshalb auf grossräumige und sehr lange Messreihen zurückgreifen. Da diese nicht vorhanden sind, lassen sich zuverlässige Aussagen meist nur dann machen, wenn grossräumig konsistente Trends festgestellt werden. Ein Blick nur auf die letzten 20 bis 30 Jahre kann leicht zu einer Fehleinschätzung der Risiken führen. Allzu oft werden Laien und Experten durch die Intensität von Wetterextremen überrascht, die in ähnlichem Ausmass während den letzten Jahrzehnten nie beobachtet wurden. Deshalb erfordert eine umfassende Risikoabschätzung eine Kombination von langen Messreihen und historischen Aufzeichnungen, physikalischem Prozessverständnis und Klimamodellsimulationen (s. a. CH2014-Impacts 2014).

## Referenzen

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) **Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?** *Geophysical Research Letters* 42: 1165–1172.
- 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
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Donat MG, Alexaner LV, Yang H, Durre R, Vose R, Dunn RJH, Willett KM, Aguilar E, Brunet M, Caesar J, Hewitson B, Jack C, Klein Tank AMG, Kruger AC, Marengo J, Peterson TC, Renom M, Oria Rojas C, Rusticucci M, Salinger J, Elrayah AS, Sekele SS, Srivastava AK, Trewin B, Villarroel C, Vincent LA, Zhai P, Zhang X, Kitching S (2013) **Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 2098–2118.
- Fischer EM, Beyerle U, Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes**. *Nature Climate Change* 3: 1033–1038.
- 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](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)**. Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)**. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)**. Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Orlowsky B, Seneviratne SI (2013) **Elusive drought: Uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections**. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 1765–1781.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 3610–3626.
- Scherrer SC, Fischer EM, Posselt R, Liniger MA, Croci-Maspoli M, Knutti R (2016) **Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121: 2626–2637.
- Sheffield J, Wood E, Roderick M (2012) **Little change in global drought over the past 60 years**. *Nature* 491: 435–438.
- Trenberth K, Dai A, van der Schrier G, Jones P, Barichivich J, Briffa K, Sheffield J (2014) **Global warming and changes in drought**. *Nature Climate Change* 4: 17–22.

## 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<sub>2</sub> 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 substantiell 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

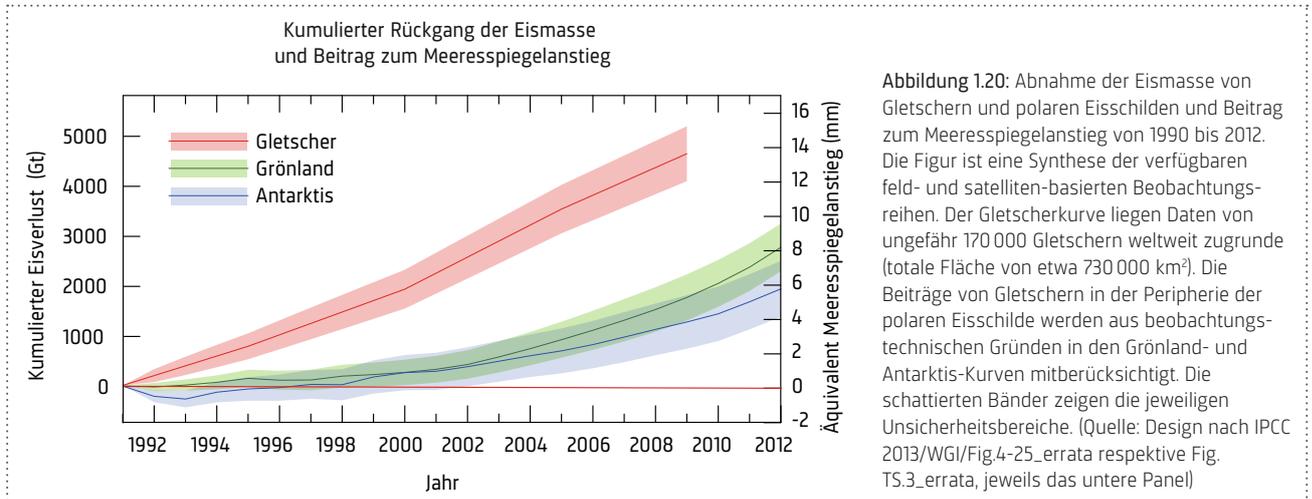
Der Ozean hat sich über die letzten Jahrzehnte erwärmt (IPCC 2013/WGI/Chap.3). Die grösste Erwärmung wurde in den obersten 700 Metern gemessen. Insgesamt sind mehr als 90 Prozent der zwischen 1971 und 2010 zusätzlich im Klimasystem angesammelten Energie im Ozean

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<sub>2</sub> wird heute vom Ozean aufgenommen (IPCC 2013/WGI/Chap.3 und Chap.6). Diese Aufnahme von zusätzlichem CO<sub>2</sub> im Ozean verlangsamt den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und damit den Klimawandel, führt aber gleichzeitig zu einer Abnahme des pH-Wertes<sup>1</sup> (d.h. einem Anstieg des

<sup>1</sup> 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.



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 *wahr-*

*scheinlich* mit dem aus seinen Aktivitäten<sup>2</sup> 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<sup>3</sup> von grosser Bedeutung für das globale Klimasystem.

<sup>2</sup> 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).

<sup>3</sup> 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 Bewässerungsanlagen 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 ther-

mische 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).

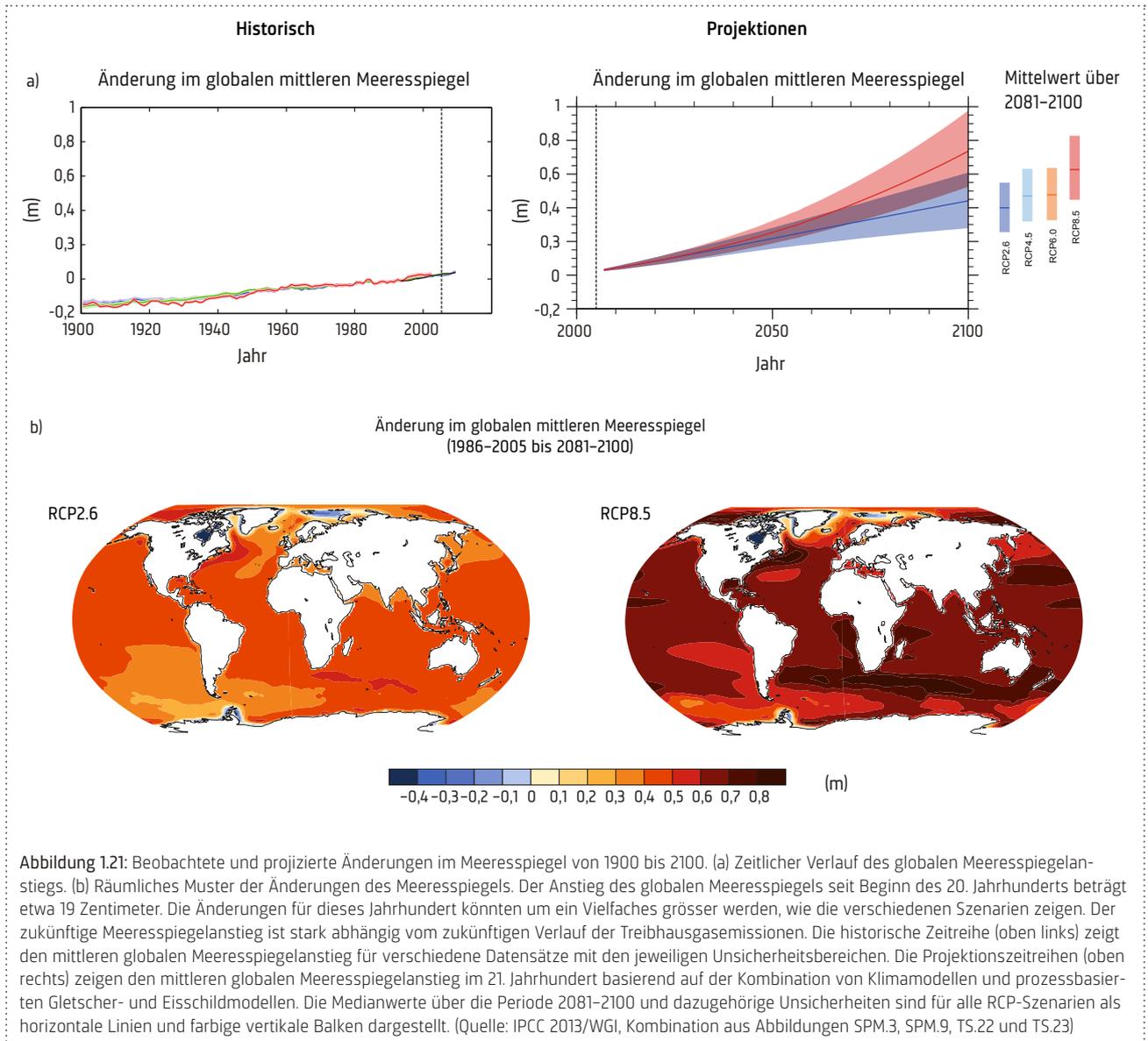
Der Anstieg des globalen Meeresspiegels hat sich in den letzten Jahren beschleunigt im Vergleich zum langfristigen Anstieg von 1901 bis 2010 (Abb. 1.21a, links) (IPCC 2013/WGI/Chap.3 und Chap.13). Auch im historischen Vergleich steigt der Meeresspiegel zurzeit stark an: Der Anstieg seit Mitte des 19. 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 Paläoklimafor- schung 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<sub>2</sub> direkt aufnehmen und damit den menschengemachten 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).

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<sub>2</sub>) und in Form des noch stärkeren Treibhausgases Methan (CH<sub>4</sub>) 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<sub>2</sub> 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).

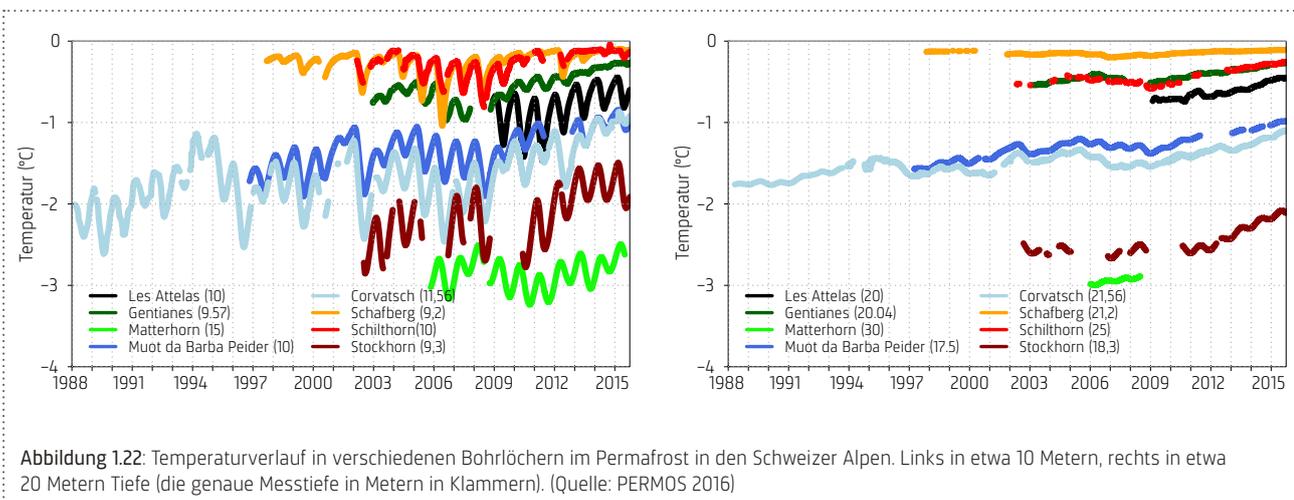


Abbildung 1.22: Temperaturverlauf in verschiedenen Bohrlöchern im Permafrost in den Schweizer Alpen. Links in etwa 10 Metern, rechts in etwa 20 Metern Tiefe (die genaue Messtiefe in Metern in Klammern). (Quelle: PERMOS 2016)

## 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 substantiell, 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](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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.



## Teil 2: Folgen und Anpassung

### Autorinnen und Autoren

**Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos**

Professor, Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, Institut für Energietechnik (IET), ETH Zürich

**Prof. Dr. David N. Bresch**

Professor für Wetter- und Klimarisiken, Institut für Umweltentscheidungen (IED), ETH Zürich und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz)

Bis Juni 2016: Leiter, Business Development Global Partnerships, Swiss Re, Zürich

**Prof. Dr. Harald Bugmann**

Professor für Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme (ITES), ETH Zürich

**Prof. Dr. Reynald Delaloye**

Professor für Physische Geographie, Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg

**Sabine Döbeli**

CEO, Swiss Sustainable Finance, Zürich

**Prof. Dr. Markus Fischer**

Direktor, Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Bern

**Prof. Dr. Jürg Fuhrer**

Leiter, Forschungsgruppe Klima und Lufthygiene, Agroscope, Zürich

**Prof. Dr. em. Wilfried Haeberli**

Professor (em.) für Geographie, insbesondere Physische Geographie, Geographisches Institut, Universität Zürich

**Prof. Dr. Martin Hoelzle**

Professor für Physische Geographie, Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg

**Dr. Roland Hohmann**

Sektionschef, Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

**PD Dr. Christian Huggel**

Leitender Forscher, Klimafolgen, Risiken und Anpassung / Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich.

**PD Dr. Margreth Keiler**

Dozentin für Geomorphologie, Naturgefahren und Risikoforschung, Geographisches Institut, Universität Bern

**Prof. em. Dr. DDR h.c. Christian Körner**

Professor (em.) für Botanik, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel

**Isabelle Kull**

Projektleiterin, GEOTEST AG, Zollikofen

**Prof. Dr. Nino Künzli**

Professor für Sozial und Präventivmedizin, Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut und Universität Basel

**Dr. Therese Lehmann Friedli**

Stv. Leiterin, Forschungsstelle Tourismus (CRED-T), Zentrum für Regionalentwicklung, Universität Bern

**Prof. Dr. Olivia Martius**

Professorin für Klimafolgen, Geographisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

**Dr. Christoph Marty**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Schnee und Permafrost, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos Dorf

**Gabriele Müller-Ferch**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

**Lea Müller**

Expertin für Naturgefahren, Swiss Re, Zürich

**Dr. Jeannette Nötzli**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Schnee und Permafrost, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos Dorf  
Bis Juli 2015: Oberassistentin, Gruppe Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich

**Prof. Dr. Anthony Patt**

Professor für Klimaschutz und -anpassung, Institut für Umweltentscheidungen (IED), ETH Zürich

**Dr. Frank Paul**

Leitender Forscher, Gruppe Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut, Universität Zürich

**Prof. Dr. Etienne Piguet**

Professor für Mobilitätsgeographie, Geographisches Institut, Universität Neuenburg

**Dr. Marco Pütz**

Leiter, Forschungsgruppe Regionalökonomie und -entwicklung, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

**Prof. Dr. Christoph C. Raible**

Professor für Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern

**Prof. Dr. Martine Rebetez**

Professorin für Angewandte Klimatologie, Geographisches Institut, Universität Neuenburg  
Leitende Forscherin, Walddynamik und Klima, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

**Dr. Andreas Rigling**

Leiter, Forschungseinheit Walddynamik, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

**Dr. Christoph Ritz**

Bis März 2016: Geschäftsleiter, ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

**Dr. Ole Rössler**

Postdoktorand, Gruppe Hydrologie, Geographisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

**Dr. Nadine Salzmann**

Leitende Forscherin und Dozentin, Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg

**Dr. Yvonne Schaub**

Stv. Leiterin Prorektorat Medizin und Naturwissenschaften, Universität Zürich  
Bis Mai 2015: Doktorandin, Physische Geographie, Geographisches Institut, Universität Zürich

**Dr. Eva Spehn**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Forum Biodiversität, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern  
Geschäftsführerin, Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA), Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Bern

**Dr. Kuno Strassmann**

Projektkoordinator, CH2018-Konsortium, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich  
Bis Juni 2016: Fachspezialist Klimaschutz, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich

Bis April 2014: Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

**Prof. Dr. Rolf Weingartner**

Professor für Hydrologie, Geographisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

**Mark Zimmermann**

Abteilungsleiter NEST («Next Evolution in Sustainable Building Technologies»), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf

**Dr. Markus Zimmermann**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Geographisches Institut, Universität Bern  
Fachexperte Gefahren- und Risikomanagement, Inhaber, NDR Consulting GmbH, Geowissenschaftliches Büro, Thun

## Herausforderungen für Forschung, Praxis und Gesellschaft im Umgang mit klimabedingten Naturrisiken – Fallbeispiel Haslital (Kanton Bern)

Die geomorphologischen Prozesse im Spreitgraben in der Gemeinde Guttannen BE veranschaulichen auf eindrückliche Weise die Auswirkungen der Klimaänderung, die seit etwa 30 Jahren immer wieder und in den letzten 10 bis 15 Jahren verstärkt in der alpinen Kryosphäre zu beobachten sind. Die zahlreichen Murgänge, die zwischen 2009 und 2011 im Spreitgraben aufgetreten sind, wurden durch Veränderungen der Permafrostverhältnisse am Ritzlihorn ausgelöst. Seit 2012 ist die Zahl der Murgänge zwar zurückgegangen, eine erneute Intensivierung der Murgänge – möglicherweise in kleinerem Ausmass – wird aber erwartet. Die enormen Geschiebeablagerungen in der Aare sowie die sich ständig ändernde Gefährdung von Siedlungen und Infrastrukturanlagen stellen hohe Ansprüche an das Gefahren- und Risikomanagement. Das im Jahre 2009 installierte Überwachungs- und Frühwarnsystem konnte durch die hohe Ereignisdichte bereits mehrmals auf seine Funktionalität geprüft und verbessert werden. Für den raumplanerischen Umgang mit diesen Risiken fehlten allerdings entsprechende Instrumente. Entscheidungsträger auf den Stufen Kanton und Gemeinde sind gefordert, zielführende Lösungskonzepte zu entwickeln, die den vorhandenen Unsicherheiten Rechnung tragen und zu einer Akzeptanz der notwendigen Anpassungsmassnahmen an der Basis führen.

*Isabelle Kull (GEOTEST AG), Markus Zimmermann (NDR Consulting GmbH und Universität Bern)*

Die Gemeinde Guttannen im östlichen Berner Oberland liegt auf rund 1050 Metern über Meer und ist umgeben von hohen Bergen. Naturgefahren sind ein wichtiger Bestandteil der Dorfgeschichte. Der grosse, nach der letzten Eiszeit entstandene Schuttkegel, an dessen Fuss sich Guttannen befindet, zeugt von wiederkehrenden Murgang-, Lawinen- und Sturzablagerungen vergangener Zeiten.

In den Jahren 2009 und 2010 ereigneten sich am Ritzlihorn (3263 m ü. M.), das sich westlich des Dorfes Guttannen befindet, grosse Felsstürze. Diese lösten im Murgangsystem Spreitgraben wesentliche Veränderungen in der Entwicklung der Prozesse aus und führten kurzfristig zu einem Systemwechsel: Während Murgänge bisher selten waren, ereigneten sich seit diesen Felsstürzen jährlich wiederkehrende Murgänge bisher ungekannten Ausmasses. Zwischen 2009 und 2011 wurden dadurch insgesamt rund 650 000 Kubikmeter Schutt – darunter riesige Felsblöcke – in der Aare abgelagert (GEOTEST 2012). Massive Erosionen auf dem Kegel und enorme Auflandungen im Talboden gefährdeten Infrastruktur und Siedlungsgebiet. Seit 2012 ist die Murgangaktivität wieder auf normalem Niveau.

### Auslösende Prozesse und Prozessketten am Ritzlihorn

Die markante Nordflanke des Ritzlihorns, die aus stark verschieferten und verwitterungsanfälligen Gneisen besteht, befindet sich im Permafrost, wie die Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung in der Schweiz zeigt

(BAFU 2005; Gruber 2012). Dies haben Feldbeobachtungen und Messungen der Basistemperatur der Schneedecke bestätigt. Mit grosser Wahrscheinlichkeit lag das Auslösegebiet der Felsstürze im degradierenden Permafrost (Hasler et al. 2011). Die ersten Murgänge entstanden in den frischen Felssturzablagerungen und verursachten auf dem Kegel des Spreitgrabens eine starke Tiefenerosion. Durch die Murgänge haben sich unter den Firnfeldern am Kegelhals Abflusskanäle ausgebildet, in denen es zu Verklausungen kam. Durchbrüche solcher Verklausungen verstärkten die Erosion, die durch die Murschübe ausgelöst wurde. Durch die mechanische Zertrümmerung und Unterspülung des Firns wurde dieser über weite Strecken aufgerissen, bis er schliesslich ganz kollabierte und auf diese Weise neue erosionsanfällige Geschiebeherde freilegte.

Das bis anhin schneebedeckte und stellenweise gefrorene Lockergestein war nun der direkten Witterung und Wärmeeinträgen ausgesetzt, was die Geschiebeverfügbarkeit zusätzlich erhöhte. Ein schneearmer Winter (2010/2011) sowie hohe Lufttemperaturen und Starkniederschläge im Sommerhalbjahr 2011 haben zum weiteren Zerfall und damit zur Freilegung der Gräben beigetragen, die teilweise seit Jahrzehnten (allenfalls seit Jahrhunderten) firnbedeckt waren.

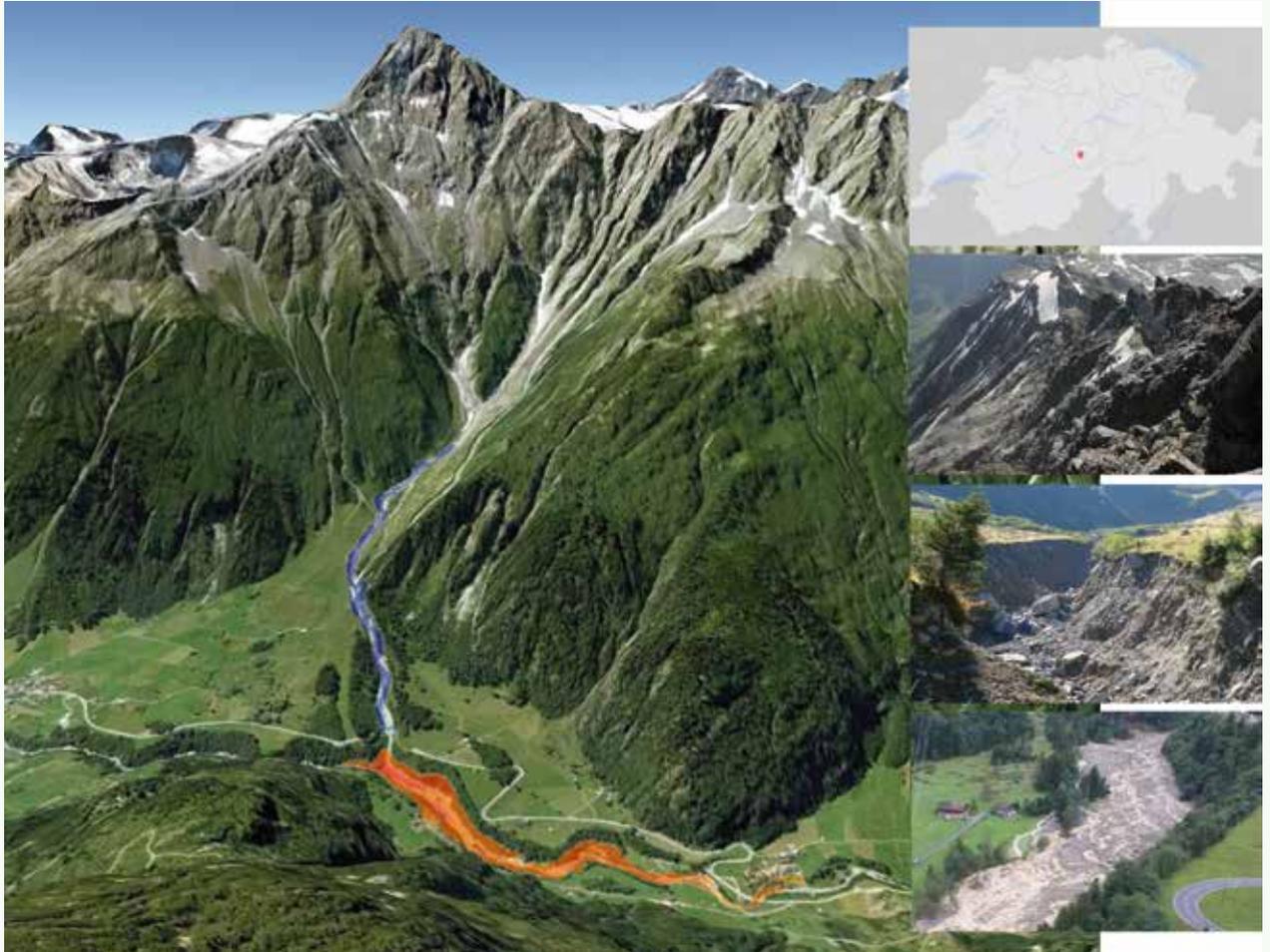


Abbildung 2.1: Ritzlihorn mit Spreitgraben und den bisherigen Erosions- (blau) und Ablagerungsgebieten (orange). Rechts: Illustrationen entlang des Grabens. (Quelle: GEOTEST 2012)

## Meteorologische Faktoren, die Murgänge auslösten

Zu den wichtigsten meteorologischen Einflussfaktoren, welche die Murgänge ausgelöst hatten, gehörten neben den unmittelbaren Niederschlägen insbesondere die Schneemenge, die Lufttemperatur und die Wassersättigung des Substrats. Diese Faktoren hatten einen hohen Einfluss auf die Permafrost- und Firnschmelze im Einzugsgebiet und damit auf die Verfügbarkeit von leicht mobilisierbarem Geschiebe.

## Neuartige Prozesskette – vermutlich durch Klimaänderung ausgelöst

Bei dieser Prozesskette handelt es sich um ein aussergewöhnliches, vermutlich klimabedingtes Phänomen, für das man im Spreitgraben bisher keine historische Parallele kennt. Das periglazial geprägte Murgangssystem scheint

nicht nur auf klimatische Veränderungen im Sinne von Extremereignissen zu reagieren, sondern insbesondere auch auf schleichende Temperaturveränderungen, die durch den Klimawandel bedingt sind und zu einer Degradation von Permafrost und Firn führen.

Der Spreitgraben ist kein Einzelfall: Im gegenüberliegenden Einzugsgebiet der Rotlouwi haben meteorologische Extremereignisse 2005 und 2011 zu grossen Murgängen geführt. Auch im zentralen Alpenraum konnte während der bekannten Unwetterereignisse 1987 eine Intensivierung der Murgänge durch Permafrostdegradation festgestellt werden (Zimmermann & Haeberli 1992).

Sowohl die Murgänge des Spreitgrabens als auch jene der Rotlouwi zeigen auf, dass Murgangssysteme je nach Charakter des Einzugsgebietes ausgesprochen sensitiv auf klimabedingte Prozessveränderungen reagieren. Dies konnte auch im zentralen Alpenraum während der Unwetter-

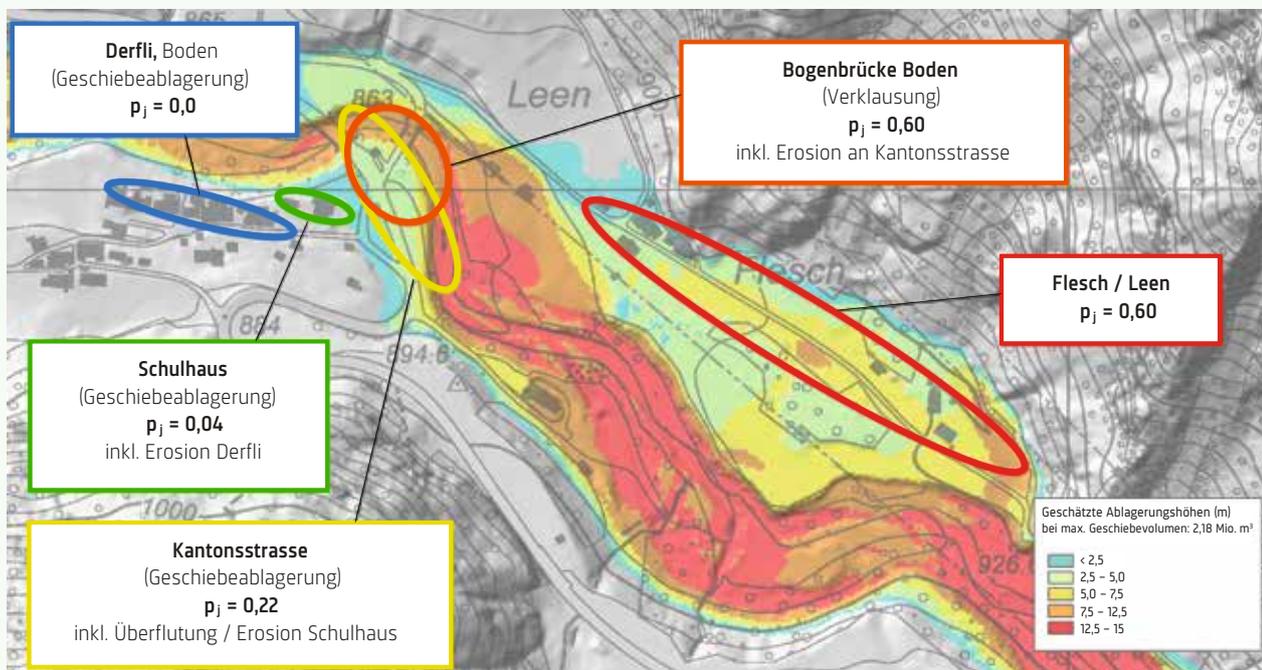


Abbildung 2.2: Prognostizierte Prozess- und Schadenswahrscheinlichkeit  $p_j$  für verschiedene Objekte innerhalb eines Zeithorizonts von 25 Jahren. (Quelle: GEOTEST 2012)

ereignisse 1987 festgestellt werden (Zimmermann & Haeberli 1992).

## Auswirkungen und Anpassungen

Während der drei Ereignisjahre von 2009 bis 2011 waren im Bereich der Kantonsstrasse von Guttannen sowohl die Lawingalerie als auch die internationale Gasleitung wiederholt durch Kolkbildung und Blockdurchschläge bedroht. Ein Wohnhaus und ein Stall, die sich unmittelbar gegenüber der Einmündung des Spreitgrabens in die Aare befanden, wurden akut durch Murgänge bedroht; das Wohnhaus stammte aus dem 18. Jahrhundert und lag bisher rund 20 Meter über dem Flussbett der Aare. Weiter talauswärts legten Murgänge und Hochwasser die Gasleitung frei und gefährdeten diese. Die Murgangablagerungen in der Aare kamen im letzten Ereignisjahr bedrohlich nahe an die ARA Guttannen und an einen Mast der Hochspannungsleitung. Überdies führten Auflandungen in der Aare im Abschnitt der Häusergruppen von Flesch, Leen und Boden – die sich rund einen Kilometer unterhalb der Mündung des Spreitgrabens in die Aare befinden – zu erhöhten Hochwasserrisiken.

## Umfangreiche Schutzmassnahmen umgesetzt

Um die Gefährdung in den Griff zu bekommen, wurden für die oben erwähnten Schadenpotenziale umfangreiche Schutzmassnahmen umgesetzt: Als erste Massnahme wurde ein hochtechnologisiertes Frühwarn- und Alarmsystem für den Strassenbetrieb, die Baustellen im Unterlauf und für betroffene Anwohner aufgebaut. Auch im Bereich des Kolkes unterhalb der Lawingalerie und Transitgasleitung konnte die Bachsohle nach mehreren Stabilisierungsversuchen im Winterhalbjahr 2010/2011 aufgefüllt und mittels eines Färrichs, einer Struktur aus Stahlträgern und grossen Blöcken, stabilisiert werden. Im Jahr 2011 mussten die akut bedrohten Gebäude gegenüber der Einmündung aufgegeben werden. Die Personen wurden umgesiedelt, die Gebäude abgebrochen. Als weitere Schutzmassnahme wurde die Gasleitung im Bereich der Einmündung des Spreitgrabens in die Aare mit viel Aufwand auf die gegenüberliegende Talseite verlegt. Es wurden Dämme aufgeschüttet, um die ARA vor den immer weiter vordringenden Murgangablagerungen und vor lokaler Erosion zu schützen.

Die Anpassungen an die bisherigen Prozessveränderungen haben Kosten von rund 50 Millionen Franken verursacht, davon alleine 34 Millionen für die Sicherheit der Gasleitung. Sollten erneut Ereignisse in der Grössenordnung der Ereignisse von 2010/2011 stattfinden, könnten weitere Siedlungsteile von Guttannen (Flesch, Leen und

Boden) wie auch die Kantonsstrasse im Ablagerungs- und Erosionsbereich der Murgänge zu liegen kommen; dies würde weitere Anpassungsmassnahmen bedingen und grosse Kosten für Private und die öffentliche Hand verursachen.

## Handlungsstrategien im Umgang mit klimabedingten Prozessveränderungen

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist zu erwarten, dass sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität und die räumliche Ausdehnung von Prozessen, wie sie im Spreitgraben stattgefunden haben, weiter zunehmen werden.

Auch in anderen Gebieten können ähnlich wie im Haslital neue Prozessabläufe und Gefährdungsbilder entstehen. Deren mögliche Auswirkungen sind aus heutiger Sicht schwierig abzuschätzen, da sie oftmals ausserhalb der historischen Erfahrung liegen. Die grossen Schwierigkeiten liegen bei der Definition von Szenarien, Ereigniskaskaden, Gefährdungsbildern und letztlich von Gefahren und Risiken. Die Komplexität der Wechselwirkungen, die fehlenden historischen Parallelen und der landschaftsverändernde Charakter von klimabedingten Prozessveränderungen machen es schwierig, deren künftige Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Aufgrund dieser Unsicherheiten war es bisher nicht möglich, für die potenziellen Prozessräume im Gebiet von Guttannen/Boden eine Gefahrenbeurteilung im Sinne einer Gefahrenkarte vorzunehmen. Es wurde stattdessen primär mit Worst-Case-Szenarien operiert. Ohne Gefahrenkarte war es für die Gemeinde jedoch schwierig, den baurechtlichen Umgang mit Bauten im Gefahrengebiet zu regeln oder grundsätzliche Entscheide zur zukünftigen Nutzung dieses Gebiets zu treffen.

## Lösungsansatz

Im Sinne eines neuen Umgangs mit solchen klimabedingten Unsicherheiten und Risiken wurde für Guttannen ein Lösungsansatz ausgearbeitet, der auf unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Prozessen, Prozessentwicklungen (Kaskaden) und daraus resultierenden Schäden basiert (GEOTEST & NDR 2014). Die Prozesswahrscheinlichkeiten basieren dabei auf möglichen Kombinationen von Prozessabläufen.

Dieses Vorgehen soll ermöglichen, für potenziell gefährdete Objekte die Schadenswahrscheinlichkeit innerhalb eines festgelegten Zeitraums abzuschätzen. Im Falle von Guttannen umfasst der Zeitraum ungefähr 25 Jahre, basierend auf der Amortisationsdauer von Umbauten an Gebäuden.

Ziel dieser Betrachtung ist, lokalen und kantonalen Behörden wie auch Versicherungen Grundlagen zur Verfügung zu stellen, die für Planungsentscheide (z. B. für Raumplanung und Infrastrukturentwicklung) und für die Versicherung von Gebäuden und Anlagen notwendig sind.

Je nach prognostizierter Prozess- und Schadenswahrscheinlichkeit im Siedlungsgebiet gibt es verschiedene Möglichkeiten des raumplanerischen Umgangs mit der Gefährdung: Aussiedlung bei sehr grosser Gefährdung (bereits angewandt bei der Häusergruppe gegenüber der Einmündung des Spreitgrabens), eine eingeschränkte Siedlungsentwicklung bei einer mittleren Gefährdung oder eine uneingeschränkte Siedlungsentwicklung bei sehr geringer Gefährdung.

In Guttannen wurde die wahrscheinlichkeitsbasierte Analyse für drei verschiedene Häusergruppen und einen Zeithorizont von 25 Jahren vorgenommen. Die Resultate der Analyse ergaben, dass

- bei zwei Häusergruppen (Flesch und Leen) mit einer erhöhten Schadenwahrscheinlichkeit von 60 Prozent zu rechnen ist. Das heisst aber auch, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 Prozent in den nächsten 25 Jahren keine Schäden auftreten.
- bei der Kantonsstrasse die Schadenwahrscheinlichkeit bei 22 Prozent liegt.
- bei zwei Objekten (Schulhaus) mit einer geringen Schadenwahrscheinlichkeit (0,04 Prozent) zu rechnen ist.
- im Derfli (Weiler Boden) im Moment mit keinen Schäden gerechnet werden muss.

Die Resultate der Analyse sind auf der Karte in Abbildung 2.2 räumlich dargestellt.

## Referenzen

- BAFU (2005) *Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung der Schweiz*. [www.bafu.admin.ch/naturgefahren](http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren)
- GEOTEST (2012) *Guttannen, Murgang Spreitloui – Analyse und Prognose*. Bericht Nr. 1409237.3.
- GEOTEST, NDR (2014) *Guttannen, Spreitgraben – Ereigniswahrscheinlichkeiten*. Grundlagen für eine Risikoevaluation. Bericht Nr. 1414046.1.
- Gruber S (2012) *Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation*. In: Bamber L, Gruber S, Gudmundsson GH, Van den Broeke M (eds.), *The Cryosphere* 6: 221–233.
- Hasler A, Gruber S, Haeberli W (2011) *Temperature variability and offset in steep alpine rock and ice faces*. In Bamber L, Gruber S, Gudmundsson GH, Van den Broeke M (eds.), *The Cryosphere* 5: 977–988.
- Zimmermann M, Haeberli W (1992) *Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas*. A case study in the Swiss Alps. *Catena Supplement* 22: 59–72.

## 2.1 Einleitung

Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht zeigt, dass der Klimawandel bereits in den letzten Jahrzehnten Folgen für natürliche und menschliche Systeme auf allen Kontinenten und über alle Ozeane hinweg hatte. Im Allgemeinen gilt: Je wärmer es wird, desto stärker werden die Folgen und desto höher werden die Risiken. Diese Erkenntnis ist nicht neu, sondern war bereits Teil der früheren IPCC-Sachstandsberichte. Neu und im Zentrum ist im Fünften IPCC-Sachstandsbericht hingegen der Umgang mit Risiken und deren Vermeidung oder Verminderung – etwa mit geeigneten Anpassungsmassnahmen. Dazu wird eine Risikoanalyse verwendet, die neben klimatischen auch sozioökonomische Faktoren miteinbezieht.

*Christian Huggel (Universität Zürich), Christoph C. Raible (Universität Bern),  
Kuno Strassmann (AWEL Kt. Zürich, \*neu ETH Zürich), Gabriele Müller-Ferch (SCNAT/ProClim)*

### Beobachtete Klimafolgen und ihre Rolle für zukünftige Abschätzungen

Das Abschmelzen der Gletscher gehört mit zu den deutlichsten Indikatoren des Klimawandels. Die Gletscher der Schweizer Alpen sind vor allem seit Mitte der 1980er-Jahre kontinuierlich und sehr rasch geschmolzen (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80). Aber auch terrestrische und marine Ökosysteme zeigen bereits Veränderungen. Viele Arten haben ihre geographische Verbreitung, jahreszeitlichen Aktivitäten, Migrationsmuster, Häufigkeit und Arteninteraktion geändert (s. a. Kap. 2.8 Biodiversität und Ökosystemleistungen, S. 100, Kap. 2.9 Wald, S. 106, Kap. 2.7 Alpine Ökosysteme, S. 96). Solche Beobachtungen stellen ein wichtiges Element zum besseren Verständnis der Art, Intensität und Geschwindigkeit der Folgen des Klimawandels dar. Beobachtungen von Folgen des Klimawandels reichen unterschiedlich weit in die Vergangenheit zurück. Meist liegen nur Daten für die letzten Jahrzehnte vor. Sie umfassen neben reinen Klimagrössen wie Temperatur oder Niederschlag auch Entwicklungen in Ökosystemen und der menschgemachten Umwelt und geben so empirisch über die Zusammenhänge zwischen Klima und Klimafolgen Aufschluss. Auf Grund der zahlreichen nicht-klimatischen Faktoren, die ebenfalls auf diese Systeme einwirken, wie zum Beispiel der Landnutzung, ist es eine grosse wissenschaftliche Herausforderung, beobachtete Veränderungen ursächlich auf den Klimawandel zurückzuführen (*Attribution*). Das durch Beobachtungen erhärtete Prozessverständnis vergangener Veränderungen kann mittels Klimafolgemodellen benutzt werden, um zu Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Klimafolgen zu gelangen (s. a. Teil 1: Physikalische Grundlagen, S. 21).

### Folgen des Klimawandels bergen Risiken

Klimafolgen bergen Risiken für natürliche und menschliche Systeme. Im Unterschied zum letzten Bericht betrach-

tet der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht die Klimaproblematik konsequent aus der Risikoperspektive. Risiko ist durch das parallele Auftreten von Gefährdung (*Hazards*), Exposition (*Exposure*) und Verwundbarkeit (*Vulnerability*) definiert (s. a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77). Die neue Risikoanalyse zieht neben klimatischen auch sozioökonomische Faktoren wie Ungleichheit oder Armut mit ein. Dieser Ansatz trägt der Komplexität der Klimaproblematik Rechnung, führt aber zu mehr Unsicherheiten in den Schätzungen.

Im IPCC-Sachstandsbericht werden verschiedene Schlüsselrisiken aufgrund grosser Gefährdung sowie grosser Verwundbarkeit der exponierten Gesellschaften oder Systeme genannt. Die Welt wird von den Schlüsselrisiken unterschiedlich betroffen sein; es wird Verlierer und Gewinner geben. Global gehören die Gefährdung der Nahrungsmittelsicherheit vor allem in ärmeren Regionen wie auch die Bedrohung der Küstenregionen durch Sturmfluten und durch den Anstieg des Meeresspiegels zu den potenziell schwerwiegenden Folgen (s. a. Kap. 2.16 Globale Zusammenhänge und Migration, S. 136, Kap. 2.13 Urbaner Raum, S. 126). Eine geringere Verfügbarkeit von Wasser gilt als Schlüsselrisiko in Südeuropa, könnte aber auch in der Schweiz ein Thema werden, falls keine Anpassung in Form eines integralen Wassermanagements stattfindet (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84, Kap. 2.10 Landwirtschaft, S. 111). Dasselbe gilt für Hitzewellen, die ohne Anpassung auch hierzulande gesundheitliche Folgen und wirtschaftliche Schäden haben könnten (s. a. Kap. 2.15 Gesundheit, S. 132, Kap. 2.13 Urbaner Raum, S. 126). Auch andere Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Hagel, Erdbeben oder Felsstürze können in der Schweiz die Bevölkerung bedrohen und wirtschaftlichen Schaden anrichten (s. a. Kap. 2.17 Versicherungs- und Finanzindustrie, S. 139, Kap. 2.6 Naturgefahren ausgelöst durch ein verändertes Klimasystem: Prozessketten und komplexe Risiken, S. 92, Kap. 2.12 Bauten und Infrastrukturen, S. 121, Kap. 2.11 Tourismus, S. 117).

## Folgen und Anpassung an den Klimawandel: Forschungsaktivitäten in der Schweiz

Die IPCC-Sachstandsberichte richten sich in erster Linie an ein globales Publikum. Um auch ein kohärentes und aktuelles Bild der Schweiz zeichnen zu können, werden in den Kapiteln des vorliegenden Berichtes zusätzliche Erkenntnisse aus Schweizer Forschungsaktivitäten berücksichtigt. Zu den grösseren Programmen gehören:

### Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Ziele des vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und WSL 2009 lancierten Forschungsprogramms sind, herauszufinden, wie sich der Klimawandel auf den Wald und die Waldleistungen auswirkt und mit welchen Anpassungsmassnahmen sich letztere sichern lassen. Anhand der Erkenntnisse soll es den Akteuren – Forstdienste, Waldeigentümer, politische Entscheidungsträger – möglich sein, die mit dem Klimawandel verbundenen Risiken und die Anpassungsfähigkeit der Wälder richtig einzuschätzen und soweit erforderlich wirksame Anpassungsmassnahmen zu treffen. Die Ergebnisse fliessen zudem in die «Nationale Anpassungsstrategie an den Klimawandel» des Bundesrates (BAFU 2012 & 2014) und sollen die politische Umsetzung der Ziele der «Walddpolitik 2020» (BAFU 2015) unterstützen (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106).

### Nationales Forschungsprogramm

#### «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61)

Im NFP 61 (2015) wurden von 2010 bis 2013 wissenschaftliche Grundlagen und Methoden erarbeitet für einen nachhaltigen Umgang mit den Wasserressourcen, die unter zunehmendem Druck stehen. Untersucht wurden auch die Auswirkungen der klimatischen und gesellschaftlichen Veränderungen auf die Ressource Wasser. Risiken und potenzielle Konflikte wurden identifiziert und Strategien für ein nachhaltiges und integrales Wasserressourcen-Management entwickelt (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84).

#### ACQWA (Assessing Climate Impacts on the Quality and Quantity of Water)

Das EU-Projekt ACQWA befasste sich von 2008 bis 2013 mit Klimawandel und Wasserressourcen in verschiedenen Regionen der Schweiz. Auf Basis von Klimamodelldaten und verschiedenen Wasserangebots- und Nachfragemodellen wurden Anpassungsstrategien in verschiedenen ökonomischen und politikrelevanten Sektoren entwickelt (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84).

### Nationaler Forschungsschwerpunkt «Klima»

Im Rahmen des sogenannten «NCCR Climate» arbeiteten zwischen 2001 und 2013 rund 200 Forscherinnen und Forscher an zwölf Institutionen in der ganzen Schweiz. Entstanden sind mehr als 800 Forschungsartikel, die in internationalen Fachzeitschriften (peer-reviewed) erschienen sind. Geforscht wurde in den Bereichen Klima der Vergangenheit (Variabilität, Trends und Extremereignisse), Klima der Zukunft (Prozesse und Vorhersagen), Folgen von Klimavariabilität und Klimawandel sowie Risikoabsicherung, Risikoabsicherung und sozioökonomische Antworten. Aus diesem Forschungsschwerpunkt entstanden sind die beiden Forschungszentren Oeschger-Zentrum für Klimaforchung (OCCR) der Universität Bern sowie das Center for Climate Systems Modelling (C2SM) von der ETH Zürich, MeteoSchweiz, EMPA, WSL und Agroscope.

### Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro)

Das Projekt CCHydro (2009–2012) des BAFU untersuchte die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100, einschliesslich einer Standortbestimmung für 2050. Die Resultate zeigen, dass sich vor allem die saisonalen Abflussregimes stark ändern werden, wahrscheinlich mit vermehrtem Auftreten von Hochwasser und insbesondere auch Niedrigwasserereignissen (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84).

### CH2014-Impacts-Initiative

Die neusten Klimaszenarien für die Schweiz (Klimaszenarien CH2011; die Szenarien werden momentan aufdatiert im Themenschwerpunkt CH2018) und die über die vergangenen Jahre entwickelten Klimafolgenmodelle führten zur CH2014-Impacts-Initiative und damit zur Quantifizierung der Klimafolgen in der Schweiz (CH2014-Impacts 2014). Dieser Bericht umfasst eine Sammlung von Klimafolgenstudien, die sowohl Veränderungen der Umweltbedingungen behandeln als auch deren wirtschaftliche und gesellschaftliche Konsequenzen wie Landwirtschaft oder Energieverbrauch. Es wurden drei Zeithorizonte (2030, 2060, 2080) behandelt, um den Anforderungen bei Planungs- und Managemententscheidungen und den je nach Klimafolge relevanten Zeitskalen gerecht zu werden.

### Weitere Aktivitäten

Abgesehen von den genannten Projekten sind alle Schweizer Hochschulen im Bereich der Klimaforschung tätig. Zusätzlich laufen forschungsnahe Aktivitäten, die vom Bund initiiert sind. Dazu gehören beispielsweise das Pilotprogramm Anpassung und die Analyse der klimabedingten Risiken und Chancen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

## Optimale Anpassung kann Risiken verringern

Im Laufe der Geschichte haben sich Menschen und Gesellschaften immer wieder an das Klima mit seinen Schwankungen und Extremen angepasst – mit unterschiedlichem Erfolg. In den neuen IPCC-Sachstandsberichten wird noch klarer ersichtlich, dass Klima, Klimafolgen, Risiken, Anpassung und Minderung (s. a. Teil 1: Physikalische Grundlagen, S. 21) eng verbunden sind und erfolgreiche Ansätze eine umfassende Perspektive einnehmen müssen. Welche Risiken sind tragbar und wie gehen wir damit um? Wie gross ist unser Handlungsspielraum? Optimale Anpassung kann Risiken substanziell verringern, wie die zweite Arbeitsgruppe im IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2014/WGII) aufzeigt. Allerdings sind die Möglichkeiten zur Anpassung je nach Region und System sehr unterschiedlich. Die Schweiz zeichnet sich durch hohe Anpassungskapazitäten aus (s. a. Kap. 2.18 Strategien und Massnahmen des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel, S. 144), wohingegen Länder mit hoher Armut und ungünstiger oder fehlender politischer Führung weniger entsprechende Möglichkeiten besitzen.

Anpassung wird zurzeit in einige Planungsprozesse eingebunden, wobei die Umsetzung von Massnahmen eher begrenzt bleibt. Technische Massnahmen hingegen werden häufig umgesetzt, oftmals in bereits bestehende Programme integriert, wie solchen zum Management von Katastrophenrisiken oder zur Wasserwirtschaft. Ein erster Schritt in Richtung Anpassung an den zukünftigen Klimawandel ist die Verringerung der Verwundbarkeit und Exposition gegenüber heutigen Klimaschwankungen (erhöhte Resilienz). Besonders wirksam sind Strategien, die gleichzeitig einen Zusatznutzen in anderen Bereichen zeigen, wie zum Beispiel in der Förderung der menschlichen Gesundheit oder der Qualität der Umwelt (IPCC 2014/WGII/SPM).

Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht zeigt ferner, dass die Risiken einer 2-Grad-Welt bedeutend kleiner sind als jene einer 4-Grad-Welt. Mit jedem zusätzlichen Grad Celsius Erwärmung wird der ökonomische und technische Spielraum kleiner. Nicht alle Systeme können sich anpassen und man stösst an Grenzen. Es gibt also Möglichkeiten, auf den Klimawandel zu reagieren – doch funktionieren sie nur in einem gewissen Rahmen und müssen Hand in Hand mit einer Minderung der Treibhausgasemissionen erfolgen. Minderung ist nach wie vor die wirksamste Reaktion auf den Klimawandel (s. a. Teil 3: Minderung, S. 149).

## Referenzen

- BAFU (2012) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder.** Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2014) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019.** Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Bern. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2015) **Waldpolitik 2020.** [www.bafu.admin.ch/wald](http://www.bafu.admin.ch/wald)
- 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
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- NFP 61 (2015) **Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft.** Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern. [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)

## 2.2 Das neue IPCC-Risikokzept

Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht werden die Klimafolgen zum ersten Mal konsequent aus der Perspektive des Risikos für Mensch und Umwelt betrachtet. Das neue Risikokzept versteht das Risiko nicht mehr einseitig als Folge der externen Gefährdungen aufgrund der Klimaänderung, sondern als Wechselwirkung zwischen Klima, seinen Auswirkungen sowie den sozioökonomischen Prozessen der Gesellschaft.

*Christian Huggel (Universität Zürich)*

Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht versteht das Risiko der Klimaänderung als integraler Teil der Bewältigung von Veränderungen durch die Gesellschaft. Risiken entstehen dabei durch die Wechselwirkung der klimabezogenen *Gefährdungen* mit der *Exposition* und *Verwundbarkeit* von Mensch und Umwelt gegenüber diesen Gefährdungen (Abb. 2.3). Der Mensch kann aktiv die möglichen Auswirkungen beeinflussen, indem er durch geeignete Anpassungen das Risiko vermindert. Ebenso kann er durch Minderung der Emissionen die menschengemachte Klimaänderung verringern.

Diese integrale Betrachtungsweise reflektiert die entsprechenden Verschiebungen in den wissenschaftlichen Publikationen. Die Unterscheidung der verschiedenen Aspekte – der externen Gefährdung sowie der Exposition und Verwundbarkeit von Mensch und Umwelt – ist eine wichtige Erweiterung gegenüber früheren IPCC-Sachstandsberichten: Diese neue Art der Strukturierung der Informationen vereinfacht das Risikomanagement und die Entwicklung politischer Instrumente.

### Zentrale Elemente des Risikokzept

#### Risiko

Risiko bezeichnet die Möglichkeit von Folgen, bei denen es um den Verlust von Werten geht und der Ausgang ungewiss ist. Risiko ist das Resultat einer Wechselwirkung zwischen Gefährdungen, Exposition und Verwundbarkeit. Im IPCC-Sachstandsbericht geht es um das klimabezogene Risiko.

#### Gefährdungen

Das mögliche Auftreten eines natürlichen oder klimabezogenen physischen Ereignisses oder Trends oder dessen physikalische Folge, die den Verlust von Leben, eine Verletzung oder eine Gefährdung der Gesundheit bewirken kann. Neben dem Menschen können auch Sachgüter und natürliche Systeme (z.B. terrestrische Ökosysteme)

Gefährdungen ausgesetzt sein. Gefährdungen beinhalten zwei Komponenten: die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Intensität des Prozesses (z.B. bei einem Hochwasser oder Sturm).

#### Exposition

Das Vorhandensein von Menschen, Lebensgrundlagen, Lebewesen oder Ökosystemen, Umweltleistungen und Ressourcen, aber auch von Infrastrukturen oder wirtschaftlichen, sozialen oder kulturellen Werten an Orten, die bedroht sein können.

#### Verwundbarkeit

Die Neigung oder Veranlagung, nachteilig betroffen zu sein. Die Verwundbarkeit umfasst auch die Empfänglichkeit für Schaden, Verlust und Leid und das Unvermögen, damit umzugehen oder sich anzupassen. Die physische Verwundbarkeit gibt Auskunft über die (strukturelle) Widerstandskraft eines Objektes gegenüber der Einwirkung eines Gefahrenprozesses (z. B. einer Lawine), während die soziale Verwundbarkeit Aspekte wie Wohlstand, Alter, Bildungsstand, sozialer Status oder Geschlecht umfasst.

#### Folgen

Auswirkungen auf natürliche und menschliche Systeme aufgrund von extremen Wetter- und Klimaereignissen oder aufgrund von schleichenden Veränderungen (z.B. Meeresspiegelanstieg oder Wasserverknappung in Trockengebieten).

### Risikokzept in der Anwendung

Geht es darum, die aufgrund eines bestehenden Risikos nötigen Massnahmen für Mensch und Umwelt abzuleiten, braucht es zuerst die Analyse und Bewertung des Risikos. Erst daraus lassen sich die nötigen Massnahmen

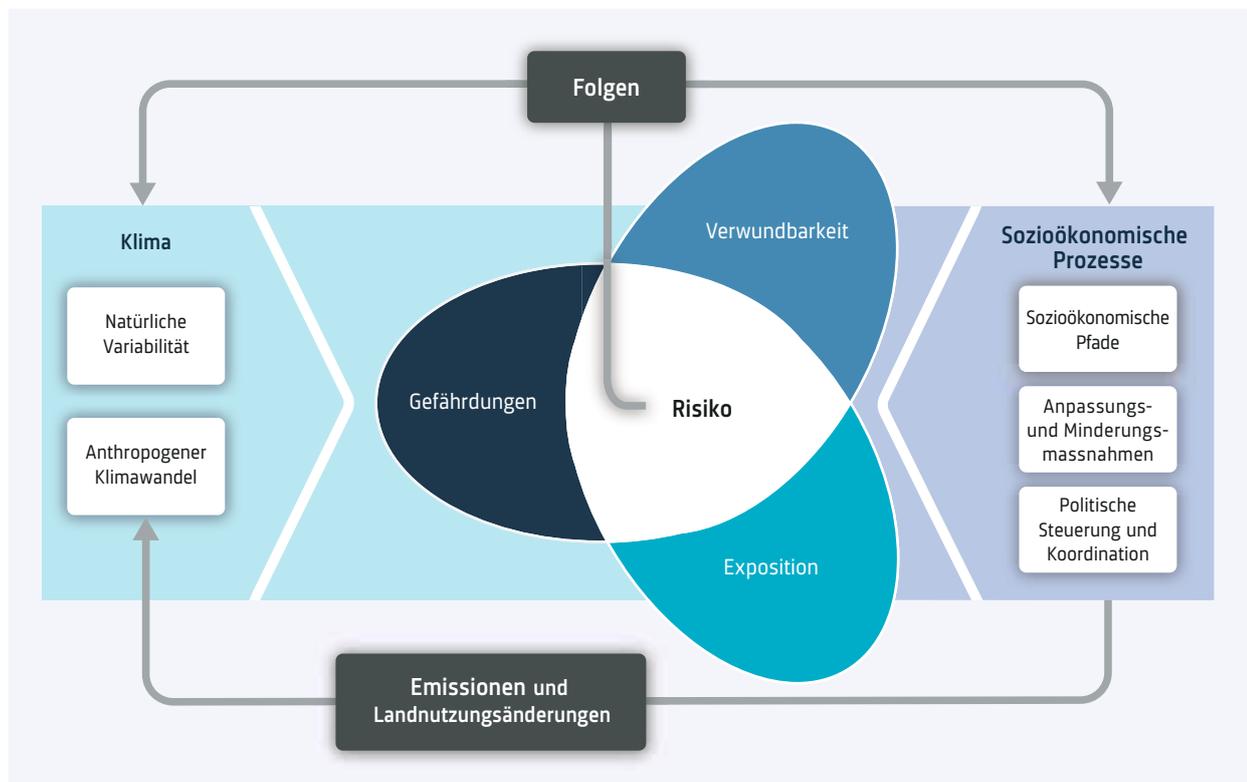


Abbildung 2.3: Risikokonzept wie im Fünften IPCC-Sachstandsbericht verwendet. Das Risiko von klimabezogenen Folgen resultiert aus der Wechselwirkung klimabezogener Gefährdungen (einschliesslich gefährlicher Ereignisse und Trends) mit der Verwundbarkeit und der Exposition menschlicher und natürlicher Systeme. Änderungen sowohl im Klimasystem (links) als auch in den sozioökonomischen Prozessen einschliesslich Anpassung und Minderung (rechts) sind Treiber für Gefährdungen, Exposition und Verwundbarkeit. (Quelle: IPCC 2014a)

planen. Zwei Beispiele sollen den Umgang mit Risiken illustrieren:

### Risiko Verkehrswege

Das gesellschaftliche Risiko für lebensbedrohende Situationen durch einen Hangrutsch auf einen Verkehrsweg steigt mit zunehmenden extremen Niederschlagsereignissen (Gefährdung) und nimmt mit wachsendem Verkehrsaufkommen und damit Personendichte zu (Exposition). Ist die Zugänglichkeit der gefährdeten Stelle und somit die Rettung erschwert, dann ist überdies die Verwundbarkeit erhöht und das Gesamtrisiko nimmt nochmals zu. Durch bauliche Massnahmen (Galerie, Tunnel) kann die Exposition und Verwundbarkeit stark verringert werden, falls die entsprechenden finanziellen, politischen und gesellschaftlichen Bedingungen für den Bau gegeben sind.

### Risiko Siedlungsgebiete

In der Schweiz liegen verschiedene Siedlungen in Überschwemmungszonen und sind damit exponiert, wie das konkrete Beispiel des Mattequartiers in der Stadt Bern illustriert. Das Mattequartier ist überschwemmungsgefährdet, wenn die Aare mehr als 440 Kubikmeter Wasser pro Sekunde führt (AWA Fakten 2010). Die Exposition des historischen Quartiers kann wegen seiner Lage an einer engen Stelle der Aare nicht beeinflusst werden. Durch verschiedene Massnahmen konnte jedoch die Gefährdung verringert werden: Einerseits durch den Entlastungsstollen in Thun mit einer Abflusskapazität von 100 Kubikmetern Wasser pro Sekunde, mit der sich die regulierte Abflussmenge aus dem Thunersee bei tiefem Wasserstand im See verdoppelt und auch bei mittlerem Wasserstand von 300 auf 400 Kubikmeter Wasser pro Sekunde erhöht werden kann. Besteht die Gefährdung eines Starkniederschlags im Einzugsgebiet der Aare oberhalb von Thun, lässt sich der Thunersee durch diesen Stollen unabhängig von der Seehöhe um etwa 20 Zentimeter pro Tag absenken. Dies entspricht 10 Millionen Kubikmetern Wasser und schafft im Thunersee

neuen Rückhalteraum für die gefallenen Niederschläge im Einzugsgebiet der Aare. Eine weitere Massnahme zur Verringerung der Gefährdung ist die temporäre Dämmung des Flusslaufs im Mattequartier selbst. Diskutiert wird zudem eine Renaturierung der Aare zwischen Thun und Bern, was weitere Rückhalte- und Überschwemmungszonen schaffen würde. Trotz aller Massnahmen bleibt das Überschwemmungsrisiko im Mattequartier hoch, flossen doch im Jahr 2005 zeitweise über 1200 Kubikmeter Wasser pro Sekunde in den Thunersee – in Zukunft könnten noch grössere Mengen abfliessen. Bereits geschaffen wurde ein Hochwasserwarnsystem, das auch Kurznachrichten auf dem Handy umfasst; das Alarmsystem verringert die soziale Verwundbarkeit (Bevölkerung) und die physische Verwundbarkeit (Sachwerte).

## Referenzen

- AWA Fakten (2010) **Hochwasserschutz am Thunersee**. Amt für Wasser und Abfall, Abteilung Gewässerregulierung, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, Bern, September 2010.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 19 «Emergent risks and key vulnerabilities». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014a) **Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger**. In: Klimaänderung 2014: Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2015.

## 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost

Die Klimaänderung wirkt sich deutlich auf die Kryosphäre aus. Weltweit betrachtet manifestieren sich die Folgen deutlich in den zwei Eisschilden (Grönland/Antarktis), im Meer-, See- und Flusseis sowie in den auch in der Schweiz weit verbreiteten Komponenten Schnee, Gletscher und Permafrost. Allen gemeinsam ist ihre Reaktion auf Änderungen von Temperatur und/oder Niederschlag. Der Wandel der Kryosphäre wirkt sich in der Schweiz auf verschiedene Bereiche von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft aus. Stark betroffen sind Winter- und Skitourismus, Wasserkraft und die Sicherheit von Siedlungen, Infrastruktur und Transportwegen in alpinen Gebieten. Anpassungsmassnahmen, die mit gewichtigen Kosten verbunden sind, werden zunehmend notwendig.

*Christian Huggel (Universität Zürich), Christoph Marty (SLF), Jeannette Nötzli (Universität Zürich, \*neu SLF), Frank Paul (Universität Zürich)*

### Nationale Situation

#### Auswirkungen auf den Winter- und Skitourismus

In tieferen Lagen der Schweiz konnte in den letzten Jahrzehnten ein klarer Rückgang der Schneedeckendauer beobachtet werden, in hohen Lagen (über 2000 Metern) jedoch nicht. Mit der fortschreitenden Erwärmung wird sich in Zukunft die Schneesaison je nach Höhenlage um mehrere Wochen verkürzen und die Schneegrenze um mehrere hundert Meter nach oben verschoben. Die erwartete Erwärmung und die damit einhergehende Zunahme der Regen- statt Schneefälle (Serquet et al. 2011) wird sich substantiell auf den Winter- und Skitourismus auswirken (s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117). Im Kanton Graubünden etwa werden ohne weitere künstliche Beschneigung die Anzahl der schneesicheren Skigebiete abnehmen. Als schneesicher werden Gebiete bezeichnet, die mindestens in sieben von zehn Jahren mehr als 100 Tage im Jahr mindestens 30 Zentimeter Schnee aufweisen. In einem Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) SRES-A2 (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38) und ohne künstliche Beschneigung verringert sich die Zahl der schneesicheren Skigebiete bis 2035 um rund 20 Prozent, bis 2085 um mehr als die Hälfte. Auch mit künstlicher Beschneigung nehmen die schneesicheren Gebiete ab – mit rund 25 Prozent bis ins Jahr 2085 aber weniger stark. Um die Schneesicherheit für Skigebiete weiterhin zu gewährleisten, müsste die künstliche Beschneigung – sofern überhaupt noch möglich – bis Ende des Jahrhunderts verdreifacht werden (Abegg et al. 2013; CH2014-Impacts 2014). Andererseits könnte aufgrund zunehmend fehlender Winterstimmungen im Unterland die Nachfrage nach klassischem Wintertourismus abnehmen.

#### Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit und Wasserkraftwerke

Das starke Abschmelzen der Gletscher und die Veränderungen der Schneedecke wirken sich auch auf die Wasserverfügbarkeit sowie den Energiesektor mit seinen Wasserkraftwerken aus. Auch wenn der globale Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius (gegenüber vorindustriellem Niveau) begrenzt werden kann, gehen Modellrechnungen im Vergleich zum Jahr 2000 immer noch von einem Gletschermassenverlust von etwa 50 Prozent bis 2050 und etwa 75 Prozent bis 2100 aus (Salzmann et al. 2012).

Im Zuge der zukünftigen Veränderungen der Schneedecke könnte die als Schnee gespeicherte Wassermenge 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 liegt im Hochgebirge, weil dort die unsichere Niederschlagsentwicklung im Winter einen Teil der Erwärmung kompensieren könnte, zumindest falls mehr davon als Schnee fallen sollte.

Genaue Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Abflusses aus vergletscherten Gebieten sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet. Ob sich in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten ein Anstieg des Abflusses ergibt, hängt von der Vergletscherung des Einzugsgebietes und weiteren Faktoren ab. Sind die Gletscher gross und dick, kann die Erhöhung der Schmelze durch Dickenabnahme die Verringerung der Schmelze durch Flächenabnahme überwiegen und der Abfluss wird noch einige Jahrzehnte zunehmen. Es lässt sich jedoch mit grosser Sicherheit sagen, dass der durch die Gletscherschmelze beeinflusste Abfluss im Sommer nach Mitte des Jahrhunderts abnehmen und sich die Abflussspitzen vom Hochsommer in den Frühsommer verschieben werden (Huss 2011).

**Abbildung 2.4:** Als Folge des Gletscherschwundes sind zahlreiche neue Seen in den Alpen entstanden, wie zum Beispiel der See am Triftgletscher (Bild unten) – und weitere werden dazu kommen. Dies führt für die Nutzung der Wasserkraft und für den Tourismus zu neuen Fragen im Umgang mit Risiken, Nutzung und Bewirtschaftung. Diese wurden etwa im Nationalen Forschungsprogramm 61 (NFP61) untersucht. Die Erwärmung der Permafrostböden führt zu Bewegungen an der Oberfläche, welche die Infrastruktur in hochalpinen Gebieten beschädigen können (zum Beispiel Lawinerverbauungen oder Seilbahnstationen). Als Anpassungsmassnahme werden «schwimmende Fundamente» eingeführt. Das Bild rechts zeigt ein Beispiel oberhalb von Randa im Mattertal. (Quelle: Jürg Alean, SwissEduc.ch [Foto unten] und Marcia Phillips [Foto oben])



Inzwischen liegen auch einzelne Modellstudien zum Einfluss von Klimawandel und Gletscherschmelze auf die Speicherseen vor. Diese sagen eine erhebliche Abnahme des Sommerabflusses in stark vergletscherten Einzugsgebieten schon in der Mitte des 21. Jahrhunderts voraus (Finger et al. 2012), basieren allerdings nur auf der Abnahme der Gletscherfläche. Mit abnehmendem Sommerabfluss muss gegebenenfalls die Bewirtschaftung der Speicherseen und Kraftwerke angepasst werden. Neue Gletscherseen, die beim Abschmelzen der Gletscher im Gletscherbett entstehen können, könnten – falls wirtschaftlich sinnvoll, gesellschaftlich akzeptiert und ökologisch unbedenklich – in bestehende Kraftwerkssysteme integriert werden (NELAK 2013; ACQWA 2013). Effektiv haben sich bereits in den vergangenen Jahren zahlreiche Gletscherseen neu gebildet oder bestehende Seen weiter vergrössert (z. B. am Rhone- und am Triftgletscher). Damit verbundene konkrete Studien und Projekte für einen Ausbau der Wasserkraft wurden bereits durchgeführt und liegen vor, so etwa für den Triftgletscher im Berner Oberland (Abb. 2.4).

## Auswirkungen auf Hangstabilität und Geschiebe

Wie schwindende Gletscher hat auch auftauender Permafrost Auswirkungen auf die Hanginstabilität und Sedi- mentfracht in den alpinen Gebieten der Schweiz. Anders als bei den Gletschern sind systematische Messreihen von Untergrundtemperaturen in den alpinen Permafrostgebieten 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 noch vorsichtig zu interpretieren. Die meisten Permafrostvorkommen in der Schweiz haben Temperaturen zwischen etwa minus drei und null Grad Celsius – also nur wenig unter dem Schmelzpunkt. Eine Erhöhung der Temperatur braucht in diesem Temperaturbereich sehr viel mehr Energie als im kalten Permafrost, da für den Phasenwechsel (fest–flüssig) zusätzlich Schmelzenergie benötigt wird. Die Erwärmungstrends zeigen sich damit weniger klar als bei tieferen Temperaturen. Es lässt sich jedoch an verschiedenen Standorten beobachten, dass die Temperatur in der Tiefe zunimmt 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 konstant sehr warme Permafrostverhältnisse beobachtet, verglichen mit dem Be-

ginn der meisten Messungen vor zirka 15 Jahren (PERMOS 2016). Im Vergleich zu den letzten gut 150 Jahren scheint es während der letzten 20 Jahre auch eine Häufung von grossen Felsstürzen<sup>1</sup> aus Permafrostgebieten zu geben (Huggel et al. 2012).

Gestützt auf Prozessverständnis und Computermodelle kann davon ausgegangen werden, dass eine fortlaufende Erwärmung zu einer dickeren jährlichen Auftauschicht sowie generell zu höheren Untergrundtemperaturen führen würde. Damit einher gehen die weitere Erwärmung und schliesslich das Auftauen von Permafrost sowohl in Schutthalden und Blockgletschern als auch in eisgefüllten Klüften im Fels. Voraussagen zu detaillierten räumlichen Auswirkungen sind schwierig zu machen, da, neben der zukünftigen Entwicklung, bereits die Abschätzung der genauen räumlichen Verbreitung von Permafrostvorkommen grösseren Unsicherheiten unterliegt. Generell kann man aber sagen, dass mit dem Auftauen von Permafrost neue Gefahren in Gebieten entstehen können, die bisher davon nicht betroffen waren. So können Häufigkeit und Ausmass von Steinschlag und Felsstürzen zunehmen, oder grössere Mengen an Lockermaterial Starkniederschlägen ausgesetzt werden, die zu Murgängen führen können. Bereits in den vergangenen Jahren hat man neuen oder stärkeren Steinschlag an verschiedenen Orten in den Alpen beobachtet. Felsstürze können bewohntes Gebiet oder Infrastruktur direkt betreffen, es können aber im Zusammenhang mit neuen oder bereits existierenden Seen auch Flutwellen ausgelöst und damit die Gefahrenzonen um ein Vielfaches vergrössert werden. Bewegungen und Setzungen im sich erwärmenden oder auftauenden Untergrund können die Lebensdauer oder Stabilität von Infrastrukturen beeinflussen, die auf Permafrostböden gebaut sind. Bei Ski- und Seilbahninfrastrukturen oder Lawinverbauungen sind zum Beispiel bereits seit einigen Jahren Massnahmen ergriffen worden, welche die Auswirkungen verringern (Abb. 2.4).

Die erwarteten Veränderungen von Gletschern und Permafrost betreffen zudem das Geschiebe. Die abschmelzenden Gletscher legen neue Sedimentvorkommen frei und bis anhin gefrorene Schuttkörper können durch auftauenden Permafrost stärker der Erosion ausgesetzt werden. Zusätzlicher Schutt durch stärkeren Steinschlag kann die Geschiebefracht in Gerinnen erhöhen und Murgangaktivität auslösen oder verstärken. Eine Untersuchung des Kantons Bern geht für die nächsten Jahrzehnte in fast allen Einzugsgebieten des Berner Oberlandes von grossen Veränderungen beim Geschiebehaushalt aus (AG NAGEF 2015). Extreme Auswirkungen durch eine Kombination von auftauendem Permafrost und stark erhöhter Steinschlag- und Murgangaktivität auf wichtige Infrastruktur und den Ge-

<sup>1</sup> Volumen von mindestens einer Million Kubikkilometern

schiebehaushalt der Aare konnte in den letzten Jahren beispielhaft in Guttannen beobachtet werden (s. a. Kap. Herausforderungen für Forschung, Praxis und Gesellschaft im Umgang mit klimabedingten Naturrisiken – Fallbeispiel Haslital (Kanton Bern), S. 70). Die Veränderungen der Geschiebefracht sind zudem von grosser Bedeutung für die Anlagen der Wasserkraftwerke.

## Herausforderungen für die Schweiz

Die Kryosphärenkomponenten Schnee, Gletscher und Permafrost haben bereits stark und im Fall der Gletscher auch sehr sichtbar auf den Klimawandel reagiert. Dies führte bereits zu deutlichen Veränderungen im Hochgebirge (s. a. Kap. 2.5 Dynamik von polaren und hochalpinen Landschaften, S. 88), die sich mit grosser Sicherheit auch in Zukunft fortsetzen und noch verstärken werden. Die Schweiz muss sich mit neuen, gletscherfreien Landschaften und den entsprechenden Auswirkungen auseinandersetzen. Im Wasserhaushalt werden saisonal starke Veränderungen erwartet (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84). Diese verursachen Auswirkungen auf die Energie- und Landwirtschaft (s. a. Kap. 3.4 Energie, S. 168, Kap. 2.10 Landwirtschaft, S. 111), insbesondere in Kombination mit wahrscheinlich häufiger auftretenden Hitze- und Dürreperioden. Die Verschiebung der Schneegrenze und die abnehmende Schneesicherheit stellen bedeutende Herausforderungen für den Tourismus dar (s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117). Zudem werden Energie, Transport und Siedlungen in den Alpen zunehmend betroffen sein durch Veränderungen im Sedimenthaushalt sowie durch Felsstürze und Murgänge. Dadurch entstehen neue Herausforderungen für das Gefahren- und Risikomanagement sowie für das Betreiben und die Sicherheit von Infrastrukturanlagen (s. a. Kap. 2.12 Bauten und Infrastrukturen, S. 121).

## Referenzen

- Abegg B, Steiger R, Walser R (2013) **Aktuelle und zukünftige Schneesicherheit der Bündner Skigebiete**. In: Herausforderung Klimawandel: Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. Amt für Wirtschaft und Tourismus & Bergbahnen Graubünden.
- ACQWA (2013) **Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water**. A large integrating project under EU Framework Programme 7 (FP7), coordinated by the University of Geneva, Switzerland (2008–2013). [www.acqwa.ch](http://www.acqwa.ch)
- AG NAGEF – Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kantons Bern (2015) **Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen**. Bern, 36 pp.
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Finger D, Heinrich G, Gobiet A, Bauder A (2012) **Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century**. *Water Resources Research* 48: W02521.
- Huss M (2011) **Present and future contribution of glaciers to runoff from macroscale drainage basins in Europe**. *Water Resources Research* 47: W07511.
- Huggel C, Allen S, Deline P, Fischer L, Noetzi J, Ravelin L (2012) **Ice thawing, mountains falling—are alpine rock slope failures increasing?** *Geology Today* 28: 98–104.
- 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.
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken**. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli W, Bütler M, Huggel C, Müller H, Schleiss A (eds.). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 pp.
- PERMOS (2016) **Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014**. Noetzi J, Luethi R, Staub B (eds.). Glaciological Report (Permafrost) No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Radić V, Bliss A, Beedlow AC, Hock R, Miles E, Cogley JG (2013) **Regional and global projections of the 21st century glacier mass changes in response to climate scenarios from GCMs**. *Climate Dynamics* 42: 37–58.
- 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.
- Serquet G, Marty C, Rebetez M, Dulex JP (2011) **Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation day ratio in Switzerland**. *Geophysical Research Letters* 38: L07703.

## 2.4 Wasser

Der Klimawandel wird zu markanten Veränderungen im Wasserkreislauf führen – mit weitreichenden Folgen wie Wassermangel in Sommer und der Beeinträchtigung der Lebensgrundlagen durch Hochwasser. Der Wissensstand ermöglicht es in der Schweiz, auch im Bereich des Wassers mit einem integrativen Ansatz auf den Klimawandel zu reagieren. Neben Massnahmen zur Minderung des Klimawandels sollten auch solche zur Anpassung an seine Folgen geplant werden. Da die Grundzüge der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse bereits mit relativ grosser Sicherheit abgeschätzt werden können, kann bereits jetzt gehandelt werden. Dabei muss auch der sozioökonomische Wandel mitberücksichtigt werden, der die zukünftige Nachfrage nach Wasser stark beeinflussen wird. Es braucht ein Wassermanagement sowie regionale Planungsinstrumente, die alle Aspekte berücksichtigen.

Rolf Weingartner (Universität Bern), Ole Rössler (Universität Bern)

«Wasser ist Leben»: Die Verfügbarkeit von Wasser spielt eine zentrale Rolle bei der Trinkwasserversorgung, der landwirtschaftlichen und industriellen Produktion und der Energieerzeugung. Zu viel Wasser kann aber auch Leben gefährden und Schäden verursachen, zum Beispiel durch Hochwasser oder Murgänge. Jede Veränderung des Wasserkreislaufs durch den Klimawandel hat deshalb direkte Folgen für Mensch und Umwelt. Die Prozesse im Wasserkreislauf sind allerdings komplex und nicht nur vom Klimawandel beeinflusst.

Vereinfacht lässt sich das System Wasser als Balance zwischen den verfügbaren Wasserressourcen und dem Wasserverbrauch beschreiben (Abb. 2.5). Das Klima, die sozioökonomischen Verhältnisse sowie das politische Handeln sind dabei entscheidende Rahmenbedingungen, die beim Wassermanagement berücksichtigt werden müssen. Idealerweise wird nicht nur durch Anpassungsmassnahmen auf eingetretene oder erwartete Änderungen reagiert, sondern auch durch Massnahmen zur Minderung des Klimawandels versucht, diese Änderungen zu minimieren.

### Globale Situation

Laut dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC ist es *wahrscheinlich*, dass sich der globale Wasserkreislauf in den letzten 50 Jahren durch eine vom Menschen verursachte Erwärmung des Klimasystems verändert hat (IPCC 2014/SYR/SPM). Beobachtet wurden unter anderem eine Erhöhung des atmosphärischen Wasserdampfes, eine Verschiebung der räumlichen Niederschlagsmuster sowie eine Intensivierung der Starkniederschläge. Gleichzeitig haben niederschlagsarme Perioden und Hitzewellen zugenommen. In Gebirgsregionen und in den hohen Breiten schmelzen die Gletscher und die Bedeutung des Schnees im Wasserkreislauf nimmt ab.

Die Entwicklung des Niederschlags ist ausschlaggebend für die zukünftige Ausprägung des Wasserkreislaufs. Bei den Jahresniederschlagssummen geht man von einer Zunahme in den hohen und den mittleren humiden<sup>1</sup> Breiten aus und von einer Abnahme in trockeneren Regionen der mittleren Breiten sowie in den subtropischen Trockengebieten. Diese Veränderungen werden sich vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts akzentuieren, was bedeutet, dass sich die räumlichen und saisonalen Gegen-

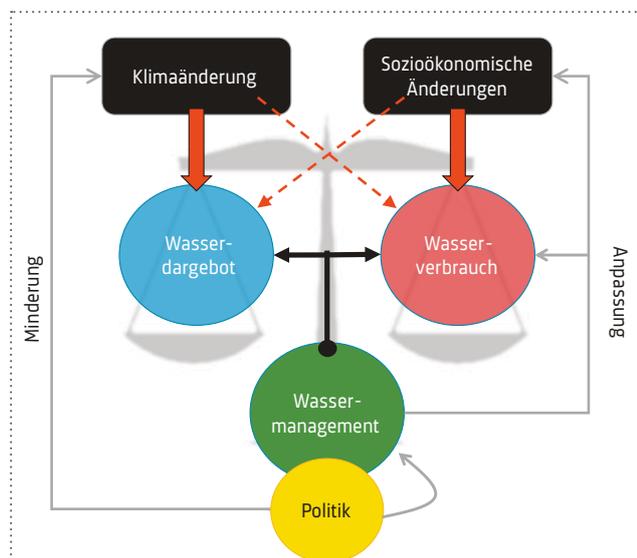
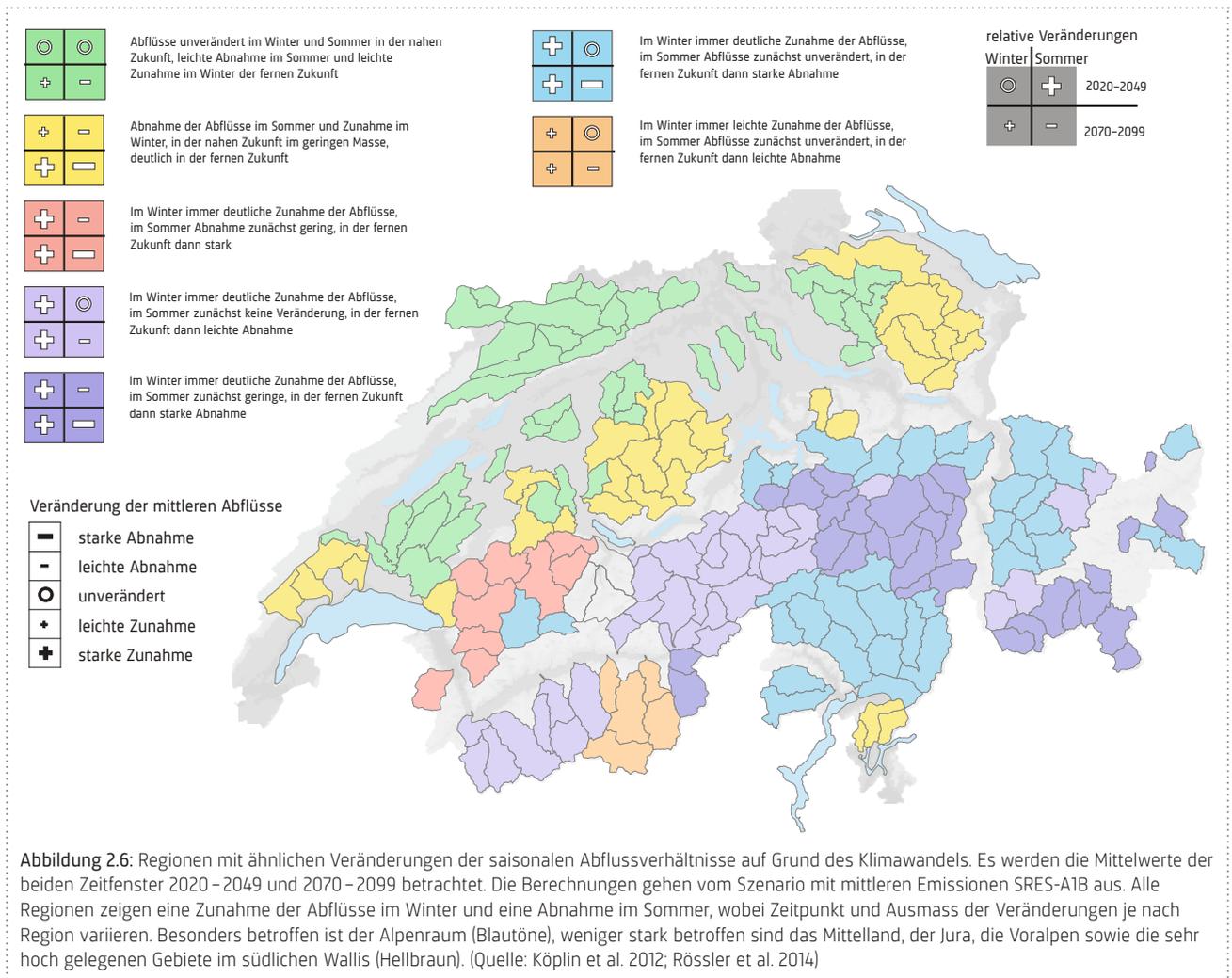


Abbildung 2.5: Ein regionales Wassermanagement ist der Schlüssel zu einer optimalen Nutzung des Wassers. Ziel des Wassermanagements ist eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Das heisst, dass die Nachfrage auf das Dargebot abgestimmt werden muss. Eine Veränderung der klimatischen und/oder der sozioökonomischen Rahmenbedingungen beeinflusst sowohl Nachfrage wie Dargebot, was politisch angestossene Massnahmen zur Anpassung nötig macht. Eine vorausschauende Politik setzt aber immer auch auf die Minderung der Treibhausgasemissionen. (Quelle: Eigene Darstellung)

<sup>1</sup> Reich an Niederschlag



sätze zwischen «nass» und «trocken» weiter verstärken werden. Zu- oder abnehmende Niederschlagsmengen haben direkte Auswirkungen auf die Abflüsse und die Grundwasserneubildung und somit auf die verfügbaren Wasserressourcen. Die Folgen dieser Veränderungen sind vielfältig. Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht nennt unter anderem folgende Aspekte:

- Schwere Beeinträchtigung oder gar Zerstörung der Lebensgrundlagen durch zunehmende Hochwasser.
- Engpässe bei der Nahrungsversorgung durch höhere Niederschlagsvariabilität und zunehmende Naturgefahren.
- Beeinträchtigung der Lebensbedingungen und der ökonomischen Situation durch einen erschwerten Zugang zu sicherem Trinkwasser und eine abnehmende Verfügbarkeit von Bewässerungswasser.
- Verlust an (Wasser-)Ökosystemen mit negativen Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosystemleistungen.

Viele dieser Risiken betreffen städtische Regionen, in denen heute rund 50 Prozent der Weltbevölkerung leben und Mitte des Jahrhunderts rund 65 Prozent leben werden (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung 2016).

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird das globale Gletschervolumen zwischen 15 und 85 Prozent abnehmen, je nach Grad der Erwärmung. Zudem besteht die Gewissheit, dass in der Nordhemisphäre die Ausdehnung der frühjährlichen Schneedecke zurückgeht (IPCC 2014/SYR/SPM; Kap. 1.9 Ozean und Kryosphäre, S. 60, Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80). In diesem Kontext ist hervorzuheben, dass vielerorts Veränderungen der Schneebedeckung grössere Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben als das Abschmelzen der Gletscher.

## Schweiz – Konturen der hydrologischen Zukunft

Nach aktuellem Kenntnisstand werden sich die künftigen Jahresniederschlagssummen in der Schweiz gegenüber heute nicht signifikant verändern. Grund dafür ist, dass sich die Schweiz im Übergangsbereich zwischen Nord-europa mit einer Niederschlagszunahme und Südeuropa mit einer Niederschlagsabnahme befindet. Saisonal hingegen sind teilweise grosse Verschiebungen zu erwarten: Die Klimaprojektionen zeigen eine Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer sowie einen leichten Anstieg der Winterniederschläge vor allem im Süden der Schweiz (Fischer et al. 2014). Die sommerliche Abnahme – hier sind sich alle Klimaprojektionen einig – wird zu längeren Trockenphasen führen, die durch intensivere Niederschläge unterbrochen werden.

Während bei den saisonalen Veränderungen des Niederschlags noch grosse Unsicherheiten bestehen, ist die Zunahme der Lufttemperatur *sehr wahrscheinlich*. Dies hat grosse Auswirkungen auf Schnee und Gletscher und damit auch auf den Wasserhaushalt. Die folgende Überlegung verdeutlicht dies: Der Anteil des Schmelzwassers an der jährlichen Abflussmenge beträgt in der Schweiz rund 40 Prozent, wird jedoch auf rund 24 Prozent zurückgehen – mit weitreichenden Folgen für das saisonale Abflussverhalten (s. a. Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46).

### Saisonale Umverteilung der Abflüsse

Bei Modellsimulationen zu den Auswirkungen veränderter Temperaturen und Niederschläge auf die Abflussverhältnisse konnten in der Schweiz sieben nicht zusammenhängende Regionen identifiziert werden, innerhalb derer die Auswirkungen ähnlich sind (Abb. 2.6). In allen Regionen ist eine mehr oder weniger starke Abnahme der Abflüsse im Sommer und eine Zunahme der Abflüsse im Winter erkennbar. Es ergibt sich damit eine saisonale Umverteilung der Abflüsse bei nahezu gleichbleibenden jährlichen Abflussmengen. Die Veränderungen werden vermutlich im Alpenraum und in der fernen Zukunft (nach 2050) am grössten sein. Verallgemeinernd können die sieben Regionen wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Mittelland und das Südtessin sind vor allem niederschlagsgesteuert: In der nahen Zukunft werden die mittleren Abflüsse praktisch unverändert bleiben, während es in der fernen Zukunft zu einer saisonalen Umverteilung kommen wird. Das Abflussverhalten folgt damit der projizierten Niederschlagsveränderung (s. oben). Die leichte Zunahme der Abflüsse im Winter ist auch auf die Temperaturerhöhung zurückzuführen, die zu einer Abnahme der Speicherung der Niederschläge in Form von Schnee führt.

- Die Abflüsse in den saisonal schneebedeckten und teilweise vergletscherten alpinen Einzugsgebieten sind vor allem temperaturgesteuert, was bedeutet, dass Schnee- und Gletscherschmelze den Abfluss dominieren: Die Erhöhung der Lufttemperatur führt zur Erhöhung der Nullgradgrenze und damit zu einem höheren Anteil an Regen. Dies hat wiederum eine Erhöhung der Abflüsse im Winterhalbjahr zur Folge. Zudem apert die unteren und mittleren Höhenlagen früher aus, und es kommt zu einer früheren Schneeschmelze. Damit nehmen die Abflüsse im Mai und Juni ab. Von Juli bis September werden die Abflüsse infolge verringerter oder gar fehlender Gletscherschmelze weiter abnehmen. Eine Ausnahme bilden die sehr hoch gelegenen Einzugsgebiete im südlichen Wallis, bei denen der temperaturbedingte Wandel weniger stark ausgeprägt ist.

Eine starke Abnahme der sommerlichen Abflussmengen hat weitreichende Folgen für die Wasserversorgung. Gleichzeitig steigt das Risiko für hohe Wassertemperaturen, auch weil sich flache Gewässer stärker erwärmen und somit die Wirkung der projizierten Temperaturerhöhung verstärken. Durch die Temperaturerhöhung und der dadurch bedingten höheren Schneefallgrenze wird in allen Einzugsgebieten der direkte Einfluss des flüssigen Niederschlags zunehmen, was die inner- und interannuelle Abflussvariabilität erhöht. Alle projizierten Veränderungen, die mit der Lufttemperatur verbunden sind, also insbesondere die Umverteilung des Abflusses vom Sommer in den Winter, können als sehr sicher angesehen werden. Diese Kenntnisse erlauben bereits jetzt die Planung und Umsetzung erster Massnahmen zur Anpassung.

### Extremereignisse

Noch unsicher sind Aussagen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der extremen Hoch- und Niedrigwasser (Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52). Dies hängt einerseits damit zusammen, dass die Abbildung von Wetterextremen in Klimamodellen noch grosse Schwächen aufweist. Andererseits ist das Ausmass eines Hochwassers von mehreren Faktoren abhängig, so dass allein aus der klimabedingten Intensivierung der Starkniederschläge nicht auf eine Zunahme grosser Hochwasser und/oder eine Erhöhung der Hochwasserspitzen geschlossen werden kann. Aus der projizierten Temperaturerhöhung kann aber abgeleitet werden, dass sich die Hochwassersaison im Alpenraum verlängern wird (Köplin et al. 2014) und dass die Hochwasservolumina zunehmen werden. Zudem werden Niedrigwasserperioden im Mittelland häufiger auftreten und intensiver ausfallen (BAFU 2012).

## Herausforderungen für die Schweiz

Wie eingangs dargelegt, kann durch Minderung des Treibhausgasanstosses am effektivsten auf den Klimawandel und dessen Folgen reagiert werden – auch aus Sicht des Wassers (Rössler et al. 2014). Zusätzlich sind allerdings Anpassungsmassnahmen nötig.

Bei der Planung der Massnahmen zur Anpassung ist eine umfassende Analyse notwendig. Neben dem Klimawandel muss insbesondere auch der sozioökonomische Wandel, der einen grossen Einfluss auf die zukünftige Nachfrage nach Wasser und die Ausgestaltung der Landschaft hat, mitberücksichtigt werden (Reynard et al. 2013). Die Auswirkungen der Sozioökonomie können dabei deutlich grösser als die Folgen des Klimawandels sein, insbesondere im Schweizer Mittelland, im Jura und in den Voralpen (NFP 61 2015). Deshalb sind regionale Planungsinstrumente zu schaffen, die alle Aspekte des Wassers miteinbeziehen. Das Wassermanagement ist so zu gestalten, dass das Dargebot berücksichtigt wird und die Verteilung des nachgefragten Wassers nach klaren und gerechten Regeln geschieht (Abb. 2.5), und dass flexibel auf die zukünftigen Trockenphasen und Hochwasser reagiert werden kann. So könnten beispielweise mit dem Bau neuer Speicher und durch die Mehrfachnutzung bestehender Speicher sommerliche Engpässe überbrückt und Hochwasserspitzen gleichzeitig gedämpft werden. Ziel solcher Massnahmen ist es, das im Winterhalbjahr oder während Hochwasserphasen reichlich vorhandene Wasser zu speichern, um es dann während sommerlicher Trockenperioden für die diversen Wassernutzer verfügbar zu machen.

## Referenzen

- BAFU (2012) **Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer**. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1217: 76 pp.
- Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (2016) **Steigende Weltbevölkerung und die Hauptursachen**. [www.dsw.org](http://www.dsw.org)
- Fischer A, Keller D, Liniger M, Rajcak J, Schär CH, Appenzeller C (2014) **Projected changes in precipitation intensities and frequency in Switzerland: a multi-model perspective**. *International Journal of Climatology* 35: 3204–3219.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R (2012) **Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types**. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 2267–2283.
- Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R (2013) **Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change**. *Hydrological Processes* 28: 2567–2578.
- MeteoSchweiz (2013) **Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht**. Fachberichte 243.
- NFP 61 (2015) **Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft**. Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern. [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- Reynard E, Bonriposi M, Graefe O, Herweg K, Homewood C, Huss M, Kauzlaric M, Liniger H, Rey E, Rist S, Schädler B, Schneider F, Weingartner R (2013) **MontanAqua**. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes – Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais).
- Rössler O, Addor N, Bernhard L, Figura S, Köplin N, Livingstone DM, Schädler B, Seibert J, Weingartner R (2014) **Hydrological responses to climate change: river runoff and groundwater**. In: CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 57–66.

## 2.5 Dynamik von polaren und hochalpinen Landschaften

Schon heute und ganz besonders in Zukunft führt die Klimaänderung vor allem für Landschaften und Lebensräume in kalten Regionen zu markanten bis drastischen Änderungen mit lokalen bis globalen Auswirkungen. Die Schweiz als Hochgebirgsland ist mitbetroffen. Um sich an diese Folgen des Klimawandels anpassen zu können, braucht es einen offenen Diskurs, eine partizipative Planung, integrative Denkansätze und eine Wissenschaft, die sich mit den veränderten Geo- und Ökosystemen beschäftigt.

*Wilfried Haerberli (Universität Zürich)*

### Landschaft und Klimawandel

Die Landschaft als sichtbare Umgebung und wahrgenommener Lebensraum des Menschen ist ein komplex vernetztes System und beinhaltet eine Kombination von objektiven Elementen und subjektiven Wahrnehmungen von natürlichen Bedingungen (Naturlandschaft) und menschlichen Aktivitäten (Kulturlandschaft). Landschaften können für die Identität von Menschen und Gesellschaften eine zentrale Rolle spielen.

Treiber von landschaftlichen Veränderungen sind die Natur (Geologie, Klima, Wasser, Vegetation) und der Mensch mit seinen Aktivitäten und Infrastrukturen (speziell Siedlung, Landwirtschaft, Energieproduktion, Wasserwirtschaft, Verkehr), die aktiv die Oberfläche in unterschiedlichen Zeiträumen verändern.

Auch der Klimawandel beeinflusst die Landschaft. Klimabedingte Effekte sind dort deutlich bis dominant, wo

- die Klimaänderung am stärksten ist,
- einzelne Landschaftselemente besonders sensibel auf Veränderungen des Klimas reagieren und
- andere Einflüsse – vor allem direkte Eingriffe des Menschen – limitiert bleiben.

Diese Voraussetzungen sind in kalten Gebieten hoher Breitengrade und im Hochgebirge erfüllt. Entsprechend rasante Entwicklungen sind dort bereits im Gang.

### Landschaftsveränderungen werden unterschiedlich wahrgenommen

Wahrnehmung, Zuordnung und Wertung landschaftlicher Veränderungen sind lokal, regional und global unterschiedlich und verändern sich zudem mit der Zeit (Gagné et al. 2014). Das «ewige/reine Weiss der Firne» in Gebirgslandschaften beispielsweise wurde in der abendländischen Romantik wie auch in vielen lokalen Kulturen als Symbol einer intakten Mensch-Umwelt-Beziehung gesehen und gerade in den Alpen erfolgreich touris-

tisch vermarktet (Haerberli & Zumbühl 2003). Heute sind schwindende Gletscher zu exemplarischen Beispielen der globalen Erwärmung geworden.

Lokal bis regional stehen praktische Fragen im Vordergrund, zum Beispiel zu Wasserkraft, Wasserressourcen, Tourismus, Landschaftsschutz oder Naturgefahren. Gerade bei solchen praktischen Fragen geht es darum, unterschiedliche Wertungen und Zielvorstellungen zu berücksichtigen, um Anpassungsstrategien mit breiter Akzeptanz zu entwickeln.

### Landschaftsveränderungen wirken sich auf Gesellschaft und Wirtschaft aus

Landschaftsveränderungen einzelner Gebiete können grossräumige Ausstrahlung und weit reichende sozio-ökonomische Auswirkungen haben. Der Schwund von Schnee und Eis in den Alpen beispielsweise beeinflusst die Gewässer des Tieflandes und die touristische Attraktivität der betroffenen Alpenländer. Mit fortschreitender Veränderung des Klimas sind zudem auch in bisher kaum betroffenen Gebieten problematische Auswirkungen zu erwarten. Der Anstieg des Meeresspiegels als Folge des Eisschwundes wird langfristig weltweit küstennahe Landschaften verändern und dicht besiedelte Lebensräume gefährden. Die heute bereits erkennbaren landschaftswirksamen Phänomene in kalten Regionen sind deshalb Vorboten für weit umfassendere Veränderungen mit für menschliche Zeitbegriffe praktisch irreversiblen Charakter.

### Globale Dynamik

Die am klarsten sichtbaren Veränderungen aufgrund der Klimaänderung spielen sich in den ausgedehnten kalten Landschaften höherer Breiten und in den kalten Gebirgsregionen der Erde ab (UNEP 2007; IPCC 2013/WGI/Chap.4; IPCC 2014/WGII/Chap.3 und Chap.18).

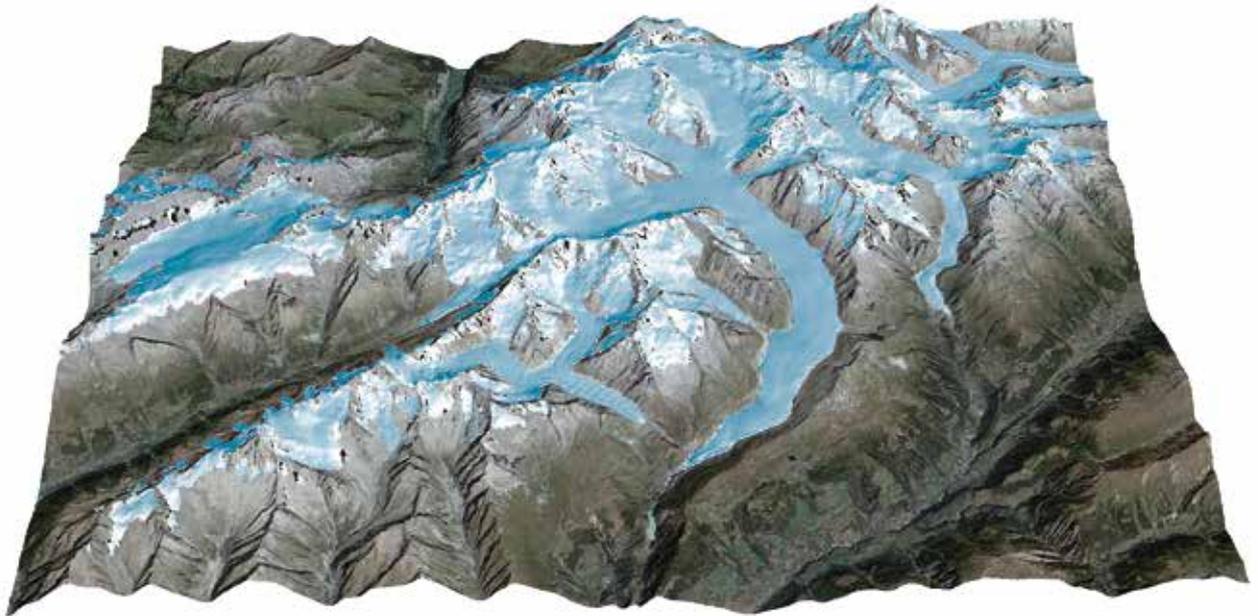


Abbildung 2.7: Region Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn (UNESCO Weltnaturerbe) mit und ohne Gletscher. Im Bild ohne Gletscher sind modellierte Gletscherbett-Übertiefungen als potenzielle Seen blau markiert. (Quelle: Andreas Linsbauer, Geographisches Institut, Universität Zürich)

## Polargebiete wandeln sich grundlegend

Der Schwund des nordpolaren Meereises zieht eine Reduktion der schneebedeckten Fläche der Erde und damit eine Reduktion der globalen Albedo<sup>1</sup> mit sich – ein Landschaftswandel, der die globale Erwärmung verstärkt (Bhatt et al. 2014). Gleichzeitig eröffnet er neue wirtschaftliche Möglichkeiten, vor allem bei der Rohstoffgewinnung und den Transportwegen. Ein möglicherweise bereits in wenigen Jahrzehnten eisfreier Sommer verkürzt die Schifffahrtsverbindungen zwischen Atlantik und Pazifik – was zu einer Erschliessung und wohl auch Gefährdung von bisher weitgehend unberührten Landschaften, Ökosystemen und indigenen Lebensräumen führen dürfte. Der bedrohte Lebensraum des Eisbären ist bereits zu einem starken Symbol für diese Entwicklung geworden.

Der steigende Zerfall von Eisschelfen wie auch der rasche Rückgang von Auslassgletschern beider Eisschilde (Grönland und Antarktis) spielen sich weit weg von menschlichen Aktivitäten ab, stehen aber im Zusammenhang mit der Stabilität enormer Eismassen, dem langfristigen Anstieg des Meeresspiegels und der weltweiten Gefährdung von Insel- und Küstenlandschaften. Das Auftauen des Permafrostes setzt nicht nur zusätzliche Treibhausgase frei, es erhöht auch die Durchlässigkeit des Untergrundes, was die Gewässer grosser subpolarer Flächen verändert und vor allem ausgedehnte Feuchtgebiete und zahlreiche Seen zum Verschwinden bringt. Das Zusammenspiel von Meeresspiegelanstieg, schwindendem Meereis und auftauendem Permafrost verstärkt die schon heute schnelle Erosion von Küsten hoher Breiten. Grossräumige Verschiebungen des temperaturabhängigen borealen Nadelwaldes auf Kosten der Tundragebiete brauchen sehr lange Zeit und werden durch Veränderungen des Permafrostes im Untergrund beeinflusst.

## Auch Hochgebirgslandschaften verändern sich tiefgreifend

Landschaften und Lebensräume der kalten Regionen entfernen sich immer weiter von Zuständen dynamischer Gleichgewichte, wie sie sich in der klimatisch relativ stabilen Nacheiszeit (Holozän) entwickeln konnten. Dies gilt auch für die Hochgebirgslandschaften der Erde, die durch den Schwund von Schnee und Eis tiefgreifende Veränderungen ihrer Charakteristik und ihrer Funktion erfahren. Die Schweizer Alpen sind ein besonders gut dokumentiertes Beispiel (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80).

## Dynamik im Gebirgsland Schweiz

In der Geschichte des Diskurses zu Fragen der Landschaft und der Umwelt in der Schweiz spielen die Begriffe *Berg, Wald, Wasser, Stadt* eine zentrale Rolle (Haerberli 2011). Veränderungen des Klimas beeinflussen primär Wasser, Wald und Berge. Veränderte Abflussverhältnisse – sommerliche Niederwasser und Trockenfall – dürften saisonal Fluss- und Seeuferlandschaften des Mittellandes zunehmend beeinträchtigen. Auch die Waldökosysteme als zentrale Elemente in Landschaft und Lebensraum dürften zunehmend betroffen sein (Björnsen Gurung & Stähli 2014). Zu erwarten sind der Wechsel von Nadel- zu Laubwald im Mittelland (Eiche und Buche statt Fichte), die Versteppung in Trockengebieten, Waldbrände und ein Anstieg der Waldgrenze (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106). Die stärksten Effekte dürften die Berge betreffen, mit ihrer für die Identität der Schweiz schon historisch zentralen Bedeutung (Walter 1996). Bei steigenden Temperaturen werden verschneite Winterlandschaften in Raum und Zeit abnehmen. Die charakteristischen Höhenstufen verschieben sich nicht einfach in grössere Höhen, sondern verändern sich, da Elemente der betroffenen Geo- und Ökosysteme wie Schnee/Wasser, Böden, Pflanzen oder Abtrag unterschiedlich und mit teilweise sehr langer Verzögerungszeit reagieren.

## Alpine Gletscherwelt: Schweizer Markenzeichen schwindet

Noch in unserem Jahrhundert dürfte der grösste Teil der alpinen Gletscherwelt verschwinden – ein touristisches Markenzeichen der Schweiz, das von Generationen verinnerlicht und auch erfolgreich kapitalisiert wurde. An Stelle des vermeintlich «ewigen Eises» der Gletscher entsteht mit grosser Geschwindigkeit eine neue Landschaft von Fels, Schutt, spärlicher Vegetation und vielen meist kleineren Seen. In den mancherorts übersteilten Bergflanken wird langsam auftauender Permafrost die Stabilität langfristig reduzieren und zu häufigeren Sturzereignissen auch grossen Volumens führen. Ausgeprägte Ungleichgewichte werden diese Landschaft auf Jahrhunderte hinaus prägen.

<sup>1</sup> Mit dem Begriff der Albedo (lat. = «Weisse») wird das Verhältnis zwischen reflektiertem und eingestrahltm Licht bezeichnet. Die hellen Schnee- und Eisflächen der Erde reflektieren einen grossen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung. Sie beeinflussen damit die globale Strahlungsbilanz und das globale Klima.

## Herausforderungen und Lösungsansätze für die Schweiz

Ein erster und entscheidender Schritt ist der Beginn des dringend notwendigen Diskurses auf allen Ebenen über den Umgang mit neuen Landschaften, vor allem im Hochgebirge. Im Landschaftskonzept der Schweiz (BUWAL 1998) sind klimabedingte Veränderungen von Landschaften noch kein Thema: die Begriffe «Klima» und «Hochgebirge» findet man nicht und den Begriff «hochalpin» nur im Zusammenhang mit der Landesverteidigung und der Luftfahrt (Lärm in Schutzgebieten). Bereits intensiver setzte sich das Nationale Forschungsprogramm 48 *Landschaften und Lebensräume der Alpen* mit dem Thema auseinander (für das Hochgebirge v. a. Haerberli et al. 2007). Letztlich werden sehr bald für viele kommende Generationen Weichen gestellt werden müssen. Dabei stehen grundsätzliche Fragen an, wie etwa:

- Welche wirtschaftliche Lebensgrundlage können und sollen Gebirgsregionen mit ihren veränderten Schnee- und Eislandschaften künftig haben?
- Was muss man für die Erhaltung und Entwicklung der Energieproduktion oder des Tourismus beachten?
- Kann man die entstehenden Landschaften im Hochgebirge mit ihren Instabilitäten sich selber überlassen?
- Was sind schützenswerte Gletschervorfelder, wenn keine Gletscher mehr vorhanden sind?
- Welche Inhalte wird ein UNESCO-Weltnaturerbe Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn mit einem zerfallenden oder langfristig verschwindenden grössten Alpengletscher haben?
- Sollen solche Fragen auf kommunaler und kantonaler Ebene angegangen oder besser national (in Anbetracht der grossräumigen Bedeutung des alpinen Hochgebirges sogar auch international) behandelt werden?

Basierend auf einem offenen Diskurs und mit einer partizipativen Planung lassen sich grundsätzliche und breit abgestützte Konzepte zu Nutzung und Schutz der neuen Landschaften entwickeln. Nötig sind dazu wissenschaftliche Grundlagen zur Charakteristik und Dynamik der neuen Landschaften mit ihren ausgeprägten Ungleichgewichten – ein derzeit entstehender inter- und transdisziplinärer Forschungsbereich. Die noch weitgehend dominierende partikuläre und sektorielle Betrachtungsweise muss durch systemische Ansätze ergänzt werden. Dass dafür ein Bedarf besteht, zeigt das Beispiel der Prozessketten von Fels- und Eisstürzen aus übersteilten und destabilisierten Bergflanken in neue Seen, die Schwallwellen und dadurch weit reichende Hochwasser auslösen können (NELAK 2013; s. a. Kap. 2.6 Naturgefahren ausgelöst durch ein verändertes Klimasystem: Prozessketten und komplexe Risiken, S. 92).

## Referenzen

- Bhatt US, Walker DA, Walsh JE, Carmack EC, Frey KE, Meier WN, Moore SE, Parmentier F-JW, Post E, Romanovsky VE, Simpson WR (2014) *Implications of arctic sea ice decline for the earth system*. Annual Review of Environment and Resources 39: 57–89.
- Björnsen Gurung A, Stähli M (2014) *Wasserressourcen der Schweiz: Dargebot und Nutzung – heute und morgen*. Thematische Synthese 1 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern.
- BUWAL (1998) *Landschaftskonzept der Schweiz*. Teil I Konzept und Teil II Bericht.
- Gagné K, Rasmussen MB, Orlove B (2014) *Glaciers and society: attributions, perceptions, and valuations*. WIREs Climate Change 5: 793–808.
- Haerberli W, Zumbühl HJ (2003) *Schwankungen der Alpengletscher im Wandel von Klima und Perzeption*. In: Jeanneret F et al. (eds): *Welt der Alpen – Gebirge der Welt*. Haupt, Bern: 77–92.
- Haerberli W, Keller F, Krüsi B, Egli M, Rothenbühler C, Meilwes J, Gruber S (2007) *GISALP – Raum-zeitliche Information über schnelle Klimaänderungen in hochalpinen Umweltsystemen als strategisches Werkzeug für Analyse, Kommunikation, partizipative Planung und Management im Tourismusgebiet Oberengadin*. Forschungsbericht NFP 48, Schweizerischer Nationalfonds, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 213 pp.
- Haerberli W (2011) *Umweltveränderungen und Naturgefahren*. In: Schneider-Sliwa R (ed.): *Schweiz – Geographie, Geschichte, Wirtschaft, Politik, WBG Länderkunden*, 169–175.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)*. Chapter 4 «Observations: Cryosphere». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Chapter 3 «Freshwater resources». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Chapter 18 «Detection and attribution of observed impacts». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- NELAK (2013) *Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques*. Forschungsbericht NFP 61. Haerberli W, Bütler M, Huggel C, Müller H, Schleiss A (eds.). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 pp.
- UNEP (2007) *Global outlook for ice & snow*. UNEP/GRID-Arendal, Norway, 235 pp.
- Walter F (1996) *Bedrohliche und bedrohte Natur – Umweltgeschichte der Schweiz seit 1980*. Chronos Verlag, Zürich, 244 pp.

## 2.6 Naturgefahren ausgelöst durch ein verändertes Klimasystem: Prozessketten und komplexe Risiken

Viele Naturgefahren wie Überschwemmungen, Dürren oder Erdbeben sind stark beeinflusst durch Veränderungen des Klimasystems, in erster Linie durch die zunehmende Frequenz und Intensität von entsprechenden Extremereignissen. Die Veränderung der Naturgefahren ist das Resultat komplexer Prozesse und beeinflusst den Umfang möglicher Schäden in der Zukunft. Die entsprechenden Risiken sind regional sehr unterschiedlich ausgeprägt und wesentlich von sozioökonomischen und sozialen Faktoren abhängig. Die damit zusammenhängenden Prozesse und Interaktionen sind nur verständlich, wenn das Zusammenspiel der natürlichen und der betroffenen sozialen und sozioökonomischen Systeme umfassend analysiert wird. Gerade in Bezug auf dieses Zusammenspiel gibt es noch viele Lücken und Unsicherheiten.

*Martin Hoelzle (Universität Freiburg), Reynald Delaloye (Universität Freiburg), Margreth Keiler (Universität Bern), Nadine Salzmann (Universität Freiburg), Yvonne Schaub (Universität Zürich), Markus Zimmermann (NDR Consulting GmbH und Universität Bern)*

### Globale Situation

Auf globaler Ebene sind Simulationen des zukünftigen Klimas mit Hilfe von Klimamodellen die Basis für die Abschätzung der Folgen der erwarteten Klimaänderung. Daraus leiten sich folgende Schlüsselherausforderungen für die Menschheit ab:

- Anstieg des Meeresspiegels,
- Erwärmung der Ozeane,
- Intensivierung des Wasserkreislaufes und
- Schleichende Veränderung des Wasserdargebots (zunehmend feucht beziehungsweise trocken).

Die Verstärkung oder auch Beschleunigung des Wasserkreislaufes (mehr Wasser verdunstet und fällt nachfolgend als Niederschlag), die Erwärmung der Ozeane und der Meeresspiegelanstieg führen zu erhöhten Sturm- und Flutgefahren in vielen Küstenbereichen und zu einer Zunahme der Hochwassergefahr in verschiedenen Regionen der Erde («Gefahr», s.a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77). Da viele Küstenregionen bereits dicht besiedelt sind und Städte in diesen Regionen weiterhin wachsen, sind besonders dort in Zukunft hohe Risiken und somit Schäden möglich – einerseits durch die Zunahme exponierter Werte wie öffentlicher Infrastruktur und privater Güter, andererseits durch vermehrte Extremereignisse («Exposition», s.a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77).

In den einzelnen Ländern und auf internationaler Ebene sind grosse Anstrengungen notwendig, um die bestehenden Risiken – insbesondere in Entwicklungsländern – in den kommenden Jahrzehnten auf ein kontrollierbares Niveau zu bringen oder zu halten und die Entstehung neuer Risiken möglichst zu vermeiden. Dabei ist mitentscheidend, wie gross die Möglichkeiten der jeweiligen Gesellschaften in den Bereichen Risikomanagement, Risikoprä-

vention sowie ökonomischer und sozialer Entwicklung sind und wie gross ihre Exposition, Verwundbarkeit und Resilienz (Widerstandsfähigkeit) ist (s.a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77).

Eine grosse Herausforderung bei der Abschätzung der zukünftigen Risiken durch Naturgefahren sind die Unsicherheiten bei der langfristigen Veränderung der natürlichen Klimavariabilität in Kombination mit den anthropogen getriebenen Veränderungen. Aktuelle Studien bestätigen, dass Extremereignisse vor allem im Bereich der Starkniederschläge sowie der Trockenheit generell zunehmen (Rajczak et al. 2013; Fischer et al. 2014; IPCC 2012/SREX; s.a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52). Unsicher ist auch, wie sich Exposition und Verwundbarkeit der gefährdeten Gebiete entwickeln, da diese von politischen Entscheidungen, ökonomischen Bedingungen und sozialen Veränderungen abhängen. Auch wenn es Massnahmen zur Risikominderung gibt, die sich ökonomisch lohnen, liegt eine weitere Herausforderung in den oft – technisch oder finanziell – limitierten Möglichkeiten für eine Risikominderung sowie in der komplexen Verkettung von Prozessen. Letzteres führte beispielsweise 2011 in Thailand nach grossflächigen Überschwemmungen zum Ausfall eines grossen Teils der Infrastruktur und in der Folge zu einer massiven Beeinträchtigung der Lebensgrundlage.

### Nationale Situation

#### Veränderte Systeme

Die globalen Veränderungen des Klimas wirken sich lokal sehr unterschiedlich aus, so auch innerhalb von nationalen Grenzen, wenn diese eine hohe räumliche Variabilität in Topographie, Landnutzung etc. aufweisen. Um die



**Abbildung 2.8:** Prozessketten im Bereich der Naturgefahren in den Schweizer Alpen: Links: An steilen Hängen können aktive gravitative und/oder hydraulische Prozesse relativ viel Lockermaterial direkt aus hoch gelegenen (sogar glazialen und periglazialen) Gebieten in die Täler transportieren. Hier am Beispiel einer tief erodierten Rinne im Mattertal, Wallis. Mitte: Auslösungsphänomene sind komplex, oft aber klimatisch gesteuert. Hier zum Beispiel durch intensive Schneeschmelze ausgelöste Murgänge an der Stirnfront eines mit erhöhter Geschwindigkeit fließenden Blockgletschers im Juni 2013, bedingt durch die Erwärmung des Klimasystems. Rechts: In den Transport- und/oder Ablagerungszonen liegen oft verschiedene Infrastrukturbauten wie Strassen, Eisenbahnanlagen, Brücken oder Häuser, deren Gefährdung durch Naturgefahren – die teilweise neu entstanden sind – sorgfältig beurteilt werden muss. (Quelle: Reynald Delaloye, 2009-2013, Mattertal – VS)

Entwicklung des lokalen Klimas abschätzen zu können, sind langfristige Beobachtungsdaten im Bereich von Atmosphäre und terrestrischen Systemen notwendig. Diese Daten werden heute global gesammelt unter dem Namen «Essential Climate Variables» (ECV) im Rahmen des Global Climate Observing Systems (GCOS) (2010). Sie erlauben,

- Durch das Klima beeinflusste Prozesse und Prozessketten<sup>1</sup> im Erdsystem besser zu verstehen,
- Klima-, terrestrische und andere Modelle zu validieren und zu kalibrieren,
- Natürliche Variabilitäten der Vergangenheit besser zu erfassen und
- Auswirkungen der Klimaänderung im regionalen Bereich besser abzuschätzen.

Heute existieren erste Ansätze, das Klima beeinflussende Prozessketten gesamtheitlich zu erfassen, wobei noch grosse Unsicherheiten bezüglich vieler Rückkopplungen bestehen. Die meisten Prozessketten sind in Modellen stark hierarchisch strukturiert. Am Anfang stehen globale Klimamodelle, die dann lokale Prozessmodelle antreiben, jedoch von diesen kein Feedback erhalten.

<sup>1</sup> Eine Prozesskette stellt hier eine Abfolge von zeitlich hintereinander gestaffelten und gekoppelten Prozessen (z.B. physikalisch, chemisch, anthropogen) dar.

## Von der Topographie geprägte Gebiete besonders betroffen

Erste Erfahrungen mit solchen Prozessmodellen zeigen, dass sich die Schweiz auf neuartige Entwicklungen und veränderte Naturgefahren einstellen muss – vor allem in den stark von der Topographie geprägten Gebieten. Während die Jahresmittelniederschläge in den Klimaszenarien keinen eindeutigen Trend erkennen lassen, ist im Sommer – vor allem im Süden – vermehrt mit längeren Trockenperioden zu rechnen. Gleichzeitig sind zunehmende Hitzeperioden im Sommer und der Anstieg der Temperaturen auch im Winter wahrscheinlich (CH2011; (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40, Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46).

Gerade Hochgebirgslandschaften verändern sich bei einer solchen Entwicklung stark, beispielsweise durch Auswirkungen auf die Gletscherschmelze und damit auch auf die Wasserverfügbarkeit (Salzmann et al. 2012). Der Klimawandel beeinträchtigt zudem die Hangstabilität sowohl kurz- als auch langfristig (Huggel et al. 2012). Dadurch werden auch gravitative Prozesse wie Rutschungen, Murgänge oder Felsstürze im Bereich der sich schnell ändernden alpinen Kryosphäre stark beeinflusst. Die Bildung neuer Seen ist eine weitere Folge des Gletscherschwundes – eine Entwicklung, die sich in Zukunft verstärken

wird (Linsbauer et al. 2015; NELAK 2013). Viele dieser neuen Seen befinden sich unter Hängegletschern oder am Fusse von sehr steilen und sich destabilisierenden Felshängen. Sie liegen damit in Reichweite von Eislawinen oder Felsstürzen (Schaub 2015). Diese potenziell gefährlichen Situationen können für lange Zeit Bestand haben.

### Exposition und Verwundbarkeit durch veränderte Naturgefahren

Um zukünftige Risiken beurteilen zu können, müssen die Dynamiken im Bereich der Naturgefahren wie auch in der Entwicklung der Wirtschaft und der Bevölkerung berücksichtigt werden (Keiler et al. 2010). Beispielsweise können sich Prozessketten, die aufgrund von Veränderungen in Hochgebirgen ihren Anfang nehmen, bis in Talregionen (Schaub 2015) und ins Flachland auswirken wie beispielsweise bei den Hochwassern 2005 (Keiler et al. 2010). Dies beeinträchtigt zum Teil sehr teure Infrastrukturbauten und hat schwerwiegende sozioökonomische Konsequenzen.

Alle Szenarien einer nachhaltigen Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung in der Schweiz gehen von einer anhaltenden Besiedlung und Nutzung des Alpenraums aus (Perlik et al. 2008). Zersiedlungen im ländlichen Raum und Siedlungsverdichtungen mit zunehmender Wertekonzentration in einigen Alpentälern, im städtischen Umfeld und auch in den grossen Flusstälern (z. B. Alpenrhein, Wallis) erhöhen die Exposition gegenüber Naturgefahren und steigern vor dem Hintergrund der erwarteten Zunahme von Schadensereignissen die Risiken, das heisst zukünftige Schäden. Herausforderungen aufgrund der veränderten Verwundbarkeit sind sicherlich die Belastung durch extreme Wetterereignisse (Hitze, Niederschläge, Stürme; s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52) oder Prozessketten, die technische Infrastrukturen (z. B. Strassen- und Schienennetz, Wasserversorgung) tangieren, die in Folge von Unterbrüchen zu hohen indirekten Schäden führen können (OcCC 2007; s. a. Kap. 2.12 Bauten und Infrastrukturen, S. 121). Die betroffenen Regionen sind oftmals intensiv genutzte (z. B. Tourismus) und somit sehr verwundbare Orte, wo nebst aufwändiger Infrastruktur auch zahlreiche Menschen exponiert sind. Dadurch können auch sekundäre und tertiäre Schäden hoch ausfallen, als Folge beispielsweise von Strassen- und Betriebsunterbrüchen oder der Rufschädigung durch negative Schlagzeilen in der öffentlichen Wahrnehmung (Lehmann Friedli 2013; s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117). Die Schweiz ist und bleibt in verschiedener Hinsicht stark verwundbar gegenüber veränderten Gefahren und Prozessketten.

### Herausforderungen und Lösungsansätze für die Schweiz

Die Herausforderungen für die Schweiz sind vielfältig; Lösungsansätze sollten auf einem Doppelkonzept basieren, das einerseits die Minderung, das heisst die Bekämpfung der Ursachen des Klimawandels weiter fördert – zum Beispiel durch die Minderung der Treibhausgase (s. a. Teil 4: Klimapolitik, S. 191) – und andererseits Massnahmen zur Anpassung an ein wärmeres Klima unterstützt. Gerade im Bereich der Naturgefahren sind ein vorausschauendes Risikomanagement und eine Definition des Schutzzieles unter voller Berücksichtigung der räumlich-zeitlichen Aspekte sowie ein grundlegendes Verständnis der beteiligten Prozesse und Interaktionen erforderlich (s. a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77). Die Analyse und Bewertung bestehender und neuer Risiken wie auch die Auswahl möglicher Anpassungsmassnahmen unterliegen in einem demokratischen System wie der Schweiz einem schwierigen politischen und gesellschaftlichen Diskurs (vgl. BAFU 2012): Welche Risiken wie stark gewichtet werden und welche Massnahmen nötig sind, wird von unterschiedlichen Interessensgruppen unterschiedlich beurteilt. Mehrzwecklösungen wie die Planung des Überlastfalles im Hochwasserschutz können die Entscheidungsfindung erleichtern (vgl. BAFU 2016). Für den Erfolg von Anpassungsmassnahmen ist nebst der breiten Abstützung wichtig, dass die Diskussionen zeitnah geführt werden: Die Auswahl möglicher Lösungen nimmt mit fortschreitender Zeit ab.

## Referenzen

- BAFU (2012) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder**. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern, 2012.  
www.bafu.admin.ch/klimaanpassung
- BAFU (2016) **Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz**. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbellay vom 14.12.2012. Entwurf Januar 2016.
- 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 EM, Beyerle U, Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes**. *Nature Climate Change* 3: 1033–1038.
- Fischer EM, Keller D, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2014) **Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective**. *International Journal of Climatology* 35: 3204–3219.
- GCOS (2010) **Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 update)**. TD-No. 1523.
- Huggel C, Clague JJ, Korup O (2012) **Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains?** *Earth Surface Processes and Landforms* 37: 77–91.
- IPCC (2012) **Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX)**.  
www.ipcc.ch/report/srex
- Keiler M, Knight J, Harrison S (2010) **Climate change and implications for natural hazards in the Eastern European Alps**. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368: 2461–2479.
- Lehmann Friedli T (2013) **Ökonomische Relevanz von Klimaanpassungen im Tourismus. Qualitative und quantitative Kosten-Nutzen-Bewertung von Anpassungsmassnahmen im Schweizer Alpenraum**. Doctoral thesis, Research Institute for Leisure and Tourism (CRED), University of Bern, 339 pp.
- Linsbauer A, Frey H, Haeberli W, Machguth H, Azam MF, Allen S (2015) **Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya-Karakoram region**. *Annals of Glaciology* 57: 119–130.
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken**. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli W, Bütler M, Huggel C, Müller H, Schleiss A (eds.). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 pp.
- OcCC (2007) **Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft**. Bern. 168 pp.
- Perlik M, Wissen U, Schuler M, Hofschreuder J, Jame A, Keiner M, Cavens D, Schmid WA (2008) **Szenarien für die nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung in der Schweiz (2005–2030)**. Nationales Forschungsprogramm NFP 54 «Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung», Zürich, 312 pp.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region**. *Journal of Geophysical Research* 118: 3610–3626.
- Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glacier's response to the global «2°C air temperature target»**. *Environmental Research Letters* 7: 044001.
- Schaub Y (2015) **Outburst Floods from High-Mountain Lakes: Risk Analysis of Cascading Processes under Present and Future Conditions**. Doctoral thesis, Department of Geography, University of Zurich, 292 pp.

## 2.7 Alpine Ökosysteme

Die starke Strukturierung der Landoberfläche im Gebirge, die unterschiedliche Hangneigung und die Exposition zur Sonne schaffen auf engem Raum ein buntes Mosaik aus Temperaturverhältnissen, die als Puffer gegen grossräumige Klimaänderungen wirken. Dennoch wirkt sich die Klimaänderung auch auf die alpinen Ökosysteme aus. So ist beispielsweise in der Schweiz – trotz wachsenden Gletschervorfeldflächen – eher eine Abnahme der alpinen Fläche zu erwarten, weil sich die temperaturbestimmte Baumgrenze langfristig nach oben schieben wird. Die Erwärmung des Klimas und das Höherrücken des Bergwaldes führen zu einer klimatischen Verinselung hochalpiner Lagen. Diese Flächenveränderungen müssen berücksichtigt werden, wenn es um die alpine Landnutzung geht. Der bereits rekordhohe und weiter steigende Bestand an Sommerungsschafen drückt dann auf eine kleiner werdende alpine Fläche. Die Folgen sind vermehrte Trittschäden und Erosion.

*Christian Körner (Universität Basel), Eva Spehn (Forum Biodiversität/SCNAT und Universität Bern)*

### Globale und nationale Situation

Der alpine Lebensraum oberhalb des Bergwaldes umfasst etwa ein Drittel der schweizerischen Landesfläche und repräsentiert die letzten grossen Urlandschaften Mitteleuropas. Ähnliche alpine Ökosysteme gibt es weltweit; sie liegen zwar je nach geographischer Breite in unterschiedlicher Höhe, aber in stets ähnlichem Temperaturklima. Daher eignen sie sich besonders für globale Vergleiche (Körner 2003). Da in der Schweiz im alpinen Lebensraum im Durchschnitt doppelt so viel Niederschlag fällt wie im Tal, liefern diese Hochlagen einen Grossteil des energie wirtschaftlich genutzten Wassers. Die Hänge im alpinen Lebensraum sind allerdings steil und nur so stabil wie ihre Vegetation dicht und vital ist, womit die alpine Pflanzendecke die Sicherheit der Siedlungsräume und Transportrouten sichert. Die Biodiversität ist sehr hoch, etwa ein Viertel aller Blütenpflanzenarten der Schweiz findet sich oberhalb der alpinen Baumgrenze. Der Einfluss des Menschen auf alpine Ökosysteme ist zwar nachweisbar, aber führte zumeist nicht zu einem markanten Umbau der Lebenswelt. Eine langfristige Umweltbeobachtung, wie es sie für den Wald gibt, existiert für den alpinen Lebensraum in der Schweiz nicht.

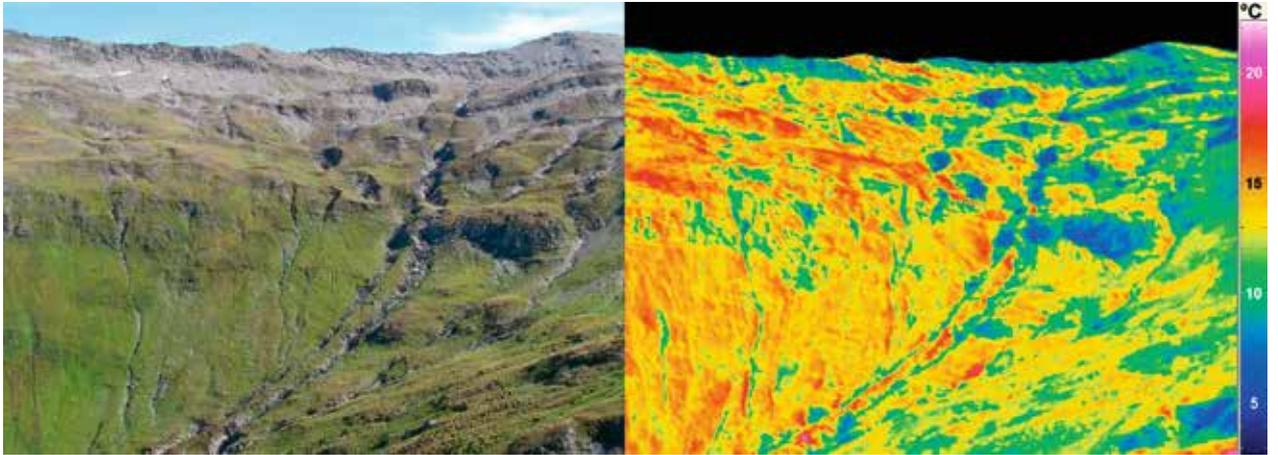
### Verletzlichkeit

Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC wird den alpinen Systemen – ausschliesslich auf Basis theoretischer Modelle – eine hohe Verletzlichkeit gegenüber dem Klimawandel zugeschrieben: Seltene Arten und Arten mit enger Temperaturtoleranz sollen demnach zurückgehen, da die Veränderungen zu rasch erfolgen oder sie im alpinen Raum irgendwann nicht mehr weiter in die Höhe ausweichen können. Die realen Lebensbedingungen im alpinen Terrain zeigen allerdings ein differenzierteres Bild: Die starke Strukturierung der Landoberfläche im Ge-

birge, die unterschiedliche Hangneigung und Exposition zur Sonne oberhalb der Waldgrenze schaffen auf engem Raum ein buntes Mosaik von Temperaturverhältnissen, das als Puffer gegen die Wirkung von grossräumigen Klimaänderungen wirkt und das System insgesamt weniger verletzlich macht. Steile klimatische Gradienten über kurze Distanzen erlauben alpinen Organismen ein kleinräumiges Ausweichen (Körner 2003; Scherrer 2010, Abb. 2.9). Auch feinskalige Modelle legen ein grosses Beharrungsvermögen nahe (Randin et al. 2009). Zudem erwiesen sich klonal wachsende Arten (die weit überwiegende Mehrheit der alpinen Arten) als besonders robust gegenüber Klimaänderungen (de Witte et al. 2012). Im Übergangsbereich zum Bergwald droht der alpinen Vegetation ein Flächenverlust durch Vergandung (Rückgang der alpinen wirtschaftlichen Nutzung) und durch das klimabedingte Hochsteigen der Waldgrenze.

### Schleichende Veränderungen

Änderungen der Biodiversität werden im alpinen Lebensraum ab einer durchschnittlichen globalen Erwärmung von mehr als zwei Grad Celsius erwartet (IPCC 2014/WGII/Chap. 4). Langfristig werden im Gebirge nach diesen Modellen Organismenarten höher rücken. Solche Temperaturschwellenwerte sind für kontinuierliche Prozesse zwar etwas Künstliches, eine 2-Grad-Erwärmung würde aber weltweit langfristig die Fläche der unteren alpinen Stufe um ein Viertel reduzieren und die obere alpine Stufe halbieren (Körner 2012; Tab. 5.5). Diese Werte dürften näherungsweise auch für die Schweiz gelten, da auch hier die Position der Waldgrenze von der Temperatur bestimmt wird. Da Pionierarten und Generalisten früher höher rücken als Spezialisten mit sehr engen Lebensraumansprüchen, wird sich die Zusammensetzung der Arten verändern und tendenziell trivialisieren. In der Schweiz wurden entlang von Höhengradienten unterschiedliche



**Abbildung 2.9:** Geländestructur, Hangneigung und Exposition schaffen in der baumlosen Hochgebirgslandschaft ein Mosaik an Kleinlebensräumen mit sehr unterschiedlichen Temperaturen. Deshalb sind alpine Organismen weniger gefährdet durch eine allgemeine Erwärmung als Arten in tieferen Lagen. Die Wege zu geeigneteren Lebensräumen sind sehr kurz. Ein Wärmemosaik in 2500 Metern Höhe, hier am Beispiel der Furkapass-Region. Während einer Saison unterscheiden sich die Mitteltemperaturen der verschiedenen Kleinlebensräume am Hang um mehr als zehn Grad Celsius. Die Daten wurden mit vielen automatischen Temperatursensoren verteilt über den ganzen Hang ganzjährig erhärtet. (Quelle: Angepasst von Scherrer & Körner 2010)

Wanderungsraten für Pflanzen, Schmetterlinge und Vögel festgestellt (Roth et al. 2014). Vögel folgen dem Klimawandel der jüngsten Zeit rasch; wesentlich langsamer reagieren Pflanzen und die – vermutlich wegen der Raupenstadien – oft an sie gebundenen Schmetterlinge. Die höchsten Berggipfel in den Zentralalpen zeigen eine deutliche Zunahme an Pflanzenarten im Laufe der letzten 100 Jahre (Wipf et al. 2013) durch die Einwanderung von Arten aus tieferen Lagen, die leicht zu verbreitende Samen besitzen und die nun nicht mehr wegen ihres höheren Wärmebedarfes von Gipfelfluren ausgeschlossen bleiben. Während des vergangenen Jahrzehnts wurden also Blütenpflanzen aus tieferen alpinen Lagen auf Bergspitzen in ganz Europa häufiger (Gottfried et al. 2012), zumindest in boreal-temperaten Gebieten (+3,9 Arten im Durchschnitt). In südlichen Teilen der Alpen und in mediterranen Gebirgen hingegen nahmen die Artenzahlen eher ab (–1,4 Arten im Durchschnitt). Grund dafür ist wahrscheinlich, dass die jüngsten Klimaänderungen die hochsommerliche Verfügbarkeit von Wasser im südlichen Europa vermindert haben (Pauli et al. 2012). Bemerkenswert ist auch, dass letztere Studie die grössten (schnellsten) Veränderungen in der untersten alpinen Stufe feststellte, da dort das Reservoir verfügbarer Arten grösser ist und wegen des günstigeren Klimas die Ausbreitung schneller erfolgen kann.

#### Alpine Flächen werden eher abnehmen

Der rapide Gletscherrückzug schafft neue Lebensräume, die bis zu ihrer vollständigen Besiedlung durch Pflanzen viele Jahrzehnte lang ein labiles, erosionsanfälliges Terrain darstellen. In der Schweiz ist trotz vergrösserten Glet-

schervorfeldflächen eine Abnahme der alpinen Fläche zu erwarten, weil sich die temperaturbestimmte Baumgrenze langfristig nach oben schieben wird. Dieses Höhersteigen des Bergwaldes hält anfangs nicht mit der Erwärmung des Klimasystems Schritt und ist noch mit ausgeprägten zeitlichen und räumlichen Unterschieden behaftet. Da der Erfolg von Sämlingen und ganz jungen Bäumen vom zufälligen Zusammentreffen von samenreichen Jahren (Mastjahren) mit klimatisch besonders günstigen Folgejahren bestimmt wird, erfolgt die Besiedlung des alpinen Gürtels durch Bäume schubweise über Jahrzehnte verteilt. Sämlingspopulationen haben daher nur beschränkten Wert als Mass für das Vorrücken des Waldes (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106). Andere Faktoren, die nichts mit dem Klimawandel zu tun haben, wie der Rückgang der Landnutzung, spielen dabei eine wichtige Rolle (Gehrig-Fasel et al. 2007). Gemäss dieser Studie geht der überwiegende Teil der Vermehrung der Bergwaldfläche auf das Konto von Wiederbewaldung (und Verbuschung) von ehemaligem Weidland unterhalb der klimatischen Waldgrenze.

Ob sich die für das Leben im Gebirge entscheidende Dauer der Schneebedeckung im oberen Bereich der alpinen Stufe (>2300 Meter) verändert, ist noch unklar. Unterhalb 1750 Metern über Meer ist ein Rückgang der Schneebedeckung evident (Rebetez 1996; Benniston 1997), in höheren Lagen kann wegen der Zunahme der Gesamtniederschläge eine mächtigere Schneedecke der Wirkung der Klimaänderung auf die Schneedeckendauer entgegenwirken. Dies obwohl die Zahl der Tage mit Schneefall in allen Höhenlagen abnimmt, wenn auch mit zunehmender

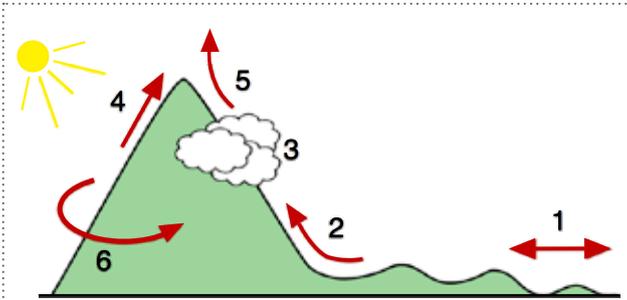


Abbildung 2.10: Wollen Arten der Niederung einer Klimaänderung ausweichen, müssen sie sehr grosse Distanzen überwinden (für sie gibt es kaum einen Ausweg (1)). Berge können hingegen ein Fluchttort (Refugium) sein (2, 4) und waren das erdgeschichtlich auch immer. Berge können auch zur Falle werden, wie im Fall schrumpfender Nebelbänke in tropischen Bergnebelwäldern oder wenn Organismen Berge besiedeln, die nicht hoch genug sind (3, 5). In aller Regel sind Berge aber eine Chance (6), weil es über sehr kurze Distanzen «Fluchtwege» gibt (6), als Folge des Mosaiks von Kleinklimabedingungen. (Quelle: Körner 2013)

Höhe weniger ausgeprägt (Serquet et al. 2011). In hohen Lagen muss deshalb die schneefreie Zeit trotz eines wärmeren Klimas nicht unbedingt länger werden.

### Stickstoff hat grossen Einfluss auf Flora

Es gibt erste Hinweise, dass der Einfluss der atmosphärischen Stickstoffdeposition (durch Verkehr, Viehhaltung und Düngemittel) auf die alpine Flora zurzeit grösser ist als der Effekt der Klimaänderung (Bobbink 2010). Die Folgen sind Verschiebungen in der pflanzlichen Arten dominanz hin zu raschwüchsigen Arten, zu Ungunsten langsamwüchsiger, kleiner und oft seltener Arten. Solche Wirkungen wurden von Roth et al. (2013) für die ganze Schweiz auch in tieferen Lagen nachgewiesen. Eine Erhöhung der Produktivität der alpinen Vegetation durch höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen kann nach heutigem Wissen ausgeschlossen werden (Inauen et al. 2012).

### Extremereignisse

Extreme Trockenheit und Hitze stellen für alpine Pflanzen nach heutigem Wissen kein existentielles Risiko dar. Das ist eine Folge der Langlebigkeit der meisten alpinen Pflanzenarten, von denen die Bedeutendsten mehrere tausend Jahre alt werden und sich vegetativ (klonal) vermehren (de Witte et al. 2012), was sie relativ robust gegenüber kurzfristigen Schwankungen der Lebensbedingungen macht. Auch die Kürze des Bergsommers und die relativ hohen Niederschläge lassen eine extreme Austrocknung nicht zu. Die negativen Wirkungen solcher Extreme sind daher im Gebirge generell stark abgeschwächt, ja können im Bereich der Waldgrenze und darüber sogar ins Positive wechseln, also zu stärkerem Wachstum führen (Jolly et al.

2009). Vermehrte Wasserausbrüche aus dem Gletschervorfeld als Folge des Gletscherschmelzens gefährden darunterliegende Lebensräume und verzögern die Etablierung einer geschlossenen Pflanzendecke im Gletschervorfeld.

## Anpassung an den Klimawandel

Die Fähigkeit der meisten alpinen Pflanzen und Tiere, mit schwankenden Lebensbedingungen umzugehen, ist gross und die vielen Kleinstlebensräume erlauben ein Ausweichen auf kleinem Raum (Scherrer & Körner 2010; Körner 2013; Abb. 2.10). Die Erwärmung des Klimas und das Höherrücken des Bergwaldes führen jedoch zu einer Verinselung der hochalpinen Lagen. Bei der Dimension und Platzierung von Schutzgebieten sind solche Veränderungen zu antizipieren (Korridore, zusammenhängende Hochlagen). Die Sömmerungsnutzung im alpinen Gelände, insbesondere durch Schafe, dürfte weiter zunehmen. Im steilen Gelände entsteht dadurch je nach Witterung ein erhöhtes Erosionsrisiko, insbesondere weil Schafe im zunehmend wärmeren Hochsommer bevorzugt kühle Hochlagen aufsuchen, deren Fläche sich wegen des Klimawandels langfristig deutlich verkleinern wird (siehe oben). Eine strikte und kompetente Behirtung ist nötig, vor allem wenn – wie neuerdings üblich – grosse Herden das Gelände nutzen. Fehler in der alpinen Landnutzung können in Kombination mit dem Klimawandel zu unumkehrbaren Schäden an den fragilen Böden führen, was sich wiederum auf den Wasserhaushalt auswirkt.

## Herausforderungen für die Schweiz

Abgesehen von den technischen und touristischen Problemen (Anlagen auf auftauendem Permafrost beziehungsweise abnehmende Schneesicherheit) in Folge einer Erwärmung des Klimasystems (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80, Kap. 2.11 Tourismus, S. 117) sind die grössten Herausforderungen für den Naturerhalt im alpinen Lebensraum die Bewahrung und Schaffung grosser, überregionaler Schutzgebiete, die durch Korridore verknüpft sind und so Migrationen besonders von Tieren erlauben. Eine spezielle Herausforderung liegt in der neuerdings massiv angestiegenen Weidenutzung höchster Lagen (Schafe) die ohne Behirtung, bei kleiner werdendem hochalpinen Areal und wärmeren Sommern, massive Boden- und Vegetationsschäden bewirken. Auch wachsende Wildtierpopulationen, wie die des Steinbocks, werden im Sommer durch die Erwärmung in höhere Lagen gedrängt. Ein Artenverlust ist in den höchsten Lagen eher unwahrscheinlich, im Bereich der Waldgrenze (durch Habitatverlust) aber möglich (Verlust von alpinen Wildheufeldern, hochgelegenen Naturwiesen infolge des hochrückenden Bergwaldes). Massnahmen zum bewuss-

ten Offenhalten solcher Flächen sind sicher eine beträchtliche Herausforderung.

## Referenzen

- Beniston M (1997) **Variation of snow depth and duration in the Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcing.** *Climatic Change* 36: 281–300.
- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erismann JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W (2010) **Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis.** *Ecological Applications* 20: 30–59.
- de Witte LC, Armbruster GFJ, Gielly L, Taberlet P, Stocklin J (2012) **AFLP markers reveal high clonal diversity and extreme longevity in four key arctic-alpine species.** *Molecular Ecology* 21: 1081–1097.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE (2007) **Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment?** *Journal of Vegetation Science* 18: 571–582.
- Gottfried M et al. (2012) **Continent-wide response of mountain vegetation to climate change.** *Nature Climate Change* 2: 111–115.
- Harsch MA, Hulme PE, McGlone MS, Duncan RP (2009) **Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming.** *Ecological Letters* 12: 1040–1049.
- Inauen N, Körner C, Hiltbrunner E (2012) **No growth stimulation by CO<sub>2</sub> enrichment in alpine glacier forefield plants.** *Global Change Biology* 18: 985–999.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps.** *Geophysical Research Letters* 32: L18409.
- Körner C (2003) **Alpine Plant Life (second edition).** Springer, Berlin.
- Körner C (2013) **Alpine ecosystems.** In: Levin SA (ed.) *Encyclopedia of biodiversity* (second edition). Elsevier: 148–157.
- Pauli H et al. (2012) **Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits.** *Science* 336: 353–355.
- Randin CF, Engler R, Normand S, Zappa M, Zimmermann NE, Pearman PB, Vittoz P, Thuiller W, Guisan A (2009) **Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence.** *Global Change Biology* 15: 1557–1569.
- Rebetez M (1996) **Seasonal relationship between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region.** *Theoretical and Applied Climatology* 54: 99–106.
- Roth T, Kohli L, Rihm B, Achermann B (2013) **Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland.** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178: 121–126.
- Roth T, Plattner M, Amrhein V (2014) **Plants, birds and butterflies: short-term responses of species communities to climate warming vary by taxon and with altitude.** *PLoS ONE* 9: e82490.
- Scherrer D, Körner C (2010) **Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections.** *Global Change Biology* 16: 2602–2613.
- Scherrer D, Körner C (2011) **Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming.** *Journal of Biogeography* 38: 406–416.
- Serquet G, Marty C, Dulex JP, Rebetez M (2011) **Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland.** *Geophysical Research Letters* 38: L07703.
- Wipf S, Stöckli V, Herz K, Rixen C (2013) **The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835.** *Plant Ecology & Diversity* 6: 447–455.

## 2.8 Biodiversität und Ökosystemleistungen

**Biodiversität ist die Vielfalt des Lebens. Die vielen unterschiedlichen Lebensformen, die es auf unserer Erde gibt, haben eines gemeinsam: Sie sind voneinander abhängig. Wenn sich die Lebenssituation für eine Art ändert, hat das Konsequenzen für andere Lebewesen. Der Mensch profitiert von vielen durch die Biodiversität erzeugten Ökosystemleistungen, die uns seit jeher Nahrung, Fasern für Kleidung, Werk- und Baustoffe sowie medizinische Wirkstoffe liefern. Intakte Ökosysteme reinigen Luft und Wasser, sorgen für fruchtbare Böden, schützen uns vor Überschwemmungen und Hangrutschen und puffern die Auswirkungen des Klimawandels ab. Weltweit und in der Schweiz sind Biodiversität und Ökosystemleistungen aber stark durch Umweltveränderungen betroffen.**

*Markus Fischer (Universität Bern), Eva Spehn (Forum Biodiversität/SCNAT und Universität Bern)*

Ökosystemleistungen sind Funktionen des Ökosystems, die für den Menschen vorteilhaft, oft auch direkt nutzbar sind (Abb. 2.11). Zu den Ökosystemleistungen gehören unter anderem:

- Produktion von Lebensmitteln,
- Wirkstoffe für Medikamente,
- Brenn- und Baumaterialien,
- natürliche Reinigung von Luft und Wasser,
- natürliche Regulierung der Nährstoffkreisläufe und des Mikroklimas,
- Abbau von Schadstoffen,
- Schutz vor Naturgefahren,
- Bestäubung,
- Schutz vor Schädlingen oder biologischen Invasionen und
- Stabilität gegenüber Umweltveränderungen.

Solche Ökosystemleistungen sind zentral für Gesundheit, Sicherheit und Wohlstand. Allerdings gelten die meisten Ökosystemleistungen als öffentliche Güter, die bisher nicht bilanziert werden.

Biodiversität ist eine Voraussetzung für Ökosystemleistungen und unerlässlich für das Funktionieren von Ökosystemen (Cardinale et al. 2012). Gleichzeitig kann man Biodiversität selbst auch als eine Ökosystemleistung mit gesellschaftlichem Wert an sich sehen (Fisher et al. 2009). Lebensräume benötigen eine gewisse Qualität hinsichtlich der Artenvielfalt und -häufigkeit, um die Vielzahl an Ökosystemleistungen zu gewährleisten (Cardinale et al. 2012). Übersteigen Verschiebungen im Artengefüge ein gewisses Ausmass – etwa als Folge von Landnutzungs- oder klimatischen Änderungen – ist zu erwarten, dass bisherige Ökosystemleistungen nicht mehr in derselben Qualität oder Quantität bereitgestellt werden können.

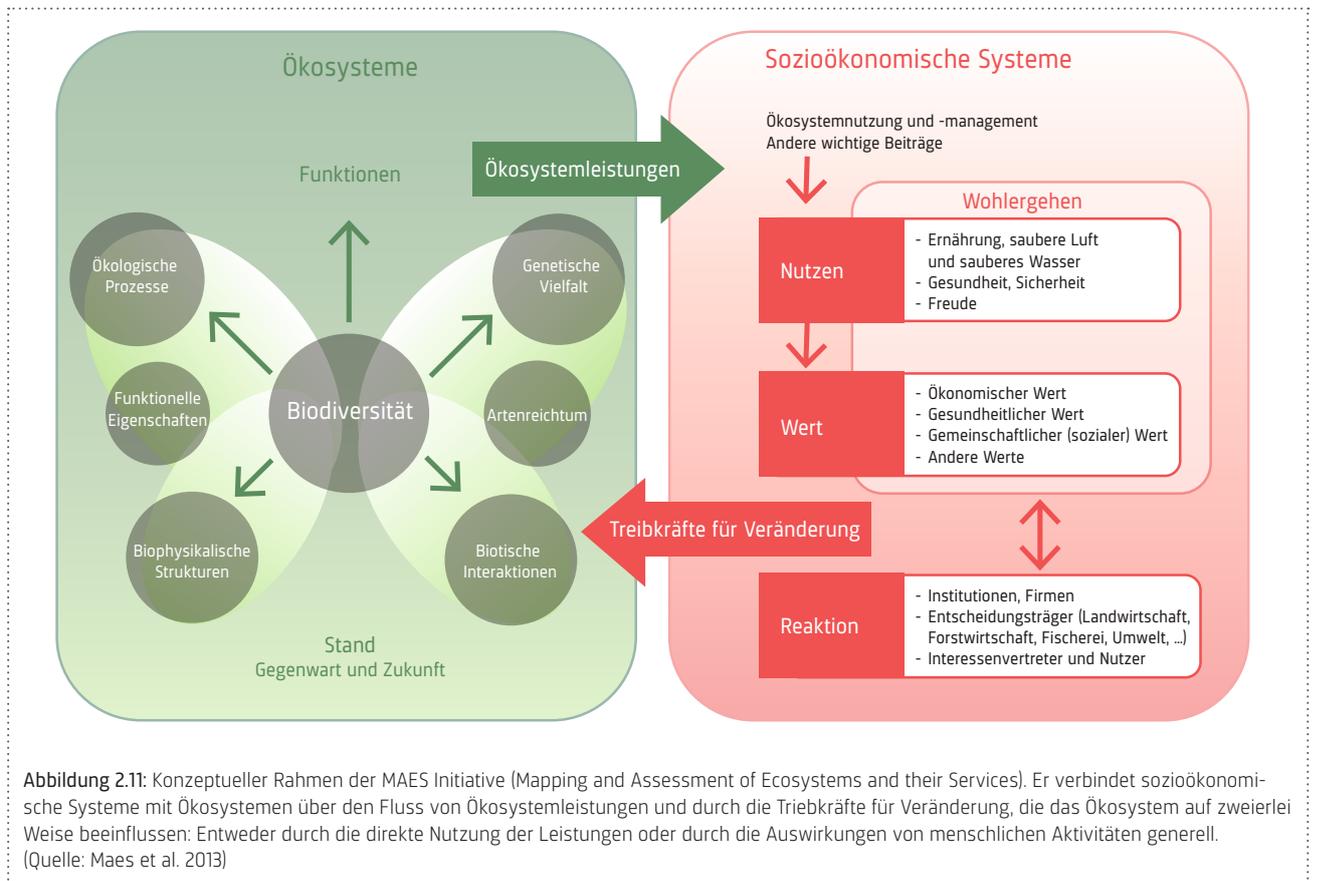
### Globale und nationale Situation

#### Weltweit hoher Druck auf Biodiversität und Ökosystemleistungen

Global ändert sich die Biodiversität mit noch nie dagewesener Geschwindigkeit aufgrund der vom Menschen verursachten Umweltveränderungen (Mace et al. 2005). Der Rückgang der Biodiversität ist eine Folge des menschlichen Eingreifens in die Natur, vor allem durch Landnutzung und damit einhergehender Lebensraumverluste und -degradierungen (Newbold et al. 2015). Eine Schätzung der Intaktheit natürlicher Biodiversität in lokalen Ökosystemen zeigt, dass über die Hälfte der globalen Landfläche als «biotisch kompromittiert» gilt, also einen Verlust von mehr als 20 Prozent der Arten aufzeigt (Newbold et al. 2016). Der Biodiversitätsverlust – sowohl der absolute Verlust an Genen/Arten/Lebensgemeinschaften, als auch deren lokales Verschwinden – wird seinerseits auch als ein Antrieb globaler Umweltveränderungen betrachtet; dies aufgrund seines Ausmasses und wegen der starken Koppelung an Ökosystemleistungen und der gesellschaftlichen Nutzung natürlicher Ressourcen an Biodiversität (Mace et al. 2005).

Ökosystemleistungen sind global und in Europa bis an die Grenzen der Belastbarkeit beansprucht, und die Nachfrage steigt in den meisten Fällen weiterhin stark an (Schröter et al. 2005). Zudem gibt es zahlreiche Hinweise, dass der Klimawandel diese (Über-)Beanspruchung weiter steigern wird (Millennium Ecosystem Assessment 2005; TEEB 2009), da seine negativen Folgen auf Ökosysteme deren Potenzial zur Bereitstellung von Ökosystemleistungen beeinträchtigen.

Detailliertere Informationen zum weltweiten Zustand von Biodiversität und den Ökosystemleistungen, die sich teilweise auch auf die Schweiz übertragen lassen, sind bis 2019 zu erwarten. Bis dann wird der Weltbiodiversitätsrat IPBES – analog dem IPCC für das Klima – verschiedene



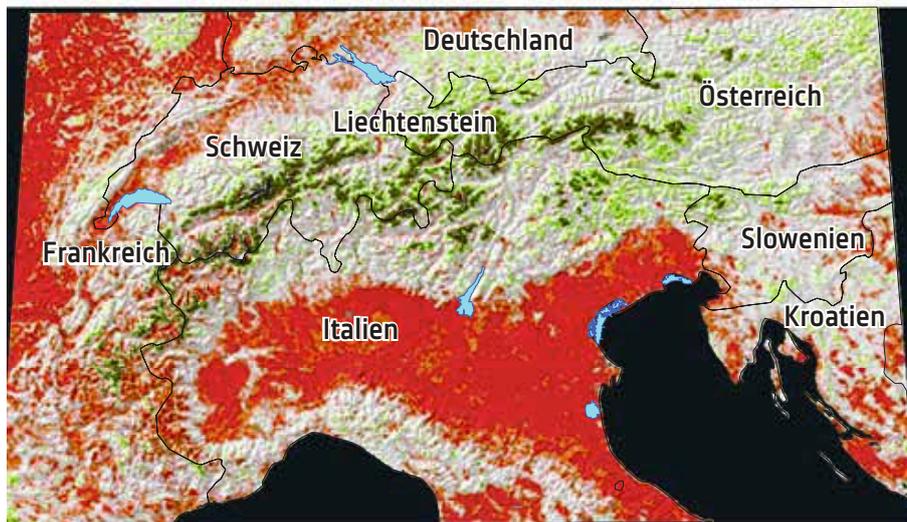
weltweite, regionale und thematische Berichte über Biodiversität und Ökosystemleistungen erarbeitet haben.

### Schweiz: Rückgang der Biodiversität und Ökosystemleistungen

In den letzten Jahrzehnten hat die Biodiversität in der Schweiz einen deutlichen Rückgang erfahren (Lachat et al. 2010). Über ein Drittel der Pflanzenarten und fast die Hälfte der Tierarten stehen auf der roten Liste der Schweiz; der Zustand geschützter Lebensräume wie Moore und Trockenwiesen und Weiden verschlechtert sich weiter. Der Rückgang der Biodiversität ist vor allem durch Landnutzungsänderungen, Zersiedelung, Infrastrukturmassnahmen, Verkehrs-, Stickstoff- und Schadstoffbelastung verursacht (Lebensraumverlust). Die Trockenwiesen und -weiden haben deshalb seit 1900 einen Flächenrückgang von 95 Prozent erlitten (Lachat et al. 2010). In der Schweiz reichen die aktuelle Qualität, Quantität und die Vernetzung vieler Lebensräume nicht aus, um deren Biodiversität und Ökosystemleistungen langfristig zu erhalten. Der tatsächliche Flächenbedarf ist deutlich höher: Je nach Region und Lebensraum wird hierfür rund ein Drittel der Gesamtfläche als notwendig erachtet, in einigen weniger, in anderen mehr (Guntern et al. 2013). Vor allem im Mit-

telland ist die Biodiversität auf einem bedenklich tiefen Niveau angelangt. Viele Leistungen der Ökosysteme wie die Erholungsfunktion, die Abpufferung von Klimaänderungen und der Hochwasserschutz sind mit einer so stark reduzierten Biodiversität nicht mehr garantiert. Eine Studie in sechs europäischen Ländern zeigte, dass die Biomasseproduktion in Mischwäldern konstanter ist als in Monokulturen (Jucker et al. 2014), und dass Bestände, die aus verschiedenen Baumarten zusammengesetzt sind, generell mehr Ökosystemleistungen erbringen als Monokulturen (Van der Plas et al. 2016). Bei einer grossangelegten Feldstudie in drei Gebieten in Deutschland zeigte sich entsprechend, dass eine Intensivierung der Grünlandnutzung nicht nur zu einem Verlust an Biodiversität führt (Allan et al. 2014), sondern auch zu einem Rückgang in der Bereitstellung vielfältiger Ökosystemleistungen (Allan et al. 2015).

Der Rückgang der Biodiversität konnte bisher trotz zusätzlicher Anstrengungen – etwa im Natur- und Gewässerschutz und beim ökologischen Ausgleich in der Landwirtschaft – nicht gestoppt werden. Stattdessen verstärkt sich der Druck auf die Biodiversität noch weiter durch Entwicklungen wie die steigende Bevölkerungszahl, den Klimawandel oder die Intensivierung der Landwirtschaft an den für Ackerbau und Grünlandnutzung günstigen



MODIS Sommer Anteil FPAR im Vergleich zum Durchschnitt (%)

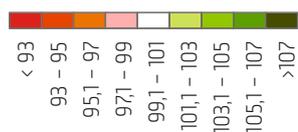


Abbildung 2.12: Anteil der im Sommer 2003 von Pflanzen absorbierten photosynthetisch relevanten Strahlung (FPAR) im Vergleich zum 5-Jahresmittel, gemessen von Instrumenten («MODIS») auf Satelliten. Die roten Bereiche zeigen, wo FPAR und somit das Pflanzenwachstum im Jahr 2003 geringer war als der Mittelwert. Grüne Bereiche zeigen höhere Werte von FPAR und somit besseres Pflanzenwachstum als im Mittelwert. In den weissen Gebieten blieben die Werte unverändert.  
(Quelle: Reprinted by permission from John Wiley & Sons Ltd.: Jolly et al. 2014, copyright [2014])

Stellen beziehungsweise die Aufgabe der Nutzung an topographisch schwieriger zu bewirtschaftenden Orten. Ein Beispiel für den Artenverlust durch Intensivierung sind die Fromentalwiesen (Glatthaferwiesen), die bis Mitte des letzten Jahrhunderts weit verbreitet waren. Durch eine starke Intensivierung wurden sie fast vollständig durch artenarmes Wiesland verdrängt (von 85 Prozent aller Wiesen um 1950 zu 2 Prozent heute). Zudem ging die Zahl der für Fromentalwiesen typischen Arten von 25 auf 9 zurück (Bosshard 2015). Im Süssgewässer sind invasive Arten die Hauptursache für den Rückgang einheimischer Arten. Zum Beispiel wurden in den vergangenen 30 Jahren die einheimischen wirbellosen Tiere (Kleinkrebse, Insektenlarven, Schnecken, Muscheln, Würmer), welche die Rheinsohle bewohnten, fast vollständig durch eingewanderte Arten (z. B. asiatische Körbchenmuschel *Corbicula fluminea*) ersetzt (Rey et al. 2005).

## Verletzlichkeit

Der Klimawandel zeigt jetzt schon Effekte auf die meisten Ökosysteme (s.a. Kap. 2.7 Alpine Ökosysteme, S.

96, Kap. 2.9 Wald, S. 106, Kap. 2.10 Landwirtschaft, S. 111) und wird künftig stärkere Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosystemleistungen haben. Die Auswirkungen der Hitzewelle im Jahr 2003 auf das Pflanzenwachstum sollen exemplarisch zeigen, dass in der Schweiz vor allem die Ökosysteme niedriger Lagen durch Extremtemperaturen betroffen werden, während das Pflanzenwachstum in höheren Lagen sogar besser sein kann als bei bisher normalen Temperaturen (Abb. 2.12; Jolly et al. 2005).

Der Klimawandel verändert sowohl die Phänologie als auch die Verbreitung von Arten in der Schweiz mit der Tendenz zur Ausbreitung in höhere Lagen. Viele untersuchte Arten zeigen ein erhöhtes Risiko lokal zu verschwinden oder auszusterben, entweder direkt durch Kli-

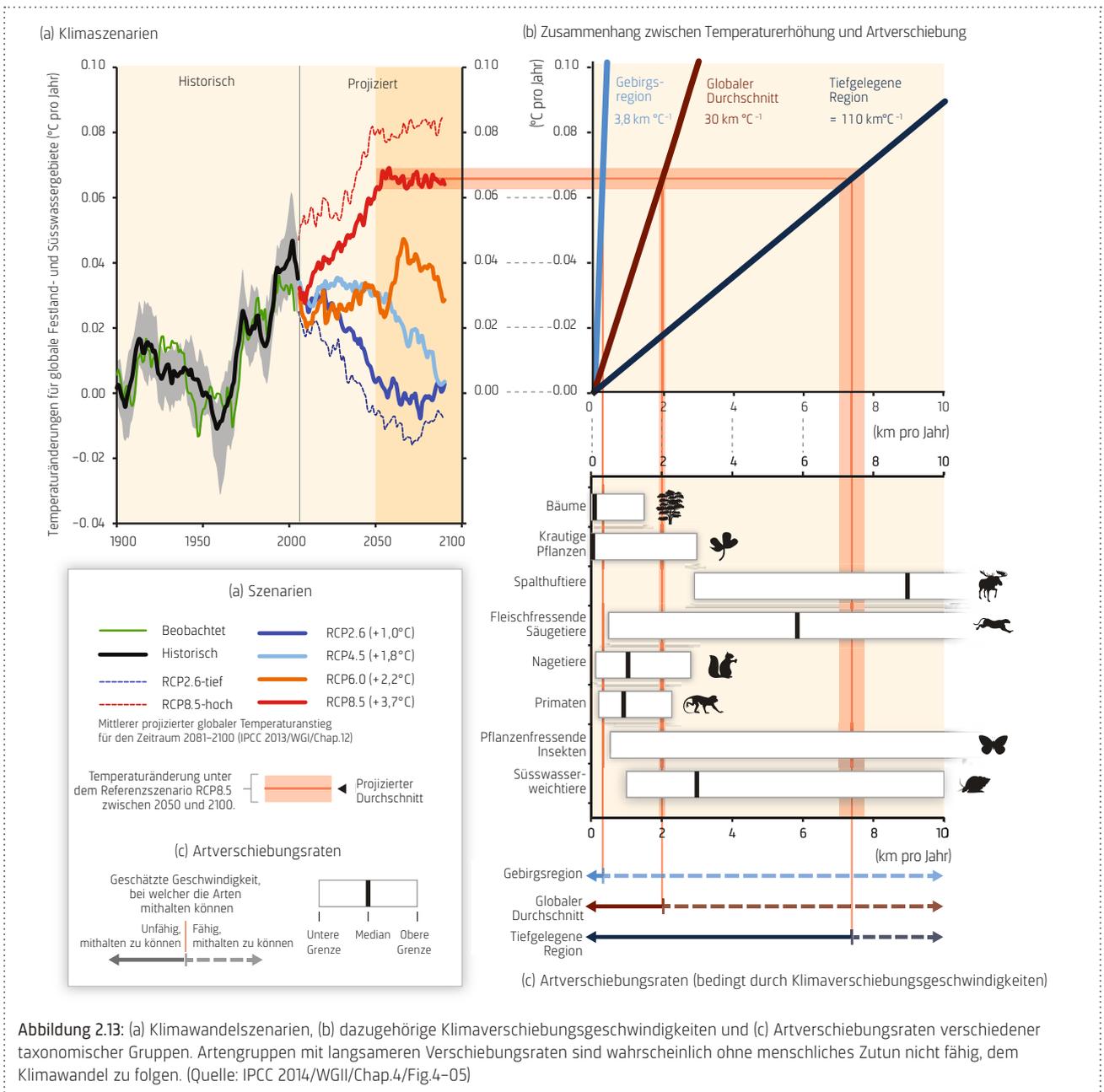
mawandel verursacht oder in Kombination mit anderen Faktoren (Lachat et al. 2010; Bellard et al. 2012; Urban et al. 2012).

Allgemein kann der Klimawandel die Lebensräume der Arten verändern durch:

- Verlagerung des bisherigen Lebensraums, ohne dass die Arten dem folgen können (Abb. 2.13),
- Verlagerung der Arten aus ihrem bevorzugten Lebensraums hinaus oder
- Änderungen in der Qualität des Lebensraums (Urban et al. 2012).

## Kippunkte der Ökosysteme

Der Klimawandel birgt einige Risiken für terrestrische und Süsswasser-Ökosysteme und ihre wichtigsten Ökosystemleistungen (IPCC 2014/WGII/Chap.4). Fast alle Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität sind schleichend, aber es kann auch zu plötzlichen, irreversiblen Veränderungen des natürlichen Gleichgewichts kommen, die zu einer substantiellen Störung von Ökosys-



**Abbildung 2.13:** (a) Klimawandelszenarien, (b) dazugehörige Klimaverschiebungsgeschwindigkeiten und (c) Artverschiebungsraten verschiedener taxonomischer Gruppen. Artengruppen mit langsameren Verschiebungsraten sind wahrscheinlich ohne menschliches Zutun nicht fähig, dem Klimawandel zu folgen. (Quelle: IPCC 2014/WGII/Chap.4/Fig.4-05)

temen führen. In diesem Zusammenhang spricht man von Kippunkten von Ökosystemen (*tipping points*) (Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2014).

Einer der am besten untersuchten Kippunkte ist der Verlust von Korallenriffen, der bis 2050 erwartet wird (IPCC 2014/WGII). Grund für das Verschwinden der Korallen ist eine Kombination von Verschmutzung, Überfischung, invasiven Arten und Versauerung der Ozeane (wegen der steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und steigenden Wassertemperaturen). Auch arktische Ökosysteme sind durch Auftauen des Permafrostes, Verbuschung der Tundra und vermehrten Ausbruch von Krankheiten oder Feuern in

nördlichen Wäldern gefährdet («boreal tipping point», IPCC 2014/WGII/Chap.4). Die Möglichkeiten, dieses Umkippen der Wälder durch Anpassung zu verhindern, sind sehr gering. Auch Baumsterblichkeit und Waldverlust nehmen an vielen Orten zu und wurden in manchen Fällen direkt Klimaeffekten und indirekten Effekten (Zunahme von Krankheitserregern und Schädlingen) zugeschrieben (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106).

## Schleichende Veränderungen und Anpassung

Klimamodelle sagen voraus, dass viele Arten in den nächsten Jahrzehnten durch langsame klimabedingte Lebensraumveränderungen betroffen sein werden (Urban et al. 2012). Zunehmende Trockenperioden aufgrund geringerer prognostizierter Regenfälle im Sommer könnten zum Beispiel bewirken, dass Wälder im Mittelwallis absterben und Laichgewässer von Amphibien frühzeitig im Jahr austrocknen (Lachat et al. 2010). Besonders gefährdet sind Arten mit geringer Ausbreitungsgeschwindigkeit; vor allem solche, die flache Gebiete besiedeln (Abb. 2.13), in denen die Geschwindigkeit der Klimaänderung hoch ist, und solche, die isolierte Lebensräume wie Berggipfel, Inseln oder kleine Schutzgebiete besiedeln. Im Zuge der Anpassung an ein wärmeres Klima wandern viele Arten im Gebirge schon nach oben. Eine Analyse der seit 2003 erhobenen Daten des Biodiversitätsmonitorings Schweiz zeigte, dass innerhalb von acht Jahren sowohl Pflanzen und Schmetterlinge als auch Vögel ihre Ausbreitung nach oben verlegt haben – im Durchschnitt um 8 Meter, 38 Meter und 42 Meter (Roth et al. 2014). Auch die Baumgrenze verschiebt sich nach oben (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106, Kap. 2.7 Alpine Ökosysteme, S. 96).

Andererseits können wärmeliebende Arten in tieferen Lagen von höheren Temperaturen profitieren. In der Schweiz ist aufgrund der wärmeren und mildereren Winter der vergangenen 30 Jahre sowohl im Tessin als auch in der Nordschweiz eine Angleichung der Vegetation an die neuen klimatischen Bedingungen im Gange. So sind beispielsweise wärmeliebende Arten häufiger als noch vor 30 Jahren. In den Wäldern im Tessin sind immergrüne hartlaubige Arten aus den gemässigten bis subtropischen Klimazonen Ostasiens inzwischen recht häufig, wie zum Beispiel Lorbeer, Japan-Liguster, Hanfpalme und Zimtbaum, die in Gärten kultiviert werden und sich von dort aus ausbreiten (Walther et al. 2001). Auch wärmeliebende Insektenarten im Mittelwallis profitieren, beispielsweise der Bläuling *Cupido alcetas*, der sein Verbreitungsgebiet im Hitzesommer 2003 stark erweitert hat (Juillerat 2005).

Langfristig könnten manche Lebensräume durch den Klimawandel ganz verschwinden oder neue Lebensräume entstehen (IPCC 2014/WGII/Chap.4). Mehrere aktuelle Studien zeigen, dass der Klimawandel die Qualität von Lebensräumen schon verändert hat und weiterhin verändern wird. Wie gross der Einfluss von veränderten Lebensräumen auf die Häufigkeit von Arten und deren Aussterberisiko ist, lässt sich nur schwer abschätzen, da manche Arten sich an neue Lebensräume anpassen können (IPCC 2014/WGII/Chap.4) oder durch unterschiedliche Wandergeschwindigkeiten (Abb. 2.13) auf neue Konkurrenten treffen (Alexander et al. 2015). Arten, die auf Synchronizität mit anderen Arten angewiesen sind, re-

agieren empfindlich auf Veränderungen in der zeitlichen Entwicklung (Phänologie), eine der raschesten Folgen des Klimawandels. So werden Interaktionen zwischen Arten unterbrochen, zum Beispiel wenn die Aktivität der Bestäuber nicht mehr mit der Blütezeit zusammenfällt. Oder wenn der Austrieb der Blätter (*Quercus robur*, Stieleiche) nicht mehr mit dem Schlüpfen der Raupen (*Operophtera brumata*, Kleiner Frostspanner) zusammenfällt, die sich von jungen Eichenblättern ernähren. Dadurch verhungern die Raupen, was wiederum den Bruterfolg von Meisen und Fliegenschnäppern verringert, die ihre Brut mit den Raupen füttern (Visser & Holleman 2001).

## Herausforderungen für die Schweiz

Für die Schweiz sind der Erhalt und die nachhaltige Nutzung ihrer Biodiversität und Ökosystemleistungen eine grosse Herausforderung. Als ein Land mit hoher Bevölkerungsdichte im besiedelbaren Raum stellt sich das Problem der Priorisierung verschiedener Nutzungen auf bestimmten Flächen in besonderem Mass. Im Rahmen nationaler und internationaler Vereinbarungen hat sich die Schweiz verpflichtet, die Biodiversität zu erhalten und ihre Nutzung nachhaltig zu gestalten (u. a. Biodiversitätskonvention, Nagoya-Protokoll).

Der Flächenbedarf für die Erhaltung der Biodiversität und der Ökosystemleistungen beträgt in der Schweiz rund ein Drittel der Landesfläche und geht damit weit über das hinaus, was heute noch an ökologisch wertvollen Flächen vorhanden ist (Gunter et al. 2013). Der Schutz dieser verbliebenen Flächen ist wichtig, bei mehreren Lebensräumen sind aber Aufwertungs- und Wiederherstellungsmassnahmen erforderlich. Naturschutzgebiete mit Arten, für welche die Schweiz Verantwortung trägt, sollten die künftigen Areale dieser Arten berücksichtigen; es geht darum Wanderkorridore zu sichern, weitere Gebiete unter Schutz zu stellen, verinselte Populationen untereinander wieder zu verbinden und ein engmaschiges Netz von Lebensräumen zu knüpfen, das den Bedürfnissen einer grösstmöglichen Anzahl Arten gerecht wird (Lachat et al. 2010).

Die Förderung der Biodiversität ist für Ökosystemleistungen und den Klimaschutz sehr wichtig: Das Ziel sollte deshalb sein, Synergien zu erkennen und zu nutzen. Mögliche Nutzungsanpassungsmassnahmen, welche die Biodiversität betreffen, sind in der Landwirtschaft eine Anpassung der Sorten und die Verwendung diverser Saatzmischungen. In der Forstwirtschaft sind es beispielsweise die Vermeidung von empfindlich auf den Klimawandel reagierenden Baumarten, wie etwa Buche und Fichte im Unterland (Schelhaas et al. 2015), und die vermehrte Verwendung von Baumartmischungen. Zu den wirksamen

Förderungsmassnahmen der Biodiversität gehören Veränderungen und Zersiedelungen der Lebensräume sowie deren Verschmutzung und Übernutzung zu mindern, invasive Arten einzudämmen, Schutzgebiete auszuweiten, die Ausbreitung von Lebensräumen zu unterstützen sowie Arten ex situ zu konservieren. Der Bundesrat hat im April 2012 die Strategie Biodiversität Schweiz (SBS) ver-

abschiedet, die zum Ziel hat, die Biodiversität reichhaltig und gegenüber Veränderungen reaktionsfähig zu halten sowie die durch sie ermöglichten Ökosystemleistungen langfristig zu erhalten (BAFU 2012). Zurzeit wird der Aktionsplan zu dieser Strategie erarbeitet; er greift die oben genannten Förderungsmassnahmen auf (BAFU 2015).

## Referenzen

- Alexander JM, Diez JM, Levine JM (2015) **Novel competitors shape species' responses to climate change.** *Nature* 525: 515–518.
- Allan E et al. (2014) **Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: 308–313.
- Allan E et al. (2015) **Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition.** *Ecology Letters* 18: 834–843.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) **Impacts of climate change on the future of biodiversity.** *Ecology Letters* 15: 365–377.
- BAFU (2012) **Schweizer Biodiversitätsstrategie.** In: Erfüllung der Massnahme 69 (Ziel 13, Art. 14, Abschnitt 5) der Legislaturplanung 2007–2011: Ausarbeitung einer Strategie zur Erhaltung und Förderung der Biodiversität.
- BAFU (2015) **Ergebnisbericht Vorkonsultation Massnahmen Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz.**
- Bosshard A (2015) **Rückgang der Fromentalwiesen und die Auswirkungen auf die Biodiversität.** *Agrarforschung Schweiz* 6: 20–27.
- Cardinale BJ, Duffy E, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S (2012) **Biodiversity loss and its impact on humanity.** *Nature* 486: 59–67.
- Fisher B, Turner RK, Morling P (2009) **Defining and Classifying Ecosystem Services for Decision Making.** *Ecological Economics* 68: 643–653.
- Guntern J, Lachat T, Pauli D, Fischer M (2013) **Flächenbedarf für die Erhaltung der Biodiversität und der Ökosystemleistungen in der Schweiz.** Forum Biodiversität Schweiz der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Jolly WM, Dobberty M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps.** *Geophysical Research Letters* 32: L18409.
- Jucker T, Bouriaud O, Avakaritei D, Coomes DA (2014) **Stabilising effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes.** *Ecology Letters* 17: 1560–1569.
- Juillerat L (2005) **Extension rapide de l'aire de distribution de *Cupido alcetas* (Hoffmansegg 1804) (Lepidoptera, Lycaenidae) en Suisse occidentale en 2003 et 2004.** *Bulletin romand d'entomologie* 22: 81–95.
- Lachat T, Pauli D, Gonseth Y, Klaus G, Scheidegger C, Vittoz P, Walter T (eds.) (2010) **Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Ist die Talsohle erreicht?** Zürich, Bristol-Stiftung, Haupt Verlag, Bern.
- Maes J et al. (2013) **Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services.** An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Publications office of the European Union, Luxembourg.
- Mace G, Masundire H, Baillie J et al. (2005) **Biodiversity.** In: Millennium Ecosystem Assessment. (2005) Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group. Ecosystems and Human Well-being, Volume 1. Island Press, Washington DC.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.** Island Press, Washington DC.
- Newbold T et al. (2015) **Global effects of land use on local terrestrial biodiversity.** *Nature* 520: 45–50
- Rey P, Ortlepp J, Küry D (2005) **Wirbellose Neozoen im Hochrhein.** Ausbreitung und ökologische Bedeutung. Schriftenreihe Umwelt 380, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Roth T, Plattner M, Amrhein V (2014) **Plants, Birds and Butterflies: short-term responses of species communities to climate warming vary by taxon and with altitude.** *PLoS one*: e82490.
- Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Hengeveld G, Reyer C, Hanewinkel M, Zimmermann NE, Cullmann D (2015) **Adaptive forest management to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe.** *Regional Environmental Change* 15: 1581–1594.
- Schröter D et al. (2005) **Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe.** *Science* 310: 1333–1337.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) **Global Biodiversity Outlook 4.** Montréal, 155 pp. [www.cbd.int/GBO4](http://www.cbd.int/GBO4)
- TEEB (2009) **The Economics of Ecosystems and Biodiversity.** Climate Issues Update, 32 p.
- Urban MC, Tewksbury JJ, Sheldon KS (2012) **On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change.** *Proceedings of the Royal Society B* 279: 2072–2080.
- Van der Plas F et al. (2016) **Jack-of-all-trades effects drive biodiversity-ecosystem multifunctionality relationships in European forests.** *Nature Communications* 7: 11109.
- Visser ME, Holleman LJM (2001) **Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology.** *Proceedings of the Royal Society B* 268: 289–294.
- Walther G-R, Carraro G, Klötzli F (2001) **Evergreen broad-leaved species as indicators for climate change.** In: G-R Walther, Burga CA, Edwards PJ (eds.), «Fingerprints» of Climate Change – Adapted behaviour and shifting species ranges. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York: 151–162.

## 2.9 Wald

Die Reaktion der Schweizer Wälder auf schleichende Klimaänderungen und Extremereignisse hängt stark davon ab, in welcher Höhenlage sich der Wald befindet. So wird sich der Wald in den höheren Lagen ausdehnen und besser wachsen, während er in den tiefen Lagen vor allem unter der Trockenheit leiden wird. Zusammen mit Änderungen in der Landnutzung, mit Windwurf, Waldbrand sowie Insekten- und Pilzbefall ergeben sich komplexe Wirkungsgefüge, welche die vielfältigen Ökosystemleistungen des Waldes stark beeinflussen werden.

*Andreas Rigling (WSL), Harald Bugmann (ETH Zürich), Martine Rebetez (Universität Neuenburg und WSL), Christian Körner (Universität Basel)*

### Globale und nationale Situation

Der Wald ist eine bedeutende Ressource und erbringt wichtige Leistungen. Während global die Produktion von Holz, Fasern und Brennmaterial sowie die Kohlenstoffspeicherung und die ausgleichenden Effekte des Waldes auf das Klima im Vordergrund stehen, sind in der Schweiz neben der Holzproduktion vor allem der Schutz vor Naturgefahren, die Biodiversität, die Filterung des Trinkwassers und die Erholungsleistung zentral (Rigling & Schaffer 2015). Diese Waldleistungen geraten durch den Klimawandel unter Druck. Viele Baumarten sind zwar in der Lage, einmalige kurzfristige Ereignisse wie zum Beispiel einen trockenen Sommer zu überstehen, sie sind aber empfindlich, wenn diese Extremereignisse wiederholt auftreten. Zudem können sich auch schleichende Klimaänderungen langfristig nachteilig auf die Waldleistungen auswirken.

### Reaktion auf Klimawandel ist abhängig vom Standort

Der Klimawandel wird die Wälder global wie regional verändern. Die Auswirkungen werden räumlich sehr unterschiedlich sein, denn je nach Standort wirken veränderte klimatische Bedingungen stimulierend oder hemmend auf die ökologischen Prozesse (IPCC 2014/WGII). In der Schweiz werden die Wälder im Bereich der oberen Waldgrenze von den wärmeren Bedingungen profitieren (Körner 2012), hingegen wird das Wachstum auf den heute schon warmen und trockenen Standorten zurückgehen (Bugmann et al. 2014; Elkin et al. 2013). Auf Standorten mit guter Wasserversorgung werden viele Baumarten früher austreiben, während auf Trockenstandorten das Wachstum früher in der Vegetationszeit abgeschlossen sein wird. Auch bei unveränderten Niederschlagsverhältnissen wird die Belastung durch Trockenheit zunehmen. Grund dafür sind die höheren Temperaturen und Verdunstung.

Neben den direkten Wirkungen des Klimawandels werden auch indirekte Effekte die Walddynamik weltweit und auch in der Schweiz verändern. Zu den indirekten Effekten gehören zum Beispiel ein höheres Waldbrand-Risiko und häufigere Massenvermehrungen von Borkenkäfern (Temperli et al. 2013).

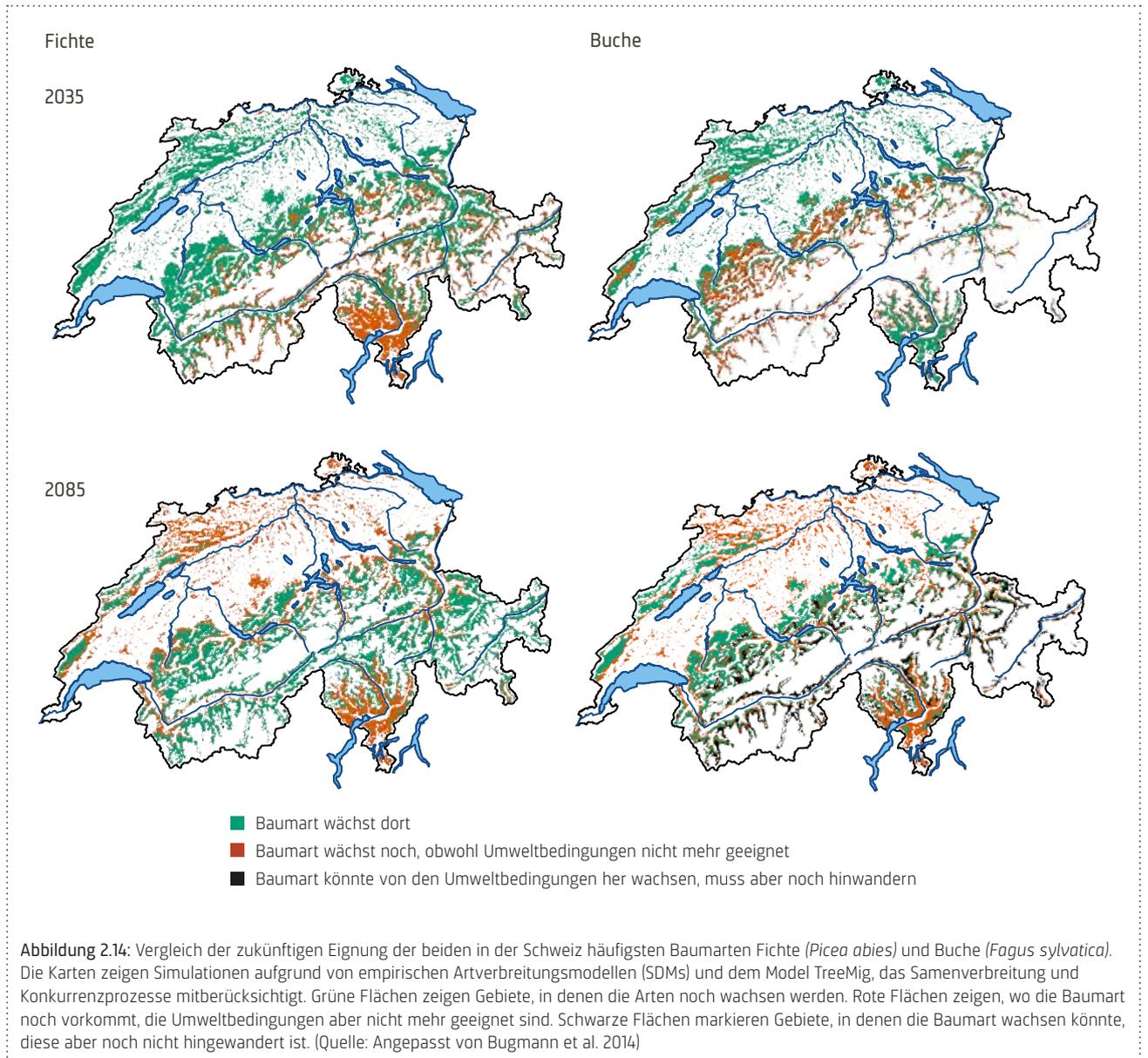
### Verletzlichkeit der Wälder

#### Schleichende Veränderungen

Die potenziellen Verbreitungsgebiete der Baumarten in der Schweiz werden sich langfristig verändern, doch bestehen nach wie vor grosse Unsicherheiten in der Abschätzung der Veränderungen (Abb. 2.14) (Bugmann et al. 2014; Bircher et al. 2015; WSL 2015). Die tatsächlichen Veränderungen werden langsam ablaufen und mit Verzögerung eintreten, denn auch unter ungünstigen Bedingungen können Baumbestände bei verringerter Produktivität lange überdauern (Elkin et al. 2013).

In der montanen Stufe der Alpen gibt es Hinweise, dass Laubbäume wie Eiche, Buche, Ahorn und Linde deutlich oberhalb der bisherigen Verbreitungsgrenze durch reichlichen Jungwuchs vertreten sind (Vitasse et al. 2012). Falls sich die Jungbäume langfristig behaupten, könnte dies eine Reaktion auf die Erwärmung des Klimasystems sein, die in der Schweiz mit rund 1,5 Grad Celsius seit den 1970er-Jahren weit über dem globalen Durchschnitt von 0,7 Grad Celsius liegt.

Die wärmeren Bedingungen führen auch dazu, dass in höheren Lagen die Bäume besser wachsen und der Wald sich gegen oben ausbreitet. Dieses klimabedingte Höherwandern von Baumarten findet aber nur langsam statt: Die Änderung der Landnutzung durch den Rückzug der Menschen aus der Alpwirtschaft wirkt sich derzeit noch stärker auf die Wälder aus als die Klimaänderung (Gehrig-Fasel et al. 2007; Küchler et al. 2014). Markanter Ausdruck dieser sozioökonomischen Entwicklung ist die vielerorts



zu beobachtende Verbuschung auf ehemaligem Weideland im Alpenraum (zwischen 1400 und 2200 Metern Höhe), vornehmlich durch Grünerlen, in höheren Lagen auch durch Zwergsträucher (Bühlmann et al. 2014). Diese Verbuschung verzögert die natürliche Wiederbewaldung dieser im Mittelalter gerodeten Flächen.

Natürlich reagieren nicht nur die Bäume auf die schleichenden Veränderungen, sondern sämtliche biotischen Elemente der Ökosysteme, so auch die Insekten (vgl. Bugmann et al. 2014). Zeitpunkt und Art der Reaktion sind aber artspezifisch – die Arten reagieren früher oder später, langsam oder schnell, linear oder erst nach Überschreiten von Schwellenwerten. Davon betroffen sind nicht nur die

einheimischen Arten, sondern auch die vermehrt einwandernden Tiere und Pflanzen. Da diese oft aus wärmeren Gebieten stammen, steigen nun ihre Überlebenschancen und sie können sich vermehrt in unseren Ökosystemen behaupten (Rigling & Schaffer 2015).

### Extremereignisse

Ein weiterer Grund für die Verzögerungen des klimatisch bedingten Anstiegs der alpinen Waldgrenze ist, dass die Verjüngung der Waldbäume in hohen Lagen eine Sequenz von klimatisch besonders günstigen Jahren benötigt (z. B. Hagedorn et al. 2014). Extremjahre wie zum Beispiel der

Hitzesommer 2003 (ProClim 2005; Rebetez et al. 2006) hatten in den Hochlagen einen stimulierenden Effekt auf das Baumwachstum, während im Mittelland viele Wälder deutliche Wachstumseinbussen verzeichneten (Jolly et al. 2005). Die Auswirkung extremer Trockenjahre variiert also je nach Standort und wirkt auch unterschiedlich auf die Baumarten. So zeigen Befunde aus Trockenregionen wie zum Beispiel den südwestlichen USA, dem Mittelmeerraum und inneralpinen Trockentälern, dass wiederholte Trockenjahre zu Baumsterben führen, was die Artenzusammensetzung langfristig verändern kann. In der Schweiz leidet die Waldföhre auf den Trockenstandorten im Wallis zunehmend unter der Trockenheit, während sich die Flaumeiche dort robust zeigt und sich ausbreitet (Rigling et al. 2013; Mina et al. 2016). Auch in tiefen ausseralpinen Lagen zeigt sich, dass Eichen mit Trockenperioden besser zurechtkommen als Rotbuche, Hagebuche, Kirsche und Linde (Leuzinger et al. 2005; Scherrer et al. 2011).

Die Fichte – der Brotbaum der schweizerischen Waldwirtschaft und gegenwärtig der wichtigste Rohstoff für die Holzverarbeitende Industrie – wird aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre in tieferen Lagen noch stärker unter Druck geraten (Lévesque et al. 2014). Dies nicht nur wegen ihrer Empfindlichkeit auf extreme Trockenheit, sondern auch wegen der zu erwartenden Zunahme der Borkenkäferaktivität; Borkenkäfer und andere potenzielle Schadinsekten können von den wärmeren Bedingungen und einem vermehrten Auftreten von Stürmen profitieren und sich stark vermehren (Bugmann et al. 2014). Stürme führen einerseits zu einer Schwächung der Bestände und andererseits zu mehr Brutmaterial für Schadinsekten.

Bei der Abschätzung, wie sich unsere Wälder im Klimawandel entwickeln werden, gilt es also nicht nur klimatische Risiken wie schleichende Veränderungen und Extremjahre zu berücksichtigen, sondern auch die sich verändernde Anfälligkeit auf Störungen wie Windwurf, Waldbrand, Insekten- und Pilzbefall.

## Anpassung an den Klimawandel

Für die Anpassung des Waldes an den Klimawandel gibt es verschiedene Ansätze (vgl. Brang et al. 2014; Rigling & Schaffer 2015):

Einerseits ist die Widerstandsfähigkeit der Wälder gegenüber Klimaextremen und biotischen Risiken wie beispielsweise den Borkenkäfern zu erhalten respektive zu erhöhen. Dies verringert das Risiko von grossflächigen Zusammenbrüchen der Wälder und trägt zur Sicherung der wichtigen Waldleistungen bei. Es gilt daher, störungsresistente, tiefwurzelnende und dem Standort angepasste

## Bäume im urbanen Raum

Bäume sind wichtige Elemente der Grünflächen im urbanen Raum nicht nur wegen ihrer Ästhetik, sondern auch wegen ihrem kühlenden Effekt während der heissen Sommermonate (s.a. Kap. 2.13 Urbaner Raum, S. 126, Kap. 3.8 Urbane Strategien zum Klimawandel, S. 186). Bäume können dazu beitragen, den sogenannten Wärmeinseleffekt in Städten und Agglomerationen zu mindern, wie Messungen in Basel am 16. Juli 2004 gezeigt haben. An diesem heissen Sommertag war die Oberflächentemperatur der Baumvegetation in Alleen und Parks 7 bis 16 Grad Celsius kühler als diejenige von Strassen ohne Baumbestand und sogar bis 26 Grad Celsius kühler als die Temperaturen auf Dächern (Leuzinger et al. 2010). Der kühlende Effekt der Beschattung durch Bäume zeigt sich eindrücklich beim Vergleich von Wäldern und Wiesenflächen: Je wärmer es auf offenen Flächen ist, desto stärker ist der kühlende Effekt von Wäldern, insbesondere derjenige von Laub- und Mischwäldern. So konnte während der 11-tägigen Hitzeperiode im August 2003 in Wäldern im Durchschnitt eine bis 5,5 Grad Celsius tiefere Lufttemperatur nachgewiesen werden als auf offenen Flächen (Renaud & Rebetez 2009). Bäume könnten also einen wichtigen Beitrag leisten für eine Stadtentwicklung, die dem Klimawandel angepasst ist, aber auch die Lebensraumqualität verbessern und die biologische Vielfalt fördern kann.

In der Schweiz laufen aktuell zwei Pilotprojekte in Bern und in Sitten, die den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Baumvegetation in Städten untersuchen und Möglichkeiten sowie Grenzen der Bewirtschaftung von Bäumen für eine klimaangepasste Stadtentwicklung aufzeigen (BAFU 2014).

Baumarten zu fördern und die Vitalität und Stabilität der Einzelbäume zu verbessern. Dazu eignen sich zielgerichtete Durchforstungen, um die Baumartenmischung zu regulieren und den verbleibenden Bäumen mehr Ressourcen wie Wasser, Nährstoffe und Licht zur Verfügung zu stellen.

Andererseits gilt es, die Anpassungsfähigkeit der Wälder zu fördern, indem ihre genetische Vielfalt erhöht, die Vielfalt an Baumarten vergrössert und standortgerechte Baumarten – darunter auch heute seltene Baumarten – gefördert werden. Generell sollte Baumverjüngung bevorzugt werden, die zu einem Baumbestand führt, der mit den zu erwartenden Umweltbedingungen zurechtkommt.

## Wald als Kohlenstoffspeicher

Eine Möglichkeit zur Minderung des Klimawandels ist, die Wirkung der Wälder als Kohlenstoffspeicher zu op-

## Waldpolitik 2020

Mit der Waldpolitik 2020 stimmt der Bund die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald aufeinander ab. Er stellt eine nachhaltige Bewirtschaftung sicher und schafft günstige Rahmenbedingungen für eine effiziente und innovative Wald- und Holzwirtschaft. Die Waldpolitik 2020 legt insgesamt elf Ziele fest. Diese betreffen das Holznutzungspotenzial, den Klimawandel, die Schutzwaldleistung, die Biodiversität, die Waldfläche, die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Waldwirtschaft, den Waldboden (inkl. Trinkwasser und Baumvitalität), den Schutz vor Schadorganismen, das Gleichgewicht von Wald und Wild, die Freizeit- und Erholungsnutzung sowie die Bildung und Forschung (inkl. Wissenstransfer). Für jedes Ziel formuliert die Waldpolitik 2020 mehrere strategische Stossrichtungen sowie verschiedene Massnahmen. Mit den Massnahmen ist in erster Linie der Bund in der Pflicht, es werden jedoch auch die Rolle der Kantone sowie weiterer Akteure angesprochen (Waldeigentümer, Bewirtschafter, Waldfachleute, Verbände etc.). Schliesslich werden auch die rechtlichen und finanziellen Auswirkungen der Waldpolitik 2020 aufgezeigt (BAFU 2015).

timieren und zu erhöhen (IPCC 2014/WGII). Dazu kann entweder die Waldfläche vergrössert oder der Kohlenstoffvorrat pro Fläche erhöht werden. Dies sind jedoch einmalige Massnahmen, die nicht wiederholt werden können.

In der Schweiz wächst zurzeit mit grosser Geschwindigkeit Wald in Weideflächen im Berggebiet ein. Dadurch wird der Kohlenstoffspeicher im Wald dauerhaft erhöht. Diese zusätzlichen Speicher sind aber gemessen an den fossilen Emissionen der Schweiz marginal und zudem bald erschöpft. Ein höherer Kohlenstoffvorrat pro Waldfläche geht zudem einher mit mehr, älteren und höheren Bäumen. Dies erhöht das Risiko von Windwurf bei Sturmextremen markant, womit die Nettoemissionen ansteigen und der Kohlenstoffspeicher im Wald in unregelmässigen Abständen stark reduziert wird, was zu einer Kohlenstoff-Quelle führt. Es ist daher nicht sinnvoll, den Flächenvorrat gesamtschweizerisch zu erhöhen, zumal die Schweiz bereits heute den europaweit höchsten Flächenvorrat an Holz im Wald aufweist.

Eine nachhaltige und effektive Strategie ist, die verschiedenen Kohlenstoffminderungseffekte von Wald und Holz zu kombinieren. Dies ist dann der Fall, wenn die CO<sub>2</sub>-Einlagerung im Wald durch gezielte Bewirtschaftung hoch gehalten und fortwährend Holz für die Verarbeitung zu langlebigen Holzprodukten verwendet wird. Mit dem Verbauen von Holz beispielsweise in Häusern geht der im Holz eingelagerte Kohlenstoff in einen langfristigen

Speicher über, was gleichzeitig auch die Substitution von CO<sub>2</sub>-intensiven Baustoffen erlaubt.

## Herausforderungen für die Schweiz

Wälder sind langlebig und entwickeln sich sehr langsam. Im Verlaufe ihres Lebens, vom Sämling bis zum Altbaum, sind Bäume somit wiederholt vielfältigen Risiken ausgesetzt, beispielsweise extremer Trockenheit, Sturm und Krankheiten. Wälder gelten daher als empfindlich gegenüber Veränderungen ihrer Umweltbedingungen wie zum Beispiel dem Klimawandel (s. a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77). Hinzu kommen sich ändernde ökonomische Rahmenbedingungen und sich rasch wandelnde gesellschaftliche Ansprüche an den Wald. Diese Faktoren können sich negativ auf die Bereitstellung der in der Schweiz besonders vielfältigen Waldleistungen auswirken. Ein grundlegendes Prinzip, mit solchen Unsicherheiten umzugehen, ist die Risikoverteilung und -minderung. Risikoverteilung bedeutet hier Förderung der Vielfalt bei Baumarten, Waldstrukturen und genetischen Ressourcen, während eine standortangepasste Bewirtschaftung und ein allenfalls verkürztes Maximalalter der Wirtschaftswälder das Risiko von grossflächigen Waldschäden vermindern können (Rigling & Schaffer 2015). Dies erfordert aber zwangsläufig Kompromisse hinsichtlich der verschiedenen Waldleistungen. Speziell in Wirtschaftswäldern würde dies einen Paradigmenwechsel voraussetzen, indem die langfristige Minderung der Risiken prioritär gewichtet und kurzfristige Einbussen in der Holzproduktion in Kauf genommen werden müssten. Dies steht wiederum im Konflikt mit der aktuell schwierigen Finanzlage vieler Forstbetriebe und Waldbesitzer, die kurz- und mittelfristig auf Einkünfte aus dem Holzverkauf angewiesen sind.

## Referenzen

- BAFU (2014) **Pilotprojekte zur Anpassung an den Klimawandel: Cluster «Klimaangepasste Stadt- und Siedlungsentwicklung»**. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2015) **Waldpolitik 2020**. [www.bafu.admin.ch/wald](http://www.bafu.admin.ch/wald)
- Bircher N, Cailleret M, Bugmann H (2015) **The agony of choice: different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics**. *Ecological Applications* 25: 1303–1318.
- Brang P, Spathelf P, Larson JB, Boncina A, Chauvin C, Drössler L, Garcia-Güemes C, Heiri C, Kerr G, Lexer MJ, Mason B, Mohren F, Mühlethaler U, Nocentini S, Svoboda M (2014) **Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change**. *Forestry* 87: 492–503.
- Bugmann H, Brang P, Elkin C, Henne P, Jakoby O, Lévesque M, Lischke H, Psomas A, Rigling A, Wermelinger B, Zimmermann NE (2014) **Climate change impacts on tree species, forest properties, and ecosystem services**. In: CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland: 79–88.
- Bühlmann T, Hiltbrunner E, Körner C (2014) **Alnus viridis expansion contributes to excess reactive nitrogen release, reduces biodiversity and constrains forest succession**. *Alpine Botany* 124: 187–191.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Elkin C, Gutierrez AG, Leuzinger S, Manusch C, Temperli C, Rasche L, Bugmann H (2013) **A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps**. *Global Change Biology* 19: 1827–1840.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE (2007) **Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment?** *Journal of Vegetation Science* 18: 571–582.
- Hagedorn F, Shiyatov FG, Mazepa VS, Devi NM, Grygoriev AA, Bartyish AA, Fomin V, Kapralov D, Terentiev M, Bugman H, Rigling A, Moiseev PA (2014) **Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions?** *Global Change Biology* 20: 3530–3543.
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps**. *Geophysical Research Letters* 32: L18409.
- Körner C (2012) **Alpine treelines**. Springer, Basel.
- Küchler M, Küchler H, Bedolla A, Wohlgemuth T (2014) **Response of Swiss forests to management and climate change in the last 60 years**. *Annals of Forest Science* 72: 311–320.
- Leuzinger S, Zotz G, Asshoff R, Körner C (2005) **Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe**. *Tree Physiology* 25: 641–650.
- Leuzinger S, Vogt R, Körner C (2010) **Tree surface temperature in an urban environment**. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 56–62.
- Lévesque M, Rigling A, Bugmann H, Weber P, Brang P (2014) **Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe**. *Agricultural and Forest Meteorology* 197: 1–12.
- Mina M, Martin-Benito D, Bugmann H, Cailleret M (2016) **Forward modeling of tree-ring width improves simulation of forest growth responses to drought**. *Agricultural and Forest Meteorology* 221: 13–33.
- ProClim (ed.) (2005) **Hitzesommer 2003**. Synthesebericht. Bern, 28 pp.
- Rebetez M, Mayer H, Dupont O, Schindler D, Gartner K, Kropp J, Menzel A, (2006) **Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis**. *Annals of Forest Science* 63: 569–577.
- Renaud V, Rebetez M (2009) **Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer 2003**. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 873–880.
- Rigling A, Bigler C, Eilmann B, Mayer P, Ginzler C, Vacchiano G, Weber P, Wohlgemuth T, Zweifel R, Dobbertin M (2013) **Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests**. *Global Change Biology* 19: 229–240.
- Rigling A, Schaffer HP (eds.) (2015) **Forest Report 2015. Condition and Use of Swiss Forests**. Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape (WSL), Birmensdorf, 143 pp.
- Scherrer D, Bader MKF, Körner C (2011) **Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies**. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1632–1640.
- Temperli C, Bugmann H, Elkin C (2013) **Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: a landscape modeling approach**. *Ecological Monographs* 83: 383–402.
- Vitasse Y, Hoch G, Randin CF, Lenz A, Kollas C, Körner C (2012) **Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps**. *Journal of Biogeography* 39: 1439–1449.
- WSL (2015) **PorTree – A portrait of Central European tree species for Switzerland**. [www.wsl.ch/lud/portree](http://www.wsl.ch/lud/portree)

## 2.10 Landwirtschaft

Mit dem Klimawandel steigt in der Landwirtschaft das Risiko von Ernteausfällen in wichtigen Produktionsgebieten, mit negativen Folgen für die Ernährungssicherheit der Bevölkerung in ärmeren Ländern. In der Schweiz werden kurzfristig sowohl positive wie negative Wirkungen auf die Erträge erwartet, längerfristig steigt aber auch hier das Risiko von Einbussen durch Hitze und Trockenheit.

Jürg Fuhrer (*Agroscope*)

### Globale und nationale Situation

Das Produktionspotenzial in der Landwirtschaft wird massgeblich durch das durchschnittliche lokale und regionale Temperatur- und Niederschlagsregime bestimmt. Zudem unterliegt die aktuelle Produktion den Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der Witterung. Es ist aber schwierig, Trends und Variabilität der Erträge ursächlich einzelnen Klimagrössen zuzuordnen; einerseits sind die Erträge zahlreichen Einflussfaktoren ausgesetzt, hauptsächlich jenen der Bewirtschaftung, andererseits stehen meist nur zeitlich begrenzte Datenreihen zur Verfügung. Die Verbindung zwischen Klimadaten und Erträgen kann allerdings mit Hilfe statistischer oder mechanistischer Modelle indirekt analysiert werden.

### Weltweit sinkende Erträge

Im Vergleich zu früheren Berechnungen (Vierter IPCC-Sachstandsbericht) liefern die jüngsten Modellstudien gemäss des Fünften IPCC-Sachstandsberichts deutlichere Hinweise auf tiefere Erträge infolge der erfolgten Klimaänderung in den meisten Anbaugebieten – mit Ausnahme einiger nördlich gelegenen Regionen. Dies gilt besonders für Weizen und Mais, in geringerem Ausmass auch für Reis. Das bedeutet, dass der Anstieg der Temperatur während der letzten Jahrzehnte, allenfalls in Kombination mit Wassermangel, bereits ertragsmindernd gewirkt hat, und dass die negativen Wirkungen auf den Ertrag gegenüber den positiven heute überwiegen. Konkret ist dies der Fall beim Anbau von Mais in China und Brasilien oder beim Weizen in Indien, Russland und Frankreich (Lobell et al. 2011). Zudem kann global ein Drittel der jährlichen Ertragsschwankungen während der letzten Jahrzehnte statistisch mit Schwankungen im Klima erklärt werden, in einigen wichtigen Produktionsgebieten wie im mittleren Westen der USA, in Australien oder in Maisanbaugebieten Chinas sogar über 60 Prozent (Ray et al. 2015).

Hitzewellen und Dürreperioden in wichtigen Produktionsregionen führten zu kurzfristigen Ertragseinbrüchen, welche die Nahrungsmittelversorgung unter anderem

in Teilen Asiens und Afrikas beeinträchtigten. Dies geschah jüngst bei der Produktion von Weizen und Reis in Russland, den USA und Australien. Gepaart mit anderen Faktoren, wie der Zunahme der Biotreibstoffproduktion, trugen solche Ereignisse zu einem Anstieg der Nahrungsmittelpreise auf dem Weltmarkt bei, und erschwerten so der Bevölkerung in ärmeren Importländern den Zugang zu Grundnahrungsmitteln (Willemböckel 2012). Im Gegenzug konnten die Produzenten von höheren Preisen profitieren.

### Schweiz: Einfluss politischer Entscheide war bisher grösser als jener des Klimawandels

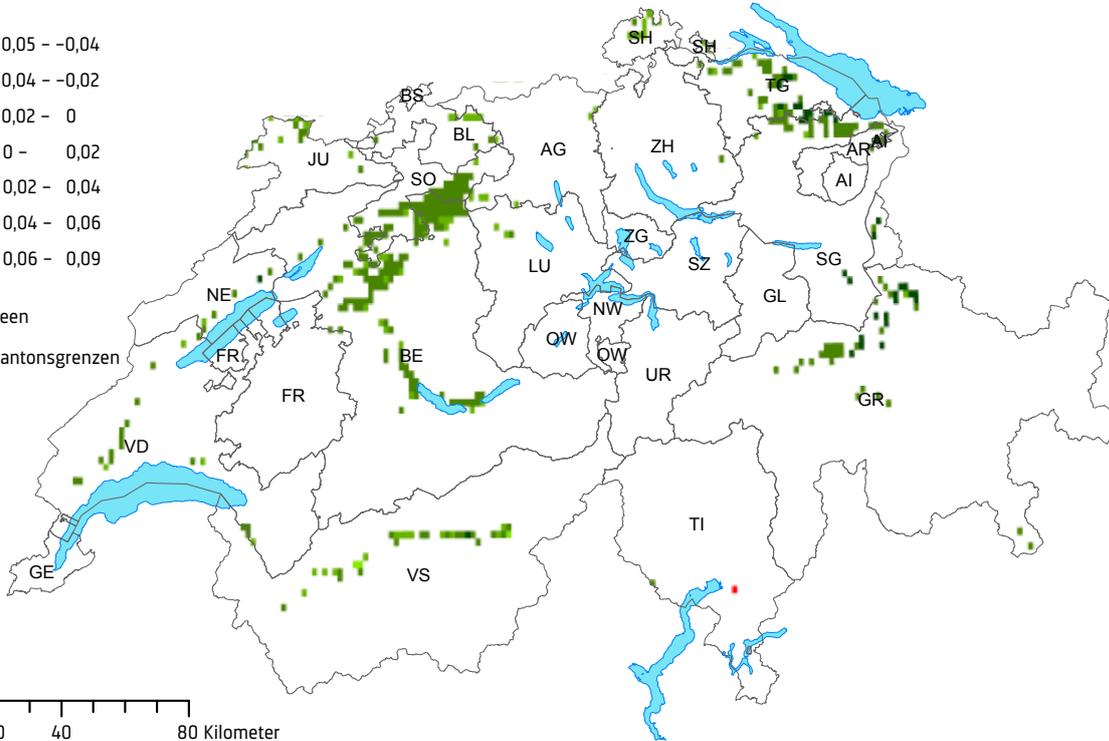
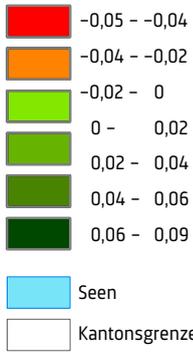
In der Schweiz ist ein Einfluss des Temperaturanstiegs seit 1980 auf die Erträge von Ackerkulturen kaum feststellbar. Die Modellierung der Klimateignung für den Anbau einzelner Kulturen lässt allerdings erkennen, dass sich die Bedingungen von 1980 bis 2010 in verschiedenen Regionen für Mais tendenziell verbessert, jene für Winterweizen verschlechtert haben (Abb. 2.15). Auch die Klima-

### Welternährung

Die globale Nahrungsmittelproduktion basiert auf einer beschränkten Vielfalt von rund 150 Pflanzenarten. Davon liefern zwölf Sorten rund Dreiviertel der konsumierten Nahrungsmittel. Lediglich drei Sorten liefern über die Hälfte des Energiebedarfs: Mais, Weizen und Reis. Weitere 25 Prozent tragen Sorghum- und Millethirsens, Kartoffel, Süsskartoffel, Soja und Zuckerrohr bei. Von der gesamten Produktion von Ackerkulturen dienen heute 62 Prozent der menschlichen Ernährung, 35 Prozent der Tierernährung und drei Prozent der Produktion von Energie und anderen industriellen Produkten.

Im Jahr 2050 werden mehr als neun Milliarden Menschen auf der Welt leben. Sie werden mehr Nahrung brauchen und mit wachsendem Wohlstand mehr Fleisch und Milchprodukte konsumieren, deren Produktion im Vergleich zur Pflanzenproduktion deutlich mehr Ressourcen verbraucht.

**Dekadische Änderungen der Klimaeignung für den Anbau von Körnermais**



**Dekadische Änderungen der Klimaeignung für den Anbau von Winterweizen**

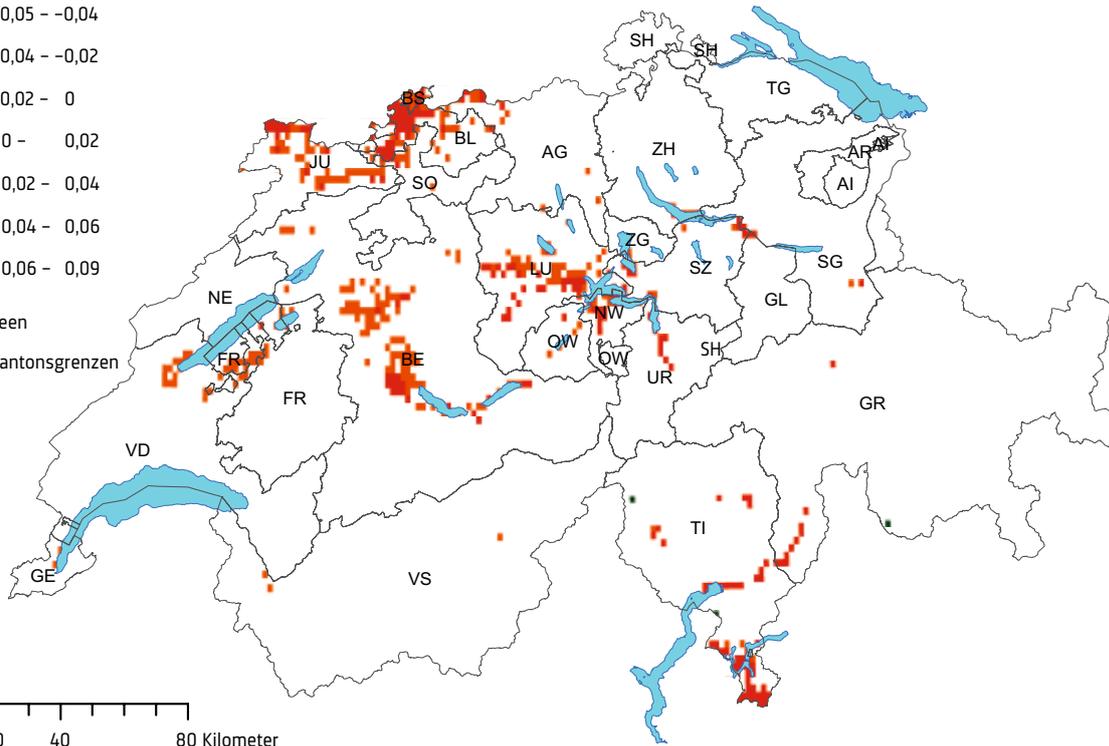
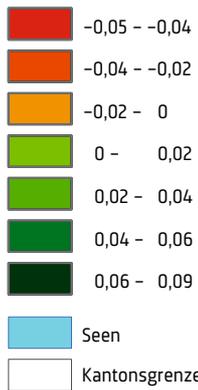
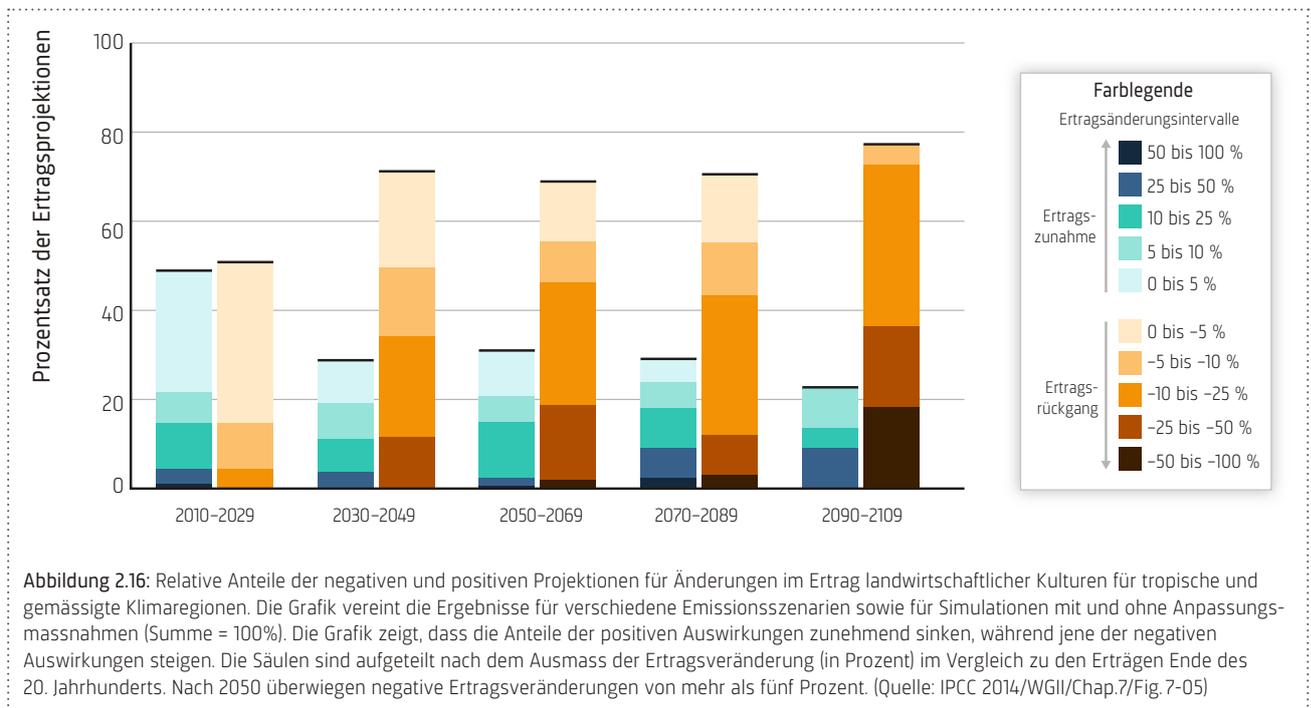


Abbildung 2.15: Änderung im Index der Klimaeignung für Mais (a) und Weizen (b) in Gebieten mit einem signifikanten Trend von 1983 bis 2010. (Quelle: Holzkämper et al. 2014)



eignung für den Rebbau hat sich in den letzten 30 Jahren verbessert und besonders anspruchsvolle Traubensorten profitierten von steigenden Temperaturen (Holzkämper et al. 2013). Im Gegensatz zum Einfluss des Klimawandels ist die Wirkung politischer Entscheide auf die Getreideerträge deutlicher erkennbar, zum Beispiel jene der Einführung der ökologischen Direktzahlungen (Finger 2010).

Hierzulande führten Jahre mit extremer Witterung in der jüngeren Vergangenheit nur bedingt zu spürbaren Veränderungen im Angebot und bei den Produktpreisen. Höhere Preise ergaben sich am ehesten bei regionalen Produkten, zum Beispiel beim Gemüse. Produktionsausfälle wie 2003 wurden teils durch zusätzliche Importe und Importerleichterungen kompensiert (Aussetzung der Zölle beim Tierfutter); in Härtefällen wurden Betriebshilfedarlehen zur Verfügung gestellt. Die Direktzahlungen des Bundes puffern zudem für Ackerbaubetriebe die Schwankungen im Betriebserfolg ab (Lehmann et al. 2013).

## Verletzlichkeit

### Künftige Veränderungen

Die weitere Entwicklung der klimabedingten Änderungen in der globalen Agrarproduktion wurde anhand der Kombination von Produktionsmodellen und regionalen Klimaprojektionen abgeschätzt. Die Ergebnisse unterliegen den Unsicherheiten im Emissions- und Klimaverlauf, in den agrartechnischen Entwicklungen sowie in den Mo-

dellen (Rosenzweig et al. 2014). Für die nächsten Jahrzehnte (2010–2029) zeigt die überwiegende Mehrzahl der Studien, dass sich die positiven und negativen Ertrags-trends in etwa die Waage halten (Abb. 2.16). Mittelfristig (Jahre 2046–2065) werden bei ungebremster Emissionsentwicklung (RCP8.5) die negativen Wirkungen in zahlreichen temperierten Regionen der mittleren Breiten und besonders in tropischen Klimaregionen deutlich zunehmen, während für nördliche Breiten weiter positive Auswirkungen erwartet werden. Gegen Ende des Jahrhunderts überwiegen die negativen Ertragsprojektionen deutlich.

In der Schweiz dürfte sich im selben Zeithorizont die Erwärmung weiter positiv auf den Anbau von Mais auswirken, sofern Trockenheit nicht häufiger und auf einer grösser werdenden Fläche ertragslimitierend wirkt. Ebenso positiv entwickelt sich die Klimaeignung für den Rebbau (Holzkämper et al. 2013). Eher negativ wird sich diese Erwärmung auf andere Kulturen wie Winterweizen oder Kartoffeln auswirken. Mit der fortschreitenden Erwärmung dürfte auch der Schädlingsdruck zunehmen. Dieses Risiko wurde bisher noch wenig untersucht. Erste Ergebnisse für den Apfelwickler zeigen jedoch, dass in Zukunft in allen Gebieten jährlich mit zwei bis drei statt wie heute ein bis zwei Folgegenerationen gerechnet werden muss (Hirschi et al. 2012). Zudem wird die Kältebarriere am Alpenkamm schmaler und für invasive Arten besser überwindbar, wie am Beispiel der Wallnussfruchtfliege gezeigt wurde (Aluja et al. 2011).

Der Klimawandel betrifft auch die Tierproduktion. Diesem Bereich wurde im Gegensatz zur Pflanzenproduktion in den bisherigen Untersuchungen deutlich weniger Beachtung geschenkt. Dies obwohl bedeutende negative Auswirkungen auf Futterproduktion, Tiergesundheit sowie Menge und Qualität der tierischen Produkte erwartet werden (IPCC 2014/WGII/Chap.7). In der Schweiz, mit einem bedeutenden Anteil an Grünland und einem hohen Wert der Fleisch- und Milchproduktion, müssen die Risiken bedingt durch zunehmenden Hitzestress bei Nutztieren vermehrt beachtet werden (Fuhrer & Calanca 2012). Mit der Erwärmung verlängert sich zwar die Vegetationsperiode, was sich positiv auf die Raufutterproduktion und die Wiesenbewirtschaftung auswirkt, sofern in Trockenperioden ausreichend Bewässerung verfügbar ist (Calanca & Fuhrer 2005). Die Tiere müssen aber vorsorglich vor Hitzestress und Wassermangel geschützt werden, um das Risiko von Leistungseinbussen, Krankheiten oder sogar erhöhter Mortalität zu mindern.

### Extreme wirken sich auf Weltagrarhandel aus

Mit fortschreitendem Klimawandel werden weltweit negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft überhand nehmen und die Ertragsstabilität sinken. Die im Zuge des Klimawandels auftretenden Temperaturextreme dürften häufiger über der physiologischen Toleranzgrenze der meisten Ackerkulturen zu liegen kommen. Damit könnte ein für eine ausreichende weltweite Agrarproduktion kritisches Mass der Klimaänderung erreicht werden. Tiefere und stärker schwankende Erträge in den Hauptproduktionsländern führen trotz wirtschaftlicher Anpassungseffekte zu höheren Weltmarktpreisen (Nelson et al. 2014) und zu stärkeren Preisschwankungen (Calzadilla et al. 2013). In Kombination mit global ändernden Ansprüchen an die Nahrungsmittelverfügbarkeit und -qualität (u. a. mehr tierisches Eiweiss) wird die Ernährungssicherheit für mehr Menschen gefährdet. Sofern die Agrarproduktion wegen des Klimawandels weiter sinkt und die jährlichen Schwankungen zunehmen, würde die Zahl der unterernährten Menschen bis 2050 deutlich steigen (WHO 2014). In vielen Gebieten würde dies den laufenden Anstrengungen zur Verbesserung der Ernährungssituation entgegenwirken. Betroffen wären insbesondere Kinder in Regionen Afrikas und Südasiens (Brown 2014). Zudem wird erwartet, dass die Qualität der Diät vieler Menschen durch den Klimawandel verschlechtert wird und dadurch die Zahl von ernährungsbedingten Todesfällen in vielen Regionen bis 2050 ansteigen wird (Springmann et al. 2016).

Besonders schwierig würde die Situation nach 2050 bei ungebremster Emissionsentwicklung (RCP8.5) mit einer Erwärmung von durchschnittlich vier Grad Celsius bis

Ende Jahrhundert, verbunden mit häufigen Extremen. Gleichzeitig wird der Bedarf nach tierischen Produkten weltweit weiter steigen, besonders in Schwellenländern mit einem starken Bevölkerungswachstum und steigenden Ansprüchen an die Qualität der Lebensmittel.

### Anpassung

Massnahmen zur Anpassung können den negativen Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels in beschränktem Mass entgegen wirken und helfen, positive Auswirkungen zu nutzen. Mögliche Massnahmen der ackerbaulichen Praxis sind unter anderem (s. a. Fuhrer & Gregory 2014):

- Züchtung und Einsatz von Sorten für ein breites Spektrum von Nutzpflanzen mit höherer Temperatur-, Trockenheits- und Schädlingstoleranz,
- verschieben der Zeiträume für den Anbau,
- zusätzliche Bewässerung im Rahmen einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung,
- schonende Bodenbearbeitung zur Verbesserung des Bodenwasserhaushalts,
- Einführung von Agroforstsystemen, das heisst einer Kombination von mehrjährigen Holzpflanzen und landwirtschaftlichen Kulturen und
- gezielte Information zur Unterstützung der Entscheidungsfindung.

Modellrechnungen zeigen, dass mit solchen Massnahmen, angepasst an die lokalen Bedingungen und Bedürfnisse, klimabedingte Ertragseinbussen reduziert werden können (Challinor et al. 2014). Viele Anpassungsmassnahmen haben generellen Charakter und spielen sowohl im Ausland wie in der Schweiz eine zunehmend wichtige Rolle. Wasser ist auch hierzulande eine begrenzt nutzbare Ressource. Bei steigendem Bedarf nach Wasser durch ein wärmeres und trockeneres Klima wird der schonende Umgang durch den Einsatz effizienter Technik und ein angepasstes Betriebsmanagement wichtiger (Fuhrer et al. 2013). Gleichzeitig muss auch den Auswirkungen von zunehmenden Starkniederschlägen vorgebeugt werden. Deshalb sind Massnahmen wie unter anderem eine schonende Bodenbearbeitung zur Verhinderung von Bodenabtrag nötig.

Anpassungen der Produktionssysteme können laufend und regional oder lokal priorisiert realisiert werden. Sie erfolgen entweder innerhalb der existierenden Strukturen oder in Form von tiefgreifenden Systemänderungen. Letztere schliessen eine stärkere Diversifizierung der bäuerlichen Betriebe und die Verschiebung von Anbauzonen ein. Um der zunehmenden Schwankungen von Produktion und Preisen entgegenzuwirken, sind verschiedene Massnahmen wichtig: Vergrösserung der Reserven, Diversifi-

zierung der Produktion, Anpassungen bei der Lagerung und Verteilung der Grundnahrungsmittel sowie ein verbesserter Versicherungsschutz der Produzenten.

Wie hoch das Potenzial zur Vermeidung negativer Auswirkungen des Klimawandels letztlich ist, bleibt unsicher. Es könnte deutlich höher liegen als aufgrund des heutigen Sachstandes angenommen wird. In wirtschaftlich schwächeren Regionen der Welt kommt der Erhöhung der Anpassungsfähigkeit besondere Bedeutung zu; sie bedingt Verbesserungen bei Wissenstransfer, Investitionen, verbesserte politische und soziale Strukturen und einen vereinfachten Marktzugang.

In der Schweiz sind die Möglichkeiten für eine Anpassung vergleichsweise gross und Massnahmen in der Landwirtschaft können durch Anreizsysteme, Auflagen für Direktzahlungen oder über die Preispolitik gesteuert werden. Zunehmend wird die Frage eines Versicherungsschutzes gegenüber Witterungsrisiken diskutiert. Die Grundlagen für index-basierte Versicherungen gegen Schäden durch Trockenheit wurden erarbeitet (Kapphan et al. 2012) und erste Versicherungsprodukte sind am Entstehen (Schweizer Hagel 2016). Zudem wird der Ausbau der Bewässerung durch eine effiziente Infrastruktur in einzelnen Regionen geplant, zum Beispiel im Berner Seeland. Dazu gehören verlustarme Bewässerungsnetze mit Anschluss an ausgiebige Reservoirs wie grössere Flüsse und Seen, die Steuerung der Bewässerungsmenge, so dass sie dem tatsächlichen Bedarf entspricht sowie eine bodennahe Wasserverteilung zum Beispiel durch Tropfbewässerung.

## Herausforderungen für die Schweiz

In der Schweiz wurden 2012 bezogen auf die Energiemenge netto<sup>1</sup> rund 55 Prozent des inländischen Bedarfs im Land selbst produziert. Dies ist im Vergleich mit der EU ein tiefer Selbstversorgungsgrad. Die Schweiz importiert hauptsächlich pflanzliche Produkte wie Früchte, Gemüse, Getreide und Fette und dies zumeist aus EU-Ländern. Mit der wachsenden inländischen Bevölkerungszahl nimmt der Nahrungsbedarf zu, was bedeutet, dass zum Erhalt des Netto-Selbstversorgungsgrades bei abnehmender Landwirtschaftsfläche künftig eine Steigerung der Produktivität nötig sein wird. Andernfalls nimmt die Abhängigkeit von Nahrungs- und Futtermittelimporten aus dem Ausland weiter zu und damit auch der Einfluss von Preisschwankungen auf den internationalen Agrarmärkten. Die Herausforderung besteht darin, diese Steigerung unter Schonung der natürlichen Grundlagen (Boden, Wasser, Luft und Klima) und der biologischen Vielfalt zu

realisieren, und gleichzeitig die negativen wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels abzufedern sowie neue Möglichkeiten zu nutzen. Besonders hoch ist die Treibhausgasemission der tierischen Produkte (Fleisch und Molkereierzeugnisse), mit einem im Vergleich zu den pflanzlichen Produkten in der Schweiz geringen Importanteil (Bretscher et al. 2014). Eine Umstellung hin zu einer zunehmend vegetarisch orientierten Ernährung wäre daher für die Schweiz günstig.

Eine zentrale Aufgabe wird die künftige Bewirtschaftung der Ressource Wasser sein.<sup>2</sup> Bereits heute ist im Mittelland, im Tessin und in inneralpinen Tallagen Bewässerung nötig (Fuhrer & Jasper 2009). In vielen voralpinen Einzugsgebieten werden die sommerlichen Abflüsse zurückgehen (Köplin et al. 2012; Fuhrer & Calanca 2014) (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84). Bei einem steigenden Bedarf an Bewässerung zur Sicherung von Ertrag und Qualität bei Acker- und Spezialkulturen (Obst- und Rebbau) sowie im Futterbau entsteht vermehrt Konkurrenz mit anderen Wassernutzern um ein knapper werdendes Wasserdargebot (Lanz et al. 2014). Möglichkeiten, den Bedarf nach Bewässerung zu mindern, sind nebst der Verbesserung der Bewässerungseffizienz auch Verschiebungen im Mix der angebauten Kulturen hin zu mehr Winterkulturen wie Winterraps oder -gerste und eine Bodenbearbeitung, welche die Bodenstruktur schont und die Wasserrückhaltung fördert.

Aber auch die Organisation der Kulturlandschaft muss überdacht werden: Anspruchsvolle Kulturen sollten dort angebaut werden, wo die Bedingungen in Bezug auf Klima- und Bodeneignung sowie Zugang zu nachhaltig nutzbaren Wasserressourcen günstig sind. Zudem können Landwirtschaftsbetriebe aufgrund von Änderungen im Wasserpreis oder durch die Einführung von Entnahmekontingenten dazu gebracht werden, Massnahmen zur Minderung ihres Wasserverbrauchs zu ergreifen, womit künftig die Übernutzung der Gewässer und einige mit einer intensiven Bewässerung verbundenen Umweltwirkungen verhindert werden, ohne dass dadurch der Betriebserfolg wesentlich geschmälert wird (Fuhrer et al. 2013).

<sup>1</sup> Netto bedeutet hier, dass nur jener Anteil der Inlandproduktion berücksichtigt wird, der mit inländischen Futtermitteln produziert wurde.

<sup>2</sup> Siehe auch [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)

## Referenzen

- Aluja M, Guillén L, Rull R, Höhn H, Frey J, Graf B, Samietz J (2011) **Is the alpine divide becoming more permeable to biological invasions? – Insights on the invasion and establishment of the Walnut Husk Fly, *Rhagoletis completa* (Diptera: Tephritidae) in Switzerland.** Bulletin of Entomological Research 101: 451–465.
- Bretscher D, Leuthold-Stärfl S, Felder D, Fuhrer J (2014) **Treibhausgasemissionen aus der schweizerischen Land- und Ernährungswirtschaft.** Agrarforschung Schweiz 5: 458–465.
- Brown ME (2014) **Food Security, Food Prices and Climate Variability.** Routledge, New York.
- Calzadilla A, Rehdanz K, Betts R, Falloon P, Wiltshire A, Tol RSJ (2013) **Climate change impacts on global agriculture.** Climatic Change 120: 357–374.
- Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) **A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation.** Nature Climate Change 4: 287–291.
- Finger R (2010) **Evidence of slowing yield growth – the example of Swiss cereal yields.** Food Policy 35: 175–182.
- Fuhrer J, Calanca P (2012) **Klimawandel beeinflusst das Tierwohl bei Milchkühen.** Agrarforschung Schweiz 3: 132–139.
- Fuhrer J, Calanca P (2014) **Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse.** Agrarforschung Schweiz 5: 256–263.
- Fuhrer J, Gregory PJ (eds.) (2014) **Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems.** CABI Climate Change Series.
- Fuhrer J, Jasper K (2009) **Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima.** Agrarforschung Schweiz 16: 396–401.
- Fuhrer J, Tendall D, Klein T, Lehmann N, Holzkämper A (2013) **Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change.** ART Schriftenreihe 19: 56.
- Hirschi M, Stoeckli S, Dubrovsky M, Spirig C, Calanca P, Rotach MW, Fischer AM, Duffy B, Samietz J (2012) **Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland.** Earth System Dynamics 3: 33–47.
- Holzkämper A, Fossati D, Hiltbrunner J, Fuhrer J (2014) **Spatial and temporal trends in agroclimatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland.** Regional Environmental Change 15: 109–122.
- Holzkämper A, Fuhrer J, Frei C (2013) **Temperaturtrends und Rebbau in der Schweiz.** Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau 149: 6–9.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 7 «Food security and food production systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kapphan I, Calanca P, Holzkämper A (2012) **Climate change, weather insurance design and hedging effectiveness.** The Geneva Papers 37: 286–317.
- Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R (2012) **Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types.** Hydrology and Earth System Sciences 16: 2267–2283.
- Lanz K, Fuhrer J, Haerberli W, Stamm C (2014) **Steigender Nutzungsdruck im Wasserschloss.** Aqua & Gas 11: 24–29.
- Lehmann N, Briner S, Finger R (2013) **The impact of climate and price risks on agricultural land use and crop management decisions.** Land Use Policy 35: 119–130.
- Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) **Climate trends and global crop production since 1980.** Science 333: 616–620.
- Nelson GC, Valin H, Sands RD, Havlík P, Ahammad H, Deryng D, Elliott J, Fujimori S, Hasegawa T, Heyhoe E, Kyle P, Lampe von M, Lotze-Campen, Mason d’Croz, van Meijl H, van der Mensbrugge D, Müller C, Popp A, Robertson R, Robinson S, Schmid E, Schmitz C, Tabeau A, Willenbockel D (2014) **Climate change effects on agriculture: economic responses to biophysical shocks.** PNAS 111: 3274–3279.
- Ray DK, Gerber JS, MacDonald GK, West PC (2015) **Climate variation explains a third of global crop yield variability.** Nature Communications 6: 5989.
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Boote KJ, Folberth C, Glotter M, Khabarov N, Neumann K, Piontek F, Pugh TAM, Schmid E, Stehfest E, Yang H, Jones JW (2014) **Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison.** PNAS 111: 3268–3273.
- Schweizer Hagel (2016) **Produkte: Die APV+.** [www.hagel.ch/de/produkte/apv](http://www.hagel.ch/de/produkte/apv)
- Springmann M, Mason-D’Croz D, Robinson S, Garnett T, Godfray HCJ, Douglas G, Rayner M, Ballon P, Scarborough P (2016) **Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study.** The Lancet 387: 1937–1946.
- WHO (2014) **Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s.** Geneva: World Health Organization, 128 pp.
- Willenbockel D (2012) **Extreme weather events and crop price spikes in a changing climate.** Oxfam Research Reports, September 2012.

## 2.11 Tourismus

Der Klimawandel führt bereits heute zu einer Verschlechterung der Schneebedingungen im Winter. Darunter leidet auch der Schweizer Tourismus, insbesondere die Wintersportgebiete unterhalb von 2000 Metern. Das steigende Naturgefahrenpotenzial und Landschaftsveränderungen erhöhen die Verletzlichkeit des Schweizer Tourismus und können im Schadensfall hohe direkte und indirekte Kosten verursachen. Chancen ergeben sich für den Schweizer Tourismus unter anderem durch die Verlängerung der Sommersaison in den Frühling und Herbst hinein. Insgesamt wird sich der Tourismus in der Schweiz in verschiedenen Bereichen und Regionen anpassen müssen; insbesondere sind neue und erweiterte Angebote gefragt, die unabhängig von Schnee sind. Oberste Priorität haben jedoch Anpassungsmassnahmen, um mögliches Schadenspotenzial zu minimieren.

*Martine Rebetez (Universität Neuenburg und WSL), Therese Lehmann Friedli (Universität Bern)*

### Globale und nationale Situation

Im Bereich des Tourismus sind global gesehen der Küstentourismus, der ländliche/alpine Tourismus und der Skitourismus vom Klimawandel am stärksten betroffen. Im Winter führt die Klimaänderung bereits heute zu einer Verschlechterung der Schneebedingungen in tieferen Lagen und allgemein im Norden: in Kanada, Skandinavien und im europäischen Alpenraum einschliesslich der Schweiz (IPCC 2014/WGII). Verlierer im Alpenraum sind insbesondere Wintersportgebiete unterhalb 2000 Meter über Meer.

Soll die Schneesicherheit<sup>1</sup> in diesen Regionen aufrechterhalten werden, müssen hohe Summen in die technische Beschneidung investiert werden, die ihrerseits mit einem hohen Ressourcenverbrauch (Energie, Wasser) einhergeht.

Im Sommer sind im Norden und in höheren Lagen, beispielsweise in den Schweizer Alpen, durch höhere Temperaturen positive Auswirkungen auf den Tourismus zu erwarten. In der Schweiz dürften Seenregionen und alpine Regionen von einer in den April und Mai und vor allem in den September und Oktober verlängerten Sommersaison profitieren (IPCC 2014/WGII; Perch-Nielsen et al. 2010; Serquet & Rebetez 2011). Sommerliche Trockenperioden könnten sich zudem in den höheren Lagen positiv auf touristische Outdoor-Aktivitäten auswirken.

In südlichen Tourismusregionen hingegen könnten zunehmende Hitze- und Trockenperioden im Sommer zu einem Nachfragerückgang beziehungsweise zu einer Verschiebung der Gästeströme in die Herbstmonate führen. Dies gilt insbesondere für Küstengebiete, so zum Beispiel im Mittelmeerraum.

### Verletzlichkeit

#### Schleichende Veränderungen

Schleichende Klimaänderungen stellen den Tourismussektor weltweit vor Herausforderungen, die jedoch immer wieder in den Hintergrund gedrängt werden von den Herausforderungen durch kurzfristig eintretende oder unerwartete Ereignisse anderer Ursache. Kleine Betriebe und Tourismusunternehmen nehmen den Klimawandel auf kurze Sicht als geringe Bedrohung wahr verglichen mit den anderen Geschäftsrisiken, denen sie ausgesetzt sind (IPCC 2014/WGII/Chap.9). Wenn beispielsweise die Gäste aus dem Euroraum wegen des starken Frankens nicht in die Schweiz kommen, bedroht dies viele touristische Leistungsträger in ihrer Existenz – Massnahmen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit stehen dann zuoberst auf der Agenda.

#### Wintertourismus unter Druck

Die Verletzlichkeit des Schweizer Tourismus durch den Klimawandel ist hauptsächlich in Gegenden und Jahreszeiten gross, in denen die touristischen Aktivitäten vom Schnee abhängig sind. Die Winter werden milder, was vor allem in tieferliegenden Regionen sowie zu Beginn und am Ende der Wintersaison zu einer Abnahme der natürlichen Schneesicherheit führt, und dies trotz einer tendenziellen Zunahme der Winterniederschläge (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40, Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46) (CH2014-Impacts 2014; Serquet et al. 2013; Klein et al. 2016). Dies kann dazu führen, dass sich Wintersportler vermehrt für Tagesausflüge statt Skiferien oder für höhergelegene Wintersportgebiete entscheiden, um kurzfristig auf die herrschenden Schneebedingungen reagieren zu können. Im ohnehin rückläufigen Skitourismus übt ein Rückgang des wertschöpfungsstarken Übernachtungstourismus weiteren Druck auf die Anbieter aus, da Tagestouristen weniger Wertschöpfung generieren (Lehmann 2013).

<sup>1</sup> 30 Zentimeter Schneedecke während 100 Tagen in mindestens sieben von zehn Jahren.

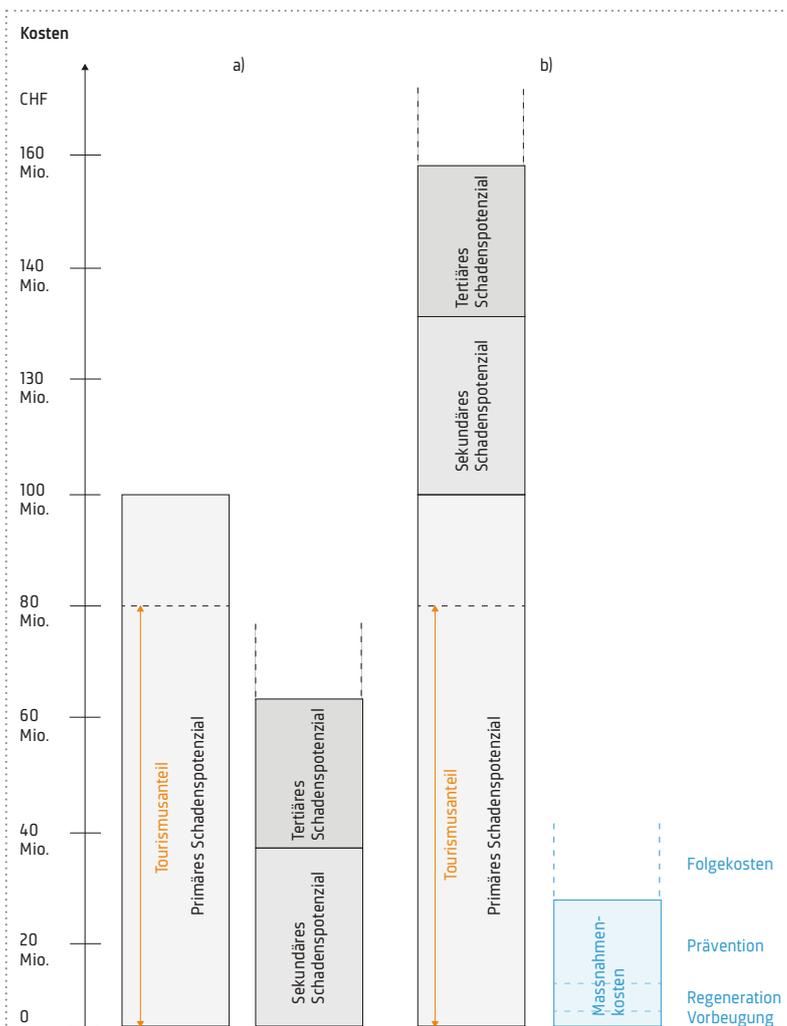


Abbildung 2.17: Kosten-Nutzen-Analyse für den Stollen Grindelwald. a) Gegenüberstellung von direktem (primärem) Schadenspotenzial wie Schäden an Gebäuden und Infrastruktur und indirektem Schadenspotenzial wie Betriebsausfälle (sekundäres Schadenspotenzial) oder Imagekosten (tertiäres Schadenspotenzial). b) Gegenüberstellung von gesamtem Schadenspotenzial und Kosten für Anpassungsmassnahmen (Bau des Stollens und weitere Massnahmen, wie die Einrichtung von Frühwarnsystemen oder die Erstellung von Evakuierungskonzepten). Die potenziellen Schadenskosten übersteigen die Anpassungsmassnahmen um ein Vielfaches. (Quelle: Lehmann & Schaub 2013)

Aufwand an technischer Beschneieung im November und Dezember einher (Steiger & Abegg 2013). Insgesamt dürften aufgrund der höheren Temperaturen die Tage, an denen eine Beschneieung möglich ist, zurückgehen (CH2014 2014).

### Landschaftsveränderungen und steigendes Naturgefahrenpotenzial erhöhen Verletzlichkeit

Die Verletzlichkeit im Tourismus wächst durch den Rückgang von Gletschern und dem Auftauen von Permafrost und als Folge davon auch durch Landschaftsveränderungen und ein steigendes Naturgefahrenpotenzial. Die Tourismusbranche muss damit rechnen, dass solche Klimafolgen – wenn auch regional sehr unterschiedlich – zu Veränderungen von touristischen Attraktionen und Aktivitäten führen.

Insbesondere im Sommer ist und bleibt die Landschaft für den Tourismus eines der wichtigsten Angebotselemente. Inwiefern sich die Attraktivität der Landschaft durch den Klimawandel verändert, ist kaum zu prognostizieren. Beispielsweise könnten neue Gletscherseen zu einer Aufwertung der Landschaft führen, hingegen die zunehmende Kargheit durch grosse Geröllfelder, die durch den Rückzug der Gletscher oder durch grossflächige Felsstürze entstehen, zu einer Abwertung (Haerberli et al. 2013; Lehmann 2013). Mit dem Verschwinden eines Gletschers kann auch ein zentrales Marketingelement verschwinden, was die Attraktivität der entsprechenden Destination schmälert. Und doch haben menschliche Eingriffe in die Landschaft einen grösseren Einfluss als der Klimawandel.

Da in den Skiregionen ein beträchtlicher Anteil des Jahresumsatzes zwischen Weihnachten und Neujahr generiert wird, ist bereits jetzt das unsichere Einschneien im Dezember eine Herausforderung (Serquet et al. 2013). Eine Studie für den Kanton Graubünden zeigt für das Jahr 2035 im Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) SRES-A2, dass über Weihnachten in 70 Prozent der Skigebiete die natürliche Schneesicherheit nicht mehr gegeben sein wird (CH2014 2014). Mit ihren vielen hoch gelegenen Skigebieten verfügen Graubünden und auch das Wallis im Vergleich mit österreichischen Skigebieten jedoch diesbezüglich über komparative Vorteile. Diese gehen aber mit einem grossen

Bei Naturgefahrenereignissen können indirekte Schadenskosten durch Attraktivitäts- oder Imageverlust auf lange Sicht durchaus hoch ausfallen, wenn Gäste ausbleiben, da sie die Destination aufgrund eines Ereignisses als gefährlich einschätzen (Abb 2.17; tertiäre Kosten). Eine Kosten-Nutzen-Analyse am Fallbeispiel «Stollen Grindelwald» bestätigt dies: Ohne Anpassungsmassnahmen würden bei einem Ausbruch des Gletschersees nebst den direkten Schadenskosten an Infrastruktur und Gebäuden zusätzlich mehr als die doppelten Kosten für indirekte Schäden wie Imageveränderung und Betriebsausfälle entstehen. Grundsätzlich ist der klimabedingte Anteil an den gesamten Schadenskosten eines Na-

turgeführten Ereignisses allerdings schwierig abzuschätzen (Haerberli et al. 2013; Lehmann 2013).

### Verteilung von Wasser wird zum Thema

Stärker in den Vordergrund treten wird die Wasserversorgung, speziell die Frage nach einer gerechten Verteilung der Wasserressourcen – dies besonders in der Zeit nach 2050, wenn das bisher im Sommer durch die Gletscherschmelze vorhandene Wasser fehlen wird. Speicherseen, die bisher den Wasserkraftunternehmen zur alleinigen Nutzung zur Verfügung standen, werden vermehrt auch anderen Nutzern zur Verfügung gestellt werden müssen. Im Bereich Tourismus könnte der Wasserbedarf wegen der Produktion von technischem Schnee steigen (Weingartner et al. 2014).

### Verlängerung der Zwischensaisons

Die Temperaturvariabilität wird zwar nicht abnehmen, aber im Frühling werden immer früher sommerliche Bedingungen herrschen, die auch weiter in den Herbst reichen. Daraus bieten sich Chancen, das saisonale Tourismusangebot auszudehnen und die touristisch weniger frequentierten Zwischensaisons besser auszulasten. Potenzielle Gästegruppen sind in dieser Zeit insbesondere ältere Reisende, deren Zahl zunimmt sowie Gästegruppen von ausserhalb Europas.

### Extreme

Die allgemeine Temperaturzunahme im Sommer wird in der Schweiz zu häufigeren Hitzeperioden führen (CH2014-Impacts 2014) (s. a. Kap. 1.6 Temperatur, S. 40, Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52). Die in tieferen Lagen und explizit in südlichen Regionen wie dem Tessin oder dem Mittelmeerraum herrschende Hitze kann Touristen von Juni bis August in höhere Gegenden locken («Sommerfrische»). Steigende Zahlen der Hotellogiernächte zeigen, dass diese Gegenden davon durchaus profitieren könnten (Serquet & Rebetez 2011).

Intensive Niederschlagsereignisse werden in Kombination mit der steigenden Schneehöhe, dem Abschmelzen der Gletscher sowie dem Auftauen von Permafrostböden das Risiko von Naturgefahren (Überschwemmungen, Murgänge oder Erdbeben) erhöhen. Dies kann im alpinen Tourismus zunehmend zu Infrastrukturschäden, zu Betriebsausfällen oder gar zu Imageverlust führen (Lehmann 2013).

### Anpassung

Einige Folgen der Klimaänderung können zum Vorteil für den alpinen Tourismus werden, sofern sie zur touristi-

schon Weiterentwicklung einer Region genutzt und zur Geltung gebracht werden. Dabei spielen Massnahmen in den Handlungsfeldern Angebotsentwicklung, Gefahrenminimierung und Kommunikation eine zentrale Rolle, um die negativen Auswirkungen zu verringern (Müller & Lehmann 2010). Bei der Entwicklung neuer Angebote könnten beispielsweise klimaunabhängige Angebote wie Festivals geschaffen werden. Zudem gilt es möglichst nachhaltige Techniken in der Beschneidung zu fördern. Im Bereich der Kommunikation sind mit Klimalehrpfaden oder geführten Exkursionen zudem Schulungsbeispiele möglich, die eine Gelegenheit bieten, die Spuren des Klimawandels aufzuzeigen und die Touristen für das Thema zu sensibilisieren. Oberste Priorität haben im Bereich Anpassung jedoch Massnahmen zur Gefahrenminimierung, wie die erwähnte Kosten-Nutzen-Analyse «Stollen Grindelwald» zeigt (Abb. 2.17).

Die Mehrheit der bereits umgesetzten Anpassungsmassnahmen im Bereich Tourismus wurde durch private Akteure initiiert und finanziert. In Zukunft werden auch die öffentlichen Akteure zunehmend zur Kasse gebeten, wenn umfangreiche planerische, organisatorische und bauliche Massnahmen notwendig werden. Präventiv geht es beispielsweise um den Ausbau von Schutzgebieten, um die Entwicklung weiterer Naturgefahrenszenarien für Regionen, die Förderung von Lehre und Forschung zu Anpassungsprozessen, die Bildung und Koordination von Gremien zum Erfahrungsaustausch oder die Erarbeitung von Handlungskonzepten. Dies erfordert eine Bewertung der möglichen Anpassungsmassnahmen nach Kriterien wie Zusatznutzen, Priorität, Machbarkeit, Effektivität, Akzeptanz und Kosteneffizienz (IPCC 2014/WGII; Lehmann 2013).

### Herausforderungen für die Schweiz

Insgesamt wird sich der Tourismus in der Schweiz in verschiedenen Bereichen und Regionen anpassen müssen. Besonders betroffen ist der Wintertourismus in mittleren Lagen, der in der wertschöpfungsstarken Zeit zwischen Weihnachten und Neujahr durch vermehrten Schneemangel betroffen sein wird. Dies erfordert vor allem neue und erweiterte schneeunabhängige Angebote. Im Sommer werden tiefe Lagen zunehmend von Hitzeperioden betroffen sein. Aufgrund der herrschenden Sommerfrische in alpinen Regionen und der mediterranen Atmosphäre in Seenregionen werden diese Gebiete attraktiver für den Tourismus, was mit entsprechenden Angeboten vermarktet werden kann. Wie in anderen Bereichen haben auch für den Tourismus Massnahmen im Bereich der Gefahrenminimierung oberste Priorität, da potenzielle Schadenskosten beispielsweise durch einen Gletscherseeausbruch, die Kosten von Anpassungsmassnahmen um ein Vielfa-

ches übersteigen können. Dies deshalb, weil im Tourismus bei einem Schadensereignis nebst den direkten Kosten an Gebäuden und Infrastruktur auch Betriebsausfälle und Imageschäden stark ins Gewicht fallen.

## Referenzen

CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.

Haeberli W, Bütler M, Huggel C, Müller HR, Schleiss A (eds.) (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – Chances und Risiken – chances et risques**. Nationales Forschungsprogramm «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61).

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 9 «Rural Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

Klein G, Vitasse Y, Rixen C, Marty M, Rebetez M (2016) **Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset**. *Climatic Change* (in press).

Lehmann Friedli T (2013) **Ökonomische Relevanz von Klimaanpassung im Tourismus – Qualitative und quantitative Kosten-Nutzen-Bewertungen von Anpassungsmassnahmen im Schweizer Alpenraum**. Berner Studien zu Freizeit und Tourismus, Heft 58, Bern.

Lehmann Friedli T, Schaub Y (2013) **Neue Gletscherseen im Alpenraum – Schaden- und Nutzenpotential für den Schweizer Tourismus**. In: Bieger T, Beritelli P, Laesser C (2012) *Nachhaltigkeit im alpinen Tourismus*, Schweizer Jahrbuch für Tourismus 2012: 111–126.

Müller HR, Lehmann Friedli T (2010). **Der Schweizer Tourismus im Klimawandel**. Auswirkungen und Handlungsoptionen. SECO, Bern.

Perch-Nielsen S, Amelung B, Knutti R (2010) **Future climate resources for tourism in Europe based on the daily Tourism Climatic Index**. *Climatic Change* 103: 363–381.

Serquet G, Marty C, Rebetez M (2013) **Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio**. *Theoretical and Applied Climatology* 114: 437–444.

Serquet G, Rebetez M (2011) **Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperature associated with climate change**. *Climatic Change* 108: 291–300.

Steiger R, Abegg B (2013) **The Sensitivity of Austrian Ski Areas to Climate Change**. *Tourism Planning & Development* 10: 480–493.

Weingartner R, Schädler B, Reynard E, Bonriposi, Graefe O, Herweg K, Homewood C, Huss M, Kauzlaric M, Liniger H, Rey E, Rist S, Schneider F (2014) **MontanAqua: Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel – Wasserbewirtschaftungsoptionen für die Region Crans-Montana-Sierre im Wallis**. Nationales Forschungsprogramm «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61), Forschungsbericht, Zürich.

## 2.12 Bauten und Infrastrukturen

Technische Infrastrukturen wie Gebäude, Verkehrswege und Energieversorgungssysteme haben in der Regel Investitionszyklen von mehreren Jahrzehnten. Aber auch die sozialen Infrastrukturen wie Spitäler, Polizei oder Militär lassen sich nur langsam reorganisieren. Die Klimaänderung erfordert Anpassungen, reduziert aber gleichzeitig die Planungssicherheit. Die direkten Auswirkungen der Klimaänderung für die Schweiz bezüglich Bauten und Infrastrukturen dürften relativ gering sein, da die schweizerischen Bauten und Infrastrukturen im Vergleich zu anderen Ländern sehr gut an mögliche Klimaänderungen angepasst sind und teilweise auch von einer mässigen Erwärmung des Klimasystems profitieren könnten. Stärker als die direkten Auswirkungen werden uns voraussichtlich die indirekten Auswirkungen der Klimaänderung treffen. Die Schweiz ist eng verbunden mit der Weltwirtschaft, die in vielen Regionen grossen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen ausgesetzt sein wird. Diese Veränderungen können global wie auch in der Schweiz zu grossen Fehlinvestitionen führen und die Bauten und Infrastrukturen wesentlich stärker treffen als die direkten Folgen der Erwärmung des Klimasystems.

Christoph Ritz (ProClim/SCNAT), Mark Zimmermann (EMPA)

### Globale Situation

Eine Jahresmitteltemperatur von 13 Grad Celsius wird in der Literatur als optimal für die wirtschaftliche Entwicklung angesehen (Burke et al. 2015). Diese Jahresmitteltemperatur dürfte auch für Bauten und viele Infrastrukturen günstige Voraussetzungen bieten, da die bauphysikalische Beanspruchung moderat ist und für hohe Wirtschaftsleistung und Komfort weder stark geheizt noch stark gekühlt werden muss (Wyon 2000). Die meisten heutigen Industrienationen liegen in klimatischen Gunstregionen mit Temperaturen unter oder nicht weit über 13 Grad Celsius Jahresmittel. Die Bauten und Infrastrukturen der Industrienationen weisen in der Regel relativ hohe Sicherheitsstandards und eine gute Bauqualität auf. Wie Abbildung 2.18 illustriert, dürften die nördlichen Industrienationen sogar unter dem Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) RCP8.5 wirtschaftlich geschont bleiben, weniger aber die südeuropäischen Länder, Teile der USA und Chinas sowie Australien.

Viele Regionen in den Tropen und Subtropen weisen hingegen deutlich höhere Jahresmitteltemperaturen als 13 Grad Celsius auf. Zudem sind viele dieser Regionen bereits heute ungenügend an die natürlichen Schwankungen und Extreme angepasst. Es ist absehbar, dass bei einer Klimaänderung in diesen Entwicklungs- und Schwellenländern nicht nur die Gefährdung von Bauten und Infrastrukturen durch Klimaextreme steigt, sondern wegen der erwarteten Verringerung der Wirtschaftsleistung (Abb. 2.18) gleichzeitig auch die Anpassungsfähigkeit beziehungsweise die Kapazität für Prävention geringer wird. Im Vordergrund stehen dabei die Auswirkungen von Überschwemmungen und Stürmen, denen die Bauten oft nicht standhalten. Aber auch zunehmende Hitze und Trockenheit verursachen grosse Schäden und Beeinträchtigungen.

### Nationale Situation

Im schweizerischen Mittelland beträgt die Jahresmitteltemperatur zirka 9,5 Grad Celsius. Die Schweiz kann somit wie die meisten gemässigten und nördlichen Klimazonen von einer mässigen Erwärmung des Klimasystems auch profitieren (Abb. 2.18). Das milder werdende Klima verringert den Heizenergiebedarf und das Ausmass der Frost- und Schneeschäden. Umgekehrt erhöhet sich der Bedarf für die sommerliche Kühlung. Allerdings wird dieser erst bei einer starken Erwärmung markant zunehmen. Ein erhohetes Bauschadenrisiko durch Wind undverstarkten Schlagregen (starker Regen bei hohen Windgeschwindigkeiten) ist denkbar, aber noch nicht schlüssig nachweisbar. Am kritischsten dürften Hochwasser und Murgänge sein, die mindestens lokal zu grossen Schäden führen können.

Die *technischen Infrastrukturen* der Schweiz wie Gebäu- de, Energiegewinnungs- und -transportinfrastruktur, Verkehrswege oder Kommunikationssysteme sind – im Vergleich zur Situation in den meisten Weltregionen – sehr gut an die *direkten Auswirkungen* der heutigen Klimaverhältnisse angepasst. Hinzu kommen gut ausgebaute Beobachtungssysteme, um gravierende Naturgefahren frühzeitig zu erkennen und Massnahmen einzuleiten.<sup>1</sup> Die Schweiz verzeichnete deshalb in den letzten Jahrzehnten nur wenige Todesfälle aufgrund extremer Wetterereignisse, mit Ausnahme der rund 1000 vorzeitigen Todesfälle während des Hitzesommers 2003. Die technischen Infrastrukturen dürften auch in Zukunft den klimatischen Herausforderungen weitgehend genügen oder können angepasst werden. Allerdings wurden beim Hochwasser 2005 doch Sachschäden von 3 Milliarden Franken registriert.

<sup>1</sup> Zum Beispiel das regelmässige Ausmassen von Gebirgshangen rund um Gebirgsstauseen oder fest installierte Messstellen für Erdbeben oder Steinschlag an gefährdeten Verkehrsachsen im Gebirge.

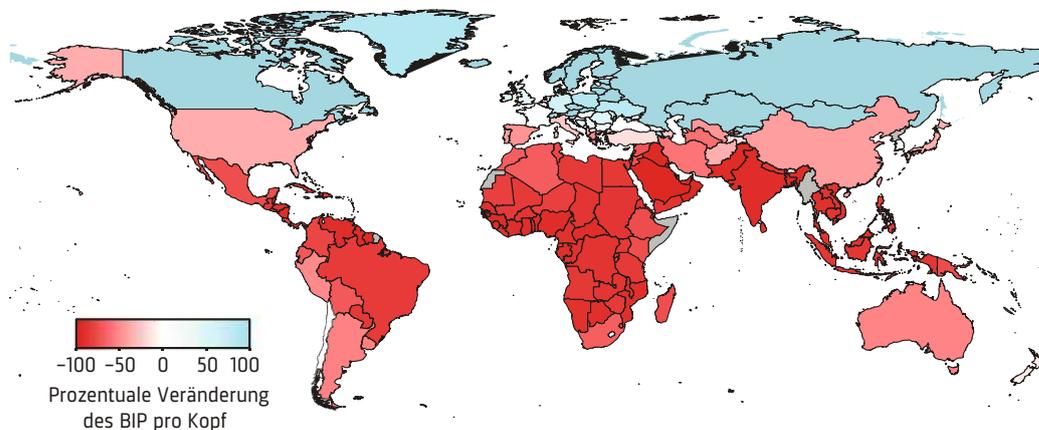


Abbildung 2.18: Projizierte Veränderung des Bruttoinlandprodukts im Jahr 2100 für das Szenario RCP8.5 verglichen mit einer Entwicklung unter heutigem Klima. Die meisten Industrieländer mit ihren Bauten und Infrastrukturen liegen in gemässigten Gebieten mit mittleren Jahrestemperaturen in der Nähe der idealen 13 Grad Celsius. Sie dürften relativ geringe Auswirkungen auf das Bruttoinlandprodukt BIP erfahren. Die erwarteten negativen Auswirkungen auf das BIP in den meisten Entwicklungsländern dürfte die Anpassung der Bauten und Infrastrukturen stark erschweren. (Quelle: Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Burke et al. 2015, copyright [2015])

Weniger klar ist, wie gut die Schweiz bei den *sozialen Infrastrukturen* für zukünftige Klimaereignisse gewappnet ist: Das Gesundheitssystem mit Spitälern und Rettungsdiensten oder Sicherheitseinrichtungen wie Polizei, Militär, Zivilschutz wurden bisher kaum in Katastrophensituationen getestet. Der warme Sommer 2015 hat immerhin gezeigt, dass Lehren aus dem Hitzesommer 2003, beispielsweise Anpassungen in der Gesundheitsversorgung, die Verletzlichkeit sehr wahrscheinlich verringerte.

Aus verschiedenen sozioökonomischen Gründen besteht bei allen Infrastrukturen und Bauten der Schweiz trotzdem ein Anpassungsbedarf. Dieser wird durch die Folgen der Klimaänderung mindestens teilweise noch verstärkt:

- Mit wachsender Bebauungsdichte, Zersiedelung und zunehmender Mobilität nimmt die *Exposition* von Menschen, Gebäuden und Infrastrukturen gegenüber Naturereignissen zu, und das Risiko von Schäden steigt entsprechend. Zum Beispiel wächst das Personenschadensrisiko mit erhöhter Zugdichte und Anzahl beförderter Personen, auch wenn die Eintrittshäufigkeit des Naturereignisses (*Gefährdung*) gleich bleibt. Eine Erhöhung der Eintrittshäufigkeit aufgrund des Klimawandels erhöht die Gefährdung und damit das Risiko zusätzlich (s. a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokonzept, S. 77).
- Die Gesellschaft akzeptiert immer weniger Risiken – insbesondere wenn es externe Einwirkungen betrifft. Insbesondere nimmt die Akzeptanz von Risiken ab, wenn es um sehr seltene Ereignisse geht, die jedoch katastrophale Auswirkungen haben (Sunstein 2003). Eini-

ge Bauten liegen bereits heute in Gefahrenzonen, in denen nach heutigem Stand des Wissens und bei heutiger Risikoakzeptanz nicht mehr gebaut werden dürfte. Eine Verstärkung der Häufigkeit und Intensität von Ereignissen aufgrund des Klimawandels kann lokal zu einer Vergrößerung der Gefahrenzonen führen, womit zusätzliche bestehende Bauten und Infrastrukturen in Gefahrenzonen zu liegen kommen.

## Schleichende Veränderungen, Extreme und Anpassung

*Technische Infrastrukturen* haben in der Regel Investitionszyklen von mehreren Jahrzehnten. Um unvorhergesehene Wertverluste zu vermeiden, muss beim Bau oder Umbau die zu erwartende Klimaänderung über den ganzen Investitionszyklus eingeplant werden.

Besonderes Augenmerk gilt den Infrastrukturen der *dicht besiedelten Gebiete* – der Städte und deren Agglomerationen – wo sich 80 Prozent der Arbeitsplätze befinden (Bundesrat 2015) und bei einem Extremereignis viele Menschen betroffen sind. Der IPCC-Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe II hat die Auswirkungen der Klimaänderung auf diese urbanen Gebiete gesondert untersucht. In Abbildung 2.19 sind die für die Schweiz wichtigsten Risikotypen aufgeführt, zusammen mit ihren klimatischen Ursachen.

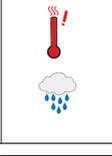
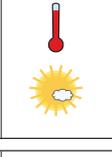
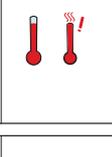
Urbane Regionen in der Schweiz						
Infrastruktur	Anpassungsbelange und Perspektiven	Klimatische Einflussfaktoren				
Frischwasserversorgung	Die Wasserversorgung in der Schweiz ist für die meisten Städte gesichert. Für langanhaltende Hitzeperioden sind Korrekturen am Versorgungsnetz (z.B. grössere Verbünde), Massnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs und ein integrales Verbrauchmanagement für Wasserkraft, Bewässerung und Trinkwasser erforderlich.					
Abwassersystem	Verschmutztes Abwasser aus Haushalten, Industrie und stark befahrenen Strassen wird meist nicht getrennt von unverschmutztem Abwasser (z. B. von Hausdächern). Die Bevölkerungszunahme und grössere Niederschlagspitzen führen zu überlasteten Systemen und zu direktem Überlauf in die Gewässer. Durch Neudimensionierung und Trennung lassen sich bei der Erneuerung von überalterten Systemen die Kosten optimieren.					
Energieversorgung	Die Energieversorgung von städtischen Gebieten mit ihren Industrien ist besonders während grossräumigen Hitzeperioden oder Kälteeinbrüchen gefährdet. Dies gilt insbesondere dann, wenn die 40 Prozent Stromerzeugung der KKW nicht durch erneuerbare Energien ersetzt wurden und der Verbrauch, trotz Effizienzmassnahmen zunimmt. Durch lokale Produktion (z. B. Photovoltaik) lassen sich Engpässe im Sommer minimieren.					
Nahrungsmittelversorgung	Die Nahrungsvorsorgung der Schweizer Agglomerationen ist globalisiert und damit stark beeinflusst durch die globalen Preise und die lokale und nationale landwirtschaftliche Produktivität. Die Anpassung der städtischen Nahrungsmittelversorgung stellt eine grosse Herausforderung dar. Einschneidende Veränderungen in der Herstellung, Lagerung, Weiterverarbeitung und Transport von Nahrungsmitteln sowie die Reduktion von Abfall sind erforderlich.					
Transport und Kommunikation	Schweizer Agglomerationen und im Speziellen die grösseren urbanen Regionen verfügen über ein dichtes öffentliches Verkehrssystem und Kommunikationsnetz. Diese Netze sind zwar verwundbar, aber durch ihre gegebene Redundanz auch bei klimatischen Extremereignissen gut verfügbar. Bergregionen sind hier verletzlicher, da alle Transportwege und Kommunikationsinfrastrukturen in den Tälern nahe beieinander liegen.					
Behausung	Schweizer Agglomerationen bestehen aus einer grossen Zahl von alten (oft geschützten) Gebäuden mit schlechter Isolation im Sommer und Winter. Zudem stehen verschiedene Gebäude in Gefahrenzonen bezüglich Überschwemmungen. Während grössere Anstrengungen zur Reduktion des Heizenergieverbrauchs bereits unternommen werden, wird dem Hitzestau in Gebäuden durch ungenügenden Sonnenschutz noch wenig Beachtung geschenkt.					
Gesundheitssystem	Die Gesundheitsüberwachung und Pflege durch das Schweizer Gesundheitssystem ist reaktionsfähig. Während länger andauernden Hitzeperioden erfordern besonders ältere, chronisch kranke und sehr junge Menschen gezielte Hilfe.					
Hauptwirtschaftssektoren und Dienstleistungen	Die Schweizer Wirtschaft wird dominiert durch den Dienstleistungssektor und durch global tätige Firmen, welche abhängig sind von Klimarisiken der externen Märkte. Unterbrüche der essentiellen Infrastrukturen wie Transport- und Energienetzwerke haben kurzfristige Auswirkungen.					
Legende der klimatischen Einflussfaktoren						
 Erwärmung	 Extreme Temperaturen	 Niederschlag	 Extremer Niederschlag	 Schneebedeckung	 Austrocknung	 Hochwasser

Abbildung 2.19: Klimarisiken auf Infrastrukturen in Städten und Agglomerationen der Schweiz. Dargestellt sind die Schlüsselrisiken und deren klimatische Ursachen. (Quelle: Design nach IPCC 2014/WGII/Chap.8/Tab.8-6 (London) und Tab.8-3 (generisch), Inhalt angepasst auf die Schweiz)

Das Abwassersystem als Beispiel (zweites Schlüsselrisiko in der Abbildung 2.9) ist besonders durch Klimagefahren aufgrund von Starkniederschlägen und Überflutungen gefährdet. Heute sind die Risiken an den meisten Orten noch gering. Sie können jedoch an exponierten Stellen (Schmutzwasser aus Kläranlagen, das bei Extremniederschlägen in die Flüsse gelangt) bereits heute mittelhoch sein.

In der Schweiz sind die *ländlichen Gebiete* mit wenigen Ausnahmen sehr eng mit den städtischen Räumen verwoben. Sie dienen als Wohnort für Menschen, die in den Städten arbeiten und werden von Personen aus den Agglomerationen als Naherholungsgebiet genutzt. Zudem sind die urbanen Räume abhängig von ländlichen Gebieten und deren Ressourcen wie Trinkwasser, Nahrungsmittel und Energie. Extremereignisse in den ländlichen Gebieten können damit auch die Versorgung der städtischen Gebiete empfindlich treffen.

In einigen ländlichen Räumen, insbesondere im Gebirge, kommen weitere spezifische Infrastrukturrisiken hinzu: Bei Unterbrüchen von Transportwegen gibt es oft keine Umfahrungsmöglichkeiten. Die Versorgungssicherheit ganzer Regionen – allerdings mit schwacher Besiedelung – kann so gefährdet sein. Alpenquerende Verkehrsachsen bergen daneben weitere Risiken. Oft befinden sich dort auf engem Raum in der Talsohle neben Bahn und Strasse auch Gas- oder Ölpipelines und Hochspannungsleitungen. Ein einzelnes Extremereignis kann zu Versorgungslücken führen, die weit über das Tal hinaus die Wirtschaft und die Bevölkerung betreffen.

## Herausforderungen für die Schweiz

Teure zukünftige Investitionen aufgrund veränderter klimatischer Verhältnisse und ausserhalb der normalen Sanierungen von Gebäuden und Infrastrukturen lassen sich minimieren, indem die über den ganzen Lebenszyklus der Bauten zu erwartenden Klimaänderungen bereits bei deren Bau berücksichtigt werden. Voraussetzung sind verlässliche Klimaprojektionen, darauf basierende Gefahrenkarten und eine konsequente Umsetzung der Erkenntnisse durch konkrete und überprüfbare Gesetze und Regeln und/oder mit finanzieller Unterstützung (z. B. durch einen Fonds der öffentlichen Hand). Da der Lebenszyklus der Bauten und Infrastrukturen oft weit mehr als 50 Jahre beträgt, sind Anpassungsstrategien in zweifacher Hinsicht eine Herausforderung:

- Die heute nötigen Anpassungen bei einem Bau oder einer Erneuerung hängen vom Erfolg der weltweiten Klimaschutzmassnahmen ab: Die zu tätigen Anpassungen an ein Klima mit einer Erwärmung von zwei Grad Celsius sind anders als diejenigen an ein Klima mit vier Grad Celsius Erwärmung.

- Die Beschränkung der Erwärmung auf zwei Grad Celsius setzt eine Dekarbonisierung voraus: Eine weitgehend CO<sub>2</sub>-emissionsfreie Welt stellt andere Anforderungen an Bauten und Infrastrukturen (z. B. Strassenausbauten oder Flughäfen) als eine mehrheitlich auf fossiler Energieversorgung basierte Welt.

Wichtig ist deshalb, dass bei den Anpassungsanstrengungen auch berücksichtigt wird, welche Auswirkungen die nationalen und internationalen Massnahmen zur Eindämmung des Klimawandels – die je nach Klimapolitik grosse wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen auslösen können – haben werden. Die Schweiz ist den Folgen solcher Veränderungen aufgrund ihrer starken globalen Vernetzung massiv ausgesetzt. Die Planungssicherheit beim Bau oder Unterhalt von Infrastrukturen wird dadurch eingeschränkt. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt:

- Vor allem aufgrund veränderter Energiepreise (z. B. durch Lenkungsabgaben) oder einer veränderten Energienachfrage (z. B. durch grössere Effizienz oder bessere Nachfragesteuerung) können sich heutige Investitionen im Energiebereich im Nachhinein als unrentabel erweisen und Arbeitsplätze in wichtigen Bereichen gefährden. Bereits heute müssen beispielsweise grosse Investitionen in den Umbau des Stromnetzes getätigt werden,<sup>2</sup> um die durch Photovoltaik- und Windanlagen dezentral erzeugte erneuerbare Energie räumlich und zeitlich umverteilen zu können. Der benötigte Ausbaugrad hängt jedoch stark vom Ausbau beziehungsweise der Förderung der unterschiedlichen Energiequellen und von den technischen Entwicklungen bei der lokalen Energienachfrage (lokale Speicherung, Smart Grids etc.) ab.
- Veränderte Mobilitäts- und Tourismusbedürfnisse können neue Investitionen erfordern und gleichzeitig andere in Frage stellen. Der Tourismusbereich reagiert sehr sensibel auf Veränderungen des wirtschaftlichen Umfelds. Es ist absehbar, dass sich der Schweizer Tourismus aufgrund des Klimawandels neu ausrichten und dazu grosse Investitionen in Infrastrukturen tätigen muss, deren Rentabilität aufgrund ungewisser Entwicklungen im nationalen und globalen sozioökonomischen Umfeld mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist (s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117).

Die schwierigste Aufgabe dürfte die Anpassung der sozialen Infrastrukturen sein. Das von unserem Wirtschaftssystem vorausgesetzte Wachstum von Konsum und Produktion und die zur Eindämmung des Klimawandels notwendigen Einschränkungen derselben stehen sich gegenüber und mindern durch die entsprechende, riesige

<sup>2</sup> Gemäss Schätzungen von Swissgrid werden rund 10 bis 16 Milliarden Franken für das Übertragungs- und Verteilnetz benötigt. Einige dieser Investitionen fallen auch im Rahmen der normalen Erneuerung an. Die Aufrüstung des lokalen Netzes mit Mess-, Steuer- und Regeltechnik zur Bewältigung der lokalen Stromeinspeisung dürfte gemäss den Bernischen Kraftwerken (BKW) den Investitionsbedarf gegenüber heute mehr als verdoppeln.

Bandbreite möglicher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklungen die Planungssicherheit und erhöhen damit das Risiko von Fehlinvestitionen.

## Forschungsbedarf

Vertiefte Systemanalysen sind nötig, um die komplexen Zusammenhänge zu verstehen zwischen Energiebereitstellung und Energienutzung, der veränderten Nutzung von Bauten und Infrastrukturen und deren Abhängigkeiten von Kosten, Marktregulierungen und Marktchancen. Nebst den technischen Risiken müssen auch die zukünftigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen verstärkt in Entscheidungen einbezogen werden. Es braucht dazu mehr als das Wissen zu saisonalen Temperatur- und Niederschlagsveränderungen und zur Häufigkeit und Dauer von intensiven Ereignissen (Gefährdung), um die Risiken für Infrastrukturen und die Möglichkeiten zur Anpassung abschätzen zu können. Weitere Parameter wie die Exposition, die Verletzlichkeit und Anpassungsfähigkeit der Infrastrukturen sind ebenfalls entscheidend. Zur Abschätzung der Verletzlichkeit und zur Wahl geeigneter Anpassungsmassnahmen sind Projektionen von Zeitreihen von Klimaparametern in täglicher oder stündlicher Auflösung erforderlich, die mit weiteren Risikoparametern gekoppelt werden können, wie dem Energiesystem und Transportsystem oder gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen.

## Referenzen

- Bundesrat (2015) **Agglomerationspolitik des Bundes 2016+**. Für eine kohärente Raumentwicklung Schweiz. Bericht vom 18. Februar 2015, Bern.
- Burke M, Hsiang SM, Miguel E (2015) **Global non-linear effect of temperature on economic production**. *Nature* 527: 235–239.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 8 «Urban Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 9 «Rural Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Sunstein CR (2003) **Terrorism and Probability Neglect**. *The Journal of Risk and Uncertainty* 26: 121–136.
- Wyon DP (2000) **Enhancing Productivity While Reducing Energy Use in Buildings**. Proceedings of the conference «E-Vision 2000», Department of Energy, Washington DC: 11–13.

## 2.13 Urbaner Raum

Der Klimawandel verändert den Lebensraum. Für den urbanen Raum sind global gesehen, je nach Lage, grössere Hitzebelastungen, der Anstieg des Meeresspiegels, Hochwasser an Küsten und Fließgewässern, extreme Niederschlagsereignisse, Trockenheit, Hangrutschungen, Luftverschmutzung und Wasserknappheit die grössten Klimarisiken. Besonders verletzlich sind Menschen, Wirtschaftsaktivitäten und Ökosysteme, die nicht über vorsorgende und schützende Infrastrukturen und Dienste wie beispielweise Warnsysteme verfügen. Für die Schweiz wurde die grössere Hitzebelastung in den Agglomerationen und Städten als eine der grössten Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel identifiziert. Hinzu kommt, dass der urbane Raum durch seine hohe Bevölkerungsdichte und Wertekonzentration besonders verletzlich ist gegenüber einer klimabedingten Zunahme von Extremereignissen. Für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist die Raumplanung von grosser Bedeutung.

Marco Pütz (WSL)

### Globale und nationale Situation

Der Klimawandel verändert den Lebensraum. Der urbane Raum, das heisst die Städte und Agglomerationen, der Raum, in dem sich die meisten Aktivitäten der Menschen konzentrieren und Siedlungen weiterentwickeln, ist weltweit insbesondere den folgenden Risiken aufgrund des Klimawandels ausgesetzt (IPCC 2014/WGII/SPM):

- grössere Hitzebelastungen,
- Anstieg des Meeresspiegels,
- Hochwasser an Küsten und Fließgewässern,
- extreme Niederschlagsereignisse,
- Trockenheit,
- Hangrutschungen,
- Luftverschmutzung und
- Wasserknappheit.

Besonders verletzlich sind die Menschen, Wirtschaftsaktivitäten und Ökosysteme, die nicht über vorsorgende und schützende Infrastrukturen und Dienste wie Hochwasser-schutzdämme oder Warnsysteme verfügen. Ausserdem sind Städte und Regionen gefährdet, die besonders exponiert gegenüber Naturgefahren liegen, zum Beispiel an Küsten und Fließgewässern.

Auch in der Schweiz wird das Leben im urbanen Raum zunehmend durch Extremereignisse geprägt sein. Ereignisse wie extreme Niederschläge treten häufiger auf (s.a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52, Kap. 1.7 Wasserkreislauf, S. 46) und gefährden vermehrt Infrastrukturen und Siedlungen. Die grössere Hitzebelastung in den Agglomerationen und Städten wurde in der Schweizer Klimaanpassungsstrategie als eine der grössten Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel identifiziert und betrifft vor allem die Sektoren Raumentwicklung, Gesundheit und Energie im urbanen Raum (BAFU 2012).

### Verletzlichkeit: Wärmeinsel-Effekt verstärkt die Folgen

Der urbane Raum ist in zweierlei Hinsicht vom Klimawandel betroffen. Zum einen kann die Wirkung hoher Temperaturen durch stadtspezifische Gegebenheiten verstärkt werden. So tragen zum Beispiel eingeschränkte Windzirkulation, fehlende Beschattung und Grünflächen, Absorption der Sonnenstrahlung durch versiegelte Flächen sowie Abwärme von Industrieanlagen, Gebäuden und Verkehr zum sogenannten Hitze- oder Wärmeinsel-Effekt bei: stärkere Aufheizung tagsüber und weniger Abkühlung nachts. Bereits heute können sich die Temperaturen zwischen urbanem und ländlichem Raum um bis zu zehn Grad Celsius unterscheiden.

Zum anderen ist der urbane Raum aufgrund seiner hohen Bevölkerungsdichte und Wertekonzentration besonders verletzlich gegenüber einer klimabedingten Zunahme von Extremereignissen. Neben direkt spürbaren Klimafolgen, zum Beispiel, wenn Menschen oder Sachgüter durch Naturgefahrenereignisse zu Schaden kommen, kann der urbane Raum auch indirekt stark von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein: Es kann zum Unterbruch wichtiger Infrastrukturen, sogenannter «kritischer» Infrastrukturen kommen, und so Probleme beim Verkehr, der Telekommunikation oder der Versorgung mit Trinkwasser und Energie auslösen (s.a. Kap. 2.12 Bauten und Infrastrukturen, S. 121).

### Anpassung: Raumplanung spielt wichtige Rolle

Die räumliche Planung ist von grosser Bedeutung für die Anpassung an den Klimawandel, weil viele Folgen des Klimawandels direkt raumwirksam sind und die Raumnutzung beeinflussen können. Da der urbane Raum besonders sensitiv für die zu erwartende Zunahme von Hit-

## Projekte zur Klimaanpassung von Städten, Gemeinden und Regionen in der Schweiz

In der Schweiz bestehen verschiedene, umsetzungsorientierte Projekte zu den Herausforderungen des Klimawandels für Städte, Gemeinden und Regionen und möglichen Anpassungsstrategien:

### Projekte des Bundes

Im Pilotprogramm «Anpassung an den Klimawandel» (2014–2016) unterstützt der Bund Projekte zur Klimaanpassung in den Kantonen, Regionen und Städten. Drei Projekte widmen sich in einem eigenen Themencluster der «klimaangepassten Stadt- und Siedlungsentwicklung». Im Pilotprojekt «ACCLIMATASION» arbeitet die Stadt Sitten auf öffentlichen und privaten Grundstücken daran, den Wärmeinseleffekt und das Hochwasserrisiko zu verringern, um so Entscheidungsträger und Bevölkerung für die Notwendigkeit der Klimaanpassung zu sensibilisieren. Im Pilotprojekt «Urban Green & Climate Bern» werden Konzepte, Methoden und Finanzierungsmöglichkeiten für eine nachhaltige Bewirtschaftung des städtischen Baumbestandes entwickelt. So soll das Wissen zur klimabedingten Vulnerabilität und zu den Ökosystemleistungen (u. a. Kohlenstoffsенke) von urbanen Baumbeständen verbessert werden. In einem weiteren Pilotprojekt werden schweizweit der «Effekt von Hitzeperioden auf die Sterblichkeit und mögliche Adaptionsmassnahmen» untersucht. Am Beispiel der Kantone Tessin und Genf werden besonders stark betroffene Bevölkerungsgruppen und gesundheitsrelevante Wettermerkmale ermittelt.

### CLISP: Herausforderungen für den Alpenraum

Im vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE koordinierten Projekt «CLISP: Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space» (2008–2011) wurden die konkreten Herausforderungen des Klimawandels für die Raumplanung im Alpenraum bearbeitet und erste Ansätze für eine «klimasichere» Raumentwicklung entwickelt. Entstanden ist unter anderem ein Leitfaden zur Bewertung der «Klimawandelfitness» von Raumplanungsinstrumenten (ARE 2013), in den die Erfahrungen aus 10 Modellregionen im Alpenraum eingeflossen sind (Kruse & Pütz 2014).

### Klimaanalysen in Zürich, Genf und Basel

In den letzten Jahren haben die Schweizer Kantone und Städte verschiedene Studien durchgeführt, um zukünftig stadtklimatische Aspekte besser in planerische, gestalterische und bauliche Entscheide einbeziehen zu können. So hat zum Beispiel die Stadt Zürich in einer Klimaanalyse (2009–2011) ihr Stadtklima untersucht und dabei die akuten und zu erwartenden Belastungen wie Überwärmung, eingeschränkte Durchlüftung und erhöhte Luftbelastung identifiziert. 2015 wurden eine Klimastrategie vorgelegt und ein Massnahmenplan zur Verminderung der Treibhausgase und zur Anpassung an den Klimawandel erarbeitet. Der Kanton Genf hat 2015 einen «Plan climat cantonal» entwickelt und Risiken und Chancen des Klimawandels analysiert. Der Kanton Basel hat 2011 einen Bericht über die Folgen des Klimawandels vorgelegt und darauf aufbauend Massnahmen für die verschiedenen betroffenen Sektoren entwickelt sowie Risiken und Chancen des Klimawandels ermittelt.

zwellen ist, zielen Anpassungsaktivitäten im urbanen Raum in der Regel darauf ab, Grünräume und Freiflächen aufzuwerten und neu zu schaffen sowie die Durchlüftung zu fördern. Für die räumliche Planung bestehen damit jedoch potenziell Zielkonflikte mit der Siedlungsentwicklung nach innen oder dem verdichteten Bauen. Auch zwischen Naturgefahrenprävention und Siedlungsentwicklung können Raumnutzungskonflikte bestehen. Hier nicht vorsorgend zu handeln, erhöht die Verletzlichkeit von Städten, Gemeinden und Regionen. Damit besitzt die räumliche Planung grosses Potenzial, die Anpassung an die Folgen des Klimawandels massgeblich zu steuern und die Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Einwirkungen zu verbessern. Es ist jedoch eine grosse Herausforderung, die Raumplanung und die raumwirksamen Fachplanungen so zu gestalten, dass sektorübergreifende Synergien entstehen, eine hohe bauliche Qualität gewährleistet ist und genügend Freiräume erhalten und geschaffen werden. Dies gilt insbesondere für die Schweiz mit

ihren kleinteiligen, föderalen Strukturen und ihrem bestehenden und künftigen Siedlungsdruck.

## Herausforderungen für die Schweiz

Für viele Städte, Gemeinden und Regionen ist das Thema Klimawandel noch relativ neu und nur eines von vielen. Zusammen mit Energie und Ressourcenknappheit wird eine energie- und klimaschonende Stadtentwicklung und -planung jedoch immer wichtiger. Aus Sicht vieler Städte liegen die Herausforderungen dabei vor allem in energiesparenden, integrierten Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklungen, einer klimaverträglichen Energieversorgung sowie bei Gebäudesanierungen und Ersatzneubauten (vgl. ECOPLAN 2012). Mit den Folgen des Klimawandels und dem klimawandelbedingten Schutz vor Naturgefahren beschäftigen sich bisher jedoch nur wenige Gemeinden und dies oft nur indirekt, zum Beispiel mit dem Erstellen von Gefahrenkarten.

Da konkrete Anpassungsstrategien und Anpassungsmassnahmen auf lokaler und regionaler Ebene bisher nur einzeln und eher als Pilotaktivitäten entwickelt werden (s. a. Box Projekte zur Klimaanpassung von Städten, Gemeinden und Regionen in der Schweiz, S. 127), spielt derzeit der Erfahrungsaustausch zwischen Städten und Agglomerationen sowie die Zusammenarbeit von Gemeinden, Kantonen und Bund eine grosse Rolle. So zielen im Aktionsplan der Schweizer Klimaanpassungsstrategie (BAFU 2014) die Massnahmen im Handlungsfeld Raumentwicklung unter anderem darauf ab, sich am «Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel» zu beteiligen und die Entscheidungsgrundlagen für Planer zu verbessern, zum Beispiel durch Arbeitshilfen (ARE 2013). Zahlreiche Städte beschäftigen sich seit Jahren mit Massnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität, zur Aufwertung von Freiräumen und generell zur Verbesserung der grünen Infrastruktur, so dass grosse Erfahrung und viel Expertise zur Anpassung vor Ort vorhanden sind. Allerdings wurden diese Aktivitäten nicht unbedingt immer direkt auf den Klimawandel bezogen. Die Hitzesommer 2003 und 2015 haben jedoch in den Städten das Bewusstsein für den Klimawandel weiter geschärft. Falls der Klimawandel als raumordnungspolitische Herausforderung ins Raumplanungsgesetz aufgenommen würde, müssten Städte und Regionen verstärkt Klimawandel-Aktivitäten entwickeln und der Bund könnte diese besser unterstützen und koordinieren. Es bleibt allerdings offen, inwiefern dies zurzeit politisch umsetzbar ist und auch seitens der Raumplanung unterstützt wird.

## Referenzen

- ARE (2013) **Klimawandel und Raumentwicklung**. Eine Arbeitshilfe für Planerinnen und Planer. Bern.
- BAFU (2012) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder**. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2014) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019**. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Bern. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- ECOPLAN (2012) **Urbane Herausforderungen aus Bundessicht. Ein Diskussionsbeitrag zur Weiterentwicklung der Agglomerationspolitik**. Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Staatssekretariat für Wirtschaft SECO, Bern.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kruse S, Pütz M (2014) **Adaptive Capacities of Spatial Planning in the Context of Climate Change in the European Alps**. *European Planning Studies* 22: 2620–2638.

## 2.14 Auswirkungen des Klimawandels auf das Energiesystem der Schweiz

Gestützt auf internationale und nationale Studien lassen sich bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf das Schweizer Energiesystem folgende qualitative Trends ableiten: Der erwartete Einfluss des Klimawandels ist im Vergleich zu demographischen, wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen weitestgehend von untergeordneter Bedeutung, zumindest kurz- (2030) bis mittelfristig (2050). Sowohl auf der Nachfrage- als auch auf der Angebotsseite halten sich positive und negative Auswirkungen die Waage beziehungsweise überwiegen die günstigen Effekte leicht. Gefahren für die Energieinfrastruktur sind trotzdem erkennbar. Langfristig (zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts) bestehen noch erhebliche Unsicherheiten.

*Konstantinos Boulouchos (ETH Zürich)*

### Energienachfrage und -nutzung

#### Kühlen und Heizen

Die projizierte direkte Erwärmung in der Schweiz von 1,5 bis 4 Grad Celsius (sowohl regional- als auch jahresgemittelt) wird in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts (um 2085 herum) zu einer Abnahme des Heizwärmebedarfs um 7 bis 20 Prozent führen; wenn ein konstanter Gebäudetechnikstandard vorausgesetzt wird. Entsprechend würde sich eine Zunahme des Strombedarfs für Kühlung ergeben. Beide Effekte sind relativ klein und würden sich vermutlich bis zu einem gewissen Grad energetisch kompensieren. Allerdings trägt die Reduktion des Wärmebedarfs direkt zur Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses bei, während die Zunahme des Kühlbedarfs durch den fürs Jahr 2050 erwarteten CO<sub>2</sub>-armen Schweizer Strommix wohl einen entsprechend kleineren Effekt haben dürfte (CH2014-Impacts 2014). Insgesamt jedoch würde der direkte Effekt der Klimaerwärmung auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoss, verglichen mit den Herausforderungen vor allem im Verkehrsbereich aber auch mit der Technikentwicklung im Gebäudebereich, von klar untergeordneter Bedeutung sein. Je nach Klimaszenario sind dabei maximale CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 0,9 bis 3,7 Prozent zu erwarten. Geht man aber von einer erfolgreichen Umsetzung der Energiestrategie 2050 (BFE & Prognos 2012) aus und damit von einer weit höheren Energieeffizienz der Gebäude, würden die durch den Klimawandel bedingten Einsparungen beim Heizwärmebedarf deutlich kleiner. Hingegen sind in der Zukunft effiziente Kühlsysteme vor allem im Dienstleistungssektor erforderlich, da dort höhere Abwärmemengen aus der massiv zunehmenden Nutzung von IT-Systemen erwartet werden.

Ein positiver Aspekt einer Verschiebung vom Winter- zur Sommerelektrizitätsnachfrage ist die bessere Ausgeglichenheit des Elektrizitätsbedarfs zwischen Sommer und Winter. Diese wird der zukünftigen Angebotsstruktur des

Schweizer Elektrizitätssystems etwas entgegenkommen, da mit einem höheren Anteil an Photovoltaik-Produktion gerechnet wird, was insbesondere im Sommer zu einer Zunahme der Elektrizitätserzeugung führt.

#### Verkehr

Im Sektor Verkehr lässt sich als direkter Effekt der Klimaänderung – nebst dem Zusatzaufwand für die Fahrzeugklimatisierung – eine Zunahme des Verkehrs von den Ballungszentren aus voraussagen: einerseits hin zu den immer höher liegenden Wintersportdestinationen (sofern der Wintersport den langfristigen Klimawandel überlebt; s.a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117), andererseits hin zu Regionen ausserhalb der Städte im Sommer (OcCC & ProClim 2007). Mit einer Verkehrszunahme verbunden ist die Zunahme des Treibstoffverbrauchs. Das Ausmass dieser Erhöhung der Energienachfrage muss über die Zeit beobachtet werden, ist schwer zu quantifizieren und fällt gegenüber den übrigen Treibern (Raumplanung, Bevölkerung- und Wirtschaftsentwicklung) weniger ins Gewicht.

### Energieangebot

Auf der Seite des Energieangebots lassen sich verschiedene Folgen des Klimawandels – insbesondere mit Bezug auf die Elektrizitätserzeugung – ausmachen. Dabei ist zu beachten, dass die Schweiz auch stark durch Veränderungen im europäischen Energieangebot betroffen ist, die möglicherweise bedeutender sind, als der Einfluss des Klimawandels.

#### Wasserkraft

Für den mit Abstand wichtigsten Beitrag zur Elektrizitätsproduktion, nämlich denjenigen der Wasserkraft, sa-

gen neuere Studien (CH2014-Impacts 2014) bis etwa 2050 geringfügige, wahrscheinlich leicht positive Erträge im Jahresmittel von 0,9 bis 1,9 Prozent voraus – allerdings mit gewissen regionalen Unterschieden. Wichtiger jedoch ist die projizierte Erhöhung der Winterstromproduktion um etwa zehn Prozent und die gleichzeitige Abnahme der Sommerstromproduktion um vier bis sechs Prozent, unter anderem aufgrund der Veränderungen des saisonalen Wasserangebots. Von Vorteil ist, dass diese saisonale Verschiebung den Ertragsüberschuss im Sommerhalbjahr verringern würde, der aufgrund des erwarteten hohen Beitrags der Photovoltaik in Zukunft steigen dürfte. Allerdings existieren noch keine belastbaren Aussagen für die Zeit nach 2050, für die eine Abnahme des Gletschervolumens um 60 bis 80 Prozent befürchtet wird (CH2014-Impacts 2014, Szenario mit mittleren Emissionen SRES-A1B). Zudem könnten veränderte Geschiebefrachten erhöhte Anforderungen an die Infrastruktur stellen. Es sind technische Möglichkeiten zur diesbezüglichen Anpassung bekannt, die jedoch einen entsprechenden Einsatz finanzieller Mittel erfordern würden.

## Thermische Grosskraftwerke

Höhere Temperaturen führen in der Regel zu einer Leistungsabnahme und in geringerem Ausmass zu einer Verringerung des Wirkungsgrades thermischer Grosskraftwerke, insbesondere bei einer verminderten Verfügbarkeit von Kühlwasser im Spätsommer. Da jedoch in der Schweiz von einer Abschaltung der Kernkraftwerke noch deutlich vor 2050 ausgegangen werden kann und Kohlekraftwerke nicht in Betracht gezogen werden, dürfte dieses Problem langfristig von geringer Bedeutung sein. Sollten in Zukunft Gaskraftwerke zur Deckung des inländischen Energiebedarfs erforderlich werden, so würden sie vorzugsweise im Winterhalbjahr eingesetzt, in dem die Kühlproblematik leichter zu beherrschen ist.

## Photovoltaik

Von Bedeutung könnte die erwartete Temperaturerhöhung durch den Klimawandel für die Photovoltaik sein, deren Potenzial gegen Mitte des Jahrhunderts auf etwa 20 Prozent des Schweizer Strombedarfs geschätzt wird. Eine Temperaturerhöhung von einem Grad Celsius führt üblicherweise zu einer Abnahme des Wirkungsgrades um etwa 0,5 Prozent (IPCC 2014/WGII/Chap.10), abhängig von der Photovoltaik-Technik. Der Effekt ist absolut gesehen nicht sehr gross, zumal Techniken wie Hybridkollektoren mit rückseitiger Kühlung der Solarpanels zur gleichzeitigen Wärmenutzung, zum Beispiel für Warmwasser, gerade auf den Markt kommen. Relevant könnten jedoch in der Schweiz Extremereignisse, wie zum Beispiel Hagel,

werden, die Schutzmassnahmen für die betroffenen Infrastrukturen erforderlich machen würden.

## Biomasse

Obwohl regional unterschiedlich (in höheren Lagen durch die Erwärmung grössere, in tieferen Lagen durch sommerliche Trockenheit kleinere Produktion) ist in der Tendenz mit einer aufgrund des Klimawandels höheren Biomasseverfügbarkeit zu rechnen. Das heutige ökologisch vertretbare Energienutzungspotenzial macht etwa 10 bis maximal 15 Prozent der gegenwärtigen Endenergie der Schweiz aus (OcCC & ProClim 2007). Die Biomassenutzung ist ein wesentlicher Teil der Energiestrategie 2050. Allerdings ist für eine optimale Nutzung des Biomassesortiments darauf zu achten, dass diese wertvolle chemische Energie nicht einfach zur Deckung des Wärmebedarfs, sondern für die kombinierte Strom-/Wärmeerzeugung und/oder – zum Beispiel in Form von synthetischem Methan – für den Ersatz fossiler Treibstoffe verwendet wird.

## Wind

Gemäss Energiestrategie 2050 wird ein Beitrag der Windenergie zur Deckung des Schweizer Elektrizitätsbedarfs von etwa vier Terawattstunden jährlich angestrebt. Quantitative Schätzungen zum Einfluss des Klimawandels sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt. Die projizierte Häufigkeit von Extremereignissen lässt einen zusätzlichen Aufwand für die Gewährleistung der Robustheit und Funktionstüchtigkeit der Anlagen erwarten; dies gilt auch für die Infrastruktur in den Bereichen Wasserkraft und allgemein Verkehr und Energie.

## Fazit

Zumindest bis etwa Mitte des Jahrhunderts sind die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf das Schweizer Energiesystem sehr moderat und in der Tendenz voraussichtlich mehrheitlich positiv. Grössere Herausforderungen sind erkennbar einerseits bei den Anforderungen an die Energieinfrastruktur und andererseits in Zusammenhang mit dem langfristigen Beitrag der Wasserkraft.

## Referenzen

- BAFU (2012) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder.** Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2014) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz.** Aktionsplan 2014 – 2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- BAFU (2015) **Treibhausgasinventar 2015.** [www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar](http://www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar)
- BFE, Prognos (2012) **Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000–2050.** Ergebnisse der Modellrechnungen für das Energiesystem.
- BFE (2014) **Schweizer Gesamtenergiestatistik 2014.** [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 10 «Key economic sectors and services». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- OcCC, ProClim (eds.) (2007) **Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.** Bern.

## 2.15 Gesundheit

Direkte und indirekte gesundheitliche Folgen des Klimawandels sind heute gut belegt. Betroffen werden vor allem die ärmsten Länder und Bevölkerungsgruppen sein. In der Schweiz können Anpassungsstrategien die gesundheitlichen Folgen der bei uns wichtigsten Klimafolgen – Hitzewellen und andere klimatische Extremsituationen – deutlich verringern. Insgesamt dürfte in der Schweiz die gesundheitliche Bedeutung des Klimawandels weniger durch das Klima und seine direkten und indirekten Folgen bestimmt sein als durch politische Entscheide zum Klimaschutz respektive durch Anpassungsstrategien. Die Anpassung an häufigere und intensivere Hitzewellen, die Überwachung von Krankheitsüberträgern und Infektionskrankheiten bei Mensch und Tier sowie eine mit der Luftreinhaltung vereinbarte Energiepolitik sollen zentrale Bestandteile der Vorsorge sein.

*Nino Künzli (Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut und Universität Basel)*

### Globale und nationale Situation

Der Klimawandel kann direkte und indirekte Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Temperaturschwankungen, extreme Niederschläge, Hitzewellen oder Waldbrände verursachen direkt Krankheit und Tod. Ernteaufschläge, veränderte Verbreitung von Krankheitsüberträgern<sup>1</sup>, Wasserhygiene und -mangel oder die Migration wegen Dürre (Flüchtlinge) wirken sich hingegen indirekt auf die Gesundheit aus (IPCC 2014/WGII/Chap. 11). Die Einflüsse können positiver oder negativer Art sein: Geographische Verschiebungen der Nahrungsmittelproduktion, die Abnahme von vektorübertragenen Krankheiten oder von Kältewellen werden in einigen Regionen gesundheitliche Vorteile bringen. Global betrachtet sind diese positiven Folgen jedoch geringer als die negativen Auswirkungen. Zum Beispiel wird sich die geographische Verteilung einiger Krankheitsüberträger – und der von ihnen übertragenen Krankheiten – mit dem Klimawandel, aber vor allem auch durch die globalisierten Migrations- und Warenströme weiter verändern. In Ländern mit hohem Fleischkonsum kann der Wechsel zu einer weniger fleischlastigen Ernährung zur Minderung von klima- und gesundheitsrelevanten Schadstoffen beitragen. Für die Gesundheit in der Schweiz spielt der Klimawandel verglichen mit anderen gesundheitlich relevanten Problemfeldern wie der Zunahme nichtübertragbarer Krankheiten und der damit verbundenen Kostenentwicklung, eine eher untergeordnete Rolle; bis 2050 wird er vor allem bereits bestehende gesundheitliche Herausforderungen wie den Umgang mit Hitzewellen oder die Verbreitung von übertragbaren Krankheiten akzentuieren. Längerfristig gewinnen diese Verstärkungseffekte des Klimawandels an Bedeutung.

### Verletzlichkeit

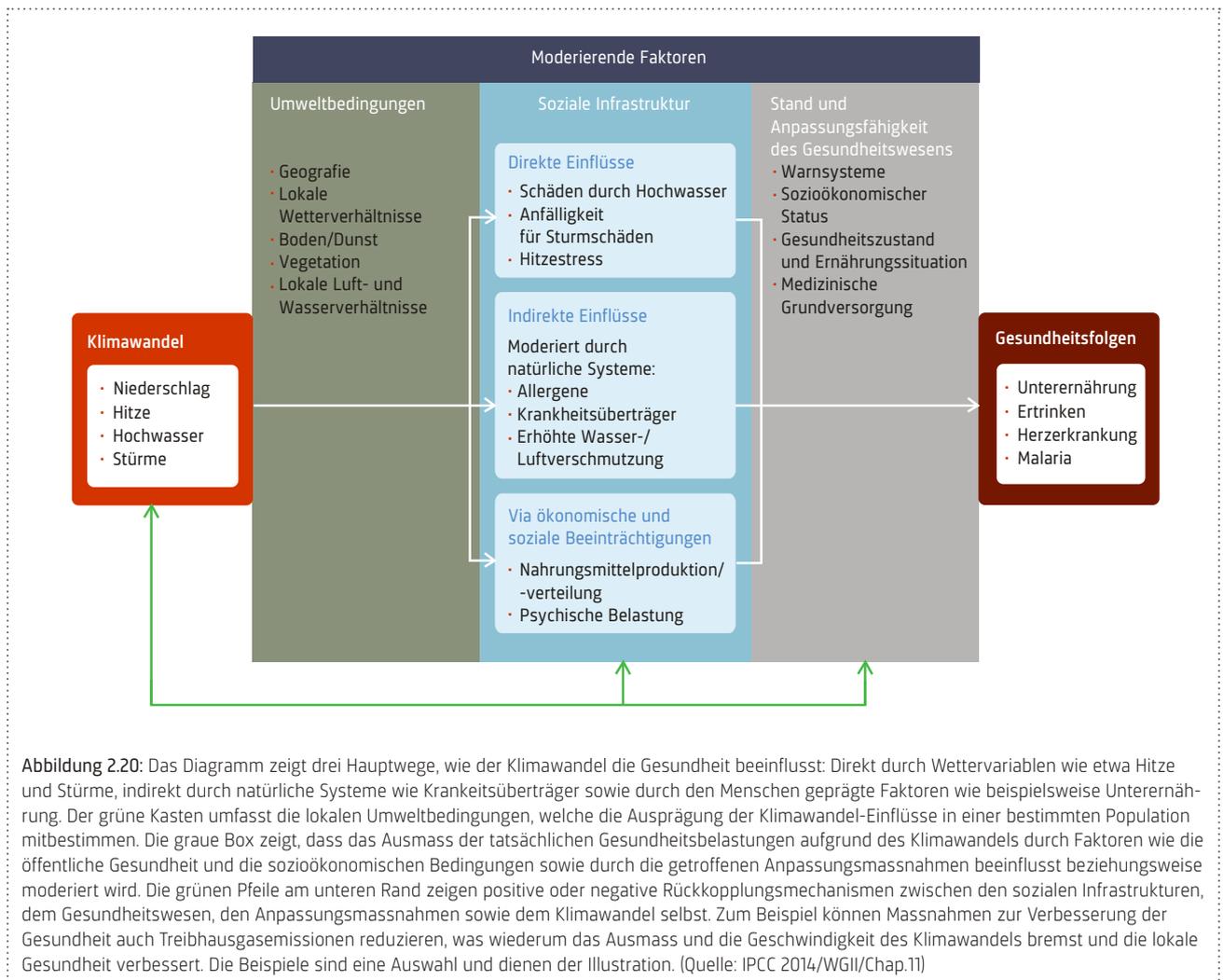
Wie hoch die Verletzlichkeit des Gesundheitszustands der Bevölkerung für direkte und indirekte Folgen des Klimawandels ist, hängt von der geografischen Lage, von Ausbildungsstatus und Einkommen oder vom Alter und Gesundheitsstatus ab, aber auch von der Fähigkeit der Regierungen, wirksam auf Herausforderungen zu reagieren (IPCC 2014/WGII/Chap. 11). Vom Klimawandel am stärksten betroffen sein werden die Gesundheitssysteme der ärmsten Länder sowie küstennaher Regionen mit hoher Überschwemmungsgefahr. Klimafolgen, welche die Gesundheit beeinflussen, wie zum Beispiel Hitzewellen, werden die Jüngsten und Ältesten besonders treffen sowie die sozial isolierten Menschen und jene mit bestehenden Krankheiten wie Nierenleiden, psychischen Erkrankungen oder allergischem Asthma.

In Folge der weltweiten Verbesserung der Gesundheit hat die Lebenserwartung in fast allen Ländern stark zugenommen. Der Anteil von Menschen im höheren Alter und mit nichtübertragbaren chronischen Krankheiten nimmt deshalb stetig zu. Somit wird der Bevölkerungsanteil, der von extremen Klimasituationen besonders betroffen sein kann, zunehmend grösser.

Bis Mitte des Jahrhunderts muss bei fortschreitendem Klimawandel vor allem in armen Ländern mit einem erhöhten gesundheitlichen Risiko gerechnet werden; dies aufgrund von Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Feuersbrünsten, Unterernährung in Folge verschlechterter Nahrungsmittelproduktion sowie der Zunahme von Erkrankungen durch Wasser- und Nahrungsverunreinigungen und von vektorübertragenen Erkrankungen (IPCC 2014/WGII/Chap. 11).

Mit dem Klimawandel könnten auch die Belastung durch bodennahes Ozon sowie die Dauer der Pollensaison zu-

<sup>1</sup> Krankheitsüberträger (Vektoren) übertragen Erreger, die eine Infektionskrankheit auslösen können, von einem Wirt auf einen anderen Organismus, ohne dabei selbst zu erkranken. Die Übertragung geschieht beispielsweise über einen Stich.



nehmen, was vor allem Leute mit Asthma oder Allergien betreffen würde.

## Übertragbare Krankheiten

Für die Schweiz dürften die prognostizierte Zunahme von Hitzewellen (CH2014 2014), Veränderungen bei krankheitsübertragenden Vektoren und eine allfällige Verlängerung der Pollensaison gesundheitlich relevant sein. Bei den krankheitsübertragenden Vektoren muss die Rolle des Klimawandels aber in Bezug zu anderen ursächlich wichtigen Faktoren gesetzt werden. So führen die im Rahmen der Globalisierung weltweit zunehmenden Migrations- und Materialflüsse zu klimaunabhängigen, globalen Verschleppungen von Vektoren und Krankheitserregern, wie das Beispiel der im Tessin und nunmehr auch in der Nordschweiz heimisch gewordenen Tigermücke (*Aedes albopictus*) zeigt (Kutlar 2010; Suter et al. 2015). Das Beispiel der Malaria, die bis zur ersten Hälfte des 19. Jahr-

hunderts auch im kühleren Klima in der Schweiz vorkam (Kutlar 2010), zeigt, dass gesundheitspolitische Strategien wie die Bekämpfung der Infektionsquellen respektive der infizierten Überträger (Vektoren) – im Fall der Malaria durch die Trockenlegung von Sumpfbereichen – einen viel stärkeren Einfluss auf die Gesundheit haben können als der Klimawandel. Entscheide in gesundheitlich relevanten Politikbereichen sowie das Verhalten der Bevölkerung dürften in der Schweiz auch in Zukunft die Bedeutung der durch Vektoren übertragenen Krankheiten stärker beeinflussen als das Klima. Generell dürften der hohe Gesundheitsstatus und die in der Schweiz starken Ressourcen zur Anpassung die Verletzlichkeit im Bereich der Gesundheit verringern.

## Extremereignisse

Die Zunahme von Extremereignissen wie Hitzewellen oder Starkniederschläge wird global für die betroffenen

Bevölkerungen – insbesondere bei Menschen, die beruflich im Freien arbeiten – gesundheitliche Folgen haben (IPCC 2014/WGII/Chap.11). Die Arbeitskapazität und Leistungsfähigkeit wird durch extreme Klimabedingungen beeinträchtigt. Zudem können bei nicht sachgemäßer Lagerung von Nahrungsmitteln während Hitzewellen Lebensmittelvergiftungen zunehmen. Dürreperioden, Waldbrände oder schwere Regenfälle und Überschwemmungen haben direkte und indirekte gesundheitliche Auswirkungen. Beispiele aus Australien, Kalifornien und Russland zeigen, dass bei ungünstigen Windverhältnissen grossflächige Waldbrände – auch weit ab von Agglomerationen – zu massiven und langanhaltenden gesundheitsschädigenden Smogbelastungen in Grossstädten führen können (IPCC 2014/WGII/TS). In der Schweiz sind die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Sterberaten sowie Spitaleinweisungen dokumentiert (CH2014 2014; Grize et al. 2005; Manser et al. 2013).

## Anpassung

In Regionen mit wachsendem Wohlstand können die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels limitiert respektive durch für die Volksgesundheit förderlichen gesellschaftlichen Fortschritte kompensiert werden. Die gesundheitlich wirksamsten Anpassungen sind identisch mit den global wichtigsten, klimaunabhängigen gesundheitspolitischen Strategien. Dazu gehören zum Beispiel:

- Sicherer Zugang zu sauberem Trinkwasser, medizinische Grundversorgung und Impfprogramme,
- Bekämpfung der Armut und
- Programme für den wirksamen Umgang mit Naturkatastrophen und zur Erhaltung einer gesunden Umwelt.

Falls arme Länder am Fortschritt nicht genügend teilhaben können, werden dort die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels zunehmen und den Fortschritt weiter verlangsamen. Für die Schweiz sollte dies jedoch kein Problem darstellen.

## Hitzeereignisse

Ob und in welchem Ausmass die für die Schweiz wichtigsten gesundheitlich relevanten Faktoren des Klimawandels (Hitzewellen, extreme Niederschläge) die Gesundheit der Schweizer Bevölkerung beeinträchtigen werden, lässt sich aus Beobachtungen in der Vergangenheit (Grize et al. 2005) ohne Berücksichtigung der Anpassungen nicht abschliessend beurteilen. So konnten nach den extremen Hitzewellen von 2003 dank gesundheitspolitischen Massnahmen die Folgen späterer Extremereignisse in Frankreich (Fouillet et al. 2008) und Europa (Kovats 2006) deutlich reduziert werden. Verschiedene

Kantone (z.B. Waadt) haben in den letzten Jahren Massnahmenpläne entwickelt um die Folgen von Hitzewellen zu dämpfen. Die Auswirkungen der Hitze können verringert werden durch:

- Anpassen des Verhaltens: direkte Sonneneinstrahlung vermeiden, Flüssigkeitsaufnahme erhöhen, kühlende Speisen zu sich nehmen, sportliche Aktivitäten im Freien während Spitzenbelastungen vermindern beziehungsweise danach den Salz- und Wasserverlust ausgleichen; Wohnung und Körper möglichst kühl halten,
- Massnahmen bei der baulichen Infrastruktur: hohe Isolation und/oder Klimaanlage und
- Freiraumgestaltung: Begrünung, Beschattung, Durchlüftung, offene Wasserflächen und -läufe (Wärmeinselleffekte reduzieren).

Langfristig erfolgt eine physiologische Anpassung des Menschen an die schleichende Zunahme der mittleren Temperatur. So steigt grundsätzlich zwar überall die Sterblichkeit während Hitzewellen wie auch Kältewellen. Die optimal mittlere Tagestemperatur – das heisst die Temperatur mit der niedrigsten Sterberate – hängt hingegen von der Klimazone ab.

## Klimawirksame Schadstoffe beeinträchtigen auch die Gesundheit

Mit Ausnahme des CO<sub>2</sub> haben alle klimaaktiven Schadstoffe wie Russ oder Schwefeldioxid bei den in der Umwelt vorkommenden Konzentrationen direkte Auswirkungen auf die Gesundheit. Global lassen sich mehr als sieben Prozent aller Krankheiten und Todesfälle der globalen Krankheitslast<sup>1</sup> den Folgen dieser Luftschadstoffe zuordnen. Eine Senkung dieser Emissionen trägt nicht nur zum Schutz des Klimas sondern auch der Gesundheit bei. Eine Energiepolitik, die auf erhöhter Energieeffizienz und erneuerbaren Energien beruht, und die gleichzeitig die gesundheitsschädigenden Schadstoffemissionen mindert, leistet sowohl einen klimawie auch gesundheitspolitischen Beitrag. Werden in der Schweiz die Immissionen der Russpartikel um 80 Prozent reduziert – wie dies von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene gefordert wird – dient dies der Klimapolitik und bringt sofortigen und langfristigen gesundheitlichen Nutzen. Denn in der Schweiz lassen sich jedes Jahr mehrere tausend Todesfälle sowie eine erhebliche Zahl an Krankheitsfällen den Schadstoffen aus der Verbrennung zuordnen (ECOPLAN 2014).

<sup>1</sup> Die Krankheitslast umfasst alle Lebensjahre, die wegen vorzeitigem Tod verloren oder wegen Krankheiten qualitativ eingeschränkten sind. Diese verlorenen oder eingeschränkten Lebensjahre können verschiedenen Ursachen zugeordnet werden.  
www.healthdata.org

## Mobilität und Raumplanung

Die Raumplanung bietet mit dem Ausbau und der Förderung städtischer Transportsysteme Möglichkeiten sowohl zur Anpassung als auch zur Minderung: Diese Transportsysteme, die aktive Mobilität, dämmen den motorisierten Individualverkehr ein und führen damit zu erhöhter körperlicher Aktivität und reduzierten Schadstoffemissionen. Auch eine an die Klimaänderung angepasste Raum- und Siedlungsentwicklung kann zum Schutz des Klimas beitragen und die Gesundheit positiv beeinflussen, zum Beispiel durch vermehrte Grünflächen, die Vermeidung von Hitzeinseln und Verdichtung statt Zersiedelung (s. a. Kap. 2.13 Urbaner Raum, S. 126).

## Herausforderungen für die Schweiz

In Risikoanalysen der Verwaltung (BAFU, BABS) wurde die Zunahme von Hitzewellen als wichtiges Risiko für die Schweiz identifiziert. Hingegen wurde bisher keine umfassende gesamtschweizerische Beurteilung der gesundheitlichen Relevanz von Klimawandel und Klimapolitik vorgenommen, die auch die Krankheitslast und -dynamik berücksichtigt. In einigen regionalen Studien (Aargau, Basel Stadt) wurde dies bereits gemacht. Eine umfassende Beurteilung muss auch einen Vergleich mit den Gesundheitsfolgen anderer Ursachen beinhalten, um die gesundheitliche Bedeutung des Klimawandels im Vergleich zu anderen Herausforderungen angemessen zu gewichten. In der Schweiz lassen sich beispielsweise weniger als ein Prozent der Spitaleinweisungen wegen Magen-Darm-Infektionen den Hitzewellen zuordnen (Manser et al. 2013). Ein grosser Anteil lebensmittelbedingter Infektionserkrankungen liesse sich jedoch durch klimaunabhängige Hygienemassnahmen vermeiden (Bless et al. 2014). Insgesamt dürfte in der Schweiz die Bedeutung des Klimawandels weniger durch seine direkten und indirekten Folgen bestimmt sein als durch politische Entscheide zum Klimaschutz und zur Anpassungsstrategie (BAFU 2014).

So dürfte für die Schweiz die wichtigste Strategie, die sowohl dem Klima wie der Gesundheit dient (Win-Win-Strategie) (Cheng 2013), in der aktiven Energie- und Luftreinhaltungspolitik liegen. Nicht nur für Verkehrsmittel sondern auch für Holzfeuerungen müssen strengste Emissionsvorschriften gelten, falls man vermeiden möchte, dass die energiepolitisch sinnvolle Förderung von klimaneutralen Holzfeuerungen zu erhöhter Luftverschmutzung führt. Man kann für die Schweiz davon ausgehen, dass der direkte gesundheitliche Nutzen einer klimarelevanten Luftreinhaltungspolitik höher ist, als die möglicherweise zu erwartenden gesundheitlichen Folgen des Klimawandels (s. a. Box Klimawirksame Schadstoffe beeinträchtigen auch die Gesundheit, S. 134).

Zentrale Bestandteile einer für die Gesundheit sinnvollen Vorsorgepolitik sind nebst der mit der Luftreinhaltung vereinbarten Energiepolitik auch die Anpassung an Hitzewellen sowie die Überwachung von Vektoren und Infektionskrankheiten bei Mensch und Tier. Wichtig ist, Entscheide zu vermeiden, die dem Klima dienen aber die Gesundheit schädigen.

## Referenzen

- BAFU (2014) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019.** Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Bern. [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung)
- Bless PJ, Schmutz C, Suter K, Jost M, Hattendorf J, Mäusezahl-Feuz M, Mäusezahl D (2014) **A tradition and an epidemic: determinants of the campylobacteriosis winter peak in Switzerland.** *European Journal of Epidemiology* 29: 527–537.
- Cheng JJ, Berry P (2013) **Health co-benefits and risks of public health adaptation strategies to climate change: a review of current literature.** *International Journal of Public Health* 58: 305–311.
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- ECOPLAN, INFRAS (2014) **Externe Effekte des Verkehrs 2010. Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.** Schlussbericht 18. Juni 2014.
- Fouillet A, Rey G, Wagner V, Laaidi K, Empereur-Bissonnet P, Le Tertre A, Frayssinet P, Bessemoulin P, Laurent F, De Crouy-Chanel P, Jouglé E, Hémon D (2008) **Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave.** *International Journal of Epidemiology* 37: 309–317.
- Grize L, Huss A, Thommen O, Schindler C, Braun-Fahrlander C (2005) **Heat wave 2003 and mortality in Switzerland.** *Swiss Medical Weekly* 135: 200–205.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 11 «Human health: impacts, adaptation, and co-benefits». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Technical Summary (TS). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kovats RS, Kristie LE (2006) **Heatwaves and public health in Europe.** *European Journal of Public Health* 16: 592–599.
- Kutlar Joss M (2010) **Klimawandel und Gesundheit. Durch Mücken übertragene Infektionskrankheiten in der Schweiz.** Universitäten Basel, Bern und Zürich.
- Manser CN, Paul M, Rogler G, Held L, Frei T (2013) **Heat waves, incidence of infectious gastroenteritis, and relapse rates of inflammatory bowel disease: a retrospective controlled observational study.** *The American Journal of Gastroenterology* 108: 1480–1485.
- Suter T, Flacio E, Farina BF, Engeler L, Tonolla M, Müller P (2015) **First report of the invasive mosquito species *Aedes koreicus* in the Swiss-Italian border region.** *Parasit Vectors* 8: 402.
- Xiao J, Peng J, Zhang Y, Liu T, Rutherford S, Lin H, Qian Z, Huang C, Luo Y, Zeng W, Chu C, Ma W (2014) **How much does latitude modify temperature-mortality relationship in 13 eastern US cities?** *International Journal of Biometeorology* 59: 365–372.

## 2.16 Globale Zusammenhänge und Migration

Die Schweiz entwickelt sich in einer zunehmend vernetzten Welt. Die Folgen des Klimawandels – sogar solche, die geografisch weit entfernt sind – können daher äusserst konkrete Auswirkungen auf die Schweizer Gesellschaft haben. Dies gilt auch für die Folgen des Klimawandels auf die Gesellschaft im Zusammenhang mit Sicherheit und Entwicklung. Einer der Hauptmechanismen, der die diesbezüglichen weltweiten Entwicklungen mit der Schweiz verbindet, ist die Migration.

*Etienne Piguet (Universität Neuenburg)*

### Klimawandel, Sicherheit und Entwicklung

In den Kapiteln 12 (Human security) und 13 (Livelihoods and poverty) des Fünften IPCC-Sachstandsberichts (IPCC 2014/WGII/Chap.12 und Chap.13) werden die Folgen des Klimawandels auf die Sicherheit und die Entwicklung behandelt. Unter dem Begriff «menschliche Sicherheit» sind unter anderem zusammengefasst:

- die sicherheitsrelevanten Herausforderungen im engeren Sinne, insbesondere die Gefahr von Gewalt und Konflikten,
- Themen der materiellen Sicherheit, zum Beispiel Ernährungssicherheit und
- Themen der immateriellen Sicherheit, zum Beispiel bedrohte Lebensbedingungen einer Bevölkerung im Bereich der Freiheit oder der Kultur.

Die im Bericht zusammengestellten Forschungsarbeiten zeigen: Obwohl nie nur ein einzelner Faktor für die Gefährdung der menschlichen Sicherheit verantwortlich ist, ist das Klima diesbezüglich ein entscheidender Faktor (IPCC/WGII/Chap.12).

### Materielle Sicherheit

Die meisten Studien zur Nahrungsmittelproduktion sagen ab 2050 einen Ernterückgang voraus (s.a. Kap. 2.10 Landwirtschaft, S. 111). Es hat sich bereits gezeigt, dass die Erwärmung Ressourcen wie Wasser, Fischbestände oder Viehzucht negativ beeinflusst. Jenseits bestimmter CO<sub>2</sub>-Grenzwerte (Zeithorizont 2100 im Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz [kurz: Referenzszenario] RCP8.5) gefährdet die Kombination von hohen Temperaturen und Feuchtigkeit in gewissen Regionen die landwirtschaftlichen Tätigkeiten und die Arbeit ausserhalb der Wohnhäuser und erhöht so die Risiken für die Ernährungssicherheit signifikant (IPCC 2014/WGII/TS).

Die armen Bevölkerungsschichten sind besonders stark von den landwirtschaftlichen Ressourcen abhängig und anfällig für Preisschwankungen – und zwar gleichermaßen in ländlichen als auch in städtischen Gebieten.

Es bleibt zu hoffen, dass die technischen Fortschritte – zum Beispiel neues Saatgut und neue Düngemittel – diese Trends auffangen können. Auch falls sich diese Hoffnung erfüllen sollte, würden diese Neuerungen teuer und wären damit vor allem eher für die Reichen bestimmt. Eine Quantifizierung ist zwar nach wie vor schwierig, aber die zunehmende Intensität bestimmter klimatischer Extremereignisse wie beispielsweise tropischer Wirbelstürme (s.a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52) wird ebenfalls Auswirkungen auf die armen Bevölkerungsschichten haben. Diese sind aufgrund ihrer Behausungen, der hohen Bevölkerungsdichte und dem fehlenden Zugang zum Gesundheits- und Rettungswesen häufig viel verletzlicher («Verwundbarkeit», s.a. Kap. 2.2 Das neue IPCC-Risikokzept, S. 77).

Die extremste Form des verwehrten Zugangs zu den Ressourcen ist eindeutig der Verlust des eigenen Lebensraumes. Sofern keine Anpassungsmassnahmen ergriffen werden, werden bis Ende des 21. Jahrhunderts hunderte Millionen von Menschen davon bedroht sein (IPCC 2014/WGII/TS; IPCC 2014/WGII/Chap.5). Auch hier sind die armen Bevölkerungsschichten in allen Bereichen als erste betroffen:

- Die schutzbedürftigsten Länder – beispielsweise Bangladesch (IPCC 2014/WGII/Chap.5) – gehören zu den ärmsten Ländern,
- gefährdete Regionen sind häufig Küstenstädte mit benachteiligten Bevölkerungsgruppen wie Alexandria, Port-au-Prince oder Jakarta (IPCC 2014/WGII/Chap.5) und
- in diesen Städten sind die hochwassergefährdeten Quartiere häufig Slums und informelle Siedlungsgebiete.

Der Klimawandel beeinflusst auch die kulturellen Praktiken und Lebensformen sowie die identitätsstiftende Zugehörigkeit der Gemeinschaften zu ihrem Lebensraum (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Dies ist insbesondere der Fall in Ökosystemen, die fragil und stark von der Umwelt abhängig sind (z.B. Inuit in der Arktis).



Abbildung 2.21: In Saint-Louis im Senegal ist das Fischerquartier vom Wasseranstieg bedroht. (Quelle: Etienne Piguet)

Einigen Studien zufolge führen die Umweltzerstörungen zwangsläufig zu Teufelskreisen von Konflikten und Migration. Die direkte Verbindung zwischen Umweltbeeinträchtigungen und sich entwickelnden individuellen oder kollektiven Gewalttaten wird jedoch in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Weniger umstritten ist die Tatsache, dass klimabedingte Gefährdungen wirtschaftliche und politische Probleme und damit indirekt die Risiken von Gewalt verschärfen können (IPCC 2014/WGII/Chap.23). Unabhängig von ihrer Ursache scheinen Konflikte die Verletzlichkeit der betroffenen Gesellschaften gegenüber dem Klimawandel zu erhöhen.

## Migration und Bevölkerungsbewegungen

Die historische Erfahrung mit klimatischen Extremsituationen wie Überschwemmungen und Dürren zeigt, dass diese grosse Bevölkerungsgruppen vertreiben können (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Die aktuellen Beobachtungen und die Modelle legen nahe, dass Überflutungen von Küstenabschnitten und schwindender Permafrost in Berggebieten zur Notwendigkeit einer Bevölkerungsumsiedlung und zu Migration führen können (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Bei klimabedingten Gefährdungen bewegen sich die Migranten grösstenteils auf die Städte zu, die oftmals jedoch selber sehr verletzlich sind (IPCC 2014/WGII/Chap.12), was die betroffenen Bevölkerungsschichten zusätzlich verletzlicher macht und ihnen sogar die nötigen Ressourcen rauben kann, mit denen sie vor Katastrophen flüchten könnten. Deswegen wächst die Bevölkerung der

exponiertesten Städte und insbesondere der Küstenstädte paradoxerweise am schnellsten durch die Migration.

Trotz des Ernstes dieser Entwicklungen lässt der Grossteil der Studien den Schluss zu, dass die Schweiz nicht durch umweltbedingte Migrationswellen betroffen sein wird. Die durch klimatische Faktoren ausgelösten Bevölkerungsbewegungen finden tatsächlich vor allem über kurze Distanzen, innerhalb von Staaten und in geringerem Ausmass zwischen benachbarten Staaten statt. Zudem ist bei extremen Ereignissen von kurzer Dauer, wie beispielsweise bei Zyklonen, festzustellen, dass die vertriebenen Bevölkerungsgruppen anschliessend wieder an die Orte der Katastrophen zurückzukehren scheinen, um ihr Leben dort wieder aufzubauen (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Nur eine Minderheit fasst eine endgültige Migration über weite Distanzen ins Auge.

Die Ursachen für Migrationen sind vielfältig und weder Konflikte, noch Armut oder das Klima sind alleinige Faktoren einer Migration, es spielen häufig auch ökonomische Faktoren eine wichtige Rolle (Wirtschaftsflüchtlinge). Es ist nicht auszuschliessen, dass eine Kombination von Faktoren in bestimmten Gebieten zu akuten Krisen oder chronischen Schwierigkeiten führt und so einen Migrationsdruck auf die Schweiz erzeugen könnte. Dies ist insbesondere möglich, wenn bereits eine grössere Zahl von Menschen aus den betroffenen Regionen in der Schweiz lebt («Diaspora»). Diese Art der Migration wird jedoch bei weitem nicht das Ausmass erreichen wie Wanderungen über kurze Distanzen.

## Herausforderungen für die Schweiz

Aus dem Fünften IPCC-Sachstandsbericht zu den Themen Entwicklung, Konflikte und Migration geht hervor, dass die Herausforderungen für die Schweiz vor allem indirekter Art sind. Zu den Herausforderungen gehören weniger die Asyl- und Migrationspolitik, sondern die Katastrophenhilfe vor Ort, die Entwicklungszusammenarbeit und die Friedensförderung.

### Asylpolitik

Es existieren derzeit keine internationalen Rechtstexte, die in globalem Massstab Vertriebenen Schutz gewähren, wenn sie vor umweltbedingten Gefährdungen flüchten. Auch das Schweizer Recht kennt diesen Asylgrund nicht. Bis heute hat denn auch niemand Asyl oder eine vorläufige Aufnahme aufgrund einer «Umweltflucht» erhalten. Dies wird sich auch in Zukunft nicht gross ändern. Die Schweiz könnte hingegen eine Rolle bei der Umsetzung von besseren Aufnahmebedingungen für Umweltflüchtlinge in den Nachbarländern spielen, indem sie Bemühungen wie die Nansen-Initiative, in der sie an der Seite von Norwegen bereits eine wichtige Rolle übernimmt, weiterverfolgt und unterstützt (The Nansen Initiative 2016).

### Migrationspolitik

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass tendenziell bewegungsunfähige Bevölkerungsgruppen (z. B. aufgrund fehlender ökonomischer Ressourcen) zu den Hauptopfern klimabedingter Gefährdungen gehören. Eine erleichterte Migration kann daher eine wirkungsvolle Anpassungs- und Überlebensstrategie sein (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Dieser Ansatz könnte im Rahmen von Migrationspartnerschaften und des internationalen Dialogs über die Migration verstärkt werden (EDA 2016b).

### Katastrophenhilfe und Friedensförderung

Extreme Wetterereignisse werden häufiger und heftiger, Notsituationen nehmen zu. Da die darauf folgenden Verschiebungen von Bevölkerungsgruppen in der Regel zeitlich begrenzt sind und über kurze Distanzen erfolgen, verlangen sie vor allem eine humanitäre Nothilfe vor Ort und Massnahmen für den Wiederaufbau, zu deren Unterstützung die Schweiz verpflichtet ist. Falls sich die Umweltzerstörungen verschlimmern oder sich durch Konflikte verschärfen, sollte die Friedensförderung ebenfalls eine grössere Rolle spielen (EDA 2016a).

## Entwicklungszusammenarbeit

Mehrere Schwerpunktländer der schweizerischen Entwicklungszusammenarbeit sind in Bezug auf klimatische Bedrohungen und Risikopopulationen an vorderster Front betroffen. Es ist wichtig, dass die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel von Anfang an in den Entwicklungsprojekten berücksichtigt werden – wie dies heute bereits häufig der Fall ist. Aus den Forschungsarbeiten geht unter anderem hervor, dass die Kosten für Investitionen in den Schutz und die Prävention vor klimabedingten Gefährdungen in der Regel um einiges tiefer sind als die sozialen und wirtschaftlichen Folgekosten im Falle einer Untätigkeit (IPCC 2014/WGII/Chap.5). Sogar die Folgen eines steigenden Meeresspiegels können aufgrund der Langsamkeit des Prozesses durch den Bau von Schutzvorrichtungen minimiert werden, allerdings sind diese Massnahmen oftmals sehr teuer.

Die Gefahr, dass die Klimaänderung die sozioökonomischen Ungleichheiten verschärft und die Sicherheit gefährdet, ist demnach erheblich. Die Multikausalität der Naturereignisse kann aber auch als ein Zeichen der Hoffnung interpretiert werden: Sie bedeutet, dass trotz der Unvermeidbarkeit gewisser klimabedingter Zerstörungen, gut durchdachte Präventions-, Schadensbegrenzungs- und Entwicklungsstrategien höchst aktuell bleiben.

### Referenzen

- EDA (2016a) **Aussenpolitik. Menschenrechte und Menschliche Sicherheit. Frieden.** [www.eda.admin.ch](http://www.eda.admin.ch)
- EDA (2016b) **Aussenpolitik. Menschenrechte und Menschliche Sicherheit. Migration.** [www.eda.admin.ch](http://www.eda.admin.ch)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 5 «Coastal systems and low-lying areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 12 «Human security». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 13 «Livelihoods and poverty». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 23 «Europe». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Technical Summary (TS). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- The Nansen Initiative (2016) **The Nansen Initiative – Towards a Protection Agenda for people displaced across borders in the context of disasters and the effects of climate change.** [www.nanseninitiative.org](http://www.nanseninitiative.org)

## 2.17 Versicherungs- und Finanzindustrie

Die aus Wetterextremen resultierenden gesamtökonomischen Schäden haben in den letzten Jahrzehnten zugenommen, dies vor allem aufgrund der Zunahme exponierter Sachwerte. Der Einfluss des Klimawandels ist dabei schwierig abzuschätzen. Der Klimawandel und die wirtschaftliche Entwicklung von Privateigentum und öffentlicher Infrastruktur werden das Schadenspotenzial wahrscheinlich weiter steigen lassen. Die Versicherungswirtschaft muss sich dabei neuen Herausforderungen wie steigenden Schadenssummen stellen. Bei einer Häufung von Ereignissen stellt sich auch die Frage der Versicherbarkeit. Um diese auch in Zukunft gewährleisten zu können, braucht es die stetige Weiterentwicklung von Präventionsmassnahmen, Massnahmen wie Prämien erhöhungen, Anpassungen der Versicherungsdeckung oder die zusätzliche Verteilung der Risiken. Die Finanzindustrie kann durch die Entwicklung neuer Finanzierungsmodelle dazu beitragen, dass ausreichend Kapital für Anpassungsmassnahmen bereit steht. Die Berücksichtigung von Klimarisiken trägt dazu bei, Anlagerisiken in der Vermögensverwaltung zu kontrollieren und unerwartete Verluste zu vermeiden.

*Lea Müller (Swiss Re), Olivia Martius (Universität Bern), David N. Bresch (Swiss Re, \*neu ETH Zürich und MeteoSchweiz), Sabine Döbeli (Swiss Sustainable Finance)*

Die Schweiz ist ein Leben mit Naturkatastrophen gewöhnt. Überschwemmungen, Stürme und Hagel haben in der Schweiz in den vergangenen 60 Jahren immer wieder wirtschaftlichen Schaden verursacht. Auch andere Naturkatastrophen wie Hitzewellen, Lawinen, Erdbeben und Felsstürze können die Bevölkerung bedrohen. Durch Präventionsmassnahmen kann das Risiko vermindert werden und Versicherungslösungen können die Schadensbewältigung tragbar machen. Im Folgenden werden die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherung von Sachwerten (z. B. Gebäude, Hausrat) diskutiert. Es fehlen die Grundlagen, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Versicherungsprodukte in den Bereichen Gesundheit, Energieversorgung und Tourismus zu diskutieren. Im letzten Abschnitt wird die Rolle der Finanzindustrie erläutert.

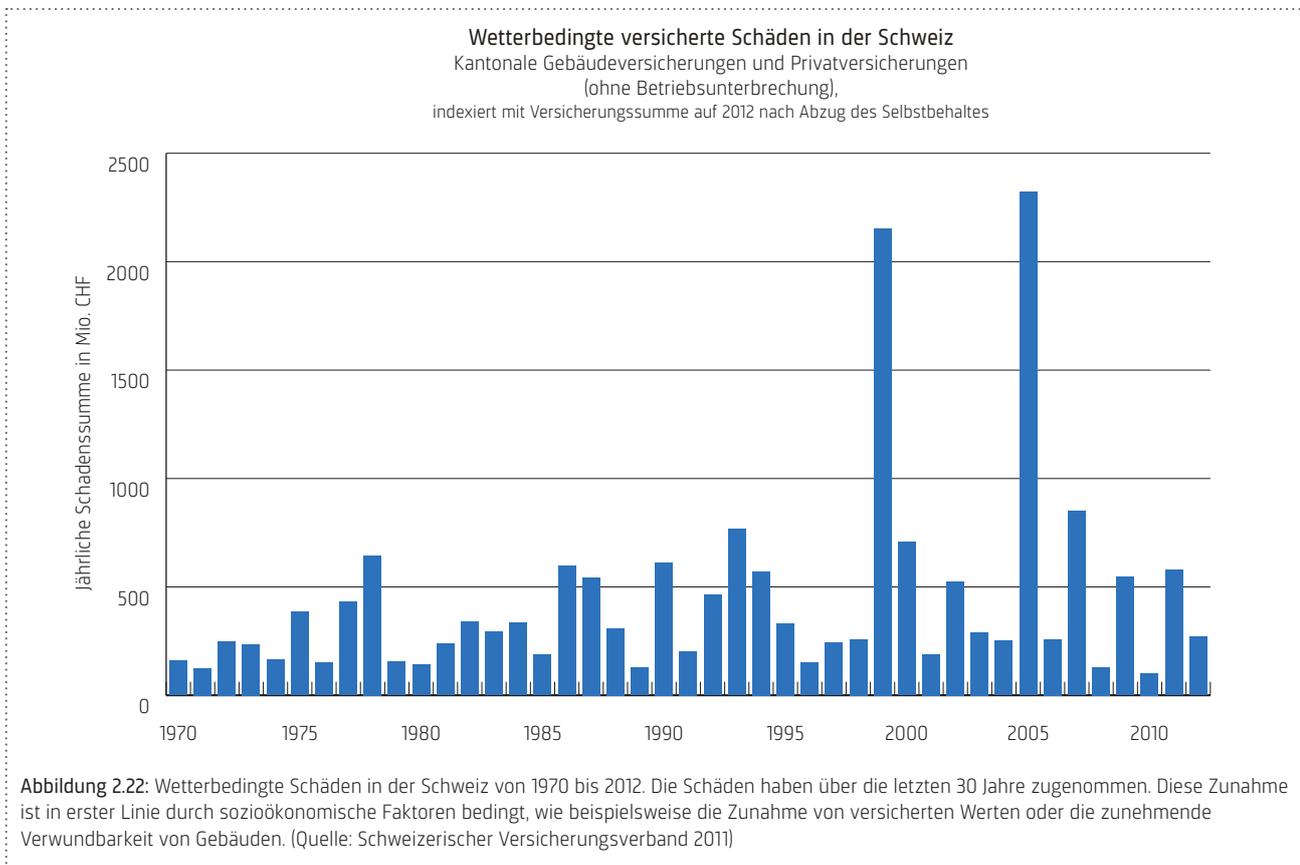
### Drei Wirkungsweisen der Versicherung

Im Bereich Naturgefahren bezeichnet das Risiko die Grösse und Wahrscheinlichkeit eines möglichen Schadens und ist somit das Produkt von Eintrittshäufigkeit und Schadensausmass. Das Schadensausmass ist abhängig von der Intensität des Ereignisses, von den betroffenen Werten und von deren Schadensempfindlichkeit. Versicherungen sind eine Möglichkeit, die Risiken für Einzelpersonen und die gesamte Wirtschaft tragbar zu machen. Sie spielen eine zentrale Rolle bei der Bewältigung eines Ereignisses. Im Bereich des Klimawandels wirken Versicherungen auf drei Arten:

- **Stabilisieren der Lebensgrundlage von Einzelpersonen und der gesamten Wirtschaft:** Die Versicherungsindustrie erkennt mögliche Risiken, schätzt Risiken ab, bewertet diese und übernimmt Risiken. In einer Versicherung schliesst

sich eine Vielzahl von Menschen zu einer Risikogemeinschaft zusammen. Die Risiken durch plötzliche und unvorhersehbare Ereignisse werden gemeinsam gestemmt und somit tragbar. Bei Naturkatastrophen übernehmen Versicherungen einen wesentlichen Teil der Schadenslast und unterstützen so die Intervention, Instandstellung und den Wiederaufbau. Sie engagieren sich auch im Bereich der Prävention. Die Versicherung trägt damit zur Stabilisierung der Lebensgrundlage von Einzelpersonen und der gesamten Wirtschaft bei (IPCC 2014/WGII). Auch können damit die Kosten dieser Risiken internalisiert werden.

- **Fördern von Innovation und Wachstum:** Auch die Privatwirtschaft kann potenzielle Risiken – etwa im Zusammenhang mit grossen Bauvorhaben oder der Entwicklung von neuen Techniken wie Windfarmen und Solartechniken – durch die Weitergabe an die Versicherung mindern. Hierbei nimmt die Versicherung eine wichtige Funktion als Innovations- und Wachstumsförderin ein (Swiss Re 2010). Dabei lanciert sie aktiv neue Produkte (Sach- und Haftpflichtversicherung von neuen Techniken wie Windfarmen und Solaranlagen, Wetterindexversicherungen für Landwirtschaft und Tourismus), die nicht nur den Versicherungsnehmern helfen, sich auf den Klimawandel einzustellen, sondern auch viel dazu beitragen können, dass die Umstellung auf eine klimafreundliche Wirtschaft gelingt.
- **Versorgen der Wirtschaft mit langfristigem Kapital:** Die Versicherungsindustrie verwaltet beachtliche Vermögenssummen, die für die Zahlung von zukünftigen Schäden benötigt werden, und zählt zu den grossen institutionellen Anlegern. Der grösste Teil des Kapitals wird langfristig in Staats- und Unternehmensanleihen angelegt und steht somit Regierungen und Unternehmen zur Verfügung (Swiss Re 2010).



## Versicherbarkeit

Die Versicherung stellt Kapital zur Deckung von Schäden durch Naturgefahren zur Verfügung; künftige Schadenszahlungen werden durch Prämieinnahmen vorfinanziert. Die zentrale Voraussetzung ist dabei die Versicherbarkeit der Naturgefahren. Versicherbarkeit ist keine feste Formel, sondern ergibt sich aus einer Reihe grundlegender Kriterien, die erfüllt sein müssen, damit ein Risiko versicherbar ist (Swiss Re 2010):

- **Gegenseitigkeit:** Die Versicherungsnehmer und der Versicherer bilden eine Gemeinschaft und teilen die Risiken zu wirtschaftlichen und fairen Bedingungen.
- **Zufälligkeit:** Der Zeitpunkt eines versicherten Ereignisses an einem bestimmten Ort ist nicht vorhersehbar, und das Eintreten ist unabhängig vom Willen sowohl des Versicherten als auch des Versicherers. Häufig auftretende Schäden widersprechen hingegen dem Grundsatz der Versicherbarkeit. Für die Schadensminderung solcher Ereignisse müssen deshalb präventive Massnahmen getroffen werden.
- **Schätzbarkeit:** Die Häufigkeit und das Ausmass von Schadensereignissen müssen innerhalb eines angemessenen Erwartungsbereichs quantifiziert werden können.

- **Wirtschaftlichkeit:** Aus Sicht des Versicherers enthält der Preis die erwarteten Schadenskosten sowie Abschluss- und Verwaltungskosten des Geschäfts. Der Preis soll ausserdem einen angemessenen Ertrag auf das Kapital ermöglichen, das auch den Ansprüchen der Kapitalgeber (z. B. Aktionäre) genügt. Schwerere Schäden und häufigere Schadensereignisse führen langfristig zu höheren Versicherungsprämien und angepassten Versicherungsbedingungen.

Der Klimawandel kann demnach die Versicherbarkeit von Naturgefahren insbesondere durch Veränderungen der Häufigkeit beeinflussen, zum einen indem gewisse Ereignisse sehr häufig werden und damit nicht mehr versicherbar, zum anderen indem heute sehr seltene, nicht schätzbare Ereignisse häufiger und damit schätz- und versicherbar werden.

## Nationale Situation

Heute sind in der Schweiz 99 Prozent aller privaten Gebäude und beweglichen Güter versichert gegen Elementarschäden wie Hochwasser, Überschwemmung, Sturm, Hagel, Lawinen, Schneedruck, Felssturz, Steinschlag und Erdbeben (Schweizerischer Versicherungsverband 2011).

In den letzten Jahren haben die naturbedingten Schäden an Gebäuden in der Schweiz zugenommen (siehe Abb. 2.22). Dieser Anstieg ist in erster Linie durch sozioökonomische Faktoren bedingt, wie der Zunahme von versicherten Werten oder der zunehmenden Verwundbarkeit von Gebäuden (CH2050; IPCC 2014/WGII), sei es aufgrund von architektonischen Veränderungen, der eingesetzten Materialien oder der Ansiedlung in Gefahrengebieten. Zudem spielen für den Trend wegen der für eine Betrachtung von Extremereignissen relativ kurzen Zeitperiode auch natürliche Schwankungen eine wichtige Rolle, wie das zufällige Auftreten von Einzelereignissen mit Rückkehrperioden, die möglicherweise weit über der untersuchten Zeitperiode liegen (z. B. Sturm «Lothar» 1999 oder die Überschwemmungen von 2005). Der wichtige Einfluss solcher sozioökonomischen Faktoren sowie der Einfluss von Präventionsmassnahmen erschweren es abzuschätzen, inwiefern die Schäden aufgrund des Klimawandels zunehmen (IPCC 2014/WGII). Quantitative Analysen sind deshalb noch ausstehend.

Die schadenträchtigen Naturgefahren in der Schweiz sind Windstürme, Überschwemmungen, Starkniederschläge, Hagel sowie Hitzewellen und in zweiter Linie Massenbewegungen wie Lawinen, Steinschlag oder Murgänge. Überschwemmungen haben in den vergangenen 40 Jahren mehr als die Hälfte aller Naturkatastrophenschäden in der Schweiz verursacht (Swiss Re 2013). Ausserdem gefährden Hitzewellen die Gesundheit von Kleinkindern sowie betagten und chronisch kranken Menschen und haben in den letzten Jahren die meisten Todesopfer aufgrund von Naturgefahren gefordert (BAFU 2013).

## Zukünftige Entwicklung

Der Klimawandel wird zu Änderungen in der Häufigkeit, der Dauer und der Intensität von Naturgefahren führen. Die Stärke der heutigen Klimamodelle liegt bei Vorhersagen von globalen Durchschnittswerten insbesondere der Temperatur. Viel schwerer tun sich die Modelle damit, regionale und lokale Phänomene wie Extremniederschläge darzustellen. Die Zunahme von Dauer und Intensität von Hitzewellen ist allerdings sehr wahrscheinlich, und auch eine Zunahme von Trockenperioden wird erwartet. Aussagen zu künftigen Änderungen von Starkniederschlägen und Hagel in der Schweiz sind mit grossen Unsicherheiten verbunden, es ist jedoch von einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen auszugehen, dies aufgrund des höheren Wassergehalts von wärmerer Luft. Eine Zusammenfassung des heutigen Wissensstands zu den erwarteten Änderungen atmosphärischer Naturgefahren findet sich im Kapitel 5 der Swiss Climate Change Scenarios (CH2011 2011).

## Versicherung von Gebäuden in der Schweiz

In der Schweiz sind bei den Gebäuden die Versicherungen von Feuer und Elementarschäden (Hochwasser, Überschwemmungen, Sturm, Hagel, Lawinen, Schneedruck, Felssturz, Steinschlag oder Erdbeben) gekoppelt. Die Versicherung wird in 19 Kantonen jeweils durch eine kantonale Monopolanstalt, die so genannte Kantonale Gebäudeversicherung, angeboten, in den anderen Kantonen bieten private Versicherungsgesellschaften Elementarschadenversicherungen von Gebäuden an. Der Abschluss dieser Versicherung ist in allen Kantonen (mit Ausnahme der Kantone Genf, Tessin und Wallis) obligatorisch. Die Versicherungsprämien sowie der Selbstbehalt sind in der ganzen Schweiz durch Bund und Kantone gesetzlich geregelt und festgelegt. Hausrats- und Inventarversicherungen (Gebäudeinhalt) sind nur in den Kantonen Waadt und Nidwalden obligatorisch und werden durch die Kantonale Gebäudeversicherung abgedeckt. In allen anderen Kantonen bieten auch private Versicherungen diese Dienstleistungen an.

Die Kantonalen Gebäudeversicherungen bieten einen unbegrenzten Versicherungsschutz an, während für alle privatrechtlichen Versicherungsunternehmen zusammen eine schweizweite Haftungsmitel pro Ereignis von jeweils einer Milliarde Franken gilt. Diese sogenannte Katastrophenbremse müssen alle Versicherten solidarisch mittragen (Finma 2013).

Der Klimawandel könnte indirekt auch die Vulnerabilität von Gebäuden erhöhen, indem Minderungs- und Anpassungsmassnahmen wie Gebäudesanierungen (z. B. nachträglich installierte Aussenisolationen), auf Dächern installierte Solaranlagen oder das Anbringen von Sonnenstoren das Schadenspotenzial für gewisse Ereignisse erhöhen.

## Die aktive Rolle der Versicherungsindustrie

Klimaanpassung ist eine dringliche Aufgabe für Entscheidungsträger auf nationaler und lokaler Ebene. Es sind viele Anpassungsmassnahmen bekannt, um die Anfälligkeit von Regionen, Gemeinden und Städten gegenüber dem Klimawandel zu reduzieren (BAFU 2013). Diesbezüglich findet auch ein regelmässiger Dialog unter allen Akteuren statt, insbesondere was die übergeordnete Zusammenarbeit mit der öffentlichen Hand anbelangt.

Die Versicherungsindustrie beurteilt und übernimmt Risiken und ist darauf angewiesen, bestehende aber auch neue Risiken frühzeitig zu erkennen und zu verstehen. Damit ist die Versicherungsindustrie prädestiniert, auch im Umgang mit dem Klimawandel eine wichtige und ak-

tive Rolle zu spielen. Anpassungsmassnahmen wie Hochwasserschutz, Zonenplanung oder angepasste Bauvorschriften können die Versicherungsprämien senken. Dies gilt allerdings nicht nur für Schutzmassnahmen im Hinblick auf den Klimawandel, sondern auch für die Behebung von Schutzdefiziten gegenüber bereits heute bestehenden Gefährdungen. Auf der anderen Seite verteuern risikoe erhöhende Faktoren wie häufiger auftretende und stärkere Ereignisse die Prämie. In der Schweiz sind die Versicherung von Elementarschäden gesetzlich geregelt und die Prämien staatlich festgelegt (s.a. Box Versicherung von Gebäuden in der Schweiz, S. 141).

Durch das Erkennen und Bewerten (z.B. «Bepreisen») von heutigen, aber auch zukünftigen Risiken schafft die Versicherung Grundlagen für die langfristige Versicherbarkeit und – mit der Unterstützung von Präventionsanstrengungen beispielsweise durch Prämienereleichterungen – auch Anreize zu einem vorausschauenden Umgang und zur Risikoprävention. Anpassungsmassnahmen zur Stärkung der Klimaresilienz existieren (IPCC 2012/SREX; IPCC 2014/WGII).

## Die Rolle von Banken und Vermögensverwaltern

Anpassungsmassnahmen lassen den Finanzierungsbedarf für Infrastruktur sowohl im öffentlichen wie auch im privatwirtschaftlichen Sektor ansteigen (Swiss Re 2014). Hier kann die Finanzindustrie eine vermittelnde Rolle einnehmen und durch die Entwicklung neuer Finanzierungsmodelle dazu beitragen, dass ausreichend Kapital für diese Anpassungsmassnahmen bereitgestellt wird.

Die globalen Auswirkungen des Klimawandels verändern die Rahmenbedingungen für Unternehmen und wirken sich auch auf die Bewertung von Anlagevermögen aus. Dies führt zu neuen Risiken im Anlagegeschäft, die sowohl institutionelle wie auch private Anleger betreffen (Mercer 2011). Insbesondere Pensionskassen, die Kapital treuhänderisch verwalten, sind auf Vermögensverwaltungsdienstleistungen angewiesen, die Klimarisiken soweit als möglich berücksichtigen. Nötig sind dafür Methoden zur Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Wert von Anlagen. Banken und Vermögensverwalter sind gefordert, solche Methoden zu entwickeln und in ihre Vermögensverwaltung zu integrieren. Klimarisiken können sowohl bei der Bestimmung der Anlagestrategie und der Auswahl verschiedener Anlageklassen berücksichtigt werden wie auch bei der Auswahl einzelner Anlagen (z.B. CSSP & SPG 2015). Eine Möglichkeit ist, die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Portfolios zu berechnen, indem die Emissionen einzelner Firmen relativ zu ihrem Anteil aufsummiert werden. Einzelne Investo-

ren gehen sogar so weit, dass sie besonders CO<sub>2</sub>-intensive Unternehmen (z.B. Erdölfirmen) ganz aus ihren Anlagen ausschliessen.

## Herausforderungen für die Schweiz

Die Versicherungswirtschaft muss sich als Folge des Klimawandels Herausforderungen in den Bereichen Prämien schätzung, Prävention, Kapitalknappheit nach Grossereignissen und steigenden Schadenssummen stellen (IPCC 2014/WGII). Die Frage, ob Versicherungen weiterhin möglich sind, stellt sich grundsätzlich (IPCC 2014/WGII). Für die Schweiz wird dies relevant, sobald ein Einfluss des Klimawandels auf die Entwicklung der Schadenssumme erkennbar ist oder erwartet werden kann. Mögliche Anpassungsmassnahmen des Versicherungsektors umfassen Prämien erhöhungen, Einschränkung oder Minderung der Versicherungsdeckung, zusätzliche Verteilung der Risiken und das Schaffen von Anreizen zur Risikominderung (IPCC 2014/WGII).

Nicht-versicherte Naturkatastrophenschäden sind eine erhebliche finanzielle Belastung für Privatpersonen und den Staat. Meist übernimmt der Staat – und damit letztlich der Steuerzahler – die entsprechende Rechnung bei schweren Katastrophen. Nach einem Ereignis muss die Regierung unmittelbar Kosten für Interventions- und direkte Hilfsmassnahmen tragen und für längerfristige Folgekosten von grossen Infrastrukturprojekten aufkommen, wenn beschädigte Strassen oder andere öffentliche Anlagen und Einrichtungen wieder aufgebaut werden müssen. Eine Versicherung ist ein vorausschauender Finanzierungsmechanismus für Wirtschaft und Private, denen die finanziellen Möglichkeiten, wie sie ein Staat hat, zur Deckung von Folgekosten fehlen.

Der Schutz vor Naturgefahren erfolgt heute nach den Grundsätzen des integralen Risikomanagements, wobei mit allen Beteiligten ein umfassender Umgang mit Naturgefahren etabliert wird. So arbeiten Bundes-, Kantons- und Gemeindeebenen sowie Versicherungen und Bevölkerung zusammen, um vorausschauend mit Naturgefahren umzugehen und somit frühzeitig agieren und nicht nur reagieren zu können. Wenn sich in der Schweiz aufgrund des Klimawandels die Häufigkeit von schadenbringenden Naturgefahren ändert, kann dies zu Anpassungen im integralen Risikomanagement führen und folgende Konsequenzen für die Versicherbarkeit beziehungsweise Notwendigkeit von Prävention dieser Ereignissen haben:

- Wenn ein kleines Ereignis lokal sehr viel häufiger auftritt, zum Beispiel im Schnitt alle drei Jahre anstatt alle 15 Jahre, ist eine Versicherung dieses Ereignisses unter Umständen nicht mehr wirtschaftlich, und das Ereignis ist demnach nicht mehr versicherbar. Dann müssen an-

dere, präventive Schutzmassnahmen getroffen werden, zum Beispiel bauliche Massnahmen. Zusätzliche Prävention ist aber auch bei noch versicherbaren Ereignissen eine Möglichkeit.

- Wenn sehr grosse schadenbringende Ereignisse – die im Moment nicht versicherbar sind, weil sie so selten auftreten (z.B. durchschnittlich alle tausend Jahre), dass das Prinzip der Schätzbarkeit nicht gegeben ist – häufiger und damit schätzbar werden, sollten die Versicherungen entsprechende Versicherungsmöglichkeiten anbieten und müssten dazu ihre Kapitaldeckung erhöhen.

Grosse internationale Investoren erwarten schon heute, dass solche Klimarisiken in der Vermögensverwaltung berücksichtigt werden. Für Schweizer Banken und Vermögensverwalter ist es daher wichtig, dass sie geeignete Prozesse zur Berücksichtigung von Klimarisiken bei Anlagen etablieren und diese laufend weiterentwickeln, um international konkurrenzfähig zu bleiben.

Anpassung an den Klimawandel ist günstiger als Zuwarten, aber nicht gratis – und bleibt nur dann bezahlbar, wenn der Klimawandel und damit auch seine Auswirkungen in möglichst engen Grenzen gehalten werden können.

## Referenzen

- BAFU (2013) **Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton Aargau**. Ergebnisbericht. Bundesamt für Umwelt.
- 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
- CH2050 (2007) **Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft**. OcCC, Bern (eds.), 168 pp.
- CSSP, SPG (2015) **Kohlenstoffrisiken für den Finanzplatz Schweiz**. Center for Social and Sustainable Products & South Pole Group (eds.), Zürich/Vaduz, 94 pp.
- Finma (2013) **Elementarschadenversicherung in der Schweiz (ES-Versicherung) Historie und Anwendungsbereich**. [www.finma.ch](http://www.finma.ch)
- IPCC (2012) **Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX)**. [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Mercer (2011) **Climate Change Scenarios – Implications for strategic asset allocation**. Mercer, London.
- Schweizerischer Versicherungsverband (2011) **Die einzigartige Elementarschadenversicherung**. [www.svv.ch](http://www.svv.ch)
- Swiss Re (2010) **Wegweisende Einführung in die Rückversicherung**. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)
- Swiss Re (2013) **Geschichte der Versicherung in der Schweiz**. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)
- Swiss Re (2014) **Economics of Climate Adaptation – Shaping climate resilient development: A global overview of case studies with a focus on infrastructure**. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)

## 2.18 Strategien und Massnahmen des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel

Die Folgen des Klimawandels sind mit höheren Temperaturen sowie veränderten Niederschlagsverhältnissen und Naturgefahrenereignissen auch in der Schweiz bereits zu erkennen. Es ist zu erwarten, dass sie spätestens ab Mitte des 21. Jahrhunderts noch deutlicher spürbar werden. Um Verwaltung, Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt bestmöglich zu unterstützen, hat der Bund die Strategie «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz» erarbeitet. Die Ziele sind, die Risiken des Klimawandels zu minimieren, die Bevölkerung, Sachwerte und die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen sowie die Anpassungsfähigkeit von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu steigern. Zur Strategie gehört auch ein Aktionsplan mit 63 Massnahmen, die in den Jahren 2014 bis 2019 umgesetzt werden sollen. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist es nötig, die Anpassungsstrategie in andere Strategien und Politiken des Bundes zu integrieren. Anpassung ist aber nicht nur eine Aufgabe des Staates, sondern muss durch alle betroffenen Akteure erfolgen.

Marco Pütz (WSL), Anthony Patt (ETH Zürich), Roland Hohmann (BAFU)

### Grundlagen der Anpassung

Es gibt kein Patentrezept für die Anpassung an den Klimawandel. Die Auswirkungen des Klimawandels weisen grosse örtliche und zeitliche Unterschiede auf. Aus diesem Grund müssen Anpassungsmassnahmen so geplant und umgesetzt werden, dass sie die konkreten Bedingungen und Erfahrungen vor Ort berücksichtigen. Die heute am weitesten verbreiteten Anpassungsaktivitäten betreffen Versicherungen oder technische Massnahmen gegen Naturgefahren wie zum Beispiel Dämme gegen Hochwasser oder Schlammlawinen. Andere Aktivitäten wie ökosystembasierte, institutionelle oder gesellschaftliche Massnahmen – beispielsweise die Warnung und Alarmierung im Gesundheitsbereich – gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Bei der Anpassung kann zwischen autonomer und geplanter Anpassung unterschieden werden. Während autonome (auch spontane) Anpassung selbständig, ungeplant und unbewusst erfolgt, ist geplante Anpassung gezielt auf reale oder erwartete Klimaänderungen mit ihren Folgen

ausgerichtet. Eine weitere Möglichkeit ist, zu unterscheiden zwischen technischen, ökosystembasierten und gesetzlichen sowie management- und politikorientierten Klimaanpassungsmassnahmen.

Am wirksamsten sind Anpassungsaktivitäten, wenn sie Synergien nutzen und Win-Win-Situationen (Co-Benefits) mit anderen Aktivitäten herstellen können. Bei der Auswahl der Anpassungsmassnahmen sind flexible und auf Lernen ausgerichtete Massnahmen zu bevorzugen.

### Erschwerende Umstände

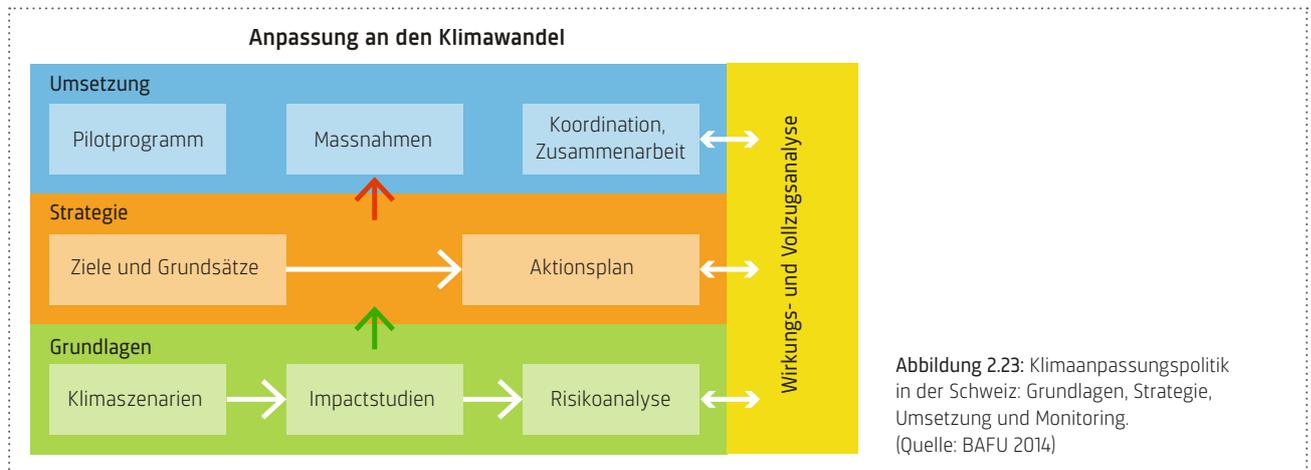
Die Planung und Umsetzung von Anpassungsaktivitäten wird unter anderem durch folgende Umstände erschwert:

- die lokalen Folgen des Klimawandels sind unklar,
- finanzielle und personelle Ressourcen sind ungenügend,
- die Koordination der Anpassungsaktivitäten ist nicht übergreifend über Sektoren und administrative Ebenen,
- klimabedingte Risiken sind zu wenig bekannt und werden unterschiedlich eingeschätzt,
- Massnahmen und ihre Wirkungen und damit Kosten und Nutzen sind zeitlich entkoppelt,
- Leadership in Politik, Verwaltung oder Wirtschaft fehlt teilweise.

In der internationalen Debatte wird nach Entwicklungspfadern gesucht, die Massnahmen zum Schutz des Klimas und zur Anpassung an den Klimawandel kombinieren, um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Synergien zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung repräsentieren jedoch nicht unbedingt immer die jeweils wirksamsten Massnahmen (IPCC 2014/WGII/SPM).

### Anpassung an den Klimawandel

Anpassung an den Klimawandel bezeichnet den Prozess der Anpassung von natürlichen und gesellschaftlichen Systemen an tatsächliche und erwartete Veränderungen des Klimas sowie deren Folgen. Ziele der Anpassung sind, die negativen Auswirkungen zu mindern und Vorteile zu nutzen. In Europa gehören zu den grössten Handlungsfeldern für Klimaanpassung Hitzewellen, extreme Niederschlagsereignisse, der Anstieg des Meeresspiegels, Hochwasser sowie Veränderungen der Wasserressourcen und der Biodiversität (IPCC 2014/WGII/SPM).



## Strategie des Bundesrates zur Anpassung

Artikel 8 des CO<sub>2</sub>-Gesetzes sieht vor, dass der Bund Aktivitäten zur Anpassung an den Klimawandel koordiniert und Massnahmen zur Verbesserung der Wissensgrundlagen ergreift. Darauf basierend hat der Bundesrat die Verwaltung beauftragt, eine Strategie zur «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz» zu entwickeln.

### Teil 1 der Strategie: Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder

Am 2. März 2012 wurde der erste Teil der Strategie genehmigt, der die Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder für die Klimaanpassung in der Schweiz enthält (BAFU 2012). Die drei Ziele der Strategie sind:

- die sich ergebenden Chancen nutzen,
- die Risiken des Klimawandels minimieren und den Schutz von Bevölkerung, Sachwerten und den natürlichen Lebensgrundlagen sicherstellen,
- die Anpassungsfähigkeit von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt steigern.

Ausserdem umfasst die Strategie neun Teilstrategien für neun Sektoren (Wasserwirtschaft, Umgang mit Naturgefahren, Landwirtschaft, Waldwirtschaft, Energie, Tourismus, Biodiversitätsmanagement, Gesundheit und Raumentwicklung) sowie zwölf sektorübergreifende Herausforderungen.

### Teil 2 der Strategie: Aktionsplan 2014 – 2019

Als zweiten Teil seiner Strategie zur Anpassung an den Klimawandel hat der Bundesrat am 9. April 2014 einen Aktionsplan verabschiedet (BAFU 2014). Der Aktions-

plan enthält Massnahmen, die bereits umgesetzt werden, konkret geplant oder noch zu entwickeln sind, um die Anpassungsstrategie in den Jahren 2014–2019 umzusetzen und die Schweiz auf die Folgen des Klimawandels vorzubereiten. Zu den insgesamt 63 Massnahmen des Aktionsplans gehören 54 sektorale Massnahmen in den genannten neun Sektoren, die vor allem in den jeweiligen Sektoralpolitiken umgesetzt werden sollen. Weitere fünf Massnahmen dienen dazu, sektorenübergreifend die Wissensgrundlagen zu verbessern. Mit den letzten vier Massnahmen soll die Zusammenarbeit von Bund, Kantonen, Städten und Gemeinden für die Anpassung an den Klimawandel verbessert werden. Die Fortschritte bei der Umsetzung der Massnahmen und die erzielte Wirkung werden regelmässig überprüft. Spätestens 2019 wird über das weitere Vorgehen bei der Anpassung an den Klimawandel entschieden.

### Strategien aufeinander abstimmen

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Klimaanpassungsaktivitäten ist es wichtig, dass die Anpassungsstrategie in andere Strategien und Politiken des Bundes integriert wird oder zu deren Ergänzung und Umsetzung hinzugezogen wird. Abstimmungsbedarf besteht unter anderem mit

- Strategie «Sicherheit vor Naturgefahren» der Plattform Naturgefahren PLANAT,
- Umsetzung des Berichts «Umgang mit lokaler Wasserknappheit»,
- Klimastrategie Landwirtschaft,
- Waldgesetz,
- Energiestrategie 2050,
- Wachstumsstrategie für den Tourismusstandort Schweiz,
- Strategie Biodiversität Schweiz,
- Tiergesundheitsstrategie Schweiz 2010+ und
- Raumkonzept Schweiz.

## Förderung und Umsetzung von Klimaanpassungsaktivitäten in der Schweiz

Die geplante Klimaanpassung in der Schweiz basiert auf soliden wissenschaftlichen Grundlagen und einer differenzierten Strategie. Die Umsetzung erfolgt durch verschiedene Massnahmen und wird unterstützt durch ein Pilotprogramm. Für die Weiterentwicklung von Grundlagen, Strategie und Umsetzung wird ein Monitoring aufgebaut, um Wirkungen und Vollzug evaluieren zu können (s. Abb. 2.23). Die Klimaanpassungsaktivitäten des Bundes werden nur dann erfolgreich sein, wenn die Betroffenen aktiv mitmachen und zusätzlich eigene Initiativen ergreifen.

### Klimabedingte Risiken und Chancen bis 2060 analysieren

Neben den Klimaszenarien (CH2011) und Impact-Studien (CH2014) ist die Analyse der klimabedingten Risiken und Chancen bis 2060 eine zentrale wissenschaftliche Grundlage für Klimaanpassungsaktivitäten in der Schweiz. Dazu wurde eine Methode entwickelt, mit der Risiken und Chancen des Klimawandels sektorenübergreifend und nach verschiedenen klimawandelbedingten Gefahren und Effekten analysiert und auf quantitative oder qualitative Weise bewertet werden können (Holthausen et al. 2011). Die Methode berücksichtigt sowohl projizierte klimatische als auch demographische und sozioökonomische Veränderungen in der Schweiz. Die Analyse erfolgt für die sechs Grossräume der Schweiz: Mittelland, Alpen, Voralpen, Jura, Südschweiz und grosse Agglomerationen. Für jeden dieser Grossräume wird mindestens ein repräsentativer Kanton analysiert. Die erste Fallstudie im Kanton Aargau (EBP et al. 2014) zeigt, dass durch den Klimawandel einerseits Risiken für Biodiversität und Gesundheit entstehen, andererseits leichte Chancen für den Energieverbrauch und die Landwirtschaft zu erwarten sind. Die Analyse für die gesamte Schweiz wird voraussichtlich Mitte 2017 vorliegen.

### Pilotprogramm: Innovative Projekte in den Regionen fördern

Um Anpassungsaktivitäten in den Regionen zu fördern, wurde 2013 vom Bundesamt für Umwelt zusammen mit anderen Bundesämtern das «Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel» lanciert. Innovative und beispielhafte Projekte zur Anpassung an den Klimawandel in Kantonen, Regionen und Gemeinden werden mit finanzieller Unterstützung des Bundes umgesetzt. Aus über 100 Gesuchen wurden dazu 31 Projekte ausgewählt, die sich auf fünf Themengebiete verteilen: Management von Ökosystemveränderungen und Landnutzung, Umgang mit lokaler Wasserknappheit, Umgang mit Naturgefahren, Wissenstransfer und Governance, klimaangepasste Stadt- und Siedlungsentwicklung. Die ersten Projekte sind im Januar 2014 gestartet. Bis Ende 2016 werden alle Projekte beendet sein; das gesamte Programm wird 2017 durch eine Synthese abgeschlossen.

### Anpassungsaktivitäten der Kantone und Regionen

Unabhängig vom Pilotprogramm werden in den Kantonen und Regionen Strategien und Massnahmen zur Anpassung entwickelt. So hat im Kanton Uri (2011) der Regierungsrat eine «Klimastrategie» zum Umgang mit dem Klimawandel beschlossen. Darin sind Ziele und Umsetzungsschritte für Anpassung, Verminderung der Treibhausgasemissionen, Monitoring und Wissensbildung sowie Kommunikation und Information formuliert. Der Kanton Graubünden hat Anfang 2016 seine Klimastrategie verabschiedet, die sowohl die Vermeidung als auch die Anpassung behandelt (ANU 2015). In den Kantonen Basel Stadt, Schaffhausen, Bern, Aargau und Zürich (zusammen mit der Internationalen Bodenseekonferenz) wurden Übersichten erarbeitet über die regionalen Folgen des Klimawandels, den Handlungsbedarf und die Möglichkeiten zur Anpassung.

In den nächsten Jahren werden die begonnenen Anpassungsaktivitäten fortgeschrieben und erweitert. Dazu gehören wichtige Grundlagen wie neue regionalisierte Klimaszenarien, die für 2018 geplant sind. Und von grossem Interesse sind sicher auch die Ergebnisse der Vollzugs- und Wirkungsanalyse, die unter anderem auf den für Ende 2015 erstmals verlangten Fortschrittsberichten der Kantone und beteiligten Bundesämtern basieren und 2018 vorliegen sollen. Basierend auf den konkreten Erfahrungen der Umsetzung von Anpassungsaktivitäten vor Ort soll schliesslich ein zweiter Aktionsplan ab 2018 erarbeitet werden.

## Referenzen

ANU (2015) **Klimawandel Graubünden. Synthese der Herausforderungen und Handlungsfelder.** Arbeitspapier 4 einer kantonalen Klimastrategie. Chur, 27 pp.

BAFU (2012) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder.** Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern.  
www.bafu.admin.ch/klimaanpassung

BAFU (2014) **Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019.** Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. Bern. www.bafu.admin.ch/klimaanpassung

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

CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.

EBP, WSL, SLF (2014) **Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton Aargau.** Ergebnisbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Holthausen N, Perch-Nielsen S, Locher P, de Haan van der Weg P, Pütz M, Bründl M (2011) **Pilotprojekt Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in der Schweiz.** Schlussbericht. Im Auftrag vom Bundesamt für Umwelt BAFU und vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE. Ernst Basler + Partner AG, Zollikon, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 145 pp.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Summary for Policymakers (SPM).  
www.ipcc.ch/report/ar5/wg2

Kanton Uri (2011) **Umgang mit dem Klimawandel. Klimastrategie des Kantons Uri.** Im Auftrag des Regierungsrat des Kantons Uri. Altdorf, 46 pp.



1.5 DEGREES

# Teil 3: Minderung

## Autorinnen und Autoren

**Daniel Bretscher**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Forschungsgruppe  
Klima und Lufthygiene, Agroscope, Zürich

**Dr. Peter de Haan**

Partner, Gruppenleiter Energiepolitik und Mobilität,  
Ernst Basler + Partner, Zollikon

**Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey**

Professorin für Planung von Landschaft  
und Urbanen Systemen, Institut für Raum-  
und Landschaftsentwicklung (IRL), ETH Zürich

**Prof. Dr. Reto Knutti**

Professor für Klimaphysik, Institut für Atmosphäre  
und Klima (IAC), ETH Zürich

**PD Dr. Jens Leifeld**

Leitender Forscher, Forschungsgruppe Klima  
und Lufthygiene, Agroscope, Zürich

**Prof. Dr. Dirk Messner**

Direktor, Deutsches Institut für Entwicklungspolitik,  
Bonn

**Dr. Christoph Ritz**

Bis März 2016: Geschäftsleiter, ProClim – Forum  
für Klima und globalen Wandel, Akademie  
der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

**Dr. Carmenza Robledo Abad**

Assoziierte leitende Wissenschaftlerin, USYS-TdLab  
(Transdisziplinaritätslabor) und Gruppe Klimaschutz  
und -anpassung, ETH Zürich

**Dr. Joeri Rogelj**

Forschungsstipendiat, Energieprogramm,  
Internationales Institut für angewandte  
Systemanalyse (IIASA), Laxenburg  
Bis Juni 2014: Postdoktorand, Institut  
für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

**Dr. Regine Röthlisberger**

Sektionschefin, Sektion Klimaberichterstattung und  
-anpassung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

**Prof. Dr. Jean-Louis Scartezzini**

Professor für Bauphysik, Leiter Laboratorium  
für Sonnenenergie und Bauphysik (LESO-PB),  
ETH Lausanne

**Prof. Dr. Renate Schubert**

Professorin für Nationalökonomie, Institut  
für Umweltentscheidungen (IED), ETH Zürich

**Prof. Dr. Philippe Thalmann**

Professor für die Ökonomie der Natürlichen  
und Gebauten Umwelt, Institut für Architektur  
und Städtebau, ETH Lausanne

**Prof. Dr. Alexander Wokaun**

Leiter, Forschungsbereich Energie und Umwelt,  
Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen



## Dekarbonisierung – Transformation zur Klimaverträglichkeit

Die globale Erwärmung kann nur mit internationaler Kooperation und einer kohlenstoffarmen, klimaverträglichen Weltwirtschaft abgebremst werden. Der Umbruch zu einer solchen Weltwirtschaft geht über den klassischen Strukturwandel in einer Marktwirtschaft hinaus und beinhaltet umfassende Prozesse des Wandels. Verschiedene Gründe sprechen dafür, von einer «Grossen Transformation» zu sprechen – die möglicherweise nur vergleichbar ist mit der jungsteinzeitlichen sowie der industriellen Revolution, den zwei grossen Zivilisationsschüben in der bisherigen Geschichte der Menschheit.

*Dirk Messner (Deutsches Institut für Entwicklungspolitik)*

Auch radikale Minderungen der Treibhausgasemissionen der Mitgliedstaaten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) reichen nicht mehr aus, um die 2-Grad-Leitplanke einzuhalten. Zwischen 1990 und 2013 sind die jährlichen Treibhausgasemissionen der OECD-Länder (also der Gruppe der Industrienationen) von gut 11 auf rund 13 Gigatonnen CO<sub>2</sub> gestiegen und stagnieren seitdem in etwa auf diesem Niveau. Die Emissionen der Nicht-OECD-Länder haben sich im gleichen Zeitraum von 10 auf 20 Gigatonnen erhöht, insbesondere infolge des hohen Wachstums in den Schwellenländern (OECD 2010; Kaplinsky & Messner 2008). Setzen sich die derzeitigen Trends fort, dürften sich die Emissionen der OECD-Länder zwischen 2010 und 2040 auf einem Niveau von jährlich etwa 12 bis 13 Gigatonnen einpendeln, während die Emissionen der Nicht-OECD-Länder in diesem Zeitraum von jährlich 20 auf gut 30 Gigatonnen ansteigen würden (IPCC 2014/WGII-Chap.7). Die globale Erwärmung kann daher nur noch im Zusammenspiel von Industrie- und Schwellenländern abgebremst werden (Abb. 3.1). Und ein wirksamer Klimaschutz ist nur noch möglich, wenn die grundlegenden Wachstumsmuster in der Weltwirtschaft klimaverträglich gestaltet werden.

### Kohlenstoffarme Weltwirtschaft

Globaler Klimaschutz ist zu einem Synonym für den Aufbau einer kohlenstoffarmen Weltwirtschaft geworden (Messner 2015, World Bank 2012 & 2014). Der Aufbau einer klimaverträglichen Weltwirtschaft erfordert Dekarbonisierungsprozesse in drei zentralen Basisinfrastrukturen der globalen Ökonomie (WBGU 2011; IPCC 2014/WGIII) (s. a. Kap. 3.4 Energie, S. 168):

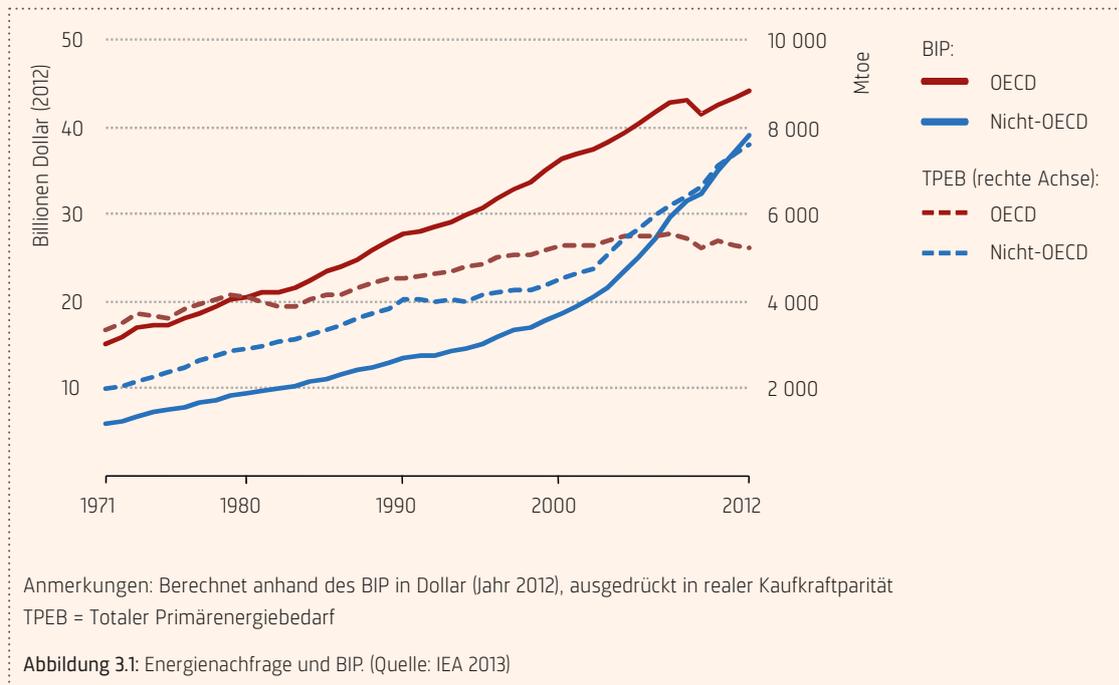
- in den weltweiten Energiesystemen, die für etwa 70 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind,
- in der Landnutzung (Waldnutzung, Landwirtschaft), auf die etwa 25 Prozent der Emissionen entfallen und

- in städtischen Räumen, weil ein grosser Teil der Emissionen auf die Bedürfnisfelder Wohnen (Gebäude) und Mobilität in Städten zurückzuführen ist.

Die Urbanisierung ist von besonderer Bedeutung, weil die Zahl der Menschen, die in städtischen Räumen lebt, von derzeit drei auf sechs Milliarden Menschen im Jahr 2050 ansteigen wird (WBGU 2016). Bei Gebäuden und Mobilitätssystemen handelt es sich um Infrastrukturen, die sich nur sehr langsam anpassen lassen und daher die Emissionspfade für viele Jahrzehnte prägen werden (IEA 2010). Aus Perspektive des Klimaschutzes ist von grosser Bedeutung, ob der Urbanisierungsschub, der sich insbesondere auf Nicht-OECD-Länder und hier vor allem auf Asien konzentriert, CO<sub>2</sub>-armen Mustern folgt oder den etablierten, treibhausgasintensiven Dynamiken der Stadtentwicklung in den Industrieländern (WBGU 2011).

### Grosse Transformation

Der Übergang zu einer klimaverträglichen Wirtschaft wird in der Literatur zunehmend aus der Perspektive von Transitions- beziehungsweise Transformationsprozessen diskutiert. Dies verdeutlicht, dass der Umbruch zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft (low-carbon-economy) über klassische Muster des Strukturwandels in Marktwirtschaften hinausgeht und umfassende Prozesse des Wandels beinhaltet (Rotmans et al. 2001; Grin et al. 2010). Der Wissenschaftliche Beirat der Deutschen Bundesregierung zu Globalen Umweltveränderungen (WBGU) hat vorgeschlagen, den Übergang zu einer klimaverträglichen und insgesamt nachhaltigen Weltwirtschaft als «Grosse Transformation» zu beschreiben (WBGU 2011). Diese könnte möglicherweise nur vergleichbar sein mit zwei grossen Zivilisationsschüben in der Geschichte der Menschheit: der jungsteinzeitlichen sowie der industriellen Revolution.



## Fünf Gründe sprechen für die Grosse Transformation

Aus Sicht des WBGU sind fünf Argumentationsstränge in der Literatur gute Gründe dafür, von einer Grossen Transformation zu sprechen.

### Globale Entwicklung muss neuen Pfad einschlagen

Der Übergang zur Klimaverträglichkeit kann nur gelingen, wenn die globalen Wachstumsmuster in Richtung Dekarbonisierung verändert werden – wenn also ein neuer Pfad globaler Entwicklung eingeschlagen wird. Ob diese Weichenstellung gelingt, hängt einerseits davon ab, ob in den Industrieländern der Übergang zur Klimaverträglichkeit eingeleitet wird. Andererseits wird es von grosser Bedeutung sein, ob die dynamisch wachsenden Schwellenländer, die sich in den vergangenen zwei Dekaden zunächst an traditionellen Wachstumsmustern orientierten, bereit und in der Lage sind, Dekarbonisierung in das Zentrum ihrer Entwicklungsanstrengungen zu rücken (IPCC 2014/WG III). Eine solche Veränderung von Wachstumsmustern setzt eine **grundlegende Transformation institutioneller Rahmenbedingungen** voraus, um Anreize für klimaverträgliche Investitionen zu schaffen (Worldbank 2012; OECD 2013; Global Commission on the Economy and Climate 2014).

### Zentrale Infrastrukturen müssen umgebaut werden

Die Entwicklung einer klimaverträglichen Weltwirtschaft bedingt einen weitgehenden Umbau der zentralen Infrastrukturen, auf denen die menschlichen Gesellschaften basieren. Diese Infrastrukturen müssen zu Systemen werden, die mit wenig Ressourcen auskommen, nur geringe Emissionen ausstossen und Klimaänderungen standhalten können. Konkret geht es um die Energiesysteme, die Landnutzungssysteme und die urbanen Räume (Nakicenovic et. al 2000; WBGU 2016).

### Neben technischen sind auch soziale Innovationen nötig

Dekarbonisierungsstrategien müssen auf technischen Innovationen basieren. Die Literatur zum Rebound-Effekt (Jackson 2009; s. a. Kap. 3.3 Verhaltensänderungen, S. 164) verdeutlicht allerdings auch, dass eine absolute Abkopplung der Wohlstandsentwicklung von Emissionen nur gelingen kann, wenn sich zugleich soziale Innovationen durchsetzen, also Grundlagen einer klimaverträglichen Gesellschaft entstünden: veränderte Lebensstile und Konsummuster, neue Wohlfahrtskonzepte sowie Normen und Wertesysteme, die den Erhalt der globalen Gemeinschaftsgüter zu einem neuen Leitbild machen (OECD 2013; Skidelsky & Skidelsky 2013; Messner 2015).

### Zeitfenster für die Transformation ist eng

Die Transformation muss in einem sehr engen Zeitfenster stattfinden, wenn das 2-Grad-Ziel noch eingehalten werden soll. Bis etwa 2070 müssten die Treibhausgasemissionen, die aus der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, weltweit auf Null vermindert werden (IPCC 2014/WGIII); (s. a. Kap. 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen, S. 156, Kap. 3.4 Energie, S. 168). Damit dies gelingt, müssen wesentliche Weichenstellungen in den kommenden zwei Dekaden gelingen, wie der Übergang zu klimaverträglicher Ordnungspolitik und zu klimaneutralen Infrastrukturen und Städten. So stellt sich die Frage, ob und wie Dynamiken der Transformation beschleunigt werden können (Grin et al. 2010). Zugleich führen Treibhausgasemissionen in der Gegenwart zu langfristigen Dynamiken im Erdsystem. Es besteht das Risiko, dass Kipppunkte überschritten werden (Lenton et al. 2008) und Veränderungen eintreffen, die weit über den Zeithorizont hinausreichen, der von Institutionen von Nationalstaaten oder auch internationalen Organisationen derzeit berücksichtigt wird. Die für menschliche Gesellschaften relevanten Zeitvorstellungen verändern sich daher, ähnlich wie während der industriellen Revolution (Osterhammel 2009; Leggewie & Messner 2012).

### Die Menschheit ist zentrale Veränderungskraft im Erdsystem geworden und muss dieses stabilisieren

Wenn Paul Crutzen und andere (Crutzen 2000; Zalasiewicz et al. 2011) mit ihrem Argument recht behalten, dass die Menschheit zu einer zentralen Veränderungskraft im Erdsystem geworden ist, impliziert der Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung, dass die Menschen Institutionen sowie Normen und Wertesysteme erfinden müssen, um das Erdsystem im Zeitalter der Menschen (Anthropozän) dauerhaft zu stabilisieren und damit die Existenzgrundlagen vieler künftiger Generationen zu erhalten. Diese Herausforderungen eines «Erdsystemmanagements» (Schellnhuber 1999) gehen über die existierenden Weltbilder internationaler Politik deutlich hinaus.

## Globale Kooperationsblockaden

Der Verweis auf Klimaschutz im Kontext der Dynamiken globaler Entwicklung sowie die Diskussion über das Klimasystem als globales Gemeinschaftsgut (Ostrom 2010) führen zu der Frage, wie globale Kooperation gestaltet werden kann, um die Transformation zur Klimaverträglichkeit zu ermöglichen (Keohane & Victor 2010; WBGU 2006; Messner & Weinlich 2016).

## Vier zentrale Ursachen für Blockaden

In der Literatur wird auf vier zentrale Ursachen für Blockaden in den Klimaverhandlungen verwiesen:

### Probleme des kollektiven Handelns

Aus dem Grundgedanken der *Tragik der Allmende* (Hardin 1968), der auf die Gefahr der Übernutzung frei verfügbarer und begrenzter Ressourcen verweist, und der Theorie des *kollektiven Handelns* (Olson 1965) ergibt sich das bekannte *Trittbrettfahrer-Verhalten* der Akteure (Nordhaus 2013): Kooperationsallianzen (z. B. zum Schutz des Klimasystems) kommen erschwert zustande, wenn Akteure, die sich nicht an diesen kooperativen Lösungen beteiligen, nicht an der weiteren Übernutzung oder Überlastung des Gemeinschaftsgutes gehindert werden können.

### Verteilkonflikte zwischen den Ländern

Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer streiten sich über die Verteilung der Kosten, die durch Treibhausgas-minderungen entstehen sowie über Verantwortlichkeiten zur Treibhausgas-minderung, die sich für jeweilige Länder(gruppen) aus historischen, gegenwärtigen und zukünftig zu erwartenden Emissionen ergeben (WBGU 2009; Pan 2009).

### Sorge um Wettbewerbsfähigkeit der Ökonomie oder um Entwicklung

Entscheidungsträger sorgen sich, dass radikale Treibhausgas-minderungen die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Ökonomien schädigen, Beschäftigungseinbussen zur Folge haben oder – so der Diskurs in Schwellen- und Entwicklungsländern – Prozesse nachholender Entwicklung blockieren könnten (OECD 2010).

### Zeitstruktur des Klimaproblems

Das Klimaproblem hat eine spezifische Zeitstruktur, die darin besteht, dass schwerwiegende Folgen des Klimawandels erst in einigen Jahrzehnten zu erwarten sind, politische Systeme und Entscheidungsträger jedoch primär auf aktuellen Problemdruck reagieren (Giddens 2009).

Die skizzierten Dimensionen eines Umbruchs zur Dekarbonisierung verdeutlichen, dass der Übergang zu einer klimaverträglichen Weltwirtschaft und -gesellschaft ähnlich weitreichende Veränderungen nach sich ziehen wird, wie die Wandlung der Welt im 19. Jahrhundert, die durch die Transformation der Agrar- in Industriegesellschaften charakterisiert war.

## Referenzen

- Crutzen P (2000) **The Anthropocene**. The Global Change Newsletter 41: 17–18.
- Giddens A (2009) **The Politics of Climate Change**. Oxford University Press, Oxford.
- Global Commission on the Economy and Climate (2014) **The new Climate economy**. [www.newclimateeconomy.report/2014](http://www.newclimateeconomy.report/2014)
- Grin J, Rotmans J, Schot J (2010) **Transitions to Sustainable Development. New Directions in the Study of Long Term Transformative Change**. Routledge, London.
- Hardin G (1968) **The tragedy of the commons**. Science 162: 1243–1248.
- International Energy Agency (IEA) (2010) **Energy Balances of IEA Countries**. IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2013) **World Energy Outlook 2013**. IEA, Paris.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Jackson T (2009) **Prosperity without Growth**. Routledge, London.
- Kaplinsky R, Messner D (2008) **The impacts of Asian Drivers on the developing world**. World Development 36: 197–209.
- Keohane R, Victor D (2010) **The Regime Complex for Climate Change**. The Harvard Project on International Climate Agreements. Harvard University, Cambridge.
- Leggewie C, Messner D (2012) **The low-carbon transformation – A social science perspective**. Journal of renewable and sustainable energy 4: 041404.
- Lenton T, Held H, Kriegler E, Hall J, Lucht W, Rahmstorf S, Schellnhuber H (2008) **Tipping elements in the Earth's climate system**. PNAS 105: 1786–1793.
- Messner D (2015) **A social contract for low carbon and sustainable development: reflections on non-linear dynamics of social realignments and technological innovations in transformation processes**. Technological Forecasting and Social Change 98: 260–270.
- Messner D, Weinlich S (2016) **The evolution of human cooperation: lessons learned for the future of global governance**. In: Messner, D, Weinlich, S (eds.) Global Cooperation and the Human Factor in International Relations. Routledge, London: 3–46.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grübler A, Jung TY, Kram T, Lebre La Rovere E, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Priyadarshi S, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z (2000) **Special Report on Emissions Scenarios**. Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nordhaus W (2013) **The climate casino**. Yale University Press, New Haven.
- Olson M (1965) **The Logic of Collective Action: Public Goods and the Theory of Groups**. Harvard University Press, Cambridge.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2010) **Perspectives on Global Development 2010: Shifting Wealth**. OECD, Paris.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2013) **How's Life? 2013 Measuring Well-being**. OECD, Paris.
- Osterhammel J (2009) **Die Verwandlung der Welt**. Eine Geschichte des 19. Jahrhunderts. Beck, München.
- Ostrom E (2010) **Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change**. Global Environmental Change 20: 550–557.
- Pan J (2009) **Carbon budget proposal**. Research Center for Sustainable Development. Chinese Academy of Social Sciences, Peking.
- Rotmans J, Kemp R, van Asselt M (2001) **More evolution than revolution: transition management in public policy**. The Journal of Futures Studies, Strategic Thinking and Policy 3: 15–31.
- Schellnhuber H (1999) **Earth system' analysis and the second Copernican Revolution**. Nature 402: C19–C23.
- Skidelsky R, Skidelsky E (2013) **Wie viel ist genug?** Kunstmann, Muenchen.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2006) **Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer**. Sondergutachten 2006. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009) **Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz**. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2011) **Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Grosse Transformation**. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2016) **Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte**. WBGU, Berlin.
- World Bank (2012) **Inclusive Green Growth – The Pathway to Sustainable Development**. The World Bank, Washington.
- World Bank (2014) **Building Competitive Green Industries: The Climate and Clean Technology Opportunity for Developing Countries**. The World Bank, Washington.
- Zalasiewicz J et al. (2011) **The Stratigraphy of the Anthropocene**. Philosophical Transactions of the Royal Society. A 369: 1036–1055.

## 3.1 Einleitung

Der dritte Teil des Fünften IPCC-Sachstandsberichts, der Bericht der Arbeitsgruppe III, analysiert die Möglichkeiten zur Minderung der Treibhausgasemissionen sowie die entsprechenden sozioökonomischen Auswirkungen. Die Analyse wird erst in einer zusammengefassten, die gesamte Wirtschaft umfassenden Form präsentiert, danach auf Stufe der einzelnen Sektoren. Teil 3 des Berichts «Brennpunkt Klima Schweiz» folgt derselben Struktur.

*Philippe Thalmann (ETH Lausanne)*

Dass Handlungsbedarf besteht, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit und in der Schweiz zu senken, zeigen zuerst die Artikel von Reto Knutti und Joeri Rogelj sowie Regine Röthlisberger auf (s. a. Kap. 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen, S. 156). In der Schweiz hat die Abkoppelung der Emissionen vom Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum schon Ende der 1990er-Jahre stattgefunden, als die Wirtschaft wieder anfang zu wachsen, ohne dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen zunahmen. Seit 2010 gehen die Emissionen sogar langsam zurück, trotz anhaltendem Wachstum. Dies ist auf Massnahmen in verschiedenen Bereichen zurückzuführen, hauptsächlich auf die Energie- und Klimapolitik. Ihren Teil dazu beigetragen haben aber auch der technische Fortschritt und der Strukturwandel. Weltweit hat sich der Treibhausgasausstoss in den letzten zwei Jahren ebenfalls stabilisiert, wobei noch nicht klar ist, ob es sich um einen Trendumbruch handelt. Klar ist jedoch, dass selbst die stabilisierten Emissionen viel zu hoch sind: Sie werden das globale Emissionsbudget, das noch zur Verfügung steht, um das 2-Grad-Ziel mit zwei Drittel Wahrscheinlichkeit nicht zu überschreiten, in etwa drei Jahrzehnten aufbrauchen.

Um den Trend umzukehren, müssen jetzt schon die Weichen gestellt werden. Dies hält die IPCC Arbeitsgruppe III gleich zu Beginn ihres Berichts fest: Sie weist darauf hin, dass wir heute Entscheide treffen, aufgrund derer wir während der nächsten Jahrzehnte mehr oder weniger Energie verbrauchen und CO<sub>2</sub> ausstossen werden. Werden weiter Infrastrukturen gebaut und langlebige Produkte angeschafft, die einen grossen Bedarf an fossiler Energie haben oder deren Verbrauch fördern, würde sich unsere Gesellschaft auf CO<sub>2</sub>-intensive Pfade festlegen – eine spätere Abweichung von diesen Pfaden ist sehr kostspielig. Soll der Treibhausgasausstoss rasch gesenkt werden, dann darf mit der Umsetzung einer ehrgeizigen Klimapolitik und der Verhinderung derartiger Fehlinvestitionen nicht mehr zugewartet werden.

Zu den grössten Fehlinvestitionen gehören der Bau von Kohlekraftwerken oder die Erdölexploration – Investitionen, die nicht nur für das Klima und die Umwelt problematisch sind, sondern auch die Investoren zunehmend

beunruhigen (Standard & Poor's 2013; BlackRock Investment Institute 2015). Stichworte hierzu sind «Stranded Assets» (Vermögenswerte, z. B. Kohle- und Erdölreserven, die ihren Marktwert verloren haben) und «Kohlenstoffblase» (diese Vermögenswerte sind heute teilweise überbewertet, weil die meisten Marktakteure noch nicht gemerkt haben, dass sie gar nicht verwertet werden dürfen) (Leaton et al. 2013; IEA 2014). Es gibt auch Fehlinvestitionen in Infrastrukturen (z. B. Raffinerien oder Gasleitungen) und Städte (z. B. Quartiere mit schlechtem ÖV-Anschluss, alte Gebäude mit schlechter Isolation, neue Gebäude mit grossen Glasfassaden). Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht weist mit Nachdruck auf die Urbanisierung hin, die in bestimmten Regionen der Welt rasant voranschreitet – und auf zahlreiche Möglichkeiten zur Emissionsminderung bei der Planung von Städten und neuen Quartieren. In der Schweiz sind grosse und kleine Städte innovative Akteure in den Bereichen Energieeffizienz («Energistädte») und nachhaltige Entwicklung. Adrienne Grêt-Regamey und Jean-Louis Scartezzini nennen in ihrem Artikel (s. a. Kap. 3.8 Urbane Strategien zum Klimawandel, S. 186) die wichtigsten Faktoren für die Treibhausgasemissionen im städtischen Raum, die weiterhin prioritär zu behandeln sind. Die beiden Autoren machen deutlich, wie wichtig die Raumplanung und deren Instrumente sind – sowohl für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels als auch für die Emissionsminderung.

So wie die Raumplanung mit entsprechenden Vorschriften für kohlenstoffarme Gebäude und Infrastrukturen sorgen kann, ist auch in der Land- und Forstwirtschaft und beim Schutz von «natürlichen» Lebensräumen darauf zu achten, dass eine wachsende Bevölkerung mit einem zunehmenden Lebensstandard nicht mehr Treibhausgasemissionen verursacht, wie Carmenza Robledo Abad, Daniel Bretscher und Jens Leifeld in ihrem Artikel aufzeigen (s. a. Kap. 3.7 Land- und Forstwirtschaft und andere Landnutzung, S. 181).

Der Bericht der Arbeitsgruppe III unterstreicht mit Nachdruck die grundlegenden Veränderungen, die im Sektor der Energieversorgung (Gewinnung und Transport, Erzeugung von Strom und Wärme) notwendig sind, denn dieser

ist weltweit die wichtigste Quelle der Treibhausgasemissionen (35 Prozent im 2010) und derjenige Sektor, der am meisten zum Anstieg dieser Emissionen beigesteuert hat (47 Prozent der 10 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an zusätzlichen Emissionen im 2010 gegenüber 2000; IPCC 2014/WGIII/SPM). Ohne Minderungsmaßnahmen könnten sich die Treibhausgasemissionen im Sektor Energie bis 2050 verdoppeln oder sogar verdreifachen. Um eine Stabilisierung der globalen Temperatur zu erreichen, ist jedoch eine Minderung dieser Emissionen um mindestens 90 Prozent erforderlich. Selbstverständlich wird in diesem Sektor kaum Strom und Wärme für den Eigenbedarf produziert, daher sind seine Treibhausgasemissionen auch den Sektoren Industrie und Haushalte zuzuschreiben, wie Alexander Wokaun und Christoph Ritz in ihrem Artikel (s. a. Kap. 3.4 Energie, S. 168) aufzeigen. Gleichwohl trägt der Sektor der Energieversorgung in Bezug auf seine Emissionen eine grosse Verantwortung, denn dort werden die primären Energiequellen und die Umwandlungstechniken gewählt. Wokaun und Ritz zeigen die vielfältigen Möglichkeiten auf, mit denen der Sektor diese Emissionen mindern könnte und die allesamt mobilisiert werden müssen, wenn ehrgeizige Minderungsziele erreicht werden sollen.

In der Schweiz fällt der Energiesektor hinsichtlich der Treibhausgasemissionen weniger ins Gewicht dank hohen Anteilen an Wasser- und Atomkraft. Mit 33 Prozent trägt der Verkehr am meisten zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei (s. a. Abb. 3.5, S. 162). Gerade beim Personenverkehr hat die Emissionsminderung noch nicht eingesetzt, was viel mit persönlichem Verhalten zu tun hat (s. a. Abb. 3.9, S. 165). Das Problem präsentiert sich auf der ganzen Welt vielerorts noch grösser, da auch der Gütertransport ungebrochen zunimmt. Es ist möglich, dass sich in den Bereichen Personen- und Güterverkehr der CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis 2050 verdoppelt, hauptsächlich aufgrund einer weiteren Zunahme der Transportaktivitäten. Die Zunahme der Transportaktivitäten hat bis anhin sämtliche Effizienzgewinne bei den Fahrzeugen mehr als ausgeglichen (IPCC 2014/WGIII/Chap.8). Die Autoren des Fünften IPCC-Sachstandsberichts sehen dennoch ein grösseres Potenzial für Emissionsminderungen im Sektor Verkehr als diejenigen früherer Berichte. Dazu müssen jedoch sämtliche Möglichkeiten umgesetzt werden bei den Techniken und Verhaltensweisen in den Bereichen Fahrzeuge, Infrastrukturen und Raumplanung. Peter de Haan verdeutlicht in seinem Artikel (s. a. Kap. 3.5 Verkehr, S. 174) die Herausforderungen für die Schweiz, insbesondere in der Luftfahrt. Der Bereich Luftfahrt wird tendenziell ausgeklammert, obwohl die Treibhausgasemissionen in diesem Bereich stark zunehmen und nicht mehr vernachlässigt werden dürfen.

In der Schweiz sind die Sektoren Industrie und Haushalte je für rund 20 Prozent der Treibhausgasemissionen

verantwortlich. Im Sektor Haushalte ist dies in erster Linie auf die Gebäudebeheizung zurückzuführen, wie aus dem Artikel von Adrienne Grêt-Regamey und Jean-Louis Scartezzini hervorgeht. Diese Probleme sind bestens bekannt und es wurden bereits Massnahmen ergriffen, um den Energieverbrauch von Gebäuden zu senken (Heizung und Geräte). Dies bringt sichtbare, aber immer noch recht bescheidene Ergebnisse – die Gründe dafür werden von Renate Schubert in ihrem Artikel ausgeführt (s. a. Kap. 3.3 Verhaltensänderungen, S. 164). Die Klimaänderung könnte im Übrigen den Heizbedarf bis 2050 weltweit um 5 bis 21 Prozent senken. Der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoss würde jedoch in viel geringerem Masse abnehmen. In der Schweiz wurde für ein mittleres Klimaszenario, bei dem der Heizbedarf um 15 Prozent abnimmt, geschätzt, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur um 2,5 Prozent zurückgehen würden (Winkler et al. 2014). Ein Teil des Problems ist auf den Rebound-Effekt zurückzuführen: die Senkung des Energiebedarfs aufgrund der Klimaänderung oder der Fortschritte in der Energieeffizienz von Gebäuden, Fahrzeugen oder Geräten wird teilweise oder sogar ganz durch eine Zunahme des Verbrauchs kompensiert (Jenny et al. 2013). Dazu kommt, dass der Kühlbedarf im Sommer zunimmt und dadurch die Abnahme des Heizbedarfs teilweise kompensiert wird. In seinem zweiten Artikel (s. a. Kap. 3.6 Technische Aspekte, S. 178) zeigt Peter de Haan, dass die technischen Fortschritte zwar wichtig sind, aber aufgrund der Mengenausweitung nicht ausreichen, um die Treibhausgasemissionen zu mindern.

Am Schluss muss noch daran erinnert werden, dass mit den vertieften sektoralen Analysen nicht das Gesamtsystem vergessen werden darf: Die Dekarbonisierung des Verkehrs und jene der Gebäudewärme werden bestimmt von einer Elektrifizierung begleitet werden. Dies macht es umso wichtiger, dass die Stromerzeugung weltweit im Gleichschritt dekarbonisiert und in der Schweiz möglichst CO<sub>2</sub>-arm gehalten wird.

## Referenzen

- BlackRock (2015) *The Price of Climate Change – Global Warming's Impact on Portfolios*. October 2015.
- IEA (2014) *World Energy Investment Outlook. Special Report*. Paris, 190 pp.
- Jenny A, Karlegger A, Montanari D, Ott W, Madlener R (2013) *Massnahmen der Energiestrategie 2050: Begleitende verhaltensökonomische und sozialpsychologische Handlungsempfehlungen*. Bericht für das Bundesamt für Energie, Econcept, Zürich.
- Leaton J et al. (2013) *Unburnable carbon 2013: wasted capital and stranded assets*. Carbon Tracker and the Grantham Research Institute, London.
- Winkler R, Almer C, Bader C, Gonseth C, Laurant-Lucchetti J, Thalman P, Vielle M (2014) «Energy consumption of buildings – direct impacts of a warming climate and rebound effects». In: CH2014-Impacts (ed.) *Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland*, Bern, Switzerland: OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, 99–105.

## 3.2 Emissionstrends – vergangene und zukünftige Emissionen

Die Schweiz stösst heute pro Kopf und Jahr rund sechs Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente direkt im Inland aus; Hauptverursacher der Emissionen sind der Strassenverkehr mit einem Drittel und die Beheizung von Gebäuden mit einem Viertel Anteil an den Gesamtemissionen. Der jährliche Pro-Kopf-Ausstoss steigt auf etwa 14 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an, wenn man auch die grauen Emissionen berücksichtigt, das heisst diejenigen Emissionen im Ausland, die durch in die Schweiz importierte Güter verursacht werden. Damit liegen die Pro-Kopf-Emissionen der Schweiz über dem globalen Durchschnitt. Die globalen Treibhausgasemissionen haben sich seit 1950 verdrei- bis vervierfacht. Das derzeitige Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sorgt jährlich für noch höhere Emissionen – dies vermag auch die höhere Energieeffizienz nicht zu kompensieren. Wollen wir das politisch beschlossene 2-Grad-Ziel einhalten, steht uns jedoch nur eine begrenzte Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Verfügung. Je länger wir damit warten, unseren Treibhausgasausstoss zu mindern, desto rascher müssen die Emissionen später abnehmen, damit wir das Ziel noch einhalten können. Wer wie viel zur Erreichung des Ziels beitragen kann und soll, ist ein Problem der Lastenverteilung.

### Globale Trends beim Treibhausgasausstoss

Seit 1950 haben sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit etwa vervierfacht. Gründe sind das derzeitige Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum (Wertschöpfung pro Kopf), die jedes Jahr für noch höhere Emissionen sorgen. Die Verbesserung der Energieeffizienz (weniger Energieverbrauch pro Franken an Wertschöpfung) wirkt dem entgegen, vermag aber die Auswirkungen des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums nicht zu kompensieren. Die CO<sub>2</sub>-Intensität (CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde verbrauchte Energie) hat nach jahrzehntelanger Abnahme wieder zugenommen, als Folge der grossen Verfügbarkeit von günstiger Kohle und Gas.

*Reto Knutti (ETH Zürich), Joeri Rogelj (IIASA Laxenburg)*

#### CO<sub>2</sub>-Emissionen nehmen zu

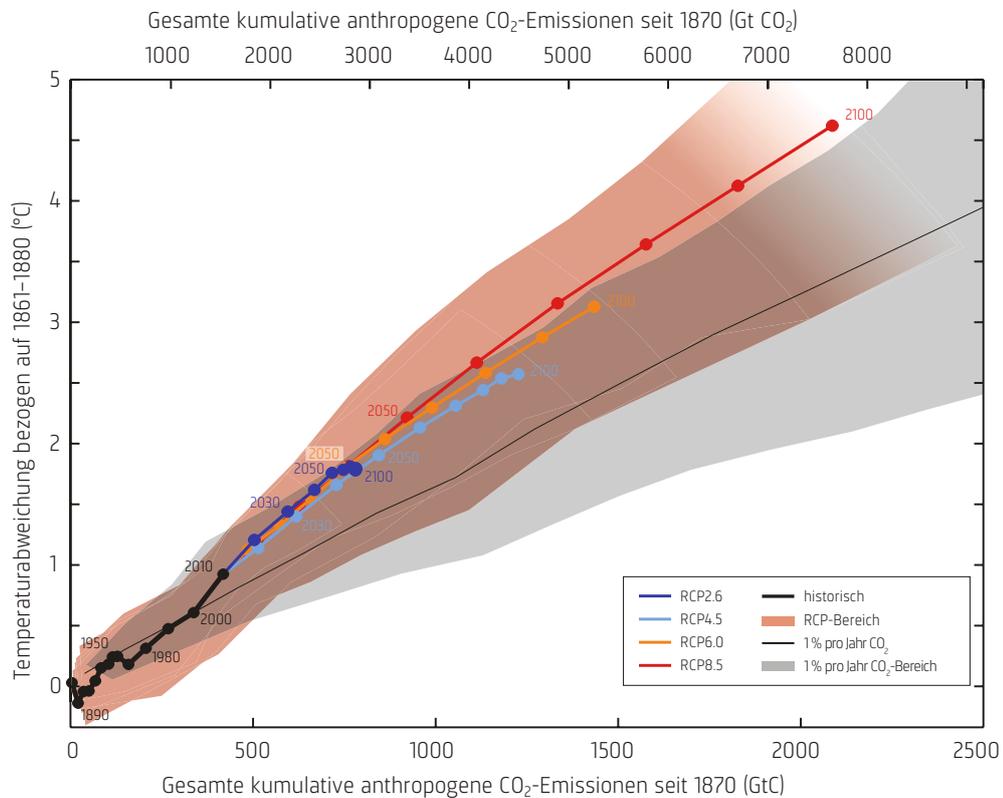
Trotz internationaler Verhandlungen und dem Kyoto-Protokoll hat sich die Zunahme der Emissionen seit etwa 2000 sogar verstärkt, von 1,1 Prozent pro Jahr in den 1990er-Jahren auf 3 Prozent pro Jahr (Mittelwert der Jahre 2000–2013). Zwei Gründe sind dafür verantwortlich: ein deutlich stärkeres Wirtschaftswachstum seit etwa dem Jahr 2000 sowie eine Trendwende zur Zunahme der CO<sub>2</sub>-Intensität. Beide Gründe sind grösstenteils auf das unerwartet hohe Wirtschaftswachstum in Schwellenländern, insbesondere China, zurückzuführen. In Schwellenländern hat Kohle als günstige und zuverlässige Quelle für die Stromproduktion eine hohe Bedeutung. China hat als Land die USA als grössten CO<sub>2</sub>-Emittent abgelöst. Pro Kopf liegt China zwar noch deutlich hinter den USA, aber schon auf ähnlichem Niveau wie die Schweiz und andere europäische Staaten.

#### Fossile Brenn- und Treibstoffe tragen am meisten zum CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus fossilen Brenn- und Treibstoffen (und zu einem kleinen Teil aus der Zementproduktion) dominiert den menschengemachten Treibhauseffekt mit weltweit rund 65 Prozent (gemessen als CO<sub>2</sub>-Äquivalent), gefolgt von 11 Prozent CO<sub>2</sub> aus Abholzung und Landnutzungsänderung. Neben CO<sub>2</sub> tragen Methan (CH<sub>4</sub>) 16 Prozent, Lachgas (N<sub>2</sub>O) 6 Prozent und F-Gase (halogenierten Fluorkohlenwasserstoffe, die perfluorierten Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid) 2 Prozent bei. Die Wirkung dieser Gase ist pro Molekül zwar deutlich grösser als bei CO<sub>2</sub>, aber ihre Mengen in der Atmosphäre sind viel kleiner.

#### Beiträge aus Sektoren

Weltweit tragen die folgenden Sektoren am meisten zu den Treibhausgasemissionen bei: Elektrizität und Wärmeproduktion (25 Prozent), Landwirtschaft, Abholzung



**Abbildung 3.2:** Globaler mittlerer Temperaturanstieg als Funktion der total ausgestossenen Menge CO<sub>2</sub>. Resultate sind gezeigt für gekoppelte Modelle des Klima- und Kohlenstoffkreislaufes für die vier RCP-Szenarien bis 2100. Mittelwerte über zehn Jahre sind als Punkte markiert (z. B. ist 2050 das Mittel über 2040 – 2049). Modellresultate über die Vergangenheit sind schwarz markiert. Die rote Fläche illustriert die Unsicherheit der Modelle. Resultate für Szenarien nur mit CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit der schwarzen dünnen Linie und der grauen Fläche gezeigt. Für eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub> zeigen diese eine kleinere Erwärmung als die RCP-Szenarien, die zusätzlich alle anderen Antriebe wie Methan, N<sub>2</sub>O und Aerosole berücksichtigen. (Quelle: IPCC 2013/WGI/SPM/FIG.10)

und Landnutzungsänderung (24 Prozent), Industrie (21 Prozent), Transport (14 Prozent) und Gebäude (6 Prozent).

## Das globale CO<sub>2</sub>-Budget

Trotz vieler komplexer Rückkopplungen sowohl im Klimasystem als auch im Kohlenstoffkreislauf gibt es einen erstaunlich einfachen Zusammenhang zwischen der globalen Temperatur und menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen: Die globale Temperaturänderung ist ungefähr proportional zu den totalen CO<sub>2</sub>-Emissionen seit vorindustrieller Zeit (Abb. 3.2). Dieser lineare Zusammenhang ist robust über viele Modelle unterschiedlicher Komplexität, aber die exakte Grösse der Erwärmung pro ausgestossene Tonne CO<sub>2</sub> ist modellabhängig. Der Wert liegt *wahrscheinlich* (Wahrscheinlichkeit ist höher als 66 Prozent) im Bereich 0,8 bis 2,5 Grad Celsius pro 1000 Gigatonnen<sup>1</sup> Kohlenstoff. Das bedeutet, dass jedes Temperaturziel einer maximalen Menge

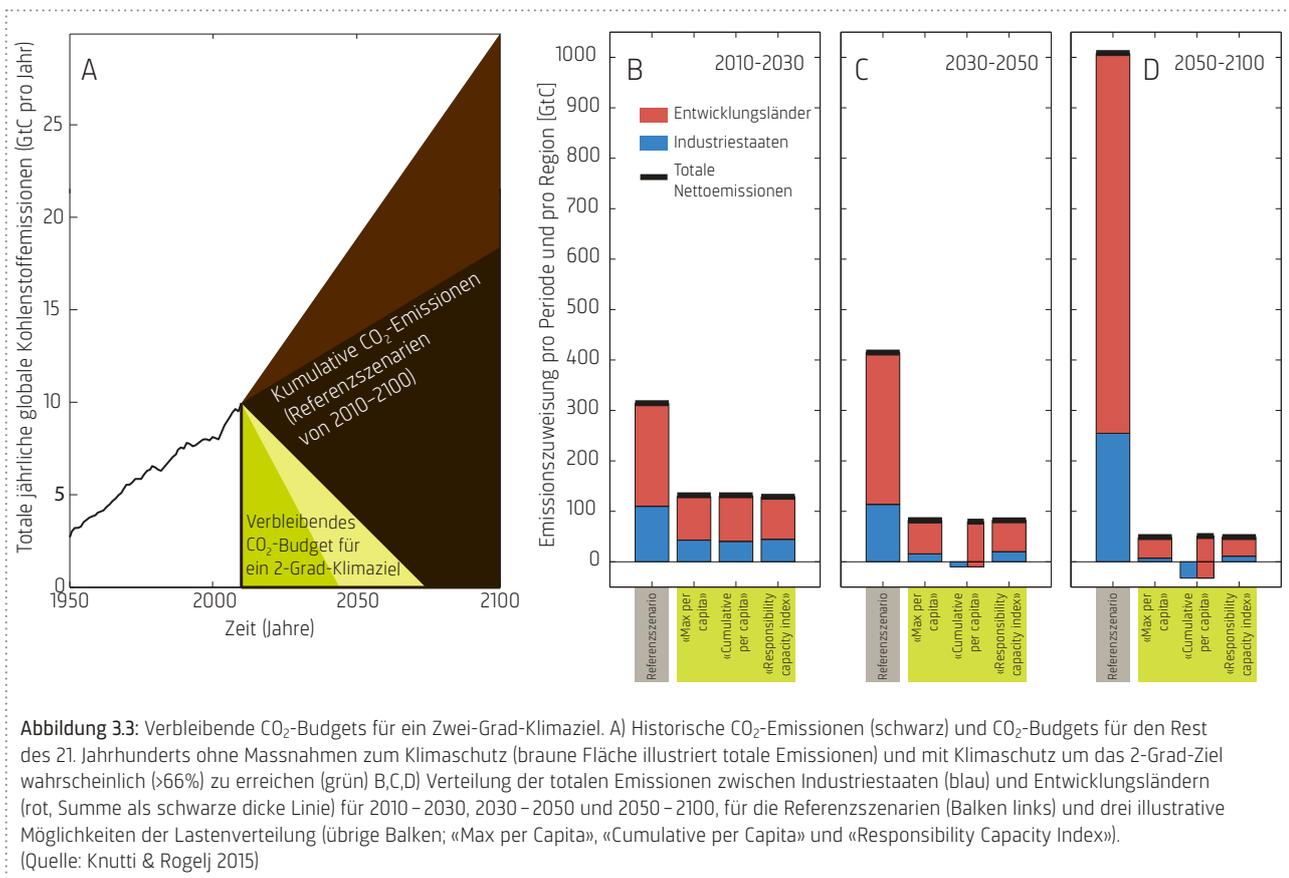
CO<sub>2</sub> entspricht, die wir ausstossen können. Egal ob 2 Grad, 1,5 Grad oder 3 Grad Celsius, die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub>, die wir dafür ausstossen können, ist beschränkt.

Aus dieser Idee des beschränkten Gesamt-CO<sub>2</sub>-Budgets über die Zeit bis zum angestrebten Temperaturstabilisierungsziel ergeben sich einfache Konsequenzen. Je mehr wir heute ausstossen, desto weniger dürfen wir später. Je mehr ein Land ausstösst, desto mehr muss ein anderes einsparen. Ist das gesetzte Temperaturziel erreicht, müssen die Emissionen global praktisch null sein, damit die Temperatur stabil bleibt.

## CO<sub>2</sub>-Budget für das 2-Grad-Ziel

Um das 2-Grad-Ziel mit mindestens 66 Prozent Wahrscheinlichkeit zu erreichen, steht uns ein Budget von rund 1000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff zur Verfügung. Dieses Budget bezieht sich jedoch nur auf Kohlenstoff aus CO<sub>2</sub> und vernachlässigt zusätzliche strahlungswirk-

<sup>1</sup> GtC = 1 Gigatonne C = 10<sup>15</sup> g C = 3,6 Gt CO<sub>2</sub>



same Substanzen wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O), die unter anderem aus der Landwirtschaft kommen sowie die kühlende Wirkung von Aerosolen. Werden diese mitberücksichtigt, wird das CO<sub>2</sub>-Budget für das 2-Grad-Ziel kleiner und beträgt rund 800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Davon haben wir rund 515 Milliarden Tonnen Kohlenstoff seit vorindustrieller Zeit (1870) schon ausgestossen. Somit verbleibt nur mehr rund ein Drittel des Gesamtbudgets.

Wollen wir das 2-Grad-Ziel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als 66 Prozent erreichen oder gelingt es uns nicht, die Emissionen von Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft genügend stark zu mindern, dann ist das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget entsprechend kleiner.

## Das Problem der Lastenverteilung

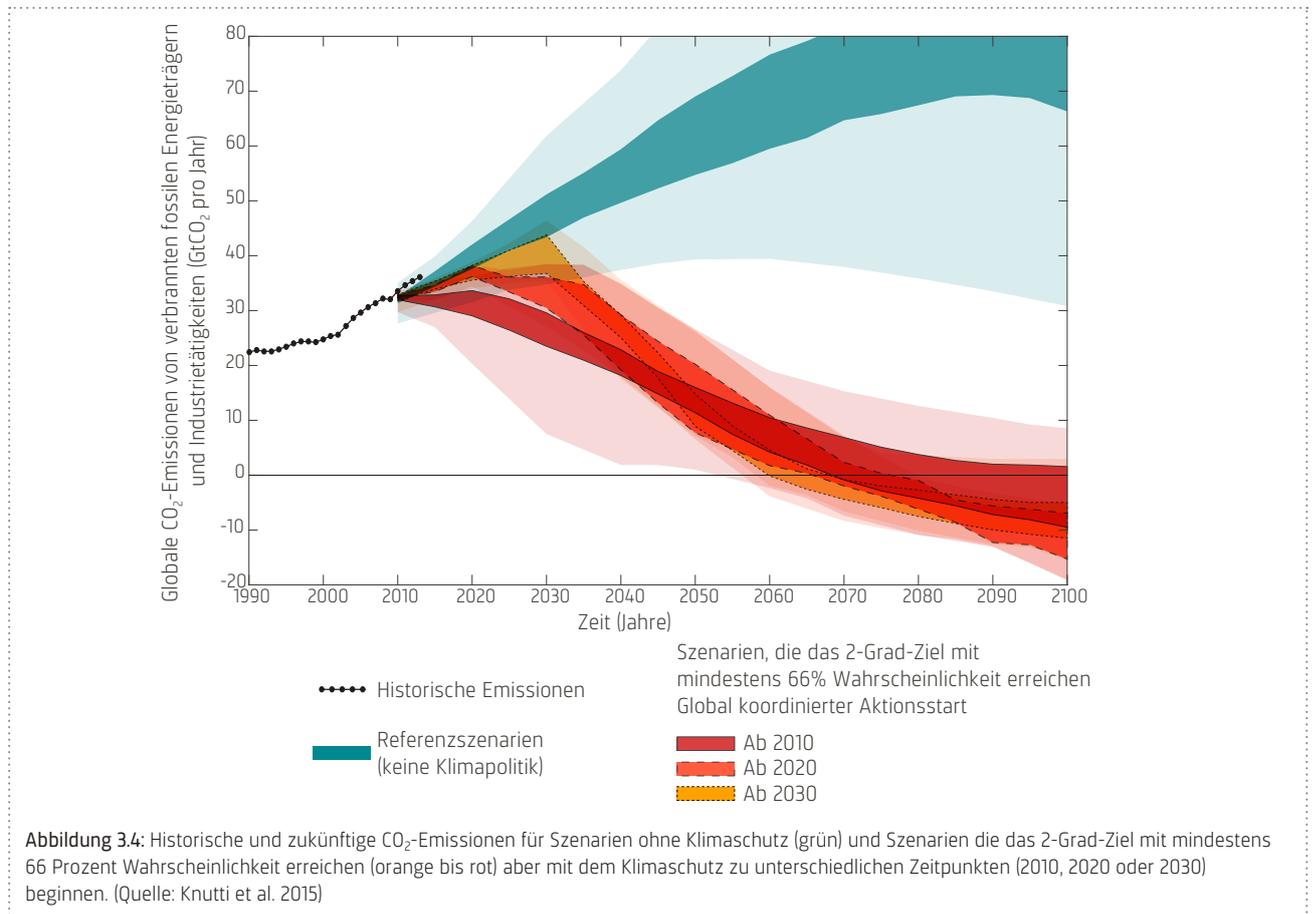
Die internationale Politik hat sich für das 2-Grad-Ziel entschieden und entsprechend verbleibt uns noch weniger als ein Drittel des Kohlenstoff-Gesamtbudgets (siehe oben). Das Übereinkommen von Paris erwähnt ebenfalls ein zusätzliches Ziel von 1,5 Grad Celsius Erwärmung. Dafür gelten die gleichen Argumente, ausser dass das Ge-

samtbudget noch kleiner ist. Wie dieses Gesamtbudget an Emissionen unter den Ländern und über die Zeit verteilt werden soll, ist eine ethische und wirtschaftliche Frage, die mit naturwissenschaftlichen Fakten nicht beantwortet werden kann. Für die Verteilung über die Länder gilt in der politischen Diskussion grundsätzlich das Prinzip der «gemeinsamen aber differenzierten Verantwortung». Das bedeutet, dass das CO<sub>2</sub>-Budget eine globale Ressource ist und nur eingehalten werden kann, wenn alle sich an der Lösung beteiligen. Was nicht heisst, dass alle gleichviel dazu beitragen müssen, denn nicht alle tragen gleichviel Verantwortung für das Problem. Dies wird mit der sogenannten Lastenverteilung<sup>2</sup> berücksichtigt.

## Lösungsansätze

Die meisten in den Klimaverhandlungen diskutierten Lösungsansätze zur Lastenverteilung berücksichtigen einerseits die historische Verantwortung eines Landes

<sup>2</sup> Der Begriff des «Burden sharing» (Lastenverteilung) bezeichnet, welche Anstrengung jedes Land unter bestimmten Kriterien von Fairness beitragen muss, um seine Emissionen zu reduzieren. Die gleichwertige Frage, die hier diskutiert wird, ist die CO<sub>2</sub>-Budgetverteilung, das heisst, welcher Anteil der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen einem Land noch zusteht (Knutti & Rogelj 2015).



(historische und heutige Emissionen) anhand des Verursacherprinzips, das besagt, dass der Verursacher einer Verschmutzung bezahlt. Andererseits wird oft bewertet, ob ein Land die Möglichkeit hat, die Emissionen zu reduzieren. Dies kann zum Beispiel durch das Bruttosozialprodukt pro Kopf abgeschätzt werden. Ähnlich wie bei Steuern gilt hier also das Prinzip, dass jeder etwas bezahlt, aber wer mehr besitzt oder verdient, der kann und muss einen grösseren Beitrag leisten. Abbildung 3.3 zeigt die Lastenverteilung am Beispiel des 2-Grad-Ziels sowie anhand der folgenden drei prominent diskutierten Lösungsansätze, wobei auch viele andere Ansätze möglich sind:

- **«Max per Capita»:** Die Pro-Kopf-Emissionen der Entwicklungsländer bleiben unter den Pro-Kopf-Emissionen der Industriestaaten.
- **«Cumulative per Capita»:** Die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen der Industriestaaten und der Entwicklungsländer zwischen 1990 und dem Ende des 21. Jahrhunderts sind gleich hoch.
- **«Responsibility Capacity Index»:** Die Emissionen werden zwischen den unterschiedlichen Ländern aufgeteilt gemäss den historischen Emissionen und dem Bruttosozialprodukt.

Kurzfristig sind die drei Ansätze der Lastenverteilung ähnlich. Langfristig aber müssten beim Ansatz «Cumulative per Capita» die Emissionen in den Industriestaaten negativ werden. Negative Emissionen kann ein Land beispielsweise erreichen, indem es Zertifikate für Emissionen kauft. Mit dem Kaufpreis werden die Emissionen im Ausland eingespart. Eine andere Möglichkeit ist, Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung zu kombinieren: CO<sub>2</sub> aus der Luft wird gebunden und im Boden eingelagert. Den drei Lösungsansätzen gemeinsam ist, dass die Länder mit den heute höchsten Emissionen am stärksten mindern müssen und dass der grössere Teil des verbleibenden Budgets den Entwicklungsländern zusteht.

Obwohl in der Politik seit langem darüber diskutiert wird, konnten sich die Länder bis heute nicht auf eine Lösung der Lastenverteilung einigen. Zum Beispiel ist unklar, ob die Bewohner eines Landes nur für die momentanen Emissionen oder auch für die Emissionen ihrer Vorfahren verantwortlich sind. Das Prinzip der Verteilung des Budgets wird von einigen als politisch nicht durchsetzbar kritisiert. Andere argumentieren, dass es kein «Recht auf Verschmutzung» gebe, das man verteilen könnte. Alternativ wäre zum Beispiel ein Recht auf Entwicklung oder

auf Lebensqualität denkbar, aber dessen Berechnung und der Zusammenhang mit historischen und momentanen Emissionen ist noch subjektiver. 2015 haben die Länder in Paris beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Diese Ziele sollen durch Beiträge auf Länderebene erreicht werden: Jedes beteiligte Land wird wahrscheinlich einen Beitrag vorschlagen, den es als gerecht empfindet. Bisher ist die Summe der Beiträge nicht ausreichend, um das Zwei-Grad- oder 1,5-Grad-Ziel zu erreichen. Eine andere Sichtweise ist, dass die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kaum durch eine Diskussion der Lastenverteilung und ein globales Abkommen gelöst werden kann, sondern dass vielmehr Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, unter denen die Dekarbonisierung für Einzelpersonen, Firmen oder Länder so attraktiv ist, dass sie unabhängig von den Handlungen der anderen Beteiligten vorangetrieben wird (Patt 2015).

### Zeit für Dekarbonisierung ist knapp

Mit Integrated-Assessment-Modellen (s. a. Kap. 1.4 Klimamodelle, S. 36) können für ein vorgegebenes CO<sub>2</sub>-Budget oder für ein Klimaziel die kostengünstigsten CO<sub>2</sub>-Pfade berechnet werden (Abb. 3.4). Dabei werden auch Unsicherheiten in Bezug auf den Ausstoss weiterer Treibhausgase und zur Entwicklung von Technik und Gesellschaft berücksichtigt, zum Beispiel, ob Nuklearenergie in Zukunft zur Verfügung steht oder nicht. Abbildung 3.4 zeigt, dass sich die heutigen Emissionen im oberen Bereich der Referenzszenarien ohne Klimaschutz bewegen und deutlich über den kostenoptimalen Szenarien zur Erreichung eines 2-Grad-Ziels liegen, die schon ab 2010 die Emissionen deutlich mindern (Abb. 3.4, dunkelrot).

In Abbildung 3.4 ist ersichtlich, dass die Emissionen immer rascher abnehmen oder nach etwa 2060 stärker negativ werden müssen, je länger wir mit Massnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen zuwarten, falls wir ein bestimmtes Temperaturziel einhalten möchten. So dürfte das 2-Grad-Ziel bei ungebremstem Wachstum der CO<sub>2</sub>-Emissionen über die nächsten fünf Jahre nur noch sehr schwer zu erreichen sein, von einem 1,5-Grad-Ziel gar nicht erst zu reden. Sogar wenn Länder ihre freiwilligen Emissionsziele bis 2020 erreichen wollen, müsste ein Trendbruch bei der Energieeffizienz und der Abnahme der CO<sub>2</sub>-Intensität stattfinden. In kostenoptimalen Szenarien liegen die zwischen 2030 und 2050 notwendigen Emissionsminderungen im Bereich von jährlich drei Prozent. Die Minderungen steigen auf ungefähr fünf Prozent jährlich an in denjenigen Szenarien, die davon ausgehen, dass die derzeit angekündigten Klimamassnahmen bis 2030 effektiv umgesetzt werden. Szenarien, die davon ausgehen, dass die momentanen Trends bis 2030 weiterlaufen, verlangen

eine jährlichen Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von sechs Prozent. Es ist klar, dass mit jedem weiteren Jahr ohne umfassende globale Klimamassnahmen die Möglichkeiten, den globalen Temperaturanstieg unter zwei Grad Celsius zu halten, rasch abnehmen.

### Freiwillige Länderverpflichtungen sind zu gering

In kostenoptimalen Szenarien für zwei Grad Celsius sind die Emissionen von Industriestaaten bis 2030 um 20 bis 40 Prozent tiefer als im Jahr 2010 (IPCC 2014/WGIII/Tab.6.4). Weltweit wären rund 40 bis 70 Prozent Minderung bis 2050 nötig, um das 2-Grad-Ziel zu erreichen. Für Industriestaaten bedeutet dies, dass ihre Emissionen im Jahr 2050 um 80 bis über 90 Prozent tiefer sein sollten als im Jahr 2010. Diese Zahlen gelten für einen grossen Teil der Lösungsansätze zur Lastenverteilung (IPCC 2014/WGIII/Figur 6-29). In vielen Szenarien werden die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2070 zudem negativ. Das bedeutet, dass die durch Bioenergie mit Sequestrierung eingelagerte CO<sub>2</sub>-Menge die Emissionen übersteigen muss.

Die von den verschiedenen Ländern freiwillig eingegangenen Verpflichtungen sind wesentlich kleiner als die in Abbildung 3.3 und 3.4 gezeigten Minderungen, die für eine kostenoptimale Erreichung des 2-Grad-Ziels nötig sind (Rogelj et al. 2016). Die globale Weltgemeinschaft ist trotz aller Klimaverhandlungen nicht auf dem Weg, das 2-Grad-Ziel zu erreichen, sondern zielt eher auf eine Erwärmung von drei bis vier Grad Celsius (Schaeffer et al. 2013).

### Referenzen

- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 6 «Assessing Transformation Pathways». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Knutti R, Rogelj J (2015) **The legacy of our CO<sub>2</sub> emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics**. *Climatic Change* 133: 361–373.
- Knutti R, Rogelj J, Sedláček J, Fischer EM (2016) **A scientific critique of the two-degree climate change target**. *Nature Geoscience* 9: 13–18.
- Patt A (2015) **Transforming Energy: Solving Climate Change with Technology Policy**. University Press, Cambridge.
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M (2016) **Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C**. *Nature* 534: 631–639.
- Schaeffer M, Gohar LK, Kriegler E, Lowe JA, Riahi K, Van Vuuren DP (2013) **Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios**. *Technological Forecasting & Social Change* 90: 257–268.

## Nationale Emissionstrends beim Treibhausgasausstoss

Im Rahmen der UN-Klimakonvention und des Kyoto-Protokolls werden die Treibhausgasemissionen der Schweiz systematisch im nationalen Treibhausgasinventar erfasst. Die Erhebung entspricht standardisierten methodischen Vorgaben, umfasst die auf dem Territorium der Schweiz ausgestossenen Emissionen seit 1990 und wird jährlich aktualisiert.

Regine Röthlisberger (BAFU)

### Aktuelle Emissionen

Pro Kopf und Jahr stösst die Schweiz rund sechs Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente direkt im Inland aus. Berücksichtigt man auch die grauen Emissionen<sup>3</sup> verursacht die Schweiz einen Ausstoss von rund 14 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Kopf und Jahr. Damit liegen die Pro-Kopf-Emissionen der Schweiz über dem globalen Durchschnitt. Dank des hohen Beitrags von Wasser- und Kernkraftwerken zur Stromproduktion liegt die Schweiz beim CO<sub>2</sub>-Ausstoss dennoch tiefer als viele andere europäische Staaten.

Drei Viertel der Treibhausgasemissionen der Schweiz stammen aus der Nutzung fossiler Energieträger, hauptsächlich Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel. Nicht berücksichtigt im Total der Treibhausgasemissionen sind die Emissionen des internationalen Flugverkehrs, die separat ausgewiesen werden. Würde man diese mitberücksichtigen, müsste man zum Total knapp zehn Prozent dazurechnen.

Betrachtet man die Treibhausgasemissionen der Schweiz aus Sicht der Sektoren (Abb. 3.5), so sind der Strassenverkehr mit 33 Prozent und die Beheizung von Gebäuden mit 24 Prozent (16 Prozent Privathaushalte, 8 Prozent Dienstleistungen) der gesamten Emissionen die beiden Hauptverursacher. Die Industrie verursacht weitere 15 Prozent, wobei der Energieverbrauch 10 Prozent beiträgt, die industriellen Prozesse (insbesondere die bei der Zementherstellung entstehenden geogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen) 5 Prozent. Es folgen die Landwirtschaft (Methanemissionen aus der Tierhaltung und Lachgasemissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden) mit etwa 14 Prozent sowie die Energieumwandlung (Strom- und Fernwärmeerzeugung, zu einem grossen Teil aus Kehrrichtverbrennungsanlagen sowie Raffinerien) mit 8 Prozent. Vier Prozent der gesamten Emissionen entstehen bei der Verwendung von fluorierten Gasen, meist bei der Anwendung von Kältemitteln. Die verbleibenden zwei Prozent stammen aus der Abfallbewirtschaftung (Abwasser, Abfalldeponien, Biogasanlagen).

### Emissionsszenarien

Mithilfe eines ökonomischen Gleichgewichtsmodells<sup>4</sup> wurde abgeschätzt, wie sich die Treibhausgasemissionen der Schweiz mit den heute geltenden klimapolitischen Massnahmen (s. a. Kap. 4.2 Schweizer Klimapolitik, S. 194) bis 2030 entwickeln werden – und wie sie sich entwickelt hätten, falls keine klimapolitischen Massnahmen ergriffen worden wären. Weiter wurde abgeschätzt, welche Wirkung sich durch eine künftige Weiterentwicklung der Klimapolitik erzielen liesse und wie sich die Treibhausgasemissionen unter der Annahme zusätzlicher oder verschärfter klimapolitischer Massnahmen entwickeln würden (Abb. 3.6):

- **Hohes Szenario ohne Massnahmen («without measures», WOM):** Trotz massiver Zunahme der Bevölkerung, der Wohnfläche und des Bruttoinlandprodukts seit 1990 wären die totalen Treibhausgasemissionen bis heute dank technischem Fortschritt auch ohne klimapolitische Massnahmen nur leicht über das Niveau von 1990 gestiegen.
- **Mittleres Szenario mit den heute geltenden Massnahmen («with existing measures», WEM):** Die heute geltenden klimapolitischen Massnahmen führen dazu, dass die totalen Treibhausgasemissionen bis 2030 um fast 20 Prozent unter das Niveau von 1990 fallen werden.
- **Tiefes Szenario mit weiteren Verschärfungen der Massnahmen («with additional measures», WAM):** Im Szenario mit zusätzlichen und verschärften klimapolitischen Massnahmen wird bis 2030 eine Minderung der totalen Treibhausgasemissionen von rund 30 Prozent gegenüber 1990 erwartet.

### Emissionsentwicklung in den Sektoren

Die Anteile der Sektoren Verkehr und Gebäude an den gesamten Emissionen haben sich von 1990 bis heute in gegenläufiger Richtung verändert: Beim Verkehr erfolgte eine leichte Zunahme, bei den Gebäuden eine Abnahme. Bis 2030 verändern sich die Anteile der verschiedenen Sektoren an den totalen Treibhausgasemissionen je nach

<sup>3</sup> Emissionen im Ausland, die durch in die Schweiz importierte Güter verursacht werden

<sup>4</sup> Mit diesem Modell kann die Volkswirtschaft als Ganzes abgebildet und ein gesamtwirtschaftlicher Gleichgewichtszustand untersucht werden (gemini-e3.epfl.ch)

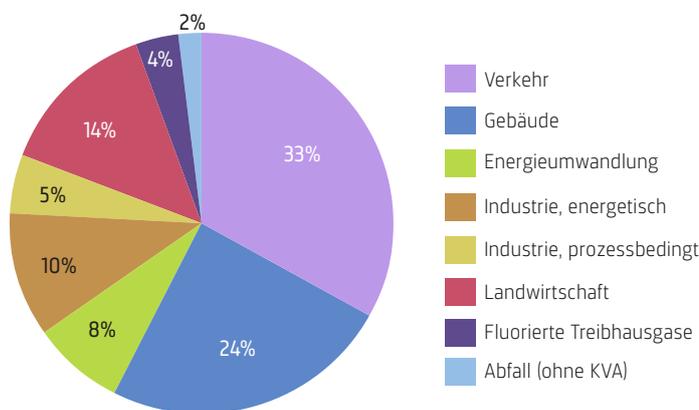
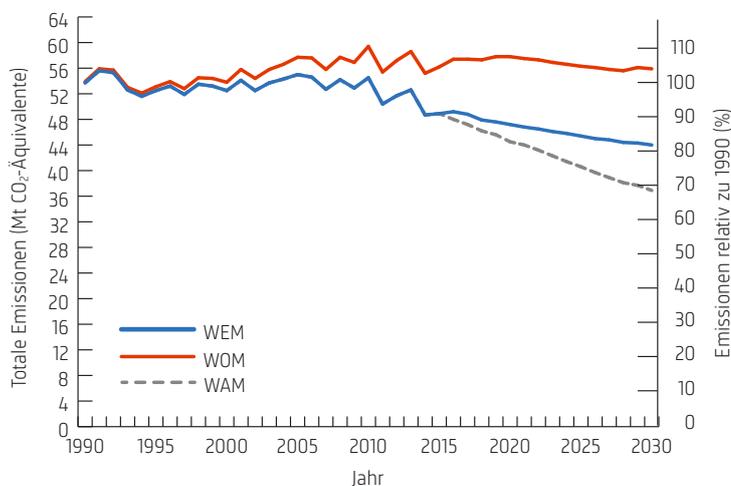
Treibhausgasemissionen  
in der Schweiz 2014

Abbildung 3.5: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Schweiz nach Sektoren im Jahr 2014. (Quelle: BAFU 2016)

Total

Abbildung 3.6: Emissionsszenarien für die Schweiz (alle Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten). Aufgezeigt wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in drei verschiedenen Szenarien: Szenario ohne klimapolitische Massnahmen («without measures», WOM), Szenario mit heute geltenden klimapolitischen Massnahmen («with existing measures», WEM) und Szenario mit zusätzlichen und verstärkten klimapolitischen Massnahmen («with additional measures», WAM). (Quelle: EPFL & INFRAS 2016; BAFU 2016)

bereits heute marktreif, werden sukzessive umgesetzt und führen – insbesondere durch den Ersatz fossiler Heizsysteme und die Verbesserung der Gebäudehülle – in den Szenarien WEM und WAM bis 2030 zu Emissionsminderungen um 40 bis 60 Prozent. Selbst im Szenario ohne politische Massnahmen (WOM) werden allein durch den technischen Fortschritt Emissionsminderungen erzielt, allerdings deutlich verlangsamt gegenüber den Szenarien mit klima- und energiepolitischen Massnahmen (Abb. 3.7).

### Sektor Verkehr

Durch die Zunahme der Fahrleistung werden Effizienzgewinne durch technischen Fortschritt weitgehend kompensiert. Im Szenario ohne Massnahmen (WOM) bleiben die Emissionen auch 2030 über jenen von 1990. Im Szenario mit heute geltenden Massnahmen (WEM) wird der Einsatz von effizienten Fahrzeugen durch Massnahmen beschleunigt und führt zu Emissionen, die in etwa auf dem Stand von 1990 verharren. Lediglich durch eine weitere Verschärfung der Massnahmen (Szenario WAM) fallen die Emissionen trotz zunehmender künftiger Verkehrsleistung bis 2030 um maximal 10 Prozent unter das Niveau von 1990 (Abb. 3.8).

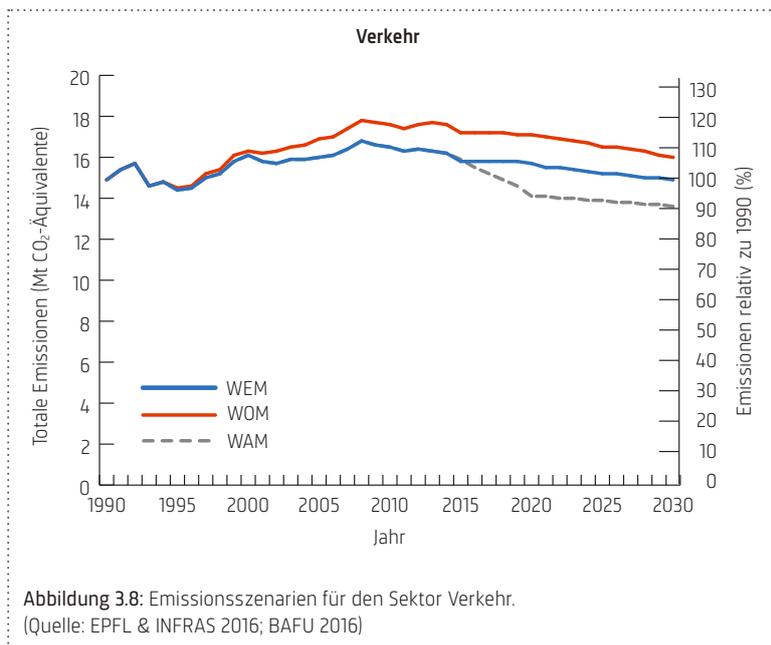
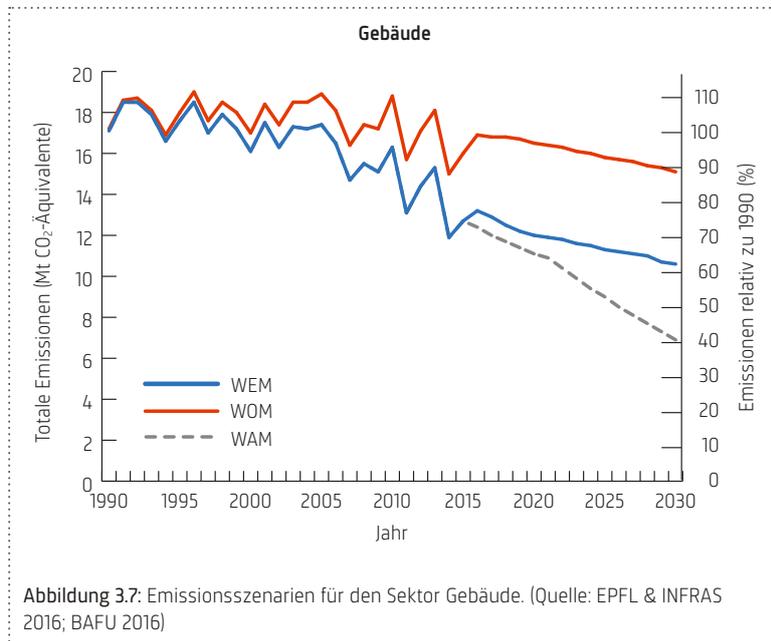
### Sektoren Industrie und Landwirtschaft

Der Anteil der Industrie (energetische und prozessbedingte Emissionen) bleibt stabil, hingegen nimmt der Anteil der landwirtschaftlichen Emissionen an den gesamten Emissionen bis 2030 leicht zu. Absolut gesehen gehen die Emissionen leicht zurück.

Szenario weiter, da sich Verkehr, Gebäude, Energieumwandlung und Industrie im Vergleich zum Total unterschiedlich entwickeln.

### Sektor Gebäude

Im Gebäudesektor gehen alle Szenarien von wesentlichen Emissionsminderungen bis 2030 aus. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie diverse Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden sind



## Referenzen

BAFU (2016) **Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2014**. Federal Office for the Environment (FOEN), Bern.  
[www.climatereporting.ch](http://www.climatereporting.ch)

EPFL, INFRAS (2016) **Emissions scenarios without measures 1990 – 2030**. Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Zurich & Lausanne, 4 May.

### 3.3 Verhaltensänderungen

Während die Wirtschaft in den letzten Jahren viel in Emissionsminderungsmassnahmen investiert hat, sind die Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte in der Schweiz in den letzten beiden Jahrzehnten kaum zurückgegangen. Dem Rückgang der Emissionen im Heizungsbereich steht eine Zunahme beim Individualverkehr gegenüber. Die Haushaltsemissionen inklusive Privatverkehr machen heute gut ein Drittel der Gesamtemissionen aus. Ein Emissionsrückgang scheitert unter anderem an ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen sowie an psychologischen und sozialen Hemmnissen. Das Wissen um diese Einflussfaktoren bietet Anknüpfungspunkte für die Planung möglicher Massnahmen, mit deren Hilfe man künftige Verhaltensänderungen der privaten Haushalte fördern kann.

Renate Schubert (ETH Zürich)

Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht, vor allem der im April 2014 erschienene Bericht der Arbeitsgruppe III (IPCC 2014/WGIII), weist darauf hin, dass eine Erhöhung der Energieeffizienz in den Bereichen Verkehr, Industrie und Gebäude von zentraler Bedeutung für die weltweite Begrenzung der Treibhausgasemissionen sei. Nebst technischem Fortschritt sind dabei auch Verhaltensänderungen – gerade auch bei privaten Akteuren – unverzichtbar; sie könnten die Energienachfrage kurzfristig um 20 Prozent und bis 2050 um 50 Prozent senken und so einen wichtigen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Verhaltensänderungen seien aber schwierig zu erreichen, da Individuen gerne am Status-Quo festhielten und selten von langfristigen Überlegungen getrieben seien. Monetäre und nicht-monetäre Anreize ebenso wie bessere Information seien daher wichtig, um die erforderlichen Verhaltensänderungen in Gang zu setzen.

Solche Überlegungen sind auch für die Schweiz wichtig. Private Haushalte verursachen rund 35 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz, rund 20 Prozent im Haushalt selbst und rund 15 Prozent beim privaten Transport (BFS 2014). In den letzten beiden Dekaden haben die verkehrsbedingten Emissionen stark zugenommen, während die heizungsbedingten Emissionen zurückgingen (Abb. 3.9). Würden die Emissionen im Bereich «Verkehr» künftig weniger stark ansteigen oder die Emissionen im Bereich «Heizung» stärker zurückgehen, könnten sich die Gesamtemissionen des Haushaltssektors trotz wachsender Wohnbevölkerung verringern. Dem stehen jedoch verschiedene Hemmnisse entgegen.

#### Ökonomische und institutionelle Hemmnisse

##### Finanzielle Hemmnisse

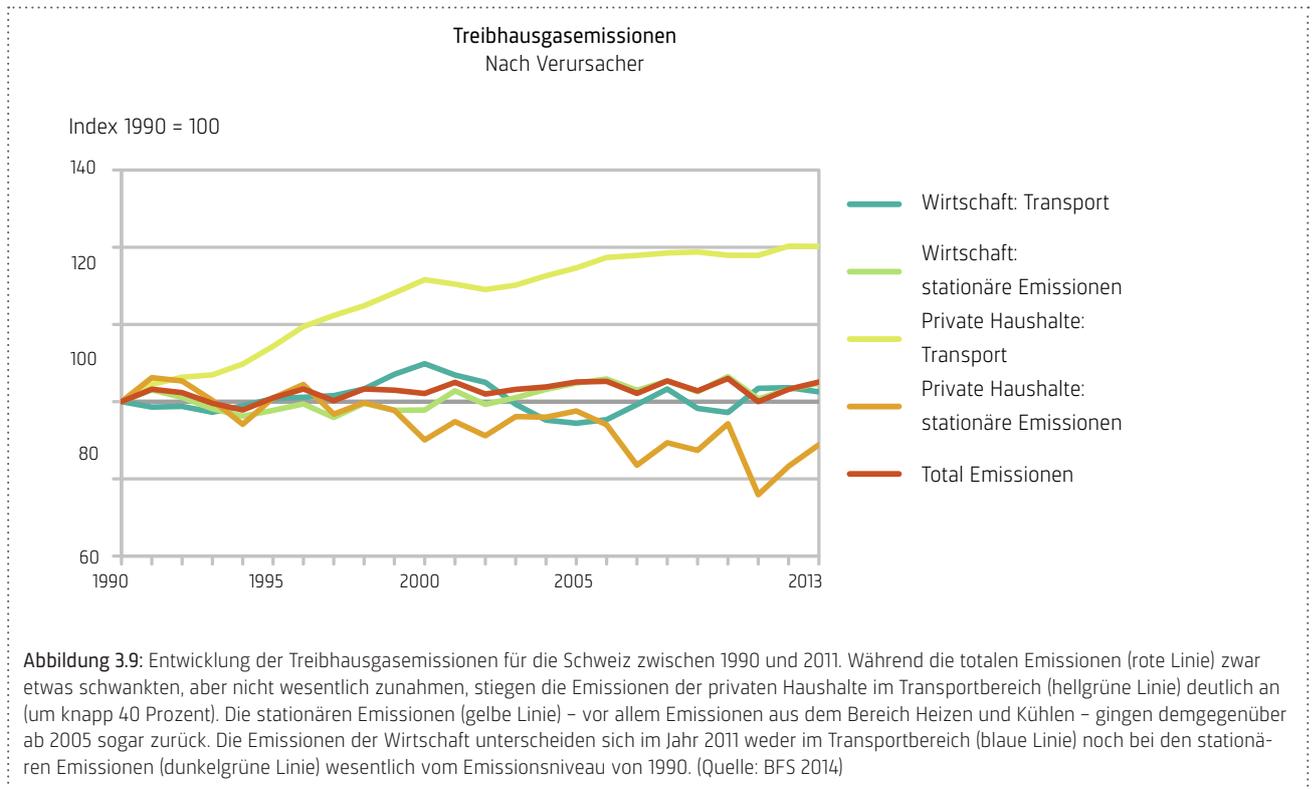
Private Haushalte haben wenige finanzielle Anreize, ihr Verhalten gegenüber fossilen Energieträgern zu ändern: Die Preise für diese Energieträger sind nämlich eher tief,

und die durch die Treibhausgasemissionen verursachten Schäden, die so genannten externen Kosten, sind darin nicht enthalten. Ausserdem ist der Anschaffungspreis von Installationen, die auf regenerative Energien setzen, beispielsweise von Elektroautos oder Erdwärmeheizungen, derzeit relativ hoch und die Rentabilität ist in vielen Fällen tiefer als die der fossil basierten Installationen.

Emissionsminderungen privater Haushalte scheitern deshalb oft auch daran, dass es den Haushalten an finanziellen Mitteln fehlt, um Investitionen zu tätigen, die ihre künftigen Treibhausgasemissionen senken könnten. Die Umstellung des Heizsystems eines Einfamilienhauses etwa, zum Beispiel von einer Ölheizung mit vielen Treibhausgasemissionen auf eine Erdwärme-Heizung mit wenigen Emissionen, oder der Einbau einer Solaranlage bringen einen erheblichen Investitionsbedarf mit sich, der viele Haushalte überfordert.

##### Institutionelle Rahmenbedingungen

Neben solchen ökonomischen Rahmenbedingungen haben auch *institutionelle Rahmenbedingungen* die Schweizer Verbraucherinnen und Verbraucher bisher davon abgehalten, ihre Treibhausgasemissionen deutlicher zu verringern (Schubert 2013). Viele Schweizer Haushalte sind Mieter und nicht Eigentümer ihrer Wohnungen und Häuser und können bei der Auswahl der Heiz- oder Kühlsysteme oder bei der Isolation der Gebäude nicht mitentscheiden. Da für die Eigentümer vielfach nur der Anschaffungspreis der entsprechenden Installationen von Interesse ist, fehlen Anreize, auf Anlagen mit tiefen Emissionen umzusteigen, Gebäudeisolationen durchzuführen oder entsprechende Massnahmen für neue Gebäude vorzusehen.



## Politikinstrumente

Die Politik hat verschiedene Möglichkeiten, die Emissionsminderung zu fördern. In der Schweiz werden diese vor allem im Wirtschaftssektor eingesetzt, zum Beispiel die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA), ein Emissionshandelssystem oder die CO<sub>2</sub>-Abgabe auf fossile Brennstoffe. Im grössten Problemsektor hingegen, dem Privatverkehr, blieben griffige Massnahmen bisher aufgrund fehlender politischer Akzeptanz weitgehend aus. So fehlt beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Treibstoffe. Die Einführung technischer Normen wurde bisher eher zurückhaltend eingesetzt. Die Umweltinformation beim Autokauf fokussiert auf Energieeffizienzklassen, die nicht den absoluten, sondern den relativen Treibstoffverbrauch im Verhältnis zum Fahrzeuggewicht bezeichnen. Die technischen Effizienzsteigerungen bei Fahrzeugen wurden in den letzten Jahren denn auch durch den Einsatz grösserer und schwererer Fahrzeuge mehr als wettgemacht. In der Schweiz wird bei der Ablehnung von Politikinstrumenten oft die Begründung der Benachteiligung von Berg- oder abgelegenen ländlichen Gebieten angeführt, zum Beispiel da diese auf den Individualverkehr angewiesen seien. Ein erhöhter Treibstoffbedarf ist in diesen Regionen allerdings nicht erwiesen.

## Psychologische und soziale Hemmnisse

### Fehlendes Wissen und Wahrnehmung

Abgesehen von den ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen verhindern psychologische Barrieren und soziale Hemmnisse, dass weitere Anstrengungen zur Verringerung der individuellen Treibhausgasemissionen unternommen werden. Zum einen *wissen* viele Haushalte gar nicht, in welchem Ausmass sie mit ihrem Verhalten zu den Treibhausgasemissionen der Schweiz beitragen oder wie sie diese wirksam verringern könnten. Eine Reflexion über die Folgen des eigenen Lebensstils findet nur selten statt. Ein Grund dafür könnte die Zurückhaltung gegenüber Informationskampagnen in der Schweiz sein, mit denen eine solche Reflexion gefördert werden könnte. Darüber hinaus ist die *Wahrnehmung* vieler Haushalte häufig in dem Sinne verzerrt, dass sie keinen Zusammenhang zwischen ihrem eigenen Verhalten und der Gefahr des Klimawandels herstellen und diese Gefahr ausserdem als etwas sehr Abstraktes und räumlich wie zeitlich weit Entferntes und daher nicht besonders Bedrohliches wahrnehmen (Attari et al. 2010). Dadurch fehlen unmittelbare Gründe für die Sorge um die Umwelt und der moralische Antrieb für die Bereitschaft zu handeln. Diese bilden aber die wichtigste Basis für ein entsprechendes Engagement (Lindenberg & Steg 2007).

## Soziale Normen

*Unsicherheit* über die künftigen Rahmenbedingungen scheint ebenfalls Verhaltensänderungen zu behindern. Dabei spielen soziale Normen, das heisst das Verhalten der anderen Individuen und Haushalte, eine wichtige Rolle. Solange Individuen nicht sicher sind, dass auch andere Personen Anstrengungen zur Emissionsminderung unternehmen, scheint die Bereitschaft eher gering zu sein, persönliche oder monetäre Kosten für Verhaltensänderungen auf sich zu nehmen. Dies gilt zum Beispiel fürs Umsteigen vom Auto auf den öffentlichen Verkehr (Devine-Wright 2010). Eine hohe Zahl von Menschen, die Anstrengungen zur Eindämmung des Klimawandels unternehmen, oder die Anerkennung des Engagements im Freundeskreis oder in sozialen Netzwerken verstärken die Bereitschaft, sich für Emissionsminderungen einzusetzen. Auch prominente Vorbilder können dabei wichtig sein (Abrahamse & Steg 2009).

## Rebound-Effekte

Weiter beeinflussen sogenannte *Rebound-Effekte* das Ausmass der Energie- und Emissionseinsparungen. Bei diesen Effekten geht es darum, dass monetäre Einsparungen an einer Stelle durch Mehrverbrauch an anderer Stelle kompensiert oder sogar überkompensiert werden (Gillingham et al. 2013). Können Haushalte zum Beispiel aufgrund einer effizienteren Heizung Kosten sparen, leisten sie sich beispielsweise eine zusätzliche Auslandsreise, was die zuvor eingesparten Emissionen wieder kompensiert. Derartige Ausweichreaktionen als Folge emissionsmindernder Handlungen können aufgrund verschiedener Ursachen auftreten: So haben viele Menschen eine Art individuelles Budget für Nachhaltigkeitsanstrengungen. Höhere Anstrengungen in einem Bereich ziehen tiefere Anstrengungen in anderen Bereichen nach sich, so dass das Budget insgesamt ausgeglichen bleibt (Khan & Dhar 2006). Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang auch das Konzept des «finite pool of worry» (Weber 2006). Es betont, dass die Anzahl Verhaltensänderungen begrenzt ist, die durch Besorgnis, zum Beispiel über die Klimaänderung, ausgelöst wird. Trotz der emissionsmindernden Wirkung einzelner Aktivitäten können die Gesamtemissionen einzelner Personen daher durchaus ansteigen.

## Wohlergehen in der Gegenwart ist wichtiger

Mögliche Emissionsminderungen privater Haushalte werden auch dadurch eingeschränkt, dass viele Individuen eine hohe Präferenz für ihr Wohlergehen in der Gegenwart haben und sich bei ihren Handlungen nicht dafür interessieren, wie es ihnen oder ihren Kindern oder

Enkelkindern in einer ferneren Zukunft gehen könnte. Hohe Diskontraten, die im Übrigen vor allem bei Unsicherheit und bei tiefen Einkommen zu beobachten sind, sorgen dafür, dass Emissionsminderungen und die damit verbundenen persönlichen und monetären Kosten auf die Zukunft verschoben werden (Greene 2011). Häufig ist ein solches Verschieben auch Ausdruck von *Risikoaversion*. Individuen scheuen vor Verlusten zurück – und als solche werden Emissionsminderungen häufig wahrgenommen: Man hat Kosten für Verhaltensänderungen in der Gegenwart, denen unsichere und sowieso erst in der Zukunft auftretende Erträge gegenüber stehen.

## Ansatzpunkte zum Abbau der Barrieren

Was könnte man nun tun, damit mehr Haushalte in der Schweiz ihre Treibhausgasemissionen auf ein tieferes Niveau absenken? Da ökonomische Aspekte eine sehr wichtige Rolle spielen, scheint es unumgänglich zu sein, den Emissionen einen Preis zu geben, das heisst, alle fossilen Energien – auch die Treibstoffe – stärker zu besteuern und die institutionellen Rahmenbedingungen so anzupassen, dass tatsächliche Anreize für Emissionsminderungen gegeben sind.

Energiepolitische Massnahmen sind neben der Aufforderung zu freiwilligem Handeln notwendig. Sie erreichen im Allgemeinen ihre höchste Akzeptanz, wenn sie als «fair» empfunden werden, wenn sie die Wahlfreiheit der handelnden Personen eher erhöhen als senken, wenn sie das Schwergewicht auf mehr Effizienz statt auf Verzicht legen und wenn sie auf die Minderung des Energieverbrauchs im Haushalt statt beim Transport zielen (Steg 2008). Letzteres bestätigt, dass beim Verkehr die Minderung kaum über individuelles Verhalten sondern vielmehr über technische Normen und spürbare finanzielle Anreize gesteuert werden kann (z. B. CO<sub>2</sub>-Abgabe).

Daneben könnten mehr Rückmeldungen zu eigenen Emissionen (zum Beispiel durch obligatorische Carbon Footprints) nützlich sein, wie eine Verbreiterung der Wissensbasis der Haushalte, unter anderem durch Energieverbrauchs-Angaben für Produkte oder auch Häuser beziehungsweise Wohnungen, oder Verbrauchsmesssysteme im Haushalt. Breit angelegte Informationskampagnen würden hier Abhilfe schaffen und zu einem erhöhten Problembewusstsein beitragen. Hier könnten nicht zuletzt auch Firmen eine wichtige Rolle spielen, indem sie ihren Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern Informationen und konkrete Umsetzungsmassnahmen anbieten. Ein Vorteil solcher firmenbasierter Programme wäre, dass deutlich wird, dass andere ebenfalls handeln. Dies könnte die Bereitschaft deutlich erhöhen, Kosten im Zusammenhang mit Emissionsminderungen auf sich zu nehmen.

Ein ähnlicher Effekt könnte durch eine Aktivierung der sozialen Netzwerke ausgelöst werden, in denen sich Individuen bewegen und die ihnen wichtig sind. Möglicherweise könnten genau durch solche Netzwerke die engen Grenzen individueller Nachhaltigkeitsbudgets ausgehebelt werden. Netzwerke könnten auch helfen, Veränderungen im Lebensstil zu beschleunigen, etwa durch mehr «Likes» für energieeffizientes Verhalten, die Gründung von Fahrgemeinschaften oder Ähnlichem.

Effizienzförderungsmaßnahmen müssten verbunden werden mit der Aufklärung über die Gefahr der Kompensation von Minderungsanstrengungen durch Mehrverbrauch oder mehr Bequemlichkeit in anderen Bereichen (Rebound-Effekt). Damit kann Menschen gezeigt werden, dass sie durch ihre Anstrengung das eigentliche Ziel, nämlich die Emissionsminderung, nicht erreichen, wenn sie dies durch Tätigkeiten in einem anderen Bereich wieder aufheben. Das Aufzeigen von solchen Widersprüchen zwischen den Absichten einer Person und dem effektiven Resultat ihrer Handlungen sowie von Wegen, diesen Widerspruch aufzulösen, hat sich als sehr effektiv in der Förderung umweltgerechten Handelns erwiesen. Weiter haben sich das Setzen von konkreten Zielen (z. B. «Minderung des Elektrizitätsverbrauchs um 20 Prozent»), der direkte Erfahrungsaustausch mit Personen, die Minderungsaktivitäten erfolgreich unternommen haben sowie das Anbringen von Erinnerungsnotizen («Beim Verlassen des Raumes Licht löschen») als erfolgreiche Instrumente für die Unterstützung individueller Anstrengungen erwiesen (Osbaldiston & Schott 2012).

## Referenzen

- Abrahamse W, Steg L (2009) **How do socio-demographic and psychological factors relate to households' direct and indirect energy use and savings?** *Journal of Economic Psychology* 30: 711–720.
- Attari SZ, DeKay ML, Davidson CI, de Bruin WB (2010) **Public perceptions of energy consumption and savings.** *PNAS* 107: 16054–16059.
- BFS (2014) **Umweltgesamtrechnung-Indikatoren; Treibhausgasemissionen nach Wirtschaftsakteuren.** [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch)
- Devine-Wright P (2010) (ed.) **Renewable energy and the public - From NIMBY to participation.** Earthscan, London.
- Gillingham K, Kotchen MJ, Rapson DS, Wagner G (2013) **The rebound effect is overplayed.** *Nature* 493: 475–476.
- Greene DL (2011) **Uncertainty, loss aversion, and markets for energy efficiency.** *Energy Economics* 33: 608–616.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Khan U, Dhar R (2006) **Licensing effect in consumer choice.** *Journal of Marketing Research* 43: 259–266.
- Lindenberg S, Steg L (2007) **Normative, gain and hedonic goal-frames guiding environmental behaviour.** *Journal of Social Issues* 63: 117–137.
- Osbaldiston R, Schott JP (2012) **Environmental Sustainability and Behavioral Science: Meta-Analysis of Proenvironmental Behavior Experiments.** *Environment and Behavior* 44: 257–299.
- Schubert R (2013) **Instrumente zur Vermittlung von Wertewandel und Verhaltensänderungen im nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen der Erde.** *Nova Acta Leopoldina* 400: 367–396.
- Steg L (2008) **Promoting household energy conservation.** *Energy Policy* 36: 4449–4453.
- Weber EU (2006) **Experience-based and description-based perceptions of long-term risk: Why global warming does not scare us (yet).** *Climatic Change* 77: 103–120.

## 3.4 Energie

Das Energiesystem, bestehend aus Energiebereitstellung und Energienutzung, verursacht heute 75 Prozent der globalen und 80 Prozent der Schweizer Treibhausgasemissionen. Ob die Ziele zur Minderung der Treibhausgase erreicht werden, hängt daher zentral vom Erfolg des Umbaus zu einem CO<sub>2</sub>-armen Energiesystem ab. Ein grosser Teil der globalen Treibhausgase entsteht durch die Stromerzeugung, und ohne Gegenmassnahmen wird hier eine Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erwartet. Diese Emissionen könnten mit dem weitgehenden Ersatz durch die Produktion aus erneuerbaren und CO<sub>2</sub>-armen Quellen praktisch eliminiert werden. Auch im Industriesektor lässt sich global eine Halbierung der Emissionen durch effizientere Energienutzung erreichen. In der Schweiz beschränkt sich die Treibhausgasminde- rung auf die Energienutzung, da die Elek- trizitätsproduktion bereits heute praktisch CO<sub>2</sub>-frei ist. Die grössten Minderungspotenziale bestehen hierzulande im Gebäu- debereich und im Verkehrssektor.

Alexander Wokaun (Paul Scherrer Institut), Christoph Ritz (ProClim/SCNAT)

### Energiesystem spielt entscheidende Rolle beim Klimawandel

Die Verfügbarkeit von Energie ist essentiell für die sozia- le Wohlfahrt der Weltbevölkerung, und die Energie ist ein zentraler Produktionsfaktor der Weltwirtschaft. Die Ener- giebereitstellung basiert heute weitgehend auf der thermi- schen Nutzung fossiler Energieträger und verursachte 2010 weltweit 37 Gigatonnen der insgesamt ausgestossenen 49 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Nutzung und Bereitstel- lung von Energie sind mit 75 Prozent für den dominieren- den Anteil der weltweiten Treibhausgasemissionen verant- wortlich; dabei werden 65 Prozent in Form von CO<sub>2</sub> und 5 Prozent in Form von Methan ausgestossen. Da CO<sub>2</sub> eine lan- ge Verweildauer in der Atmosphäre hat (mehrere hundert Jahre bis Jahrtausende [Solomon 2009]), spielt das Ener- giesystem eine zentrale Rolle, wenn man den Klimawandel langfristig limitieren will (IPCC 2014/WGIII/Chap. 7).

In der Schweiz stammen sogar 80 Prozent der Treibhaus- gasemissionen aus dem Energiesystem (41,5 Megaton- nen von total 52,6 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2013). Grund für den im globalen Vergleich höheren An- teil ist primär der geringere Anteil der Emissionen aus der Landwirtschaft. Da die Bereitstellung (Gewinnung, Raffi- nierung und Transport) der fossilen Energieträger im Aus- land erfolgt und die Stromerzeugung durch Wasserkraft und Kernkraft CO<sub>2</sub>-arm ist, lassen sich in der Schweiz energiebedingte Treibhausgasminde- rungen praktisch nur in der Energienutzung realisieren (BAFU 2015).

### Energiesystem: Treibhausgasemissionen in den Sektoren

Die Aufteilung der globalen Treibhausgasemissionen aus der Energiebereitstellung und der Energienutzung auf die vier Sektoren Industrie, Transport, Gebäude und Landnut-

### Das Energiesystem und dessen Treibhausgasemissionen

Um die verschiedenen Quellen von Treibhausgasemissionen zu verstehen, ist es zweckmässig, das ganze Energiesystem zu betrachten. Das Energiesystem setzt sich zusammen aus Energiebereitstellung und Energienutzung:

#### Energiebereitstellung:

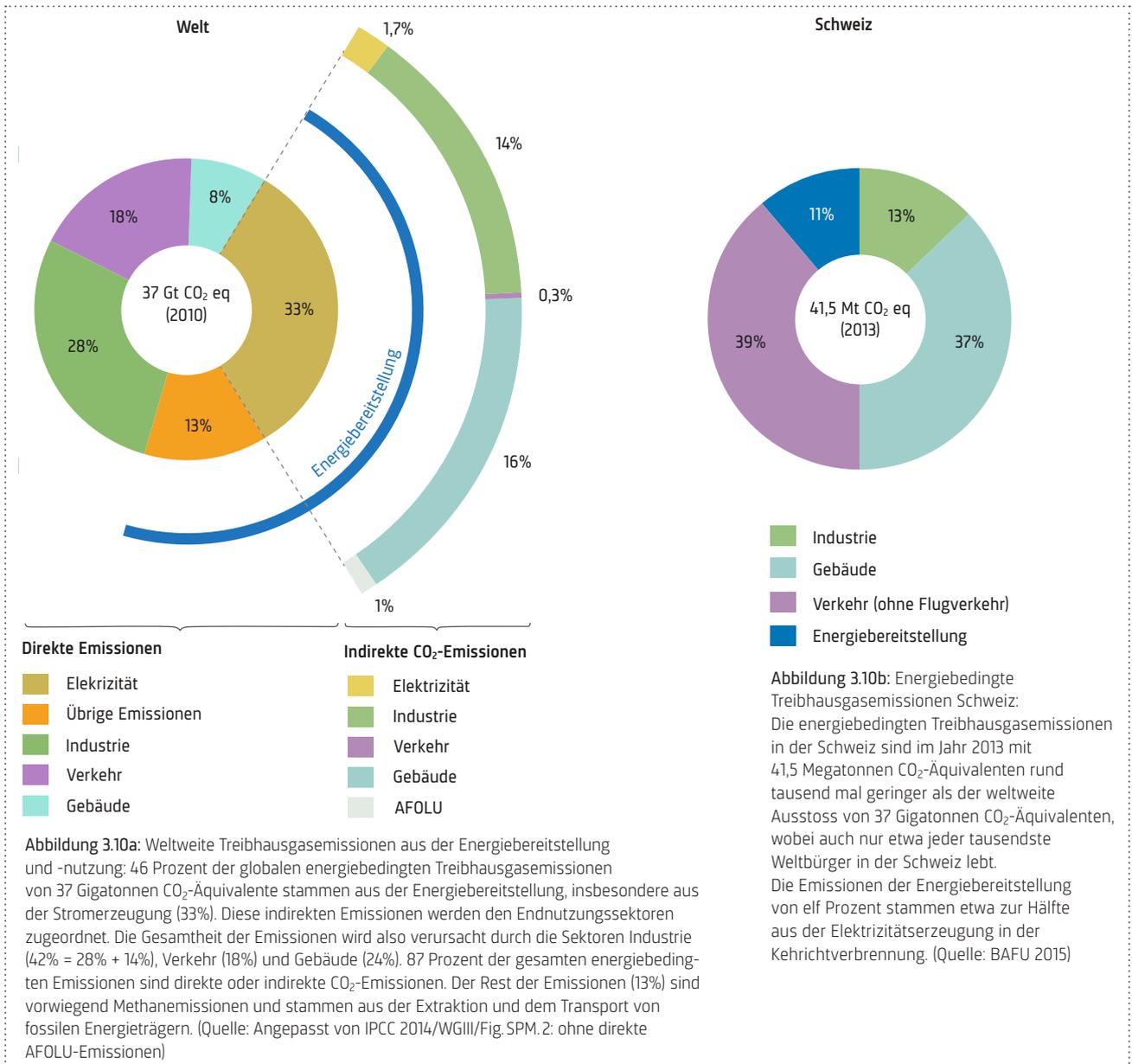
- Gewinnung der Primärenergien (z.B. Kohle, Kernbrennstoff, Wasser, Wind),
- deren Umwandlung zu Sekundärenergie (z.B. in Raffinerien, fossil befeuerten Elektrizitätswerken, Wasserkraftanlagen, Windturbinen, Solarzellen),
- Transport der Sekundärenergie mit Schiffen, Pipelines und Elektrizitätsnetzen zu den Kunden, die diese als Endenergie beziehen.

#### Energienutzung:

- Umwandlung der Endenergie in Nutzenergie (z.B. mechanische Antriebsenergie, Wärme) für Energiedienstleistungen (z.B. Transport von Gütern und Personen, Trocknen von Gütern).

Bei den daraus entstehenden Emissionen kann unterschieden werden zwischen direkten und indirekten Emissionen:

- **Direkte Emissionen** sind diejenigen, die bei der Nutzung der Energie vor Ort anfallen (z.B. beim Fahren eines benzin- getriebenen Fahrzeugs oder dem Verbrennen von Öl in einer Ölheizung).
- **Indirekte Emissionen** entstehen bei der Nutzung von Produkten oder von Elektrizität, deren Erzeugung an einem anderen Ort bzw. in einem anderen Land Emissionen erzeugt hat (z.B. Betrieb eines Elektrofahrzeugs mit Kohlestrom).
- **Graue Emissionen** sind indirekte Emissionen, die im Ausland erzeugt wurden und mit den Gütern und deren Transport in die Schweiz importiert werden oder aus dem Flugverkehr stammen.



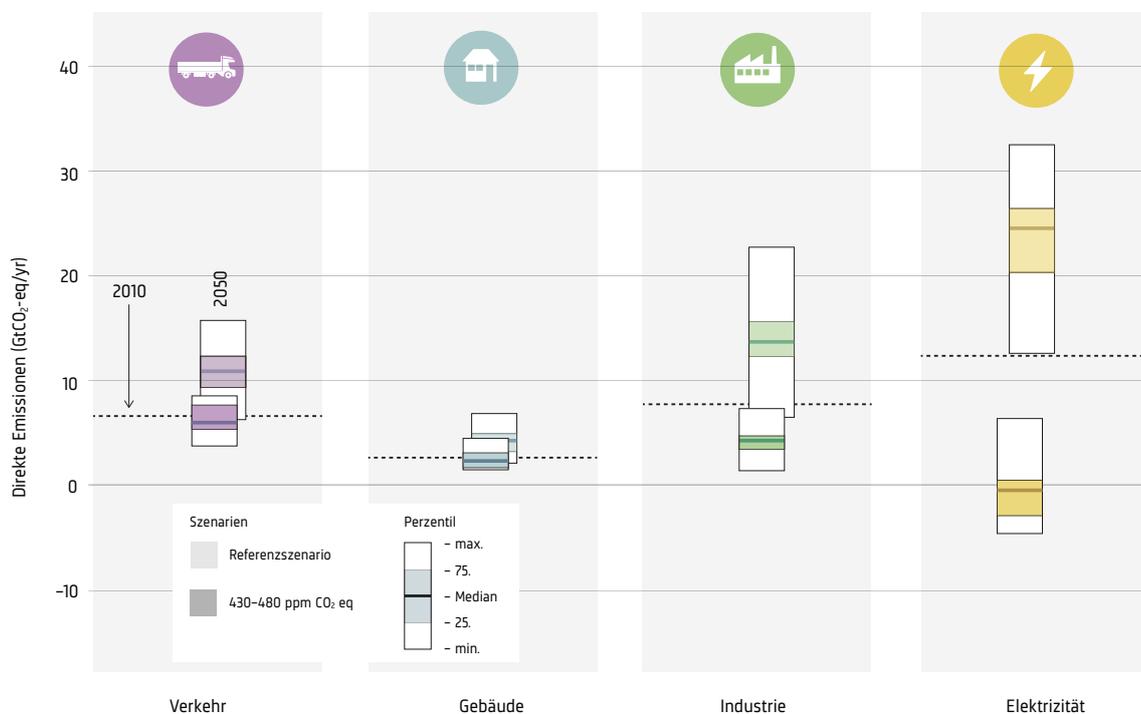
zung unterscheiden sich von derjenigen in der Schweiz beträchtlich (Abb. 3.10a und 3.10b).

### Globale Situation

In Abbildung 3.10a sind die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen ersichtlich, die weltweit durch die bedeutendsten Sektoren ausgestossen werden. Fast die Hälfte (46 Prozent) der energiebedingten Treibhausgasemissionen stammen aus der **Energiebereitstellung**. Der grössere Teil davon (33 Prozent vom Total) entsteht bei der Elektrizitätserzeugung (bzw. -bereitstellung) durch fossil befeuerte thermische Kraftwerke, vor allem Kohle-

kraftwerke. Die in thermischen Kraftwerken anfallende Wärme («Abwärme») wird meist nicht genutzt. Die anderen 13 Prozent stammen aus der Gewinnung der fossilen Energieträger, deren Bearbeitung in Raffinerien und beim Transport zu den Endverbrauchern.

Bei der **Energienutzung** ist die Industrie mit 42 Prozent die grösste Quelle von Treibhausgasen. Die Industrie verbraucht fast die Hälfte des gesamten Stroms weltweit und verursacht damit beträchtliche indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die direkten Emissionen der Industrie (s.a. Box Das Energiesystem und dessen Treibhausgasemissionen, S. 168) stammen rund zur Hälfte aus der Erzeugung von Prozesswärme für die Zement- und Metallproduktion so-



**Abbildung 3.11:** Direkte globale Treibhausgasemissionen nach Sektoren. Die Emissionen 2010 sind als gepunktete Linie dargestellt (sie entsprechen den Werten aus Abb. 3.10a). Die direkten Emissionen steigen in den Sektoren Transport, Industrie und Elektrizitätserzeugung bis 2050 unter der Annahme «Weiter Wie Bisher» (RCP8.5, Balken in schwächeren Farben) verglichen mit heute massiv an. Die Emissionen im Gebäudebereich bleiben etwa auf heutigem Stand. Um das 2-Grad-Ziel zu erreichen (Balken in intensiven Farben) muss insbesondere der Elektrizitätssektor CO<sub>2</sub>-neutral werden. Die Veränderung des Elektrizitätsbedarfs in den einzelnen Sektoren (d.h. die indirekten Emissionen) sind dem Sektor Elektrizität zugerechnet. (Quelle: Angepasst von IPCC 2014/SYR/Fig. SPM.14)

wie die chemische Industrie. Gebäude und Verkehr sind weltweit für 24 Prozent beziehungsweise 18 Prozent der Emissionen verantwortlich, wobei zwei Drittel der Emissionen der Gebäude aus indirekten Emissionen durch den Stromverbrauch bestehen.

## Situation Schweiz

In der Schweiz (Abb. 3.10b) sind die Treibhausgasemissionen aus der **Energiebereitstellung** mit 11 Prozent gering, insbesondere weil die Stromerzeugung mit 60 Prozent Wasserkraft und 40 Prozent Nuklearstrom praktisch CO<sub>2</sub>-frei ist.

Bei der **Energienutzung** dominieren die Treibhausgasemissionen von Verkehr (39 Prozent) und Gebäuden (37 Prozent). Die Emissionen der Industrie sind mit 13 Prozent relativ gering. Der prozentuale Anteil der Emissionen aus dem Verkehrssektor ist damit etwa doppelt so hoch wie in der ganzen Welt.

## Ziele und Massnahmen

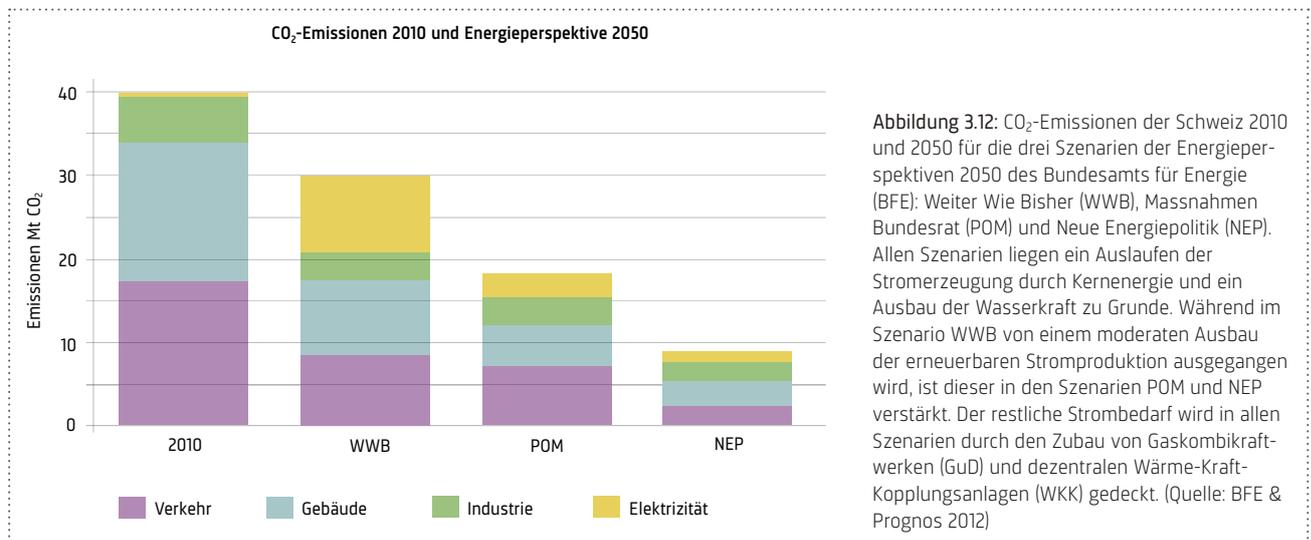
Sowohl auf globaler Ebene wie auf Ebene Schweiz sind die übergeordneten Ziele zur Emissionsminderung dieselben – und sie betreffen in erster Linie den Bereich Energie:

- Die Substitution fossiler Energieträger durch CO<sub>2</sub>-arme Energieträger, welche die Umwelt wenig belasten und
- Eine verminderte Energienutzung durch höhere Energieeffizienz und durch Anpassung des Verhaltens (s.a. Kap. 3.3 Verhaltensänderungen, S. 164).

## Global

### Energiebereitstellung

Für das Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) RCP8.5 wird erwartet, dass sich der Bedarf an Primärenergie weltweit bis 2050 in allen Sektoren gegenüber 2010 fast verdoppelt (Abb. 3.11). Für eine Minderung der Treibhausgasemissionen braucht es somit eine entsprechende Umgestaltung des Energiesystems, wie in den verschiedenen Klimaszenarien diskutiert (s.a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38). **Elektrizität** gilt dabei



als eine wichtige Alternative zu anderen Endenergien, da eine Dekarbonisierung grosser Kraftwerke einfacher umsetzbar und kostengünstiger ist als in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie. Unabhängig vom Szenario ist die Dekarbonisierung der Stromerzeugung dringend, da die Nachfrage nach Elektrizität weltweit steigt. Es stehen prinzipiell folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Starker Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere von Windkraftanlagen und Photovoltaik. Die energetische Nutzung der Biomasse kann zusätzlich einen wesentlichen Beitrag leisten. Erwähnt werden auch geothermische Kraftwerke und Ozeanenergie (Gezeiten, Wellen),
- Ersatz von Kohlekraftwerken durch hocheffiziente Gaskombi-Kraftwerke (Wirkungsgrade höher als 60 Prozent),
- Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus den Abgasströmen von Kohle- und Gaskraftwerken und geologische Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) und
- Nutzung der Kernenergie, sofern die Anforderungen an Sicherheit, Brennstoffkreislauf und Abfallmanagement erfüllt werden können.

Nach Einschätzung der IPCC-Autoren sind *alle* diese Massnahmen erforderlich, um eine Stabilisierung des Klimas zu erreichen; im Fünften IPCC-Sachstandsbericht ist deshalb keine Priorisierung zu finden. Die Auswahl aus diesem Portfolio wird von länderspezifischen Gegebenheiten, volkswirtschaftlicher Optimierung und politischen beziehungsweise gesellschaftlichen Präferenzen bestimmt.

### Energienutzung

Die Steigerung der Energieeffizienz ist eine essentielle Voraussetzung für die Erreichung jedes Klima-Stabilisierungsziels, da die Energieeffizienz die Gesamtnachfrage nach Primärenergie wesentlich beeinflusst. Die mögli-

chen Effizienzsteigerungen sind je nach Sektor verschiedenen (Abb. 3.11).

Im **Verkehrssektor** dominieren die direkten Emissionen durch den Treibstoffverbrauch, hauptsächlich von CO<sub>2</sub>. Um hier den Energiebedarf zu vermindern, sind neben technischen Effizienzmassnahmen auch Änderungen im Nutzungsverhalten erforderlich. So müssen die zurückgelegten Distanzen im Personen- und Warenverkehr gesenkt sowie Leerfahrten oder parallele Fahrten von Einzelpersonen auf gleichen Wegstrecken vermieden werden. Die Entwicklung muss in Richtung eines auf mehrere Träger abgestimmten Verkehrssystems gehen. Massnahmen dazu können auf den folgenden Handlungsebenen ergriffen werden:

- Gezielte Raumplanung zur Senkung des Mobilitätsbedarfs und Optimierung des Modalsplits (Verteilung auf die Verkehrsmittel),
- Verhaltensänderungen und Einsatz von Telekommunikation und Informationstechniken zur Reduktion von physischen Transporten,
- Förderung der Verwendung lokaler/regionaler Produkte und einer geographisch konzentrierten Warenherstellung durch einen adäquaten CO<sub>2</sub>-Preis auf dem Gütertransport,
- Effizienzsteigerung der Transportinfrastruktur,
- Effizienzsteigerung der Verkehrsträger und
- Ersatz der fossilen durch kohlenstoffarme Treibstoffe, wobei jeweils der gesamte Herstellungszyklus betrachtet werden muss.

Im **Gebäudebereich** wird bis 2050 weltweit eine Zunahme des Nutzenergiebedarfs um rund 80 Prozent erwartet; Gründe dafür sind im Wohnbereich der wachsende Flächenbedarf pro Person insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern sowie das Bevölkerungs-

wachstum und der erhöhte Kühlungsbedarf. Mit ähnlich wachsendem Energiebedarf wird bei kommerziell genutzten Gebäuden gerechnet. Trotzdem ist die Veränderung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gebäude auch ohne klimapolitische Massnahmen verglichen mit den anderen Sektoren relativ gering (schwach gefärbte Balken in Abb. 3.11). Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- Bessere Gebäudeisolation und Gebäudetechnik,
- Substitution der fossilen Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser durch andere Energien, zum Beispiel durch Solarthermie oder Erdwärme und
- Zurechnung des wachsenden Verbrauchs von Elektrizität im Sektor Gebäude zum Sektor Elektrizität.

Die direkten Treibhausgasemissionen im **Industriesektor** wachsen im Basisszenario «Weiter Wie Bisher» rasch an (Abb. 3.11). Nur ein Teil davon sind direkte Emissionen, die aus einem erhöhten Energiebedarf, insbesondere bei der Prozesswärme, resultieren. Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht rechnet damit, dass diese direkten Treibhausgasemissionen um rund die Hälfte gesenkt werden können, und zwar im Wesentlichen durch heute verfügbare Techniken. Auch bei den indirekten Emissionen, das heisst im Elektrizitätsverbrauch, sind in der Industrie massive Einsparungen möglich; diese werden im Sektor Elektrizität verbucht. Weitere Minderungen des Energiebedarfs und damit der Treibhausgasemissionen sind durch eine Steigerung der Materialeffizienz und durch das Recycling energieintensiver Werkstoffe möglich. Die Bewirtschaftung und Wiederverwertung von Abfallströmen wie die Verwendung der Abwärme aus dem Kühlbereich als Prozesswärme liefern weitere Hebel zur Minderung des Energieverbrauchs in der Industrie.

Biomasse, insbesondere Holz, aus dem **Bereich Landwirtschaft, Forstwirtschaft und andere Landnutzung (AFOLU)** war vor Beginn der industriellen Revolution die zentrale Energiequelle, hat aber in den Industrieländern wegen der billigen fossilen Ressourcen an Bedeutung verloren. Die Diskussion über nachhaltige Formen der grossmasstäblichen energetischen Nutzung von Biomasse wird international intensiv geführt. Neben der Konkurrenzierung der Nahrungsmittelproduktion durch den Anbau von Pflanzen für die energetische Nutzung stehen dabei vor allem die Vermeidung von Feinstaub- und Stickoxidemissionen und damit die Luftreinhaltung im Zentrum. In der Schweiz sind entsprechende Konzepte mit der Konzentration auf die Nutzung von Abfällen relativ weit fortgeschritten.

## Schweiz

Die Szenarien der Energieperspektiven 2050 (BFE & Prognos 2012) bilden die Grundlage der Energiestrategie 2050 und sind seit ihrer Veröffentlichung Gegenstand der po-

litischen Diskussion. Das vom Bundesrat dem Parlament vorgelegte erste Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 wird dabei im Szenario «Politische Massnahmen» (POM) abgebildet, wohingegen die langfristigen Ziele der Energiestrategie dem Szenario der «Neuen Energiepolitik» (NEP) folgen. Das Szenario «Weiter Wie Bisher» (WWB) bildet die Entwicklung der bisher in Kraft befindlichen Massnahmen ab (Abb. 3.12).

- **NEP:** Zielszenario mit einer Entwicklung des Energieverbrauchs und der Stromproduktion der Schweiz, die eine Senkung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis ins Jahr 2050 auf 1 bis 1,5 Tonnen pro Kopf ermöglicht. Dieses Szenario bedingt eine international abgestimmte CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Energieeffizienzpolitik.
- **POM:** Das Szenario ist massnahmenorientiert und zeigt auf, wie sich die Massnahmen des ersten Massnahmenpakets zur Konkretisierung der Energiestrategie auf die Energienachfrage und das Elektrizitätsangebot auswirken. Gezielt gefördert werden in diesem Szenario energetische Massnahmen auf der Energienutzungsseite, der Einsatz erneuerbarer Energien in Gebäuden und erneuerbare Energien auf der Elektrizitätsangebotsseite. Dieses Szenario ist wenig abhängig von der internationalen Energiepolitik.
- **WWB:** Alle heute in Kraft befindlichen energiepolitischen Instrumente, Massnahmen und Gesetze werden während des betrachteten Zeithorizonts bis 2050 weiter geführt und lediglich – allenfalls verzögert – dem technischen Fortschritt angepasst. Dieses Szenario beinhaltet keine Veränderungen im Verhalten oder der Nachfrageentwicklung.

Alle Szenarien gehen davon aus, dass die bestehenden Kernkraftwerke am Ende ihrer Betriebszeit nicht durch neue ersetzt werden. Bei einer Betriebszeit von 50 Jahren ginge im Jahre 2034 das letzte Kernkraftwerk vom Netz. In allen Szenarien wird von einem weiteren Ausbau der Wasserkraft und einem moderaten Zubau von Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK) ausgegangen. Während im Szenario WWB (Variante C) von einem moderaten Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion ausgegangen wird, ist dieser in den Szenarien POM und NEP deutlich verstärkt (Varianten C und E). Der restliche Strombedarf wird jeweils durch den Zubau von Gaskombikraftwerken (GuD) gedeckt. Damit steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Szenarien aufgrund des teilweisen Ersatzes der Kernkraftwerke durch Nutzung fossiler Brennstoffe mehr oder weniger stark an.

Nur das Szenario NEP ist kompatibel mit dem politisch deklarierten 2-Grad-Ziel<sup>1</sup>. Es mindert die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um zirka 75 Prozent gegenüber

<sup>1</sup> Am internationalen Klimagipfel COP21 in Paris im Dezember 2015 wurde von den Mitgliedsländern sogar ein Wunschziel von 1,5 Grad Celsius formuliert.

2010, verbunden mit einer Minderung der Nachfrage nach Endenergie um zirka 45 Prozent bei einem angenommenen gleichzeitigen Wachstum der Volkswirtschaft um zirka 45 Prozent (Energieperspektive 2050). Vor allem im Gebäudebereich nimmt der Anteil fossiler Energien für Heizzwecke massiv ab – einerseits dank verbesserter Isolation und andererseits durch die Substitution fossiler Brennstoffe durch alternative Energieträger (vor allem Wärmepumpen, dazu Wärme-Kraft-Kopplung und Fernwärmenetze). Ein zweiter wesentlicher Beitrag wird durch eine drastische Substitution der fossilen Treibstoffe Benzin und Diesel im Verkehrssektor angestrebt. Die Elektrizitätserzeugung beruht vor allem auf Wasserkraft und neuen erneuerbaren Energien. Aufgrund dieser Vorgaben gelingt es im ambitioniertesten Szenario NEP, die inländischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um zirka 75 Prozent gegenüber 2010 zu mindern.

## Herausforderungen für die Schweiz

Der Erfolg der Schweizer Massnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen hängt stark davon ab, wie griffig die Instrumente zur Umsetzung der Energie- und Klimapolitik ausgestaltet werden. Besondere Herausforderungen bestehen in jenen Bereichen, in denen Investitionen einen sehr langen Zeithorizont haben, beispielsweise beim Ausbau von Speicherkraftwerken oder Verkehrsinfrastrukturen.

Eine Herausforderung bildet auch der hohe Anteil der «grauen» beziehungsweise indirekten Emissionen (s.a. Box Das Energiesystem und dessen Treibhausgasemissionen, S. 168) der Schweiz aufgrund des hohen Güterimports und des Tourismus. Diese Emissionen werden bei der Produktion den entsprechenden Ländern zugewiesen und bei Schiffs- und Flugtransporten in keinem Land erfasst. (Jungbluth et al. 2011)

Die Schweiz mit ihrer dichten Siedlungsstruktur und dem gut ausgebauten öffentlichen Verkehr bietet eigentlich gute Voraussetzungen für die Veränderung des Modalsplits und den Einsatz optimierter Antriebskonzepte, sofern die Herstellung der Treibstoffe (Strom und Biotreibstoffe) möglichst CO<sub>2</sub>-arm erfolgt. Vielen Massnahmen im Verkehrsbereich stehen allerdings politische Hindernisse im Weg.

Im Gebäudebereich liegt die Problematik vor allem bei der Sanierung von Altbauten. Diese ist essentiell, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoss durch Heizungen mit fossilen Brennstoffen entscheidend zu vermindern. Die aktuelle Sanierungsrate von rund einem Prozent pro Jahr müsste mindestens verdoppelt werden, um die Minderungsziele bis 2050 zu erreichen.

Mit der geplanten massiven Minderung des Verbrauchs fossiler Energieträger nimmt zwar die Auslandsabhängigkeit mit ihren geopolitischen Implikationen bezüglich

dem Import von Rohstoffen ab. Demgegenüber erhält die Elektrizität eine noch bedeutendere Rolle als bis anhin. Dies bedingt auch eine gute Einbindung der Schweiz in das europäische Elektrizitätsnetz. Insbesondere beim Importstrom bestehen massive Marktverzerrungen durch Billig-Strom aus Wind- und Photovoltaikanlagen aufgrund von ausländischen Einspeisevergütungen sowie aus Kohlekraftwerken, weil der Preis für das Emissionsrecht einer Tonne CO<sub>2</sub> heute vernachlässigbar ist. Dies führt zu Rentabilitätsproblemen für die einheimische Wasserkraft – die nach Abschaltung der Kernkraftwerke wichtigste einheimische Stromquelle – die überdies in der Lage ist, Strom saisonal zu speichern.

Der vermehrte Einsatz variabler erneuerbarer Energiequellen bedingt auch einen Ausbau von Redundanzen im Schweizer Stromnetz. Eine Herausforderung sind auch kleine, unabhängige Netze («Microgrids») mit Eigenproduktion wegen des Ausfallrisikos und der Entsolidarisierung. Die Stromversorgung stellt zukünftig besonders im Winter eine Herausforderung dar, da die Produktion der Laufwasserkraftwerke und der Photovoltaik vermindert ist bei gleichzeitig erhöhtem Wärme- und Strombedarf.

Eine weitere Herausforderung ist der Übergang der Stromproduktion von Kernkraftwerken zu erneuerbaren Energiequellen. Der Ausbau von Letzteren wird wahrscheinlich nicht schnell genug erfolgen, um die nach Abschalten der Kernkraftwerke wegfallende Stromproduktion rechtzeitig ersetzen zu können. Sollten in einer Übergangsperiode fossil befeuerte Gaskraftwerke eingesetzt werden, müssten die verursachten Emissionen in anderen Sektoren kompensiert werden, zum Beispiel durch vermehrten Einsatz von Wärmepumpen für die Gebäudeheizung.

## Referenzen

- BAFU (2015) **Treibhausgasinventar 2015**. [www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar](http://www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar)
- BFE, Prognos (2012) **Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 – 2050**. Ergebnisse der Modellrechnungen für das Energiesystem.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 7 «Energy Systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- Jungbluth N, Nathani C, Stucki M, Leuenberger M (2011) **Environmental Impacts of Swiss Consumption and Production**. A combination of input-output analysis with life cycle assessment. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies 1111: 171.
- Solomon S, Plattner GK, Knutti R, Friedlingstein P (2009) **Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions**. PNAS 106: 1704–1709.

## 3.5 Verkehr

Die Emissionen des Sektors Verkehr werden in der Schweiz dominiert durch den Personen- und Gütertransport auf der Strasse. Trotz des Trends zu immer schwereren und leistungsstärkeren Personenwagen verbessert sich deren Energieeffizienz – dies wird aber durch die Verkehrszunahme überkompensiert. Entsprechend sind die Treibhausgasemissionen bis 2007 angestiegen. Seit 2008 führen neue Politikinstrumente zu einer weiteren Verbesserung der Energieeffizienz; seither sind die Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr stabil; ein klarer abnehmender Trend ist bisher also nicht sichtbar. Weltweit wächst der Personen- und Güterverkehr mit wachsendem Einkommen. Nur eine starke Entkopplung der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Wirtschaftsleistung kann verhindern, dass der Verkehr alle andern Minderungsanstrengungen zunichte macht.

*Peter de Haan (Ernst Basler + Partner)*

Mobilität ist eine essenzielle Voraussetzung für Wirtschaft (Gütertransport und Arbeitsmarkt) und Gesellschaft (soziale Interaktionen und Freizeit). Mobilität kann vor allem in der Freizeit auch Selbstzweck sein und nicht nur dazu dienen, von A nach B zu gelangen. Entsprechend steigen in der Schweiz wie auch weltweit sowohl der Motorisierungsgrad als auch das Verkehrsaufkommen jährlich an. Mobilität ist in unserer Gesellschaft eine Selbstverständlichkeit, und deren negative Auswirkungen (Luftschadstoffe, Lärm, Stau) werden bis zu einem gewissen Mass akzeptiert.

### Grad der Motorisierung

Betrag der Personenwagen-Motorisierungsgrad 1990 noch 442 Personenwagen pro 1000 Einwohner, stieg er bis 2015 um rund 22 Prozent auf einen neuen Höchststand von 541 Personenwagen pro 1000 Einwohner. Der Personenwagen-Motorisierungsgrad liegt in der Schweiz trotz der höheren Kaufkraft leicht unterhalb jener der Nachbarländer, was auf das dichte ÖV-Angebot zurückgeführt werden kann. Die höhere Kaufkraft äussert sich eher bei der Anschaffung neuer teurerer und leistungsstärkerer Fahrzeuge. Im Jahr 2015 verkehrten auf Schweizer Strassen:

- 4 450 000 Personenwagen,
- 65 000 Busse,
- 340 000 Lieferwagen,

- 54 000 Lastwagen,
- 672 000 Motorräder,
- 153 000 Kleinmotorräder und Motorfahräder,
- 191 000 land- und forstwirtschaftliche sowie
- 67 000 industrielle Fahrzeuge.

### Verkehrsaufkommen

In der Schweiz wachsen der Öffentliche Personenverkehr (2014: 24,3 Milliarden Personenkilometer<sup>1</sup>) jährlich um zirka 1 Prozent, der motorisierte Individualverkehr (2014: 95 Milliarden Personenkilometer) um 1,8 Prozent, letzterer schwergewichtig auf den Autobahnen; der Güterverkehr nimmt auf der Schiene (2014: 12,3 Milliarden Tonnenkilometer) jährlich um 2,8 Prozent zu, jener auf der Strasse (2014: 17,5 Milliarden Tonnenkilometer) um jährlich 1 Prozent. Raumplanerische und verkehrspolitische Ansätze vermochten bisher nicht, das starke Verkehrswachstum zu bremsen. Mit der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) sowie der Subventionierung und dem starken Ausbau des Öffentlichen Personenverkehrs wird versucht, das Wachstum beim Güter- und Personenverkehr zum grösseren Teil auf die Schiene zu lenken. Auch weltweit nimmt der Verkehr weiter zu, gemäss dem Fünften IPCC-Sachstandsbericht (IPCC/WGIII/Chap.8) bis 2050 um 80 Prozent beim Personen- und 50 Prozent beim Güterverkehr gegenüber 2010.

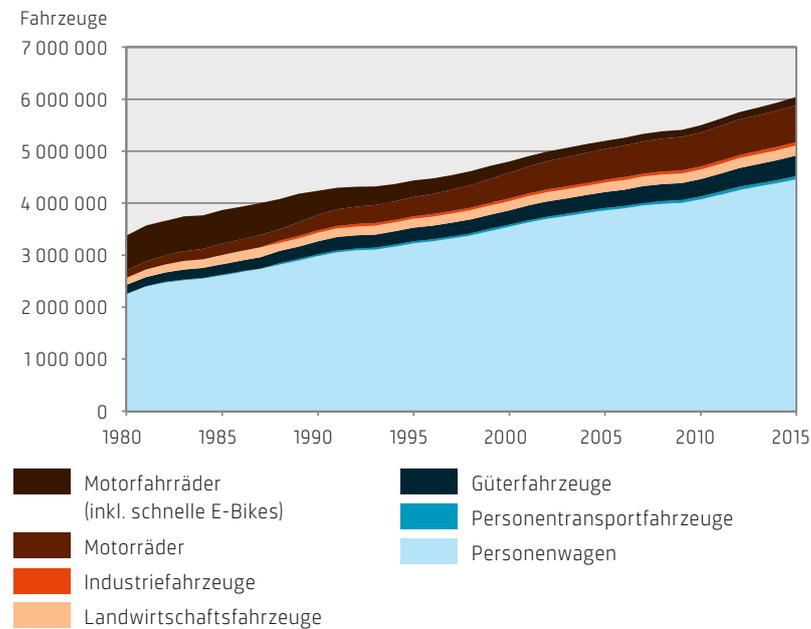
Grund für das Verkehrswachstum ist nebst der Bevölkerungszunahme auch der wirtschaftliche Wandel. Je höher die Wirtschaftsleistung und je grösser der Anteil des Dienstleistungssektors, desto höher ist die Mobilität. In städtischen Ballungszentren arbeitende Menschen sind häufig länger unterwegs, weil sie nicht mehr dort wohnen

#### Die Verkehrsträger

Zum Sektor Verkehr gehören nebst dem Strassenverkehr auch der Verkehr zu Luft, Wasser und Schiene sowie das Militär, Offroad-Fahrzeuge (Baumaschinen, land- und forstwirtschaftliche sowie industrielle Fahrzeuge) und mobile Geräte wie der Rasenmäher, wobei die Bedeutung der letzten beiden Gruppen vergleichsweise gering ist.

<sup>1</sup> Masszahl für die Verkehrsleistung; fährt ein Zug mit 100 Personen 10 Kilometer oder ein Auto mit 4 Personen 250 Kilometer, ergibt dies jeweils 1000 Personenkilometer.

## Bestand der Strassenmotorfahrzeuge



## Verkehrsleistungen im Personenverkehr

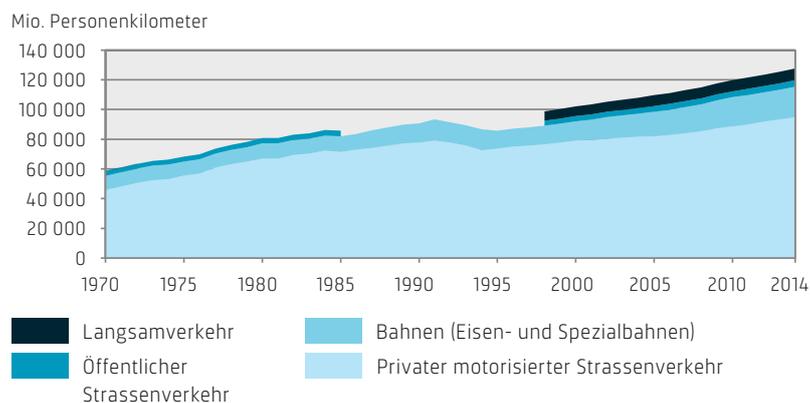


Abbildung 3.13: Motorfahrzeugbestand (1980–2015) und Personenverkehrsleistung (1970–2014). Bei der Personenverkehrsleistung fehlen von 1986–1997 die Daten für den Öffentlichen Strassenverkehr. (Quelle: BFS 2016)

können, wo sie arbeiten. Diese beiden allgemeingültigen Zusammenhänge treffen für die Schweiz besonders zu.

Um trotz des Verkehrswachstums die Treibhausgasemissionen zu mindern, sind bei den Fahrzeugen starke jährliche Effizienzsteigerungen nötig.

## Trends bei Personenwagen

Ist ein Fahrzeug einmal auf der Strasse, wird es bis ans technische Lebensende betrieben – egal ob es energieeffizient ist oder nicht. Die Energie- und Klimapolitik konzentriert sich deshalb auf den Neuwagenkauf. Vorschriften zum CO<sub>2</sub>-Ausstoss gibt es in der Schweiz erst

für Personenwagen, nicht aber für Lieferwagen. Die Flotte der Personenwagen muss – über alle verkauften Neuwagen gemittelt – 2015 erstmals unter einer bestimmten Limite beim CO<sub>2</sub>-Ausstoss bleiben, ausgedrückt in Anzahl Gramm CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro Kilometer. Gelingt das Erreichen dieser Zielwerte nicht, werden Sanktionszahlungen fällig. Auf diese Weise werden die Hersteller dazu angehalten, ihr Innovationspotenzial grösstenteils für die Energieeffizienz zu verwenden; die Autoverkäufer werden in die Pflicht genommen, effiziente Fahrzeuge zu verkaufen. Das durchschnittliche Auto bräuchte dazu aber weder kleiner noch teurer zu werden, da der jährlich maximal mögliche technische Fortschritt in etwa ausreichen würde, um die Ziele zu erreichen. Von 1996 bis 2014 sank der mittlere CO<sub>2</sub>-Ausstoss der neu verkauften Personenwagen jährlich um 2,3 Prozent (BAFU 2015); mehr wäre möglich gewesen, wenn die Autos im Durchschnitt nicht grösser und leistungsfähiger geworden wären.

Die EU hat eine analoge Vorschrift auch für Lieferwagen beschlossen, da bei diesen Wagen – wie bei den Personenwagen – oft übermotorisierte Modelle eingesetzt werden. Der Bundesrat hat dem Parlament vorgeschlagen, auch diese Vorschrift zu übernehmen.

## CO<sub>2</sub>-Gesetz: Treibstoffteilziel nicht erreicht

Die Energieeffizienz mobiler Antriebe ist höher als bei stationären Anwendungen, weil der Energieeffizienz bei der Entwicklung mehr Beachtung geschenkt wird, da der Treibstoff mitgeführt werden muss. Das CO<sub>2</sub>-Gesetz hat das Treibstoffteilziel (Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Treibstoffen von 1990 bis 2020 um 8 Prozent) weniger streng festgelegt als das Brennstoffteilziel (Minderung um 15 Prozent). Trotzdem wurde das Treibstoffteilziel nicht erreicht, da der private motorisierte Verkehr stark zugenommen hat: von 78 Millionen Personenkilometern im Jahr 1990 um 22 Prozent auf 95 Millionen Personenkilometer im Jahr 2014.

Nebst dem Verkehrswachstum und der zunehmenden Grösse der Personenwagen gibt es einen weiteren Grund, dass trotz steigender Energieeffizienz die CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht sinken: Der reale Treibstoffverbrauch weicht immer mehr vom errechneten Normverbrauch ab, der durch ein offizielles Testverfahren ermittelt wird. Betrug die Abweichung früher weniger als 10 Prozent, lag sie für Fahrzeuge der Baujahre 2012 und 2013 bei bis zu 40 Prozent. Die Fahrzeuge werden deshalb auf das Testverfahren hin optimiert oder wurden im Falle von VW sogar umgerüstet, damit sie im Test besonders effizient sind. So, wie die Fahrzeuge ausgeliefert und im Alltag gefahren werden, resultiert aber ein deutlich höherer Verbrauch.

## Trends beim Schienen- und Güterverkehr

Die Verteilung des Transportaufkommens auf die verschiedenen Verkehrsmittel (Modalsplit) hat sich in der Schweiz leicht verschoben: Der Öffentliche Verkehr hat seinen Anteil am gesamten Personenverkehrsaufkommen von 18 Prozent (1990) auf 20,4 Prozent (2014) gesteigert.

Der Güterverkehr hat in ganz Europa stark zugenommen, in der Schweiz von rund 20 Milliarden (1990) auf 30 Milliarden Tonnenkilometer. Im Jahr 1990 verkehrte in der Schweiz rund die Hälfte des Güterverkehrs auf der Strasse (10 Milliarden Tonnenkilometer); bis 2013 stieg der Anteil der Strasse auf rund 60 Prozent (17,5 Milliarden Tonnenkilometer). Dass die Schweiz den Anteil der Schiene beim Güterverkehr bei rund 40 Prozent stabilisieren konnte – anders als im restlichen Europa, wo der Anteil schwindet –, liegt am Lastwagen-Nachfahrverbot, der leistungsabhängigen Schwerverkehrs-Abgabe (LSVA) und der Subventionierung des alpenquerenden Bahntransports. Mit Einführung der LSVA übernahm die Schweiz eine Vorreiterrolle: Mit dieser Abgabe werden die externen Kosten des Strassengüterverkehrs internalisiert.

## Trends beim Luftverkehr

Beim Luftverkehr existieren bezüglich der Erhebung der nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedene Betrachtungsweisen zur Grenze des Systems, das heisst zur Frage, welche Emissionen einem Land zugerechnet werden. Im Rahmen des Kyoto-Protokolls werden nur die Treibstoffe für Inlandflüge berücksichtigt; anders als für grosse Staaten wie zum Beispiel den USA sind Inlandflüge für kleine Länder wie die Schweiz nahezu bedeutungslos. IPCC wiederum betrachtet alle in einem Land verkauften Flüge beziehungsweise die dafür gebrauchten Treibstoffe. Wirklich umfassend wäre der Ansatz des ökologischen Abdrucks, bei dem sämtliche Flüge durch Einwohner der Schweiz berücksichtigt werden, also auch Flüge im Ausland. Dies gilt auch für andere Bereiche, ist aber speziell beim Flugverkehr von Belang, weil hier die durch Flüge von Schweizern verursachten Emissionen zum allergrössten Teil im Ausland erfolgen.

Die verschiedenen Betrachtungsweisen führen zu unterschiedlichen Angaben zum Kerosin-Verbrauch der Schweiz:

- **Kyoto-Protokoll:** Rund 100 Millionen Liter Kerosin für Inlandflüge.
- **IPCC:** Rund 1900 Millionen Liter Kerosin für alle in der Schweiz verkauften Flüge.
- **Ökologischer Abdruck:** Rund 2500 Millionen Liter Kerosin für sämtliche Flüge durch Einwohner der Schweiz.

Weltweit hat sich der Kerosinverbrauch der Flugzeuge seit 1990 dank neuen, grösseren, leichter gebauten und besser ausgelasteten Flugzeugen um 60 Prozent auf noch 3,7 Liter pro 100 Passagierkilometer verringert. Der Luftverkehr hat allerdings noch stärker zugenommen, im Zeitraum 2010–2013 global um 4,6 Prozent jährlich, in der Schweiz um 5,1 Prozent. Entsprechend waren die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Flugverkehr im Jahr 2010 um 40 Prozent höher als 1990. Wichtigste Gründe für die Zunahme des Luftverkehrs sind die Zunahme der Flugdistanz sowie der Einsatz grösserer Flugzeuge. Die Anzahl Flugbewegungen hat hingegen kaum zugenommen.

Die meisten Prognosen gehen davon aus, dass der Flugverkehr weltweit jährlich um fünf Prozent wachsen wird, während die Flugzeuge jährlich um zwei Prozent effizienter werden. Für Industriestaaten wie die Schweiz bedeutet dies, dass in den nächsten Jahren allfällige Minderungen der Treibhausgasemissionen im Bereich Strassenverkehr voraussichtlich durch eine Zunahme der separat ausgewiesenen Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr überkompensiert werden.

## Referenzen

- BAFU (2015) **Treibhausgasinventar 2015**.  
[www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar](http://www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar)
- BFS (2016) **Mobilität und Verkehr. Taschenstatistik der Schweiz 2016**.  
 Bundesamt für Statistik, Neuenburg, 43 pp.
- INTRAPLAN (2015) **Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit des Schweizer Luftverkehrs 2015**. V2.1c, März 2015: 26. [www.bazl.admin.ch](http://www.bazl.admin.ch)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**.  
 Chapter 8 «Transport». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Strasse Schweiz (2016) **Verband des Strassenverkehrs FRS. Vademecum 2016 – Die wichtigsten Kennzahlen der Jahre 2014/2015**.  
[www.strasseschweiz.ch](http://www.strasseschweiz.ch)

## 3.6 Technische Aspekte

Zur Minderung der Treibhausgasemissionen wird weltweit auf den Einsatz neuer Techniken gesetzt, die eine höhere Energie- und Treibhausgas-effizienz erlauben. Die Innovation dieser Techniken wird gefördert durch Vorschriften, Anreize, Subventionen und Information. Eine Minderung des Konsums hingegen wird als Mittel zur Emissionsminderung kaum in Betracht gezogen, obwohl die theoretischen Potenziale sehr hoch sind. Die Schweiz ist im Bereich Technik vor allem bei den Gebäuden führend, während in den Bereichen Transport sowie Industrie und Gewerbe im Wesentlichen die EU-Politik übernommen wird.

*Peter de Haan (Ernst Basler + Partner)*

Treibhausgasemissionen lassen sich im Bereich der Technik über drei Pfade mindern:

- Minderung der benötigten Energie pro Konsumeinheit,
- Minderung der Treibhausgasemission pro Energieeinheit und
- Minderung der Nachfrage nach diesen Konsumeinheiten.

Die ersten beiden Pfade werden auch als **Effizienz-Ansatz** bezeichnet, der dritte als **Suffizienz-Ansatz**. Der Fokus der internationalen sowie der Schweizer Klima- und Energiepolitik liegt auf der Effizienz.

### Innovationen für Verbrauchsminderung nützen

Der Mensch ist innovativ und erfinderisch, so dass bei nahezu allen Techniken laufend Fortschritte gemacht werden. Es gibt deshalb für fast jede Technik so etwas wie ein «jährliches Innovationspotenzial» im Hinblick auf die Minderung des Energieverbrauchs. Hier handelt es sich zunächst nur um ein Potenzial. Denn bei den heutigen, sehr niedrigen Energiepreisen wird der technische Fortschritt oft dazu genutzt, um mit demselben Kostenaufwand grössere, schnellere und leistungsfähigere anstatt energieeffizientere Produkte herzustellen. Deshalb sollen die Anbieter von Gütern und Dienstleistungen gezwungen werden, das Innovationspotenzial vollständig für die Minderung des Energieverbrauchs zu nutzen, ohne aber die Produkte teurer werden zu lassen. Die Konsumenten möchte man dazu bringen, sich für diese Produkte zu entscheiden.

### Die Sektoren und ihre Minderungspotenziale

Die aus Sicht der direkten Treibhausgasemissionen relevantesten Sektoren sind Wohnen, Güter und Dienstleistungen sowie Mobilität. International ist zudem der CO<sub>2</sub>-

Ausstoss der Stromerzeugung von zentraler Bedeutung (s. a. Kap. 2.14 Auswirkungen des Klimawandels auf das Energiesystem der Schweiz, S. 129, Kap. 3.1 Einleitung, S. 154).

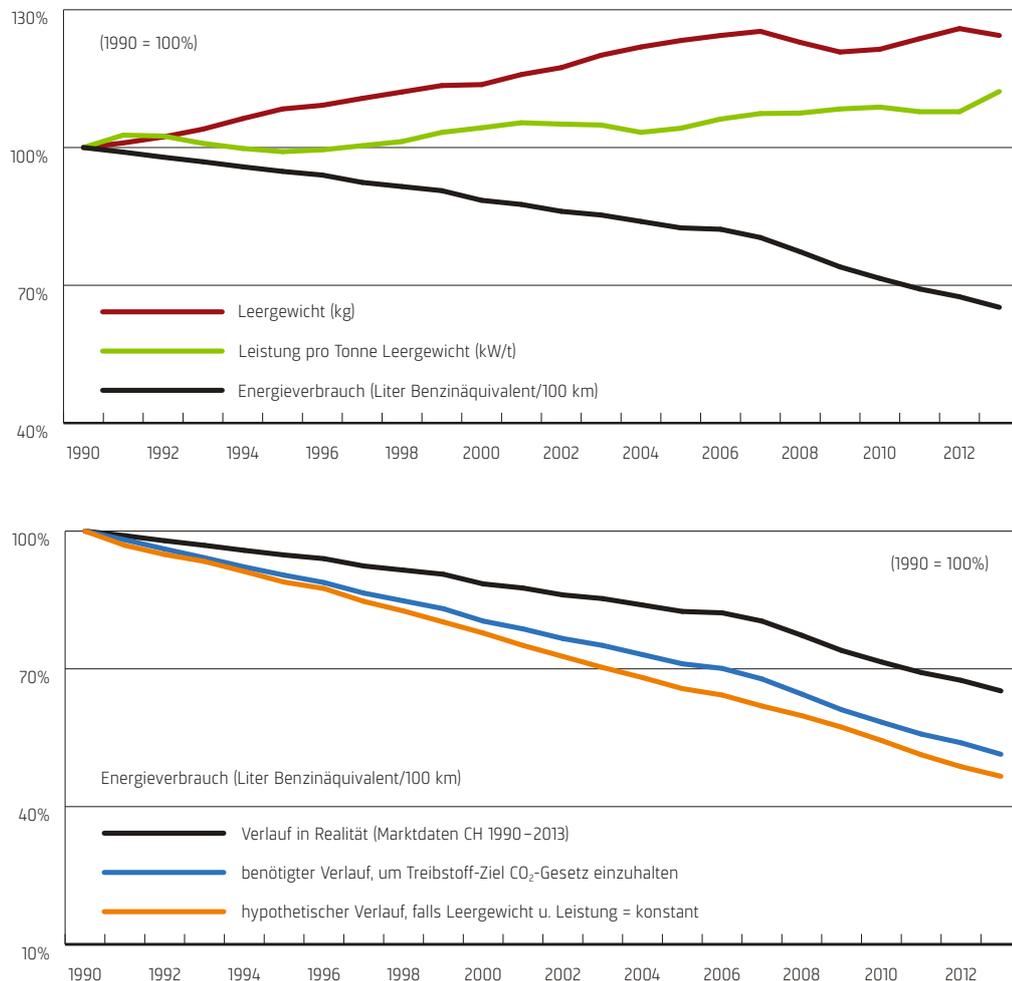
### Gebäude: viele Neubauten und geringe Sanierungstiefe

Im Bereich Gebäude wird über die laufende Verschärfung der Vorschriften bei Neubau und Renovation das gleiche Ziel verfolgt. Die Schweiz geht hier bei den kantonalen Mustervorschriften für Gebäude im Vergleich zum europäischen Umfeld besonders schnell voran.

Bei den Neubauten greifen die schärferen kantonalen Vorschriften. Je nach angestrebtem Minderungsziel müssten die Vorschriften aber noch weiter verschärft und Null- oder gar Plusenergie-Häuser gebaut werden. Eine besondere Herausforderung im Gebäudesektor sind die bereits bestehenden Gebäude: Die jährliche Erneuerungsrate ist mit zirka einem Prozent weiterhin zu tief, um die Minderungsziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen. Dazu müsste die Erneuerungsrate bei zirka zwei Prozent liegen und es bräuchte jeweils eine vollständige energetische Sanierung (Haustechnik, Fassade, Fenster und Dach). Tatsächlich werden heute die Altbauten energetisch oft nur teilsaniert.

### Transport: Personenwagen spielen Hauptrolle

Während jedes Gebäude ein Unikat ist und industrielle und gewerbliche Fertigungsprozesse oft massgeschneiderte Lösungen voraussetzen, kennen Strassenfahrzeuge ein hohes Mass an Standardisierung. Für die Marktzulassung muss vielen Vorschriften Genüge getan werden, dann kann der entsprechende Fahrzeugtyp aber in hoher Stückzahl in allen europäischen Ländern ohne weitere Prüfung verkauft werden. Im Sektor Transport spielen die Personenwagen die Hauptrolle mit einem Anteil von



**Abbildung 3.14:** Oben: Mittelwerte wichtiger Kennzahlen der pro Jahr neu verkauften Personenkraftwagen in der Schweiz. Unten: Wären das mittlere Leergewicht und die mittlere Leistung pro Tonne Leergewicht bei den Personenkraftwagen konstant geblieben statt angestiegen, hätte der mittlere Energieverbrauch bis 2013 um 53 Prozent gegenüber 1990 abgesenkt werden können – tatsächlich hat nur eine Absenkung um 35 Prozent gegenüber 1990 stattgefunden. Eine Absenkung um 49 Prozent wäre jedoch erforderlich gewesen, damit die Schweiz ihr Treibstoffziel von minus acht Prozent im 2010 gegenüber 1990 hätte erreichen können. (Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von EBP [2015])

76 Prozent an den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strassenverkehrs (BAFU 2010). Die EU und die Schweiz streben an, dass das maximale Potenzial zur Emissionsminderung ausgenutzt wird und legen dazu ein Effizienzziel fest, ausgedrückt in Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer und gemittelt über alle verkauften Neuwagen.

Im Sektor Transport würden ehrgeizige Minderungsziele den verstärkten Einsatz der Elektromobilität erfordern, mit einer Mobilitätspolitik zur Verlagerung des Mobilitätswachstums auf den Öffentlichen Verkehr als energieeffizientestes Verkehrssystem.

## Sektor Industrie und Gewerbe

In den Sektoren Industrie und Gewerbe kommen – im Gegensatz zu Autos, Haushaltgeräten und Komponenten von Wohnhäusern – keine uniformen Techniken zum Einsatz, deren Energieverbrauch sich pauschal optimieren liesse. Die technischen Minderungspotenziale verteilen sich auf sehr viele prozessspezifische Einzelanwendungen. Die eingesetzten Politikinstrumente legen den Fokus deshalb auf marktbasierende Mechanismen und überlassen es der jeweiligen Firma, welche Emissionsminderungspotenziale sie zuerst umsetzen will. Dies ermöglicht den Firmen, bestimmte Produktionsanlagen komplett mit emissionsarmer Technik auszurüsten, andere dafür nicht. Zudem können sie Emissionszertifikate mit anderen Firmen handeln.

Im Sektor Industrie und Gewerbe erfolgt die Ausnutzung des technischen Potenzials über die Einbindung der Grossindustrie in das Emissionshandelssystem der EU (ETS) beziehungsweise der Schweiz (EHS). So sind die grössten Emittenten im Schweizer Emissionshandelssystem eingebunden; die ihnen zugeteilten Emissionsrechte richten sich nach der Durchschnittsleistung der effizientesten Anlagen aus und bilden den technischen Fortschritt vollumfänglich ab. Sehr viele Firmen gehen ausserdem gegenüber dem Bundesamt für Umwelt so genannte freiwillige Zielvereinbarungen ein: Im Gegenzug zur Befreiung von der CO<sub>2</sub>-Abgabe müssen sie emissionsmindernde technische Massnahmen umsetzen, die nicht rentabel sind. Die Umsetzung wird von spezialisierten Auditoren überprüft.

## Schiff- und Luftfahrt

Bei der internationalen Schifffahrt hat die Internationale Seeschifffahrts-Organisation der Uno Mindestwerte für die Energieeffizienz festgelegt. Diese sind über den CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro erbrachte Antriebsleistung definiert und gelten seit 2013 für alle neuen Schiffe. Die Mindestwerte sollen in Fünf-Jahres-Abständen verschärft werden. Ein zusätzliches Potenzial zur Emissionsminderung bei der Schifffahrt ist die Reduktion der Geschwindigkeit.

Bei der internationalen Luftfahrt bestehen – im Vergleich mit den anderen Verkehrsträgern – nur wenige technische Potenziale. Das Mitführen grosser Mengen von Treibstoff erhöht den Treibstoffverbrauch, weshalb Flugzeuge bereits seit Jahrzehnten energieeffizient gebaut werden. Durch die Verringerung des Gewichts sowie verbesserte Aerodynamik und Triebwerke konnte der Treibstoffverbrauch zwischen 1990 und heute um mehr als 40 Prozent vermindert werden auf drei Liter Treibstoff pro 100 Sitzplatzkilometer bei Langstreckenflügen. Zusätzliche Potenziale zur Emissionsminderung bestehen bei der Vermeidung von Warteschlaufen, bei der Anpassung von Ab- und Anflugverfahren, um vermehrt den Gleitflug nutzen zu können, bei der Erhöhung des Belegungsgrades sowie bei den Bodenoperationen (Transporte vom Rollfeld zu den Flugdocks sowie zur Bevorratung der Flugzeuge). Über die nächsten 15 Jahre, schätzt die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation der UNO, seien jährliche Effizienzsteigerungen von zwei Prozent möglich. Der weltweite Flugverkehr wird gemäss Prognosen aber um fünf Prozent jährlich steigen, womit die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs um jährlich drei Prozent steigen würden. Die EU hat deshalb alle Flüge innerhalb des EWR-Raums in das Emissionshandelssystem der EU (EU-ETS) integriert, was zur Kompensation in anderen Sektoren mit niedrigeren Grenzvermeidungskosten führen wird. Die EU-Kommission führt internationale Verhandlungen, um ab 2017 alle

Flüge mit Abflug oder Ankunft im EWR-Raum – mindestens für die Strecke über EWR-Territorium – in das EU-ETS zu integrieren.

## Montrealer Protokoll ist bedeutend für Klimaschutz

Ebenfalls von hoher Relevanz sind die teilhalogenierten Kohlenwasserstoffe, die nicht dem Kyoto-Protokoll unterstehen. Dies sind Ersatzstoffe für die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die mit dem Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht verboten wurden. Diese Ersatzstoffe weisen teilweise sehr hohe Treibhauspotenziale auf. Da die Erweiterung des Montrealer Protokolls als einfacher eingestuft wird als die Umsetzung des Kyoto-Protokolls, ist es zielführender, Massnahmen bei den teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen weiterhin im Rahmen des Montrealer Protokolls umzusetzen.

## Technische Potenziale würden theoretisch genügen

Insgesamt zeigt sich, dass die technischen Potenziale zur Emissionsminderung theoretisch ausreichen, um auch ambitionierte Minderungsziele zu erreichen. Die Herausforderung besteht darin, diese Potenziale zu realisieren. Es ist deshalb notwendig – aber nicht hinreichend –, die jeweils beste verfügbare Technik zum Standard zu machen. Zusätzlich müssen die Treiber der Nachfrage beeinflusst oder die Gesamtemissionen begrenzt und in einen Emissionsrechteland eingbracht werden. Insbesondere die prognostizierte Zunahme der Emissionen beim Flugverkehr könnte die Minderungserfolge in anderen Sektoren zunichtemachen.

## Referenzen

- BAFU (2010) **Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990 – 2035, Aktualisierung 2010**. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen 1021, 130 pp.
- EBP (2015) **Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personenwagen 2014**. 19. Berichterstattung im Rahmen der Energieverordnung. 11. Juni 2015, 45 pp.

## 3.7 Land- und Forstwirtschaft und andere Landnutzung

Der Sektor AFOLU (Landwirtschaft, Forstwirtschaft und andere Landnutzung) ist weltweit für fast ein Viertel der jährlichen menschenverursachten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Davon entfällt etwas mehr als die Hälfte auf die Landwirtschaft und der Rest auf die Forstwirtschaft und andere Landnutzung. Die hauptsächlichen Emissionsursachen sind die Waldrodung (vorwiegend in den Tropen), die Methanemissionen aus der Tierhaltung, die Entwässerung von Mooren sowie die Stickstoffemissionen aus dem Einsatz von Düngemitteln. In der Schweiz stammen rund 12 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen aus dem Landwirtschaftssektor. Für die Minderung von Treibhausgasen kann die menschliche Ernährung eine Schlüsselrolle spielen, auch in der Schweiz.

*Carmenza Robledo Abad (ETH Zürich), Daniel Bretscher (Agroscope), Jens Leifeld (Agroscope)*

### Globale Emissionen

Weltweit ist der Sektor AFOLU (siehe Box) für fast 25 Prozent<sup>1</sup> der jährlichen menschenverursachten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Im Gegensatz zu Emissionen in der Periode 1990–1999 waren die Treibhausgasemissionen im AFOLU-Sektor in der Periode 2000–2009 rückläufig, trotz einer globalen Zunahme der Nutztierhaltung, des Düngereinsatzes und der Bevölkerung. Zurückzuführen ist der Rückgang der Emissionen vor allem auf die verlangsamte Entwaldung in einigen Gebieten (insbesondere in Brasilien). Dennoch bleiben Entwaldung (vorwiegend in den Tropen), Methanemissionen (CH<sub>4</sub>) aus der Tierhaltung, CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Moorentwässerung sowie Lachgasemissionen (N<sub>2</sub>O) aus der Düngung die hauptsächlichen Quellen für die Treibhausgasemissionen im Sektor AFOLU (Abb. 3.15).

#### AFOLU

Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2014/WGIII/Chap.11) werden erstmals Land- und Forstwirtschaft sowie andere Landnutzungsformen gemeinsam behandelt, zusammengefasst unter dem Begriff AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use). Dies macht es einfacher, die Möglichkeiten zur Emissionsminderung in diesem Sektor umfassend und systembezogen zu betrachten und das entsprechende Einsparpotenzial zu quantifizieren.

### Emissionen in der Schweiz

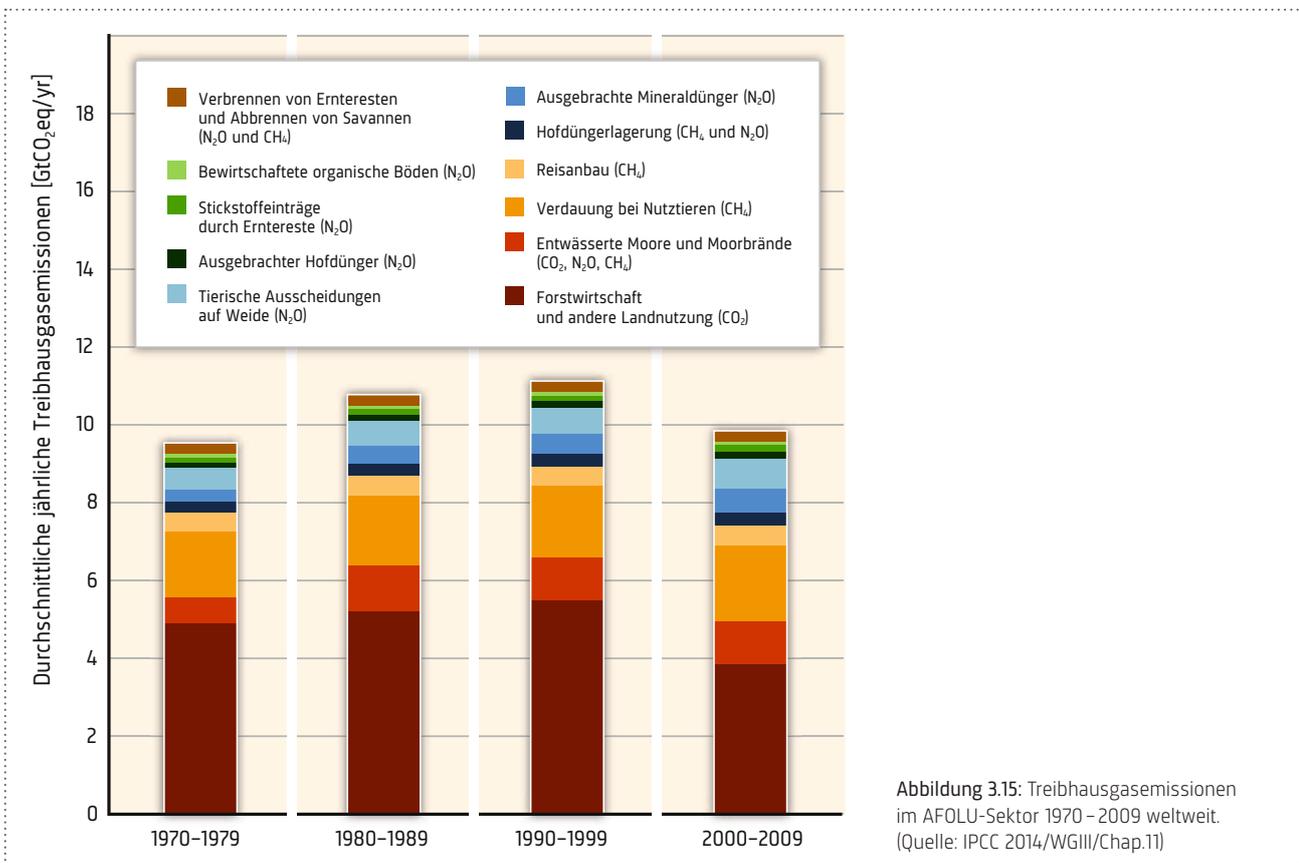
#### Landwirtschaft: Rückgang der Emissionen dank weniger Rinder und Dünger

In der Dekade 2000–2010 emittierte die Schweiz im Durchschnitt 52 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr. Davon entfallen rund 12 Prozent auf den Landwirtschaftssektor. Diese landwirtschaftlichen Emissionen setzen sich hauptsächlich zusammen aus dem Methan aus der Verdauung der Nutztiere (54 Prozent) und aus dem Lachgas, das vorwiegend aus gedüngten Böden emittiert wird (26 Prozent). Bei beiden Gasen spielen auch die Emissionen aus der Lagerung des Viehdungs eine wichtige Rolle (19 Prozent).

Ein genauerer Blick in den Landwirtschaftssektor zeigt, dass die direkten Treibhausgasemissionen in den letzten 25 Jahren um rund acht Prozent abgenommen haben, bei gleichzeitig leicht gestiegener landwirtschaftlicher Produktion. Weniger Rinder sowie eine verringerte Ausbringung von Stickstoffdüngern aufgrund einer höheren Stickstoffeffizienz sind die wichtigsten Ursachen für den Rückgang der Emissionen. Die Abnahme erfolgte vorwiegend in den frühen 1990er-Jahren. Seitdem sind die Lachgasemissionen stabil. Die Methanemissionen widerspiegeln die Entwicklung des Rindviehbestandes und sind bis 2008 kurzzeitig wieder gestiegen, um danach auf das Niveau von 2000 zurückzufallen.

Neben den im nationalen Inventar direkt ausgewiesenen Emissionen gibt es weitere, dem Sektor Landwirtschaft indirekt zugehörige Emissionen. Hier sind insbesondere graue Emissionen aus der Herstellung von Produktionsmitteln zu nennen (Mineraldünger, importierte Futtermittel, usw.). Aus Perspektive des Konsums spielen zudem die grauen Emissionen – verursacht durch die Nahrungsmittelimporte – eine wichtige Rolle. Die mit den Importen verbundenen Emissionen sind ungefähr genauso hoch wie

<sup>1</sup> Wo nichts anderes angegeben beziehen sich Emissionsangaben jeweils auf die Zeitperiode 2000–2010. Die Datenquellen sind der Fünfte Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2014/WGIII/Chap.11) respektive das schweizerische Treibhausgasinventar gemäss Submission 2016 (BAFU 2016).



die direkten Methan- und Lachgasemissionen im Landwirtschaftssektor des schweizerischen Treibhausgasinventars (Abb. 3.16.). Das Total der Emissionen aus der Land- und Ernährungswirtschaft ist seit 1990 durch das Bevölkerungswachstum kontinuierlich gestiegen, wobei die diesbezüglichen Pro-Kopf-Emissionen konstant geblieben sind. Dies verdeutlicht, dass die menschliche Ernährung über den eigentlichen Landwirtschaftssektor hinaus eine Schlüsselrolle bei der Identifizierung und Beurteilung von Minderungsmaßnahmen spielt.

### Forstwirtschaft: Baumbiomasse nimmt in der Schweiz zu

In der Forstwirtschaft werden CO<sub>2</sub>-Emissionen vor allem in Form von Änderungen in den Kohlenstoffvorräten der Ökosysteme beschrieben, das heisst als Bilanz von Gewinnen und Verlusten. Der Zuwachs an Baumbiomasse wirkt sich positiv auf die Schweizer Treibhausgasbilanz aus, da dieser die Verluste durch Holzernte und/oder Windwurf überkompensiert. Dadurch war der Forstwirtschaftsbebereich in der Schweiz in der Summe eine CO<sub>2</sub>-Senke, die im Zeitraum 2000–2010 durchschnittlich 1,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> oder rund 3,4 Prozent der gesamtschweizerischen Emissionen kompensierte.

### Landnutzung(sänderung) spielt geringe Rolle in der Schweiz

Aufgrund der relativ stabilen Struktur der Landnutzung spielt die Änderung der Landnutzung als Quelle für Treibhausgase für die Schweiz eine deutlich geringere Rolle als auf globaler Ebene. Insbesondere bestehen jedoch bei der Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Quellen und -Senken in landwirtschaftlichen Böden noch erhebliche Unsicherheiten. CO<sub>2</sub>-Emissionen aus entwässerten und landwirtschaftlich genutzten Moorböden stellen in diesem Bereich mit rund 0,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eine wichtige Quelle dar (s. a. Box Feuchtgebiete als Methan- oder CO<sub>2</sub>-Quellen, S. 185).

### Minderungspotenzial weltweit

Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC werden die Möglichkeiten zur Minderung von Emissionen im AFOLU-Sektor analysiert, aufgeteilt nach angebots- (Forst- und Landwirtschaft) und nachfrageseitigen Massnahmen (Nahrungsmittel, Holznutzung; Tab. 3.1). Emissionsminderungen auf der Nachfrageseite wie auch bei der Lagerung verlangen eine Veränderung des Konsumverhaltens auf verschiedenen Ebenen.

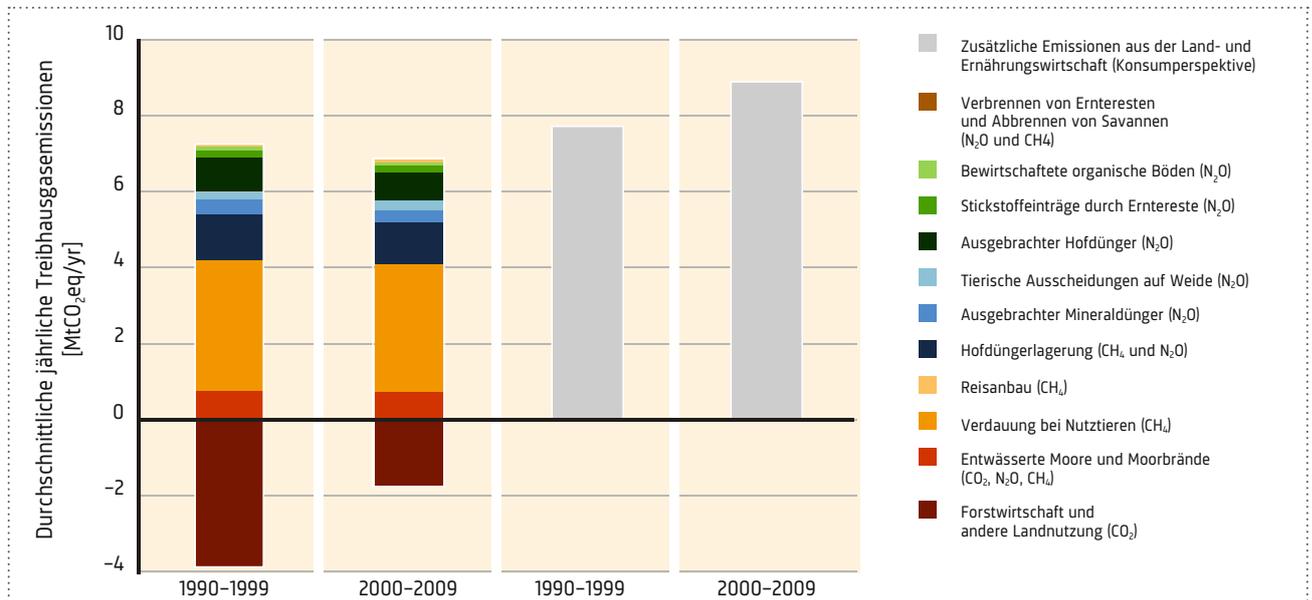


Abbildung 3.16: Treibhausgasemissionen im Sektor AFOLU sowie zusätzliche Emissionen der Land- und Ernährungswirtschaft 1990–2009 in der Schweiz. Aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze sind die Werte der Abbildung 3.16 nicht direkt mit den Werten der Abbildung 3.15 vergleichbar. (Quelle: BAFU 2016; Bretscher et al. 2014)

Auf der Angebotsseite wird das ökonomische Minderungspotenzial im Sektor AFOLU für das Jahr 2030 auf 7,2–11 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente geschätzt. Der Preis für die Einsparung einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente wird auf bis zu 100 US-Dollar geschätzt. Etwa ein Drittel des Potenzials liesse sich zu einem Preis von weniger als 20 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente einsparen. Minderungsmassnahmen auf der Nachfrageseite bergen mit 0,76 bis 8,6 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr bis 2050 ein vielversprechendes Potenzial. Hinsichtlich der gesellschaftspolitischen Umsetzung dieser Massnahmen bestehen noch grosse Unsicherheiten. Weiterhin kann die Energieproduktion aus Biomasse eine wichtige Rolle bei der Minderung spielen, falls Nachhaltigkeitsaspekte wie die Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion oder die Biodiversität berücksichtigt werden.

### Minderungspotenzial der Schweiz

Analog zum globalen Bild können Minderungspotenziale für die Schweiz sowohl auf der Seite der technischen Massnahmen im Angebotsbereich (Land- und Forstwirtschaft) als auch auf der Nachfrageseite verortet werden. Für die Landwirtschaft strebt die Klimastrategie des Bundesamts für Landwirtschaft eine Verringerung der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen um ein Drittel (technische und organisatorische Massnahmen auf Seite der landwirtschaftlichen Produktion) beziehungsweise

zwei Drittel (konsumseitig) bis 2050 (relativ zu 1990) an. Emissionen können zum Beispiel gesenkt werden durch eine erhöhte Stickstoffeffizienz, eine ausgewogene Fütterung der Nutztiere, ein optimales Herdenmanagement (insbesondere für Wiederkäuer) oder durch die Senkung des Bedarfs an fossilen Energieträgern. Zurzeit ist es jedoch noch unklar, inwiefern die Potenziale effizient und nachweisbar umgesetzt und erreicht werden können. Die Beeinflussung der zugrundeliegenden, meist eng verknüpften biochemischen Prozesse gestaltet sich in der Praxis sehr schwierig. Zudem stellen mögliche Verlagerungen von Emissionen entlang von Prozessketten, unerwünschte Nebeneffekte (*Pollution swapping*) oder mögliche Produktionseinbussen grosse Herausforderungen dar.

Treibhausgasemissionen liessen sich auch über eine veränderte Nachfrage sowie über eine Verringerung der Lebensmittelverluste (Produktenormen, Lagerung, Transport, Haushalte) vermeiden. Insbesondere die unterschiedlichen Treibhausgasintensitäten je Kilogramm erzeugtem Lebensmittel bergen ein relevantes Minderungspotenzial. Tierische Produkte tragen in der Regel um ein Vielfaches stärker zum Klimawandel bei als pflanzliche. Insbesondere in Ländern mit hohem Konsum von tierischen Lebensmitteln, wie der Schweiz, wäre eine vermehrt vegetarische Ernährung erstrebenswert. Nachfrageseitige Massnahmen sind angesichts der obgenannten Einschränkungen der technisch-organisatorischen Minderungsmöglichkeiten im Bereich AFOLU besonders wichtig.

Angebotsseite	Massnahmen
Forstwirtschaft	Verringerung Entwaldung
	Aufforstung und Wiederaufforstung
	Waldbewirtschaftung
	Schutz Sekundärwälder
Pflanzenbau	Ackerbau (Pflanzenbau, Düngung, Bodenbearbeitung, Bewässerung, Reisanbau, Wiedervernässung organischer Böden, Brachebewirtschaftung, Pflanzenkohleanwendung)
	Graslandnutzung (Vegetation, Tierhaltung, Einsatz von Feuer)
	Wiederbegrünung vegetationsfreier Flächen
	Renaturierung organischer Böden
	Effizientere Düngermanagement
Tierhaltung	Optimale Tierernährung
	Verbesserte Nutzung des Tierbestandes (z. B. Züchtung, Herdenmanagement, Tiergesundheit, Stall- und Weidesysteme)
	Verbesserte Hofdüngernutzung
Integrierte Systeme	Feldwaldbau
	Gemischte Betriebe, Zwischenkulturen
	Mehrfachnutzung von Biomasse
Generell	Erhalt vorhandener Kohlenstoffspeicher
Bioenergie	Gezielter Anbau effizienter Energiepflanzen
	Energieproduktion aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen sowie aus industriellen organischen Abfällen
Nachfrageseite	
Verringerung der Nahrungsmittelverluste	
Veränderung der Ernährung hin zu Produkten, die geringere Emissionen verursachen	
Langzeitnutzung von Holz, Holznutzung aus zertifiziertem Waldbau	

**Tabelle 3.1:** Weltweite Minderungsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen im AFOLU-Sektor. Die Massnahmen sind aufgeteilt in Angebots- und Nachfrageseite. Wie wichtig eine bestimmte Massnahme ist, unterscheidet sich von Region zu Region. Zum Beispiel ist eine Verringerung der Entwaldung sehr relevant in dicht bewaldeten Regionen wie dem Kongobecken oder dem Amazonasbecken, während die Renaturierung organischer Böden in einigen Ländern Europas eine wichtige Rolle spielt (s. a. Box Feuchtgebiete als Methan- oder CO<sub>2</sub>-Quellen, S. 185). (Quelle: IPCC 2014/WGIII/Chap.11)

In den Bereichen Forstwirtschaft und andere Landnutzung besteht die Möglichkeit CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in Form von Biomasse oder Bodenkohlenstoff zu speichern. Aufgrund der relativ grossen Landwirtschafts- und Waldflächen könnten durch relativ kleine Veränderungen in den Kohlenstoffflüssen grosse Effekte erzielt werden. Die Funktion des Waldes und der mineralischen Böden als Senken ist jedoch zeitlich von begrenzter Dauer, da jeweils ein Punkt des maximalen Biomassebestandes respektive Kohlenstoffgehaltes erreicht wird (s. a. Kap. 2.9 Wald, S. 106). Ausserdem ist die Rückbindung von CO<sub>2</sub> jederzeit reversibel. Zumindest theoretisch ergeben sich grössere Potenziale bei der Nutzung organischer Böden (Extensivieren oder Einstellen der Nutzung). Wie gross in der Schweiz das theoretische und praktisch umsetzbare Senkenpotenzial der Ökosysteme letztendlich ist, ist aufgrund der mangelhaften Datenlage noch weitgehend unklar und Gegenstand aktueller Forschung.

Die Erzeugung von Energie aus Agrotreibstoffen spielt in der Schweiz, auch aufgrund der Flächenbeanspruchung durch andere Sektoren, eine untergeordnete Rolle. Dagegen bestehen bei der Produktion und Nutzung von erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Windenergie, Holz, Vergärung von Viehdung und Biomasse) auf Landwirtschaftsbetrieben und in der Forstwirtschaft weitere Minderungspotenziale.

Dimension	Aspekte
Institutionell	Eigentums- und Nutzungsverhältnisse
	Umsetzung politischer Richtlinien
	Intersektorielle Koordination
Sozial	Ernährungssicherheit
	Menschliche Gesundheit
	Tierschutz
	Gleichberechtigung
Ökonomisch	Grossflächige Aneignung von Land
	Einkommensdiversifizierung
	Beschäftigung
	Finanzierungsmechanismen
	Verfügbarkeit von Land und Konkurrenznutzung
Ökologisch	Biodiversität, Wasser, Boden
	Ökosystemstabilität
	Zugang zu Infrastruktur
Technologisch	Technologieakzeptanz
	Technologieakzeptanz
	Technologieakzeptanz

**Tabelle 3.2:** Betrachtete Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung. (Quelle: IPCC 2014/WGIII/Chap.11)

## AFOLU und globale nachhaltige Entwicklung

Der Sektor AFOLU ist für die globale nachhaltige Entwicklung zentral. Global lebt mehr als die Hälfte der Bevölkerung in ruralen Gebieten und ist somit meist von der Land- und/oder Forstwirtschaft abhängig. Der Fünfte Sachstandsbericht unterstreicht dementsprechend den systemischen Charakter der Minderungsmaßnahmen im AFOLU-Sektor. Deshalb betrachtet IPCC die AFOLU-Massnahmen unter institutionellen, sozialen, ökonomischen, ökologischen und technischen Gesichtspunkten (Tab. 3.2) und betont deren Wechselwirkungen. Beispielsweise ist eine Aufforstung einfacher durchzuführen, wenn die Eigentumsverhältnisse geklärt sind – und kann ihrerseits dabei helfen, allfällige Eigentumskonflikte zu lösen.

Wie sehr sich diese Massnahmen im Einzelnen auf die nachhaltige Entwicklung auswirken, unterscheidet sich von Region zu Region und ist abhängig vom lokalen Kontext, der Gesamtfläche, der Geschwindigkeit des Technikwandels und der Art der Landnutzung. Weiter wird im Bericht eine verantwortungsbewusste Regierungsführung («good governance») als zentraler Faktor für eine nachhaltige Entwicklung hervorgehoben.

Die Schweiz ist durch den internationalen Handel, die internationale Zusammenarbeit sowie durch direkten privaten Konsum von Importgütern eng mit der globalen nachhaltigen Entwicklung verbunden. Vor diesem Hintergrund ist ein verantwortungsbewusstes Handeln bezüglich Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen im Klimabereich entsprechend relevant.

### Feuchtgebiete als Methan- oder CO<sub>2</sub>-Quellen

Weltweit speichern Feuchtgebiete, insbesondere Moore, rund ein Drittel des organischen Kohlenstoffs, der in Böden vorkommt – und dies obwohl die Feuchtgebiete flächenmässig nur rund drei Prozent der Böden ausmachen. In naturnahen Mooren bleibt der Kohlenstoff über Tausende von Jahren gespeichert. Der Erhalt der noch intakten Moore stellt daher eine effektive Massnahme dar, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Sektor AFOLU zukünftig zu begrenzen. Werden die Moore jedoch zu land- oder forstwirtschaftlichen Zwecken oder zur Torfgewinnung entwässert, führt dies zu einem raschen und irreversiblen mikrobiellen Abbau des Torfes und damit zur Freisetzung grosser Mengen CO<sub>2</sub> sowie, in geringeren Mengen Lachgas (N<sub>2</sub>O). Weltweit sind zirka 10 Prozent der Moore entwässert; in Europa liegt dieser Anteil allerdings bei 50 Prozent, in der Schweiz bei über 90 Prozent. Eine Renaturierung degradierter Moore kann zu einer Umkehr der negativen Treibhausgasbilanz führen, allerdings um den Preis der Aufgabe der Nutzung. Der Flächenanteil der degradierten Moorböden unter Ackerland und Grasland in der Schweiz wird auf weniger als ein Prozent geschätzt.

### Referenzen

BAFU (2016) **Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2014. National Inventory Report.** Including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of 15 April 2016 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol, 629 pp.

Bretscher D, Leuthold-Stärfl S, Felder D, Fuhrer J (2014) **Treibhausgasemissionen aus der schweizerischen Land- und Ernährungswirtschaft.** Agrarforschung Schweiz 5: 458–465.

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

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** Chapter 11 «Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)

Joosten H (2010) **The global peatland CO<sub>2</sub> picture.** Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world. Ede, The Netherlands: Wetlands International, 36 pp.

Leifeld J (2013) **Prologue paper: Soil carbon losses from land-use change and the global agricultural greenhouse gas budget.** Science of the Total Environment 465: 3–6.

## 3.8 Urbane Strategien zum Klimawandel

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Städten und einigen Schätzungen zufolge wird dieser Anteil bis 2050 auf beinahe 70 Prozent steigen; in der Schweiz rechnet man sogar mit 80 Prozent. Obwohl die Zunahme der Bevölkerungs-, Gebäude- und Infrastrukturdichte die Vulnerabilität der Schweizer Städte erhöhen wird, birgt die Urbanisierung ein grosses Potenzial, den Energiekonsum und die Treibhausgasemissionen zu mindern. Dazu gehören vor allem Massnahmen in der Raum- und Infrastrukturplanung sowie die Sanierung des Gebäudeparks: Zu fördern sind kompakte urbane Räume mit einer gemischten Bevölkerung und einer Mischnutzung, kurzen Versorgungswegen und einem grossen Anteil an Fussgänger- und Radwegen. Die Sanierung des Schweizer Gebäudeparks und der existierenden Infrastrukturen kann die Emissionen um 50 bis 80 Prozent verringern im Vergleich zum Referenzniveau von 1990.

*Adrienne Grêt-Regamey (ETH Zürich), Jean-Louis Scartezzini (ETH Lausanne)*

Die Städte sind für zwei Drittel des Energieverbrauchs des Planeten und für mehr als 70 Prozent der Treibhausgasemissionen verantwortlich (GEA 2012). Gleichzeitig schreitet die Urbanisierung rasant voran: Bis 2050 wird die Stadtbevölkerung voraussichtlich auf mehr als sechs Milliarden Menschen steigen, was zwei Drittel der Weltbevölkerung entspricht. Die Schweiz wird keine Ausnahme sein: Mehr als 80 Prozent ihrer Bevölkerung – die 2050 voraussichtlich 10,2 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner umfassen wird (BFS 2014) – wird in Städten wohnen (United Nations 2014). Heutzutage findet die Entwicklung vor allem in kleinen bis mittelgrossen Städten statt, mit einer mehr als doppelt so raschen Vergrösserung des Wohnareals wie der Wohnbevölkerung (BFS 2015). Der durchschnittliche Wohnflächenbedarf pro Person in den Städten Zürich, Genf und Lausanne liegt mit 40 Quadratmetern deutlich unter dem Schweizer Durchschnitt von 45 Quadratmetern (SSV 2016). Aktuell sind 30 Prozent der Emissionen in der Schweiz auf die Gebäude zurückzuführen und 55 Prozent der in den Gebäuden verbrauchten Energie stammt aus fossilen Energiequellen. Der erhöhte Energiebedarf im Sektor Haushalt ist im Wesentlichen auf die Zunahme der beheizten Wohnflächen zurückzuführen.

### Rasante Urbanisierung als Chance

Da der Treibhausgasausstoss urbaner Räume stark mit der Siedlungsstruktur und Infrastruktur zusammenhängt, birgt die rasante Urbanisierung ihrerseits eine der grössten Chancen, den Energiekonsum und die Treibhausgasemissionen zu mindern. Die Möglichkeiten zur Emissionsminderung variieren aber je nach Art und Entwicklungsstand der urbanen Räume. In schnellwachsenden urbanen Gebieten kann noch die grundsätzliche Richtung der Stadt- und Infrastrukturplanung beeinflusst werden. Zu den Möglichkeiten für bereits entwickelte urbane Räume gehören vor allem Massnahmen bei der Sanierung des Gebäudeparks.

### Raum- und Infrastrukturplanung

Eine entscheidende Rolle zur Minderung der Emissionen kommt der Raum- und Infrastrukturplanung zu. Bis anhin hat sich die Raumplanung vor allem auf der sektoralen Ebene, im Bereich der Naturgefahren, mit dem Klimawandel beschäftigt. Die Raumplanung als klassische Querschnittsaufgabe verfügt aber bereits heute über ein breites Instrumentarium, das geeignet ist, den Klimawandel anzugehen.

### Handlungsmöglichkeiten im Bereich Klimawandel

Neben der Festlegung der Raumstruktur durch beispielsweise Richtpläne, Nutzungspläne oder Gestaltungspläne, können Agglomerationsprogramme, Leitbilder, regionale Entwicklungskonzepte oder Modellvorhaben einen wichtigen indirekten Einfluss auf das Klima haben. Doch vor allem durch die Koordination der verschiedenen sektoriellen Aufgaben kann die Raumplanung Synergien schaffen, wenn Interessensharmonien zwischen klassischen und neuen klimabedingten Handlungsfeldern bestehen, wie zum Beispiel zwischen Luftqualität, Durchlüftung und Stadtbegrünung. Die Ziele der Raum- und Infrastrukturplanung sollten sein, dass in Anbetracht der prognostizierten stadtklimatischen und wasserhaushaltlichen Veränderungen der urbane Lebensraum auch zukünftig adäquate Lebensbedingungen anbietet und die schon heute bestehenden städtischen Wärme-Insel-Effekte (s. a. Kap. 2.13 Urbaner Raum, S. 126) nicht zu völlig unbehaglichen oder sogar lebensbedrohlichen Lagen führen. Im Folgenden werden die wichtigsten Handlungsbereiche der Raum- und Infrastrukturplanung zur Minderung des Klimawandels vorgestellt (s. a. Abb. 3.18).

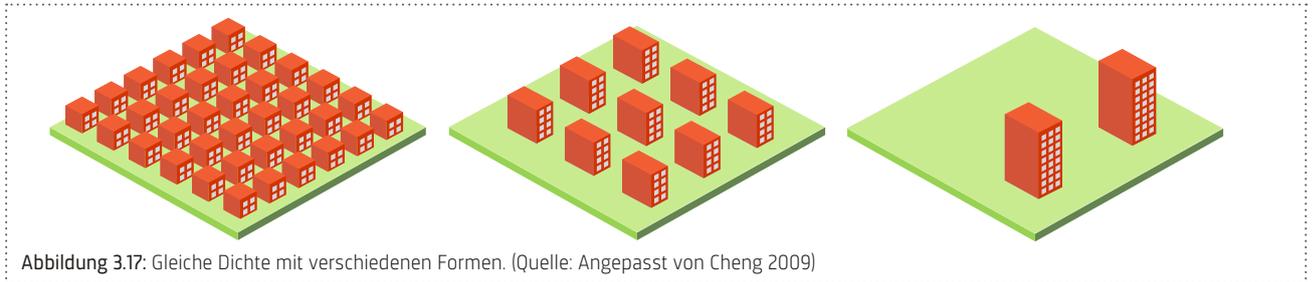


Abbildung 3.17: Gleiche Dichte mit verschiedenen Formen. (Quelle: Angepasst von Cheng 2009)

### Kompakte Siedlungsformen

Für bereits gewachsene Städte ist die Förderung **kompakter Siedlungsformen** eine elementare Massnahme zur Emissionsminderung. Hohe Dichte von Bevölkerung, Arbeit und Geschäften führt zu kurzen Transportwegen und damit zu weniger Treibhausgasemissionen. Je höher die Dichte, desto grösser ist der Anteil von Fuss- und Fahrradverkehr (Metron 2014). Jedoch könnte bei einer starken Verdichtung auch der Freizeitverkehr zunehmen. Häufig wird angenommen, dass eine Verdichtung über mehrere Stockwerke zu erreichen ist. Dies ist jedoch nicht immer die beste Lösung, wenn es um Energieeffizienz und Emissionsminderung geht, da hohe Gebäude auch viel Abstand zueinander brauchen, um Licht durchzulassen (Abb. 3.17).

### Mischnutzung

Auch eine **Mischnutzung** fördert kurze Wege, was wiederum umweltfreundliche Fortbewegungsmittel fördert. Negative Effekte wie Lärm- und Geruchsemissionen, die ursprünglich die strikte Trennung von Gewerbe-, Industrie- und Wohnzonen begründeten, können heutzutage oft begrenzt werden.

### Dichte des Transportnetzwerkes

Die Dichte des Transportnetzwerkes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionsminderung und fördert die Erreichbarkeit. Dies ist von grosser Bedeutung, da mit 32 Prozent ein Grossteil der Treibhausgasemissionen auf den Verkehr entfällt. Bei einem hohen Grad an Vernetzung, also vielen Strassen und Wegen für die verschiedenen Verkehrsteilnehmer, ist der Anteil an Fussgängern und Velofahrern grösser, was auch die Emissionen verringert. Vernetzung kann erreicht werden, indem bei Neubauten kleinere, unterteilte Gebäudeformen bevorzugt werden. Bestehende Verkehrswege können verkehrsberuhigt werden, indem Fuss- und Velowege, Verkehrsberuhigungsmassnahmen (30er-Zonen) oder Fussgängerzonen hinzugefügt werden.

### Grüne und blaue Infrastrukturen

Grüne und blaue Infrastrukturen sorgen für ein besseres Klima, eine bessere Luftqualität und sie bieten Naherholungszonen. Die grüne Infrastruktur beinhaltet die Vegetation und die grünen Elemente in der Stadt. Diese reichen von Grünflächen wie Parks und Wälder über begrünte

Alleen bis zu grünen Tramtrassees und begrünten Parkfeldern. Auch Gründächer und begrünte Fassaden oder das Urban Gardening sind Teil der grünen Infrastruktur. Die blaue Infrastruktur entspricht den Wasserelementen innerhalb der Stadt: Flüsse und Seen, Brunnen, Wassergräben oder andere Elemente zur Befeuchtung und Abkühlung. Auch sie tragen zum Wohlergehen der Stadtbewohnerinnen und -bewohner bei (BAFU 2012) (s. a. Box Bäume im urbanen Raum, S. 108). Diese Infrastrukturen sollten bei der Raum- und Infrastrukturplanung berücksichtigt werden. Im gesamten urbanen Gebiet sollten die zur Belüftung der Innenstadt relevanten Kaltluftschneisen ermittelt, erhalten und in ihrer Funktionsfähigkeit entwickelt und verbessert werden. Bei künftigen Bebauungen (nur ausserhalb von Überschwemmungsgebieten von hundertjährigen Hochwassern) oder Umbauten an Still- und Fliessgewässern sollten die Gebäude so ausgerichtet werden, dass die Kaltluftbahnen in die Zentren hineinwirken können. Beachtet man die lokalen Klimaverhältnisse, sollten insbesondere die regionalen Verknüpfungen der Kalt- und Frischluftsysteme berücksichtigt werden, da die Einzugsgebiete dieser Luftsysteme zumeist weit über das urbane Gebiet hinausreichen.

Weitere Möglichkeiten, die Emissionen in den Städten wirksam zu verringern, sind eine nachhaltige Energieversorgung mit grösstenteils erneuerbaren Ressourcen. Eine verbesserte Effizienz von Verteilnetzen, Gebäuden sowie Geräten und Anlagen verringert die Nachfrage nach Energie. Auch ein verändertes Bewusstsein und Verhalten der Bewohner kann den Verbrauch senken (s. a. Kap. 3.3 Verhaltensänderungen, S. 164). Die Einsparpotenziale werden kurzfristig auf bis zu 20 Prozent und bis 2050 auf bis zu 50 Prozent geschätzt (IPCC 2014/WGIII/Chap.12).

### Schlüsselfaktoren für eine effiziente Umsetzung von Minderungsmaßnahmen

Doch Strategien und Massnahmen scheitern oft an ihrer Umsetzung. Folgende Faktoren haben eine Schlüssel-funktion für eine im Hinblick auf den Klimawandel effiziente Umsetzung von Minderungsmaßnahmen durch die Raum- und Infrastrukturplanung:

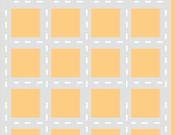
	Zu messende Grössen	Bereiche	
		Hohe Emissionen	Tiefe Emissionen
Verdichtung	- Haushalt/Bevölkerung - Gebäude/Grundflächen-Verhältnis - Arbeit/Gewerbe - Block/Parzelle - Wohnungseinheit		
Mischnutzung	- Landnutzungs-Diversität - Diversität der Arbeit - Arbeitsplatz-Wohnraum-Balance - Arbeitsplatz-Bevölkerungs-Balance - Anzahl Ladengeschäfte - Gehweg-Möglichkeiten		
Transportnetzwerk	- Dichte der Wegkreuzungen - Blockgrösse - Breite der Gehsteige - Strassennetzdichte		
Erreichbarkeit	- Bevölkerungszentralität - Distanz zum zentralen Geschäftsviertel - Erreichbarkeit des Arbeitsplatzes mit dem Auto und/oder ÖV - Erreichbarkeit der Einkaufsmöglichkeiten		
Grüne und blaue Infrastruktur	- Grünraumversorgung - Kaltluftbewegung - Kühlungseffekt		

Abbildung 3.18: Emissionsmindernde Strategien im Bereich Raum- und Infrastrukturplanung. (Quelle: Design nach IPCC 2014/WGIII/Chap.12)

- **Ein stärkeres Bewusstsein, Partizipation und regionale Verantwortung:** Emissionsminderungsmassnahmen müssen in die bestehenden Konzepte der nachhaltigen Stadt einfließen, wie beispielsweise in die 2000-Watt- oder die Eine-Tonne-CO<sub>2</sub>-Gesellschaft. Die Bewusstseinsbildung innerhalb der Stadtverwaltung sowie bei der Bevölkerung spielt dabei eine Schlüsselrolle. Dazu gehören die eigene Betroffenheit zu erkennen, in dezentrale Vollzugsmodelle zur Anpassung an die Klimaänderung Fachleute einzubeziehen sowie konkrete Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen durch das Bereitstellen von Unterlagen für Fachleute in spezifischen Tätigkeitsfeldern.
- **Systemisches Denken, die Koordination der Instrumente und deren Integration:** Die regionale Raumplanung gewinnt als Planungsregion sowie Dialog- und Koordinationsplattform an Bedeutung, da die Anpassungsstrategien sich nicht an Gemeinde- oder Kantonsgrenzen, sondern am Charakter des Klimas und des natürlichen Lebensraumes orientieren. Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Fachplanungen sind auf der Grundlage der Multifunktionalität der Landschaft optimal zu koordinieren. Beispiel hierfür ist die Koordination der Ausweisung des Gewässerraumes im Rahmen der Revi-

sion des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) mit den Anpassungsaktivitäten von Bund, Kantonen und Gemeinden an das Klima und mit der Biodiversitätsstrategie.

- **Verwendung von informellen Instrumenten:** Es sollte ein Mix von formellen und informellen Instrumenten entwickelt werden, deren jeweilige Wirkungen sich ergänzen. Ein relevantes informelles Instrument ist die Einrichtung von regionalen Akteursnetzwerken mit Vertretern der Kantone sowie mit den relevanten Verbänden und Fachorganisationen aus den Bereichen Planung, Bau und Unterhalt. Solche Netzwerke bieten zahlreiche Möglichkeiten, um das Bewusstsein zu fördern, Informationen auszutauschen und einen regionalen Ideenpool zu schaffen.

### Sanierung des Gebäudeparks und bestehender Infrastrukturen

Die Sanierung des Gebäudeparks und der existierenden Infrastrukturen mit neuen Konzepten für energieautarke Gebäude (*Net-Zero Energy Buildings*) und Gebäude ohne

## Ökosystemleistungen in der Stadt und ihr Beitrag zur Minderung

Grünflächen und Gewässer in urbanen Gebieten erbringen vielseitige Ökosystemleistungen: Sie stellen Habitate für Tiere und Pflanzen zur Verfügung, dienen der Erholung, leiten das Regenwasser in den Boden ab, verbessern die Luftqualität und das Stadtklima. Wasserflächen in Stadtnähe haben einen ausgleichenden Effekt auf das Klima, sie wirken kühlend im Sommer und speichern die Wärme im Winter. Grünflächen reduzieren den sogenannten Hitze-Insel-Effekt durch Schattenwurf, Verdunstung und verbesserte Luftzirkulation. Dadurch wird der Energieverbrauch für Klimaanlagen, Kühlschränke und andere Geräte erheblich vermindert. Zusätzlich leisten die Pflanzen durch die Assimilierung von Kohlenstoff einen Beitrag zur Minderung des Energieverbrauchs. Von Bedeutung sind dabei sowohl grössere Flächen wie Parks oder Spielplätze als auch einzelne Elemente wie Bäume oder begrünte Dächer. Die Berücksichtigung von Gewässern und Grünflächen und ihren Ökosystemleistungen kann somit in der strategischen Planung einen erheblichen Beitrag zur Minderung von Emissionen in städtischen Gebieten leisten. Darüber hinaus können solche Flächen einen Beitrag zur lokalen Lebensmittelversorgung leisten, zur Regulierung von Naturgefahren wie Hochwasser sowie zur Erholung der städtischen Bevölkerung. Damit tragen urbane Ökosystemleistungen wesentlich zu Gesundheit und Wohlbefinden bei, gerade angesichts der Herausforderungen des Klimawandels (s.a. Kap. 2.8 Biodiversität und Ökosystemleistungen, S. 100).

Treibhausgasemissionen (*Zero Emission Buildings*) kann dazu beitragen, die Emissionen im Gebäudebereich um 50 bis 80 Prozent zu verringern im Vergleich zum Referenzniveau von 1990. Solche Gebäude können im Rahmen von globalen Strategien zur Sanierung von Stadtquartieren die Emissionen der energieintensiveren Gebäude kompensieren (UMEM 2011). Bei der Sanierung des Schweizer Gebäudeparks wird das Reglement des SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) eine grosse Rolle spielen: Dieses misst der Energieeffizienz von Gebäuden und der Bekämpfung der Auswirkungen des Klimawandels eine immer grössere Bedeutung zu. Das SIA-Reglement kann langfristig dazu beitragen, die nationalen Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Zusätzlich zum SIA-Reglement sind jedoch weitere Massnahmen notwendig:

- eine höhere Energieeffizienz (Gebäudehülle, technische Anlagen),
- eine bessere Integration von erneuerbaren Energien in die Gebäude und Städte (thermische Solaranlagen, Photovoltaikmodule),

- eine höhere globale Effizienz der Gebäude und Infrastrukturen (Stadtplanung, Wärme- und/oder Kältenetz, Abnahme von Anlagen usw.),
- der Schutz vor Hitze durch das Verhindern von Sonneneinstrahlung und
- der Verzicht auf unnötige Dienstleistungen (Veränderung der Verhaltens- und Lebensweisen).

Abschliessend ist zu sagen, dass der Beitrag von Städten zur Minderung der Treibhausgasemissionen und des Energiekonsums mit grossen Unsicherheiten behaftet ist. Einerseits gibt es keine einheitlichen lokalen Erhebungsmethoden, die erlauben, die Unterschiede zwischen den Städten zu messen. Die Letzteren sind abhängig von der Stadtstruktur (kompakt oder weitläufig), der Infrastruktur (Strassennetz, Fuss- und Velowege, Alter der Gebäude), der Wirtschaftsstruktur (Industrie oder Dienstleistungen) und der demographischen Schichtung (Alter der Wohnbevölkerung, Durchmischung). Andererseits gibt es grosse Unsicherheiten in der Entwicklung der Städte. Dies erschwert die Voraussage des Einflusses von urbaner Form und Infrastruktur auf den Energiekonsum und die Treibhausgasemissionen massiv. *No-Regret-Strategien*, wie das «Climate-Proofing», welches die Tragfähigkeit von Massnahmen unter dem sich ändernden Klima prüft, sind dabei unentbehrlich, um die langfristige Anpassung der Städte an den Klimawandel zu sichern.

## Referenzen

- BAFU (2012) *Anpassung an den Klimawandel in Schweizer Städten*. Schlussbericht, 16. August 2012, 68 pp.
- BFS (2014) *Evolution future de la population – Données, indicateurs – Scénarios suisses*. [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch)
- BFS (2015) *Die Bodennutzung in der Schweiz – Auswertungen und Analysen*. [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch)
- GEA (2012) *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. Chapter 12 « Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Metron (2014) *Dichte und Mobilitätsverhalten – Zusammenhang zwischen Siedlungsstruktur und Mobilitätsverhalten*. Ein neuer Blick auf den Mikrozensus. SVI-Veranstaltungsreihe, St. Gallen, 22.5.2014.
- SSV (2016) *Statistik der Schweizer Städte*. Bern.
- United Nations (2014) *World Organization Prospects*. United Nations.
- Upadhyay G, Mauree D, Kämpf JH, Scartezzini J-L (2015) *Evapotranspiration model to evaluate the cooling potential in urban areas – A case study in Switzerland*. 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, December 6-9, 2015.



# Teil 4: Klimapolitik

## Autorinnen und Autoren

**Andrea Burkhardt**

Abteilungschefin, Abteilung Klima, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

**Prof. Dr. em. Thomas Cottier**

Professor (em.) für Europa- und Wirtschaftsvölkerrecht, Institut für Europa- und Wirtschaftsvölkerrecht, Universität Bern

**Dr. Kateryna Holzer**

Postdoktorandin, World Trade Institute, Universität Bern

**Prof. Dr. Karin Ingold**

Direktorin, Institut für Politikwissenschaft, Universität Bern

Professorin für Policy Analyse und Environmental Governance, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern und Departement der Umweltsocialwissenschaften, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf

**Dr. Axel Michaelowa**

Gruppenleiter, Internationale Klimapolitik, Lehrstuhl Politische Ökonomie der Entwicklungs- und Schwellenländer, Institut für Politikwissenschaft, Universität Zürich  
Geschäftsführer, Perspectives GmbH, Zürich

**Prof. Dr. Philippe Thalmann**

Professor für die Ökonomie der Natürlichen und Gebauten Umwelt, Institut für Architektur und Städtebau, ETH Lausanne



## 4.1 Einleitung

Teil 4 zur Schweizer Klimapolitik besteht aus vier Kapiteln, die das Thema erst aus Sicht der Bundesverwaltung, dann aus Sicht der Wissenschaft beleuchten. Die Kapitel tragen zum Verständnis bei, wie die Schweiz ihre Minderungsziele festgelegt und welche Massnahmen sie ergriffen hat, um diese zu erreichen. Dabei ist der internationale Kontext von zentraler Bedeutung. Die Schweiz spielt auf internationaler Ebene eine wesentliche Rolle und hat ansehnliche, jedoch keine aussergewöhnlichen Ergebnisse erzielt.

*Philippe Thalmann (ETH Lausanne)*

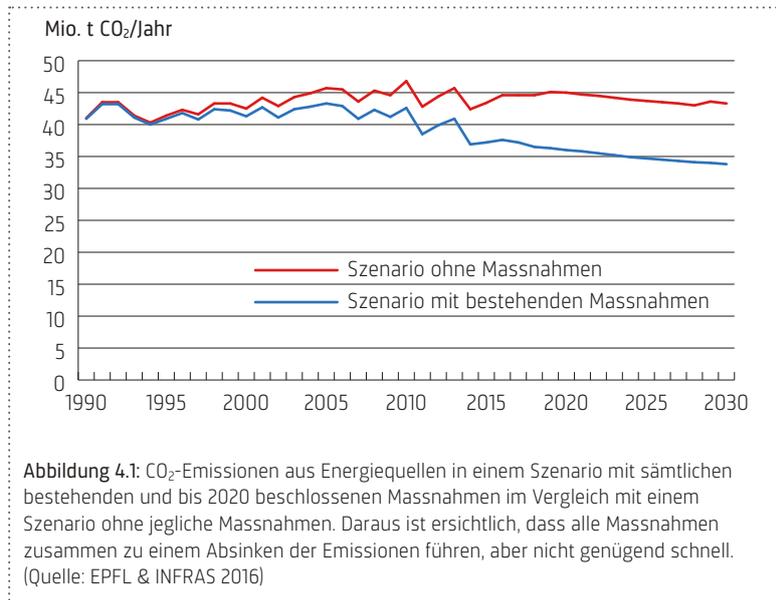
Zu Beginn des vierten Teils gibt Andrea Burkhardt, Chefin der Abteilung Klima beim Bundesamt für Umwelt (BAFU), einen Überblick über die Schweizer Klimapolitik (s. a. Kap. 4.2 Schweizer Klimapolitik, S. 194). Sie zeigt auf, was bereits erreicht worden ist und was noch angestrebt wird. Die jüngsten Zahlen in Bezug auf die Emissionen der Treibhausgase aus dem Jahr 2014 sind ermutigend, da die Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 um 9,3 Prozent gesunken sind. Gleichzeitig war 2014 das wärmste in der Schweiz je gemessene Jahr, was in hohem Masse dazu beigetragen hat, die Emissionen zu senken. Bei gleicher Witterung wie 1990 wären die Emissionen im 2014 nur um 5,2 Prozent geringer als 1990 gewesen. Schreiten die Emissionsminderungen im gleichen geringen Tempo voran, so müsste 2020 ein noch viel wärmeres Jahr werden, damit das im CO<sub>2</sub>-Gesetz festgelegte Ziel erreicht werden kann, die Emissionen um 20 Prozent zu senken.

Auch wenn sich die Schweiz noch nicht auf dem angestrebten Weg zur Minderung der Emissionen befindet, ist das Erreichte angesichts des wirtschaftlichen und demografischen Wachstums dennoch bemerkenswert. Die verschiedenen Beiträge in Teil 3 Minderung haben gezeigt, in welchen Sektoren die besten Ergebnisse erzielt wurden und welche Herausforderungen es noch zu bewältigen gibt. Teil 4 beschäftigt sich nun mit den Zielen der Schweizer Klimapolitik und den Instrumenten, die eingesetzt wurden, um diese zu erreichen. Der Beitrag von Andrea Burkhardt vergegenwärtigt die bis 2020 bereits genehmigten Ziele sowie jene, die darüber hinaus geplant sind. Die Analyse im OcCC-Bericht (2012) über die Klimaziele zeigt, dass die Ziele bis 2020 nicht besonders ehrgeizig und für ein Land wie die Schweiz vermutlich unzureichend sind. Die im Vorfeld der Klimakonferenz von Paris für 2030 angekündigten Ziele setzen für die Schweiz gleichwohl Bemühungen voraus, die mit jenen der Europäischen Union vergleichbar sind (Vöhringer et al. 2016).

Da es der Schweiz voraussichtlich nicht gelingen wird, ihre Minderungsziele einzig mit Massnahmen im eigenen Land zu erreichen, müssen auch die im Ausland er-

griffenen Massnahmen genauer betrachtet werden. Dabei geht es nicht nur um die von nationalen Organisationen finanzierten Emissionsminderungen im Ausland, die die Schweiz zu Mehremissionen berechtigen (sogenannte Kompensationsmassnahmen). Für das Klima sind unter Umständen die Bemühungen der Schweizer Diplomatie wichtiger, die Klimathematik auf der internationalen Ebene voranzubringen, um die multilateralen Mechanismen zu fördern und andere Länder zu ermuntern, eine ambitionierte Politik zu verfolgen. Diese Bemühungen werden im Beitrag von Thomas Cottier und Kateryna Holzer (s. a. Kap. 4.5 Internationale Kooperation, S. 205) präsentiert und evaluiert; die beiden Autoren zeigen zudem auf, wie vielfältig die Formen der internationalen Kooperation sind und auf welche Schwierigkeiten diese stösst.

Sind die im Ausland erreichten Minderungen mit den nationalen Emissionsminderungen vergleichbar? Natürlich hat eine Million Tonnen CO<sub>2</sub>, die in der Schweiz vermieden wird, die gleiche Auswirkung wie eine Million Tonnen CO<sub>2</sub>, die im Ausland eingespart wird. Im Ausland ist diese Einsparung grundsätzlich für weniger Geld zu erreichen als in der Schweiz, oft aber auch mit einem kleineren Einsatz von Energie und anderen Ressourcen. Beschränkt man sich nicht ausschliesslich auf die in der Schweiz realisierbaren Emissionsminderungen, kann also mit den gleichen Ressourcen kurzfristig mehr für das Klima erreicht werden. Andererseits müssen die Emissionen überall und tatsächlich – nicht nur auf dem Papier – vermindert werden, um die Erwärmung des Klimasystems auf 2 Grad Celsius (respektive 1,5 Grad Celsius) zu begrenzen. Dies bedingt bereits heute Investitionen in klimafreundliche Techniken. Werden Gebäude und Industrieanlagen nicht nach besten Standards errichtet und allmählich erneuert, belasten sie bis in weite Zukunft die Klimabilanz der Schweiz. Ausserdem führen Massnahmen zur Emissionsminderung zu positiven Effekten auf die Ökosysteme, die Handelsbilanz, die Energiesicherheit, die Innovation, die Beschäftigung und die Lebensqualität – was für inländische Minderungen spricht. Berücksichtigt man diese Effekte, dann sind die Nettokosten von inländischen Massnahmen letztendlich oftmals sehr



tief, auch wenn die durchschnittlichen direkten Kosten einer mässig ambitionierten Politik bis 2020 auf – je nach Sektor – 150 bis 321 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> veranschlagt werden (BAFU 2013).

Die Kosten für die Minderung der inländischen Emissionen und die Verteilung dieser Kosten in der Gesellschaft sind in hohem Masse von den eingesetzten Instrumenten zur Erreichung der Ziele abhängig. In ihrem Beitrag zeigt Karin Ingold (s. a. Kap. 4.3 Entstehung und Entwicklung einer Klimapolitik, S. 198), dass das Instrumentarium der Schweizer Klimapolitik nicht das Ergebnis einer technokratischen Planung ist, sondern vielmehr eines Kompromisses zwischen den beteiligten Akteuren, der nach zwei Jahrzehnten harten Feilschens ausgearbeitet wurde. Eine neue Studie im Auftrag des BAFU (INFRAS & EPFL 2016) zeigt, dass Massnahmen in mehreren politischen Sektoren dazu beigetragen haben, die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schweiz zu mindern, hauptsächlich in den Sektoren Energie und Verkehr (auch wenn im Verkehrsbereich die Minderungsziele verfehlt wurden). Ohne diese Massnahmen wären diese Emissionen im Jahr 2013 um 12 Prozent höher gewesen, als sie es tatsächlich waren.

Noch fehlt eine Gesamtübersicht, anhand derer überprüft werden kann, ob alle Massnahmen mit den geringsten Kosten zum Ziel führen. Vermutlich ist eine solche Evaluation gar nicht möglich, weil viele erzielte Minderungen des Treibhausgasausstosses nur unbeabsichtigte Folgen von Massnahmen sind, die aus anderen Gründen ergriffen wurden. Trotzdem fasst Axel Michaelowa in seinem Kapitel (s. a. Kap. 4.4 Klimapolitik weltweit: Erfahrungen mit klimapolitischen Massnahmen, S. 202) die Erfahrungen zusammen, die weltweit mit den inter-

nationalen und nationalen Instrumenten der Klimapolitik gemacht wurden. Ein Vergleich mit dem Schweizer Instrumentarium zeigt, dass die aus den zähen nationalen Verhandlungen entstandene Kombination von verbindlichen und freiwilligen Regulations-, Steuer- und Markt-massnahmen vielleicht doch kosteneffizienter ist, als man auf den ersten Blick denken könnte

## Referenzen

- BAFU (2013) **Kosten und Potential der Reduktion von Treibhausgasen in der Schweiz**. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 11.3523 vom Nationalrat Bastien Girod vom 15. Juni 2011.
- EPFL, INFRAS (2016) **Emissions scenarios without measures 1990 – 2030**. Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Zurich & Lausanne, 4 May.
- OcCC (ed.) (2012) **Klimaziele und Emissionsreduktion**. Eine Analyse und politische Vision für die Schweiz, OcCC – Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern, 35–51.
- Vöhringer F, Stocker D, Knoke W (2016) **Intended Nationally Determined Contributions (INDCs) under the Paris Agreement on Climate Change: Fact sheets for selected countries and assessments of underlying efforts**. Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Bern, Econability.

## 4.2 Schweizer Klimapolitik

Die Schweizer Klimapolitik bettet sich in die internationalen Bestrebungen zur Minderung der Treibhausgasemissionen ein. Das Ziel einer Emissionsminderung von acht Prozent für die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls von 2008 bis 2012 hat die Schweiz auch dank der Anrechnung ausländischer Zertifikate erreicht. Für die zweite Verpflichtungsperiode bis 2020 liegt der Fokus der Minderungsleistungen ausschliesslich auf dem Inland. Mit einer breiten Palette von Massnahmen in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie soll das gesetzliche Minderungsziel von 20 Prozent bis 2020 erreicht werden. Für die Zeit nach 2020 hat die Staatengemeinschaft das Übereinkommen von Paris verabschiedet. Im Vorfeld zur Klimakonferenz in Paris hatte die Schweiz ein Minderungsziel von 50 Prozent bis 2030 angekündigt, das mehrheitlich mit Massnahmen im Inland, aber auch durch Emissionsminderungen im Ausland erreicht werden soll.

Andrea Burkhardt (BAFU)

### Rahmenbedingungen

Die Schweiz hat sich zusammen mit der internationalen Staatengemeinschaft verpflichtet, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, auf welchem eine gefährliche Störung des Klimasystems durch den Menschen verhindert wird. Dieses Ziel, das in der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) aus dem Jahr 1992 festgeschrieben ist, bedingt eine massive Absenkung der Treibhausgasemissionen (BAFU 2014).

Im Jahr 2014 lagen die Treibhausgasemissionen der Schweiz bei 48,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>eq) und damit 9,3 Prozent unter dem Niveau von 1990, dem für die Klimapolitik entscheidenden Basisjahr. Dieser Rückgang erklärt sich zum einen mit dem geringeren Heizbedarf aufgrund der milden Wintertemperaturen; die je nach Heizgradtagen stark schwankenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Brennstoffen sind Ausdruck dafür, dass nach wie vor viele Gebäude fossil beheizt werden. Zum andern ist eine Entkopplung der Entwicklung der Treibhausgasemissionen vom Wachstum zu beobachten: Wohnfläche und Fahrzeugflotte haben seit 1990 um mehr als ein Drittel zugenommen, die industrielle Produktion um mehr als die Hälfte.

Ein klimaverträgliches Emissionsniveau bedingt, dass der weltweite Ausstoss bis Mitte dieses Jahrhunderts auf eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Kopf und Jahr sinkt. Von diesem Ziel ist die Schweiz mit 6,5 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Kopf und Jahr noch weit entfernt. Die Schweiz liegt zwar unter dem OECD-Durchschnitt, insbesondere aufgrund ihrer nahezu CO<sub>2</sub>-freien Stromproduktion und des strukturellen Wandels hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft. Das Bild relativiert sich allerdings bei einer Betrachtung der sogenannten grauen Treibhausgasemissionen. Werden nämlich die indirekten Emissionen dazugerechnet, die in die Schweiz importierte Güter und Dienstleistungen im Ausland verursachen, belaufen sich

die Emissionen auf 11 bis 13 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Kopf (Frischknecht et al. 2014). Nochmals knapp 6,5 Tonnen kommen dazu, wenn auch die durch den Finanzplatz Schweiz gehaltenen ausländischen Aktien berücksichtigt werden (BAFU 2015).

### Minderungsziele in der ersten und zweiten Verpflichtungsperiode

#### Erste Periode bis 2012

Die Schweiz verfolgt eine international abgestimmte und langfristig ausgerichtete Klimapolitik mit einer konsequenten, kontinuierlichen Minderung der Treibhausgase. Sie hat sich für beide Phasen des Kyoto-Protokolls, das als Zusatz zur UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) vorab den Industriestaaten Begrenzungsziele setzt, international verpflichtet. Das Ziel der ersten Verpflichtungsperiode 2008–2012, die Treibhausgasemissionen um acht Prozent unter das Niveau von 1990 zu senken, hat die Schweiz erfüllt (BAFU 2014a). Gegenüber einem Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz wurde die dafür nötige Minderungsleistung zu zwei Dritteln im Inland und zu einem Drittel im Ausland erreicht.

Die Kyoto-Verpflichtung wird national mit dem CO<sub>2</sub>-Gesetz umgesetzt. Dieses war in der ersten Verpflichtungsperiode auf die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brenn- und Treibstoffen ausgelegt und bildete nur eine Teilmenge der international relevanten Emissionsquellen und Klimagase ab. Diese Abweichung wurde bei der Totalrevision für die zweite Verpflichtungsperiode nach 2012 behoben und der Geltungsbereich erweitert auf alle sieben vom Kyoto-Protokoll erfassten Gase<sup>1</sup> und auf die

<sup>1</sup> Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>).

Senkenleistungen des Schweizer Waldes und von Holzprodukten.

## Zweite Periode bis 2020

Das seit 1. Januar 2013 geltende CO<sub>2</sub>-Gesetz verlangt, dass die Treibhausgasemissionen in der Schweiz bis 2020 gegenüber 1990 um 20 Prozent sinken. Dieses Minderungsziel steht im Einklang mit der internationalen Verpflichtung, welche die Schweiz mit der Ratifikation der zweiten Kyoto-Periode von 2013 bis 2020 eingegangen ist. In Bezug auf die Zielerreichung gibt es allerdings zwei Unterschiede: Während sich das Minderungsziel des CO<sub>2</sub>-Gesetzes auf das Jahr 2020 bezieht, ist gemäss Kyoto-Protokoll der ganze Zeitraum von 2013 bis 2020 relevant. Umgelegt auf einen Durchschnittswert über diese acht Jahre entspricht das 20-Prozent-Ziel einer mittleren Minderungsleistung von 15,2 Prozent. Für die internationale Zielerreichung dürfen im Unterschied zum CO<sub>2</sub>-Gesetz, das ein reines Inlandziel setzt, auch Massnahmen im Ausland angerechnet werden. Mit den sogenannten flexiblen Mechanismen wurde im Rahmen des Kyoto-Protokolls ein Instrumentarium geschaffen, mit dem für Emissionsminderungen Zertifikate ausgestellt werden, sobald die Minderungen mit konkreten Klimaschutzprojekten erzielt werden. In der Schweiz gelten für ausländische Zertifikate hohe Qualitätsanforderungen; so sind nur Projekte in weniger entwickelten Ländern zugelassen, die einen Beitrag an die nachhaltige Entwicklung leisten und keine negativen ökologischen und sozialen Folgen haben.

## Zielvorgaben für einzelne Sektoren

Zur Ausgestaltung des Instrumentenmix, der Lenkungs- und Fördermassnahmen sowie Vorschriften und freiwillige Zielvereinbarungen umfasst, hat der Bundesrat die Zielvorgabe von 20 Prozent auf die einzelnen Sektoren umgelegt. So müssen die Treibhausgasemissionen bei Gebäuden bis 2020 um 40 Prozent, im Verkehr um 10 Prozent und bei der Industrie um 15 Prozent sinken. Für diese drei Sektoren gelten auch Zwischenziele für das Jahr 2015, anhand derer die Massnahmen in der zweiten Hälfte der Verpflichtungsperiode nötigenfalls angepasst werden. Während die Sektoren Gebäude und Industrie auf Zielkurs sind, dürfte der Verkehr sein Ziel weit verfehlen, weil die zunehmende Fahrleistung den Effizienzfortschritt bei den Fahrzeugen wegfrisst.

## Minderungsmassnahmen bis 2020

### CO<sub>2</sub>-Abgabe

Das erste CO<sub>2</sub>-Gesetz räumte den freiwilligen Massnahmen von Wirtschaft und Privaten einen hohen Stellenwert ein. Da sich rasch abzeichnete, dass freiwillige Anstrengungen allein nicht ausreichen, wurde 2008 eine CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Brennstoffe (Heizöl, Erdgas, Kohle) eingeführt. Die CO<sub>2</sub>-Abgabe ist als Lenkungsabgabe konzipiert. Mit der Verteuerung der fossilen Brennstoffe sollen ein effizienterer Energieeinsatz und ein Umstieg auf erneuerbare Energien attraktiver werden. Die Einnahmen werden grösstenteils zurückverteilt: An die Unternehmen proportional zu ihrer AHV-Lohnsumme und an die Bevölkerung gleichmässig pro Kopf, wobei die Rückverteilung administrativ über die Krankenversicherer abgewickelt wird.

Der Abgabesatz von anfangs 12 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> (3 Rappen pro Liter Heizöl) wurde inzwischen drei Mal erhöht, weil vorgängig definierte Zwischenziele für die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Brennstoffen verfehlt wurden. Seit 2016 beträgt der Abgabesatz 84 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> (22 Rappen pro Liter Heizöl) und wird auf 2018 ein weiteres Mal automatisch angehoben, falls die Brennstoffemissionen nicht genügend zurückgehen.

### Gebäudeprogramm und Technologiefonds

Zur Verstärkung der Lenkungswirkung ist seit 2010 ein Drittel des Ertrags aus der CO<sub>2</sub>-Abgabe – maximal 300 Millionen Franken – für das Gebäudeprogramm zweckgebunden. Das Gebäudeprogramm fördert die Sanierung von Gebäuden, den Einsatz erneuerbarer Energien, die vermehrte Abwärmenutzung und die Optimierung der Gebäudetechnik. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 hat das Parlament einer Aufstockung des Gebäudeprogramms auf maximal 450 Millionen Franken pro Jahr zugestimmt.

Seit 2013 wird mit jährlich maximal 25 Millionen Franken aus der CO<sub>2</sub>-Abgabe ein Technologiefonds zur Innovationsförderung geäufnet. Mit dem Technologiefonds verbürgt der Bund Darlehen an Unternehmen, die innovative Produkte und Verfahren entwickeln und vermarkten, welche die Treibhausgasemissionen oder den Ressourcenverbrauch mindern, den Einsatz von erneuerbaren Energien begünstigen und die Energieeffizienz erhöhen. Der Technologiefonds kommt in einer späten Phase der Innovation zum Zuge: Wenn es um die Vermarktung erprobter Techniken oder Kapazitätserweiterungen geht, um neue Kunden zu erschliessen, und wenn (günstiges) Fremdkapital benötigt wird.

## Emissionshandel

Unternehmen, die treibhausgasintensiv produzieren und von der CO<sub>2</sub>-Abgabe in ihrer Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigt würden, können sich von der Abgabe befreien lassen, falls sie im Gegenzug eine Minderungsverpflichtung eingehen. Grosse Unternehmen bestimmter Sektoren sind von Gesetzes wegen abgabebefreit und stattdessen zur Teilnahme am Emissionshandel verpflichtet. Sie erhalten im Umfang von europaweit geltenden Benchmarks Emissionsrechte zugeteilt, die sie verkaufen können, falls sie weniger emittieren. Mehremissionen müssen hingegen mit zusätzlichen Emissionsrechten abgedeckt werden. In beschränktem Umfang können auch ausländische Zertifikate angerechnet werden.

Das Emissionshandelssystem, das heute rund zehn Prozent der Treibhausgasemissionen der Schweiz abdeckt, ist EU-kompatibel ausgestaltet, damit es mit dem wesentlich grösseren Emissionshandelssystem der EU verknüpft werden kann. Die technischen Verhandlungen hierzu sind abgeschlossen und das entsprechende Abkommen paraphiert. Mit der Verknüpfung werden die Schweizer Unternehmen Zugang zum viel grösseren und liquideren Markt der EU haben und die preislichen Unterschiede zwischen dem schweizerischen und europäischen Emissionshandelssystem aufgehoben.

## Branchenvereinbarungen

Auch Kehrlichtverbrennungsanlagen hätten in den Emissionshandel eingebunden werden können. Im August 2014 verpflichteten sie sich im Rahmen einer Branchenvereinbarung gegenüber dem Bund zur Treibhausgasminderung und wurden im Gegenzug vom Emissionshandel ausgenommen. Eine weitere Branchenvereinbarung zur Begrenzung der Emissionen von Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) gibt es mit der Starkstrom- und Halbleiterindustrie.

Die Emissionen aus synthetischen Treibhausgasen<sup>2</sup> sind seit 1990 stark angestiegen und machen heute einen Anteil von zirka drei Prozent an den gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz aus. Der Verbrauch dieser Gase ist in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81) geregelt. Diese sieht ein grundsätzliches Verbot dieser Substanzen vor, wobei Ausnahmen gewährt werden, wenn Ersatztechniken nicht verfügbar oder noch umweltschädlicher wären. Im Rahmen des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht nimmt die Schweiz zudem an den Verhandlungen über einen verbindlichen Abbau der Produktion und der Ver-

wendung von halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFC) teil, die in Kühlmitteln eingesetzt werden.

## Klimarappen und Kompensationspflicht für Treibstoffe

Bei den Beratungen des CO<sub>2</sub>-Gesetzes für die Zeit nach 2012 hat das Parlament die CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Treibstoffe gestrichen. Der Bundesrat hatte aber bereits im Jahr 2005 stattdessen auf den Klimarappen gesetzt, eine privatwirtschaftliche Initiative der Erdölwirtschaft, die Massnahmen im In- und Ausland finanziert. Der Klimarappen wurde mit der Totalrevision im 2013 in eine Kompensationspflicht für die Importeure fossiler Treibstoffe umgewandelt. Die Treibstoffimporteure müssen einen bestimmten Prozentsatz der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr mit Massnahmen im Inland kompensieren. Der zu kompensierende Anteil steigt ab 2013 schrittweise an und beträgt für das Jahr 2020 zehn Prozent. Ein Grossteil der Importeure hat für die Umsetzung der Kompensationspflicht die Stiftung Klimaschutz und CO<sub>2</sub>-Kompensation beauftragt. Den Importeuren steht frei, in welchem Sektor sie die Minderungsleistung erbringen. Sie können eigene Projekte initiieren oder aber auch von Dritten Bescheinigungen erwerben, die der Bund für Emissionsminderungen im Inland ausstellt, sofern diese minimalen Anforderungen genügen und zusätzlich zu ohnehin durchgeführten Massnahmen erzielt werden.

Während die Kompensationspflicht die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs nicht zwingend verringert, weil ein Grossteil der Projekte die Treibhausgase in anderen Sektoren mindert, haben hingegen die im Jahr 2012 eingeführten CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue Personenwagen eine Minderungswirkung. Seit dem Jahr 2015 dürfen neu zugelassene Personenwagen im Durchschnitt noch maximal 130 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer ausstossen. Eine Verschärfung dieser Vorschriften auf 95 Gramm bis ins Jahr 2020 sowie die Einführung von Emissionsvorschriften für Lieferwagen und leichte Sattelschlepper wurden vom Parlament im Rahmen der Energiestrategie 2050 beschlossen.

## Übereinkommen von Paris

Internationale Kooperation in der Klimapolitik (s. a. Kap. 4.5 Internationale Kooperation, S. 205) ist noch wichtiger als bei anderen Umweltproblemen. Die Schweiz mit ihrer sensiblen Gebirgsökologie ist von den Auswirkungen des Klimawandels besonders betroffen. Angesichts ihres geringen Beitrags von 0,1 Prozent an den weltweiten Treibhausgasemissionen ist allerdings klar, dass die Schweiz den Klimawandel nur als Teil der Staatengemeinschaft eindämmen kann. Dank des guten Rufes, den die Schweiz

<sup>2</sup> Halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>)

auf dem internationalen Parkett genießt, kann sie die Entschiede zugunsten einer griffigen Politik beeinflussen und zwischen den unterschiedlichen Interessen vermitteln. Als glaubwürdige Partnerin gilt die Schweiz auch deshalb, weil sie mit gutem Beispiel vorangeht und ihre Verantwortung wahrnimmt. Als kleine und aufgrund ihrer Innovationskraft erfolgreiche Industrienation ist die Schweiz geradezu prädestiniert zu zeigen, dass sich Wohlstand und Klimaschutz vereinbaren lassen. Denn von vielen Schwellen- und Entwicklungsländern wurde Klimapolitik lange als Wachstumsbremse eingestuft. Dass diese Ansicht der Erkenntnis gewichen ist, dass die Klimapolitik für die Wirtschaft auch viele Chancen eröffnet und die Kosten eines ungebremsten Klimawandels die Vermeidungskosten um ein Vielfaches übersteigen, hat den Weg für das Übereinkommen von Paris geebnet.

### Unterscheidung zwischen Industrie- und Entwicklungsländer weitgehend aufgehoben

An der Klimakonferenz in Paris Ende 2015 wurde für die Zeit nach 2020 ein Übereinkommen verabschiedet, das alle Staaten verpflichtet, Minderungsmaßnahmen zu ergreifen. Damit wird die bisherige Unterscheidung zwischen Industrie- und Entwicklungsländern weitgehend aufgehoben. Ziel ist, die durchschnittliche globale Erwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit auf deutlich unter 2 Grad Celsius zu begrenzen, wobei ein maximaler Temperaturanstieg von 1,5 Grad Celsius angestrebt wird. Das Übereinkommen verpflichtet alle Staaten, auf internationaler Ebene alle fünf Jahre ein national festgelegtes Minderungsziel einzureichen und zu erläutern. Die Zielerreichung bleibt lediglich politisch verbindlich. Die Umsetzung nationaler Massnahmen sowie die Berichterstattung über die Zielerreichung und deren internationale Überprüfung sind aber rechtlich verbindlich. Die Regeln für die Umsetzung des Abkommens werden in den nächsten Jahren verfeinert.

Ausländische Emissionsminderungen sind zur Zielerreichung zugelassen, soweit sie umweltinteger sind, zur nachhaltigen Entwicklung beitragen und keine Doppelanrechnungen vorkommen. Dies gilt für die Marktmechanismen im Rahmen der Klimakonvention sowie für Ansätze ausserhalb der Konvention (z. B. plurilaterale oder bilaterale Vereinbarungen). Des Weiteren etabliert das Abkommen einen neuen, multilateralen Mechanismus, der bis 2020 operationalisiert werden soll.

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu bewältigen, sollen alle Staaten Anpassungspläne ausarbeiten und über die ergriffenen Massnahmen Bericht erstatten. Auch in Bezug auf die Finanzierung wurde die vormalige Zweiteilung des globalen Klimaregimes in Industrie-

und Entwicklungsländer deutlich aufgebrochen. Die Mobilisierung von Investitionen aus öffentlichen sowie aus privaten Quellen ist Aufgabe Aller. Die Industrieländer sollen aber weiterhin eine Vorreiterrolle einnehmen. Das angestrebte gemeinsame Ziel der Industrieländer, ab 2020 jährlich 100 Milliarden US-Dollar an Finanzmitteln aus öffentlichen und privaten Quellen zu mobilisieren, wurde in Paris bestätigt. Das Übereinkommen von Paris hat auch zum Ziel, die Finanzflüsse klimafreundlich auszurichten. Den Akteuren auf dem Finanzmarkt (Staat, Banken, Versicherungen, Pensionskassen, private Haushalte usw.) kommt daher eine wichtige Rolle zu.

### Ausblick auf die Zeit nach 2020

In Vorbereitung auf das Übereinkommen von Paris hatte der Bundesrat im November 2014 Minderungsziele für die Zeit nach 2020 beschlossen. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen der Schweiz um gesamthaft 50 Prozent unter das Niveau von 1990 sinken: um 30 Prozent im Inland und um 20 Prozent im Ausland. Als ersten Vorschlag verfolgt der Bundesrat bis 2050 eine Absenkung in der Bandbreite von 70 bis 85 Prozent. Dies bedingt, dass Gebäude- und Verkehrssektor nahezu CO<sub>2</sub>-frei werden.

Für die nächste Etappe der Klimapolitik bis 2030 muss das CO<sub>2</sub>-Gesetz wiederum revidiert werden, um Ziele und Massnahmen rechtlich zu verankern. Der bewährte Instrumentenmix soll nach dem Willen des Bundesrates weitergeführt und einzelne Massnahmen punktuell ausgebaut werden. Im Einklang mit dem Energie- und Lenkungs-system (KELS), mit dem der Bundesrat die zweite Etappe der Energiestrategie 2050 beschreiten will, sollen die Teilzweckbindungen der CO<sub>2</sub>-Abgabe für Gebäudeprogramm und Technologiefonds aufgehoben werden. Statt einer Förderung sollen im Gebäudebereich vermehrt CO<sub>2</sub>-Vorschriften greifen.

### Referenzen

- BAFU (2014a) **Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz und Kyoto-Protokoll**. Letzte Aktualisierung: 10.04.2014. [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)
- BAFU (2014b) **Schweizer Klimapolitik auf einen Blick. Stand und Perspektiven auf Grundlage des Berichts 2014 der Schweiz an das UNO-Klimasekretariat**. Bundesamt für Umwelt, Bern, 24 pp.
- BAFU (2015) **Kohlenstoffrisiken für den Finanzplatz Schweiz**. Zürich/Vaduz, 23. Oktober 2015. [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)
- Frischknecht R, Nathani C, Büsser Knöpfel S, Itten R, Wyss F, Hellmüller P (2014) **Entwicklung der weltweiten Umweltauswirkungen der Schweiz**. Umweltbelastung von Konsum und Produktion von 1996 bis 2011. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1413, 120 pp.

## 4.3 Entstehung und Entwicklung einer Klimapolitik

Schweizer Politikwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler haben den politischen Entscheidungsprozess zum CO<sub>2</sub>-Gesetz analysiert. Die Ergebnisse geben einen Einblick, wie sich die Konstellationen der an der Schweizer Minderungspolitik beteiligten Akteure zwischen 1995 und 2012 entwickelt haben. Im Laufe des Prozesses haben sich zwei verschiedene Koalitionen entwickelt, eine Pro-Wirtschaft-Koalition mit Vertretern der Wirtschaft und von Mitte-Rechts-Parteien und einer Pro-Umwelt-Koalition mit Vertretern von linken Parteien, Konsumentenschützern, Gewerkschaften und Umweltverbänden. Dass trotz zeitweise verhärteter Fronten eine Kompromisslösung gefunden wurde, ist nicht zuletzt der Verdienst wichtiger Vertreter der politischen Elite, die sich weder in der einen, noch in der anderen ideologischen Koalition ansiedelten und sich für den Kompromiss stark machten. Dies alles zeigt, dass die Schweizer Politik im Bereich der Klimaminderung kein geplanter Prozess war. Gesetzte Politikziele und eingeführte Politikinstrumente waren immer das Resultat von Verhandlungen zwischen verschiedenen Akteuren und Akteursgruppen mit unterschiedlichen Ideologien und Präferenzen.

*Karin Ingold (Universität Bern)*

Anhand von drei aufeinanderfolgenden Studien (siehe Rohrer 2012; Sutter 2012; Ingold 2008, 2011) wurde der politische Entscheidungsprozess des CO<sub>2</sub>-Gesetzes (SR 641.71) analysiert und über die Zeit gewürdigt. Konkret wurden in drei Umfragen<sup>1</sup> Akteure der politischen Elite zu ihrer Zusammenarbeit und Koordination im Rahmen der Einführung, Revision und Verlängerung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes befragt. Die erste Periode des CO<sub>2</sub>-Gesetzes von 1995–2000 umfasste die Verhandlungen über die Gestaltung des Gesetzes, die zweite Periode von 2002–2005 die Verhandlungen rund um die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe und des Klimarappens und die letzte Periode von 2010–2012 schliesslich die Weiterführung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes sowie dessen Implementation. Diese Analysen bieten damit einen einmaligen Einblick und systematischen Vergleich, wie sich die Akteurskonstellationen in der Schweizer Minderungspolitik zwischen 1995 und 2012 entwickelt haben.

Die politische Elite wurde anhand einer Kombination von drei in der Politikwissenschaft etablierten Ansätzen identifiziert (Knoke et al. 1996). Alle drei Ansätze folgen praktisch ausschliesslich der Annahme, dass nur kollektive Akteure – also Organisationen und nicht Individuen – über genügend Ressourcen verfügen, um die Ausgestaltung eines Gesetzes oder die Revision eines Textes entscheidend mitzuprägen (Knoke 1993). Deshalb besteht auch die klimapolitische Elite der Schweiz aus kollektiven Akteuren wie Wirtschaftsverbänden, Parteien, Bundesämtern und Departementssekretariaten, Kommissionen des Parlaments, Wissenschaftsinstituten oder auch Gewerkschaften. Damit die drei Studien miteinander ver-

glichen werden konnten, wurden 34 identische Akteure für diese Analyse berücksichtigt (Tab. 4.1).<sup>2</sup>

### Entwicklung der Zusammenarbeit

Die Vertreter der 34 Organisationen erhielten eine Liste wie in Tabelle 4.1 dargestellt. Sie wurden aufgefordert, uns anzugeben, mit welchen anderen Organisationen dieser Liste sie in enger Zusammenarbeit stünden, wenn es um die Ausgestaltung, Revision, oder die Verlängerung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes in der Schweiz ginge.

Wie in Tabelle 4.2 dargestellt, nimmt die Zusammenarbeit von der Einführung der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung (Periode t1, 1995–2000) zur ersten Revision im Jahr 2005 (Periode t2, 2002–2005) zu, danach wieder ab (Periode t3, 2010–2012): Die Dichte zeigt uns an, wie viele Zusammenarbeitsverbindungen beobachtet wurden, verglichen mit allen möglichen Verbindungen in diesem Netzwerk von 34 Akteuren. Es ist interessant zu sehen, dass zwischen der Einführung und der ersten Revision viele Verbindungen aufgebaut wurden, die zwischen der zweiten Periode (2002–2005) und der dritten Periode (2010–2012) sogleich wieder abgebaut wurden. Diese Entwicklung lässt zwei Dinge vermuten: Erstens, dass die erste Revision der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung während Periode t2 und um das Jahr 2005 die Aufmerksamkeit vieler Akteure der politischen Elite weckte. Typischerweise nehmen die Zusammenarbeit und Interaktion in einem politischen Prozess zu, wenn unterschiedliche Organisationen ihre

<sup>1</sup> Sutter (2012) stützte sich bei der Erhebung auf «Belief Daten», also Einstellungen der Akteure zu klimapolitischen Geschäften, Ingold (2008) und teilweise auf kodierte Daten der nationalen Vernehmlassung.

<sup>2</sup> Nach 2010 sind neue Akteure hinzugekommen, wie zum Beispiel die Grünliberale Partei, die in diesem Artikel aber ignoriert werden, damit wir die gleiche Anzahl Akteure miteinander vergleichen können. Auch gibt es Akteure, die in der Zwischenzeit ihren Namen geändert haben, wie der Wirtschaftsverband SGCI Chemie Pharma Schweiz, heute scienceindustries. Es werden hier die Namen beibehalten, die zurzeit der Durchführung von mindestens zwei der drei Studien aktuell waren.

<b>Wirtschaftsverbände</b>
1. economiesuisse
2. SGCI Schweizerische Gesellschaft für Chemische Industrie
3. Swissemem
4. Cemsuisse
5. HEV Hauseigentümerverband
6. OEBU Schweizerische Vereinigung für ökologisch bewusste Unternehmensführung
<b>Transportbranche</b>
7. TCS Touring Club Schweiz
8. VCS Verkehrsclub Schweiz
9. FRS Schweizerischer Strassenverkehrsverband
<b>Dachorganisationen</b>
10. SGB Schweizerischer Gewerkschaftsbund
11. Travail Suisse Dachorganisation der Arbeitnehmer
<b>Energiebranche</b>
12. EnAW Energie-Agentur der Wirtschaft
13. AEE Agentur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
14. EV Erdöl-Vereinigung
15. Energieforum
<b>Parteien</b>
16. CVP Christlichdemokratische Volkspartei
17. FDP Die Liberalen (ehem. Freisinnig-Demokratische Partei)
18. SPS Sozialdemokratische Partei der Schweiz
19. SVP Schweizerische Volkspartei
20. GPS Grüne Partei der Schweiz
<b>Wissenschaft</b>
21. INFRAS
22. Prognos
23. Faktor AG
24. ProClim – Forum für Klima und globale Umweltveränderungen der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
25. OcCC – Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung
26. NCCR Climate
<b>Umweltorganisationen</b>
27. Greenpeace
28. WWF
29. Equiterre
<b>Verwaltung</b>
30. BAFU Bundesamt für Umwelt (vormals BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft)
31. BFE Bundesamt für Energie
32. SECO Staatssekretariat für Wirtschaft
33. UVEK Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
34. EFV Eidgenössische Finanzverwaltung

Tabelle 4.1: Elite der Schweizer Klimapolitik (Quelle: Angepasst von Ingold 2008; 2011; 2014)

Interessen und Ideologien in der Politik widergespiegelt sehen möchten. Je mehr Organisationen ihre Wertssysteme durch ein neues Gesetz oder eine Revision bedroht sehen oder je weniger ein Akteur über eigene Entscheidungskompetenz (*voting power*) verfügt, desto mehr ist die Organisation oder der Akteur auf Zusammenarbeit mit anderen angewiesen (Ingold et al. 2016; Stokman und Zeggelink 1996). Zweitens scheint auch die Abnahme der Zusammenarbeit in der dritten Periode (2010–2012) damit erklärbar zu sein, dass allgemein die Aktivität der politischen Elite in Netzwerken abnimmt, je näher man dem Vollzug kommt (Torenvirled & Thomson 2003). Gerade Akteure wie Interessensgruppen oder Wirtschaftsverbände sind dann weniger in die Umsetzung einer Politik involviert (Ingold & Fischer 2014).

## Ideologische Koalitionen

Schon Lehmann und Rieder (1999), später dann auch die hier zitierten Autoren (Rohrer 2012; Sutter 2012; Ingold 2008) konnten die Akteure der politischen Elite zwei prägenden Koalitionen der Schweizer Klimapolitik zuteilen: einer Pro-Wirtschaft-Koalition mit Vertretern der Wirtschaft und von Mitte-Rechts-Parteien und einer Pro-Umwelt-Koalition mit Vertretern von linken Parteien, Konsumentenschützern, Gewerkschaften und Umweltverbänden. Dies zeigt, dass die Schweizer Klimaminderung zu keinem Zeitpunkt ein geplanter Prozess war, sondern gesetzte Politikziele und eingeführte Politikinstrumente immer das Resultat waren von Verhandlungen zwischen verschiedenen Akteuren und Akteursgruppen mit unterschiedlichen Ideologien und Präferenzen. Dabei ist die Schweizer Klimapolitik keineswegs eine Ausnahme, wie verschiedene Studien zu unterschiedlichen Politikprozessen zeigen.<sup>3</sup>

Auch wenn diese beiden ideologisch entgegengesetzten Koalitionen über die Zeit stabil scheinen, so sind doch einige Details erwähnenswert. Erstens haben die Analysen gezeigt, dass der Konflikt zwischen den beiden Koalitionen in der zweiten Periode (2002–2005) am grössten war. Die Umfrage der politischen Elite (Ingold 2011) und die Kodierung der Vernehmlassungsantworten (Ingold 2008) zeigen, dass bei der Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes zwischen 2002 und 2005 die Fronten zwischen den Koalitionen verhärtet waren. Die Pro-Umwelt Koalition wollte unbedingt die Realisierung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe wie im Gesetz festgeschrieben – und dies sowohl auf Brennstoffen als auf Treibstoffen –, währenddessen die Vertreter der Pro-Wirtschaftskoalition eine CO<sub>2</sub>-Abgabe vermeiden

<sup>3</sup> Siehe Sciarini und Fischer (2013; 2015), welche die elf wichtigsten politischen Geschäfte und Felder der Schweiz im 21. Jahrhundert vergleichen; siehe auch Kriesi und Jegen (2001), die ähnlich wie hier 30 Jahre der Schweizer Energiepolitik analysieren.

Dichte im Zusammenarbeitsnetzwerk			
Beobachtungsperiode	t1 (1995–2000)	t2 (2002–2005)	t3 (2010–2012)
Dichte	0,08	0,18	0,10

Veränderungen über die Zeit					
Intervall	Total	0 → 0	0 → 1	1 → 0	1 → 1
t1-t2	1156	931	133	18	74
	100%	81%	12%	2%	6%
t2-t3	961	738	30	131	62
	100%	77%	3%	14%	6%

0 = keine Verbindung, 1 = eine Zusammenarbeitsverbindung

Tabelle 4.2: Entwicklung der Zusammenarbeit über die Zeit. (Quelle: Eigene Darstellung)

wollten und sich für den Klimarappen einsetzten, allen voran die Erdölimporteure und die Transportwirtschaft. Letztendlich entschied sich der Bundesrat für eine Kombination zwischen CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Brennstoffen und einem Klimarappen auf Treibstoffen. Dieser Kompromiss kam nicht zuletzt zustande, da wichtige Vertreter der politischen Elite sich weder in der einen, noch in der anderen ideologischen Koalition ansiedelten und sich für diese Kompromisslösung stark machten (siehe Ingold und Varone [2012] und die Diskussion der Rolle des Bundesamts für Energie [BFE] sowie der Christlichdemokratische Volkspartei [CVP]).

Des Weiteren muss festgehalten werden, dass sogar während dieser zweiten Periode (2002–2005) die Zusammenarbeit auch zwischen den Koalitionen bestand. Zwar war die Zusammenarbeit der Akteure innerhalb ihrer Koalition grösser, die Zusammenarbeitsverbindungen zu Mitgliedern der anderen Koalition aber immer noch beträchtlich. Das scheint ein typisches Phänomen der Schweizer Klimaminderungspolitik zu sein. Schon in der ersten Periode (1995–2000) hat das Bundesamt für Umwelt (BAFU, damals BUWAL) eng mit den Vertretern der Wirtschaft und auch der Wissenschaft für die Ausarbeitung des Gesetzes zusammengearbeitet (Ingold 2008). Die Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) ist denn auch Vertreterin grosser Teile der Wirtschaft und Partnerin der Verwaltung in der Umsetzung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes.

## Zentrale Akteure

Anhand von Zentralitätsmassen im Zusammenarbeitsnetzwerk kann man eruieren, welche Organisationen besonders aktiv waren oder sich auf besonders strategischen

Positionen im Netzwerk befanden.<sup>4</sup> Innerhalb der Pro-Umwelt-Koalition war der WWF über die ganze Zeit der zentralste Akteur: Er war einer der leitenden Akteure in der Klima-Allianz, hat aber auch die Zusammenarbeit zu Akteuren ausserhalb der eigenen Allianz und Koalition gesucht.

Innerhalb der Pro-Wirtschaft-Koalition war über die ganze Zeit vor allem Economiesuisse als ein Dachverband der Schweizer Wirtschaft gemeinsam mit der EnAW zentral und aktiv. In der zweiten Periode und als es um die Verhandlungen rund um die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe ging, wurde auch

die Erdölvereinigung sehr aktiv und wichtig in diesem Prozess: Es war die Erdölvereinigung, die – erst alleine, später vor allem zusammen mit TCS und Economiesuisse – den Klimarappen als Alternative für die CO<sub>2</sub>-Abgabe (vor allem auf Treibstoffen) vorschlug. Der Vorschlag beschränkte sich nicht auf ein einfaches Bekenntnis für den Klimarappen, sondern bedeutete eine starke Aktivität dieses Akteurs mit anderen Gleichgesinnten, aber auch gegenüber Vertretern der Bundesverwaltung und der Umweltkoalition.

Schlussendlich, und wie oben erwähnt, entschied sich der Bundesrat im Jahr 2005 für einen Kompromiss, der nicht zuletzt beeinflusst wurde von zentralen Akteuren wie der CVP, dem BFE und Wissenschaftsvertretern (v.a. aus NCCR Climate, ProClim, OCCC), die sich meist strategisch zwischen den Mitgliedern der beiden Koalitionen platzierten.

In der dritten und letzten Phase zwischen 2010 und 2012 haben sich viele aktive und zentrale Akteure der ersten beiden Phasen etwas zurückgezogen. Die Masterarbeit von Rohrer (2012) kommt zum Schluss, dass vor allem Bundesvertreter wie UVEK, BAFU und BFE noch aktiv waren. Die Rolle des BAFU ist nicht nur im Schweizer, sondern auch im internationalen Kontext relevant: Dieses Bundesamt stellt nicht nur die konkrete Umsetzung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes sicher, sondern koordiniert auch die Kohärenz zwischen internationalen Abkommen und Entscheiden und nationaler Über- und Umsetzung (s.a. Ingold & Pflieger [2016]).

<sup>4</sup> Wir beziehen uns hier vor allem auf die «Betweenness-Zentralität» (Freeman 1979), die aussagt, wie oft sich ein Akteur zwischen zwei anderen Akteuren befindet, die ihrerseits jedoch nicht verbunden sind. Akteure mit hoher Betweenness-Zentralität halten das Netzwerk zusammen und können Kontrolle über Verbindungen ausüben.

## Referenzen

- Fischer M, Sciarini P (2013) **Europeanization and the inclusive strategies of executive actors.** *Journal of European Public Policy* 20: 1482–1498.
- Ingold K (2008) **Les mécanismes de décision – Le cas de la politique climatique Suisse.** Politikanalysen, Rüegger Verlag, Zürich.
- Ingold K (2011) **Network Structures within Policy Processes: Coalitions, Power, and Brokerage in Swiss Climate Policy.** *Policy Studies Journal* 39: 435–459.
- Ingold K, Varone F (2012) **Treating Policy Brokers Seriously: Evidence from the Climate Policy.** *Journal of Public Administration Research and Theory* 22: 319–346.
- Ingold K, Fischer M (2014) **Drivers of collaboration to mitigate climate change: An illustration of Swiss climate policy over 15 years.** *Global Environmental Change* 24: 88–98.
- Ingold K, Pflieger G (2016) **Two levels, two strategies: explaining the gap between Swiss national and international responses towards Climate Change.** *Environmental Policy Analysis Journal* 2: 20–38.
- Ingold K, Fischer M, Cairney P (2016) **Drivers for policy agreement in nascent subsystems: An Application of the Advocacy Coalition Framework to Fracking policy in Switzerland and the UK.** Submitted to *Policy Studies Journal*.
- Knoke D (1993) **Networks of elite structure and decision making.** *Sociological Methods & Research* 22: 22–45.
- Knoke D, Pappi FU, Broadbent J, Tsujinaka Y (1996) **Comparing policy networks: Labor politics in the US, Germany, and Japan.** Cambridge University Press, Cambridge.
- Kriesi H-P, Jegen M (2001) **The Swiss energy policy elite: The actor constellation of a policy domain in transition.** *European Journal of Political Research* 39: 251–287.
- Lehmann L, Rieder S (2002) **Wissenschaftliches Wissen in politischer Auseinandersetzung: Fallstudie zur Genese des CO<sub>2</sub>-Gesetzes im Auftrag der Arbeitsgruppe Transdisziplinarität der Energiekommission der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW).** SATW Bericht 34. SATW, Zürich.
- Rohrer D (2012) **Die Rolle des Policy Netzwerks in der Schweizer Klimapolitik.** Master Thesis. IDHEAP Lausanne, Université de Lausanne, Universität Bern.
- Sciarini P, Fischer M, Traber D (2015) **Political Decision-Making in Switzerland.** *The Consensus Model under Pressure.* Palgrave.
- Stokman FN, Zeggelink E (1996) **Is politics power or policy oriented? A comparative analysis of dynamic access models in policy networks.** *Journal of Mathematical Sociology* 21: 77–111.
- Sutter A (2012) **Schweizer Klimapolitik nach 2012.** Master Thesis. ETH Zürich.
- Torenvlied R, Thomson R (2003) **Is implementation distinct from political bargaining?** *Rationality and Society* 15: 64–84.

## 4.4 Klimapolitik weltweit: Erfahrungen mit klimapolitischen Massnahmen

Klimaschutz erfordert zwingend internationale Zusammenarbeit. Deren Bilanz fällt bisher gemischt aus. Einerseits haben internationale und nationale Klimaschutzpolitiken den globalen Anstieg der Treibhausgasemissionen in den letzten 20 Jahren nicht signifikant bremsen können. Andererseits haben Emissionsabgaben und Regulierungen, begleitet durch technischen Fortschritt, in einer Reihe von Ländern, vor allem in Skandinavien, zu einem erheblichen Emissionsrückgang geführt, ohne die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit zu schwächen. Kooperation ausserhalb der UN-Klimarahmenkonvention hat bisher keine weltweit sichtbaren Effekte gezeigt, während die Marktmechanismen des Kyoto-Protokolls tausende von Emissionsminderungsprojekten weltweit mobilisiert haben.

*Axel Michaelowa (Universität Zürich)*

Die Minderung des Klimawandels ist ein Beitrag an ein globales öffentliches Gut. Es ist für das Klima egal, wo eine Verringerung der Treibhausgasemissionen stattfindet. Einerseits ermöglicht dies, die weltweit kostengünstigsten Möglichkeiten der Emissionsverringerung auszuwählen, andererseits entsteht ein Anreiz für Trittbrettfahrerverhalten, da man von den Investitionen anderer profitiert. Im schlimmsten Fall tut niemand etwas. Daher ist internationale Kooperation eine unabdingbare Voraussetzung für einen wirksamen Klimaschutz. Seit 20 Jahren besteht mit der UN-Klimarahmenkonvention ein Gerüst für diese Zusammenarbeit, die in vielen Ländern als Katalysator für die Einführung nationaler Klimapolitikinstrumente gewirkt hat. Es ist daher möglich zu beurteilen, unter welchen Umständen internationale und nationale Instrumente zur Treibhausgasreduzierung erfolgreich eingesetzt werden können.

### UN-Klimakonvention und Kyoto-Protokoll – trotz einzelner Schwächen erfolgreich

In der öffentlichen Debatte entsteht oft der Eindruck, dass die internationale Klimaschutzpolitik gescheitert sei. Dies geht mit Forderungen einher, dass der UN-Klimaverhandlungsprozess eingestellt werden solle und die internationale Klimapolitik durch «Clubs» einflussreicher Staaten zu gestalten sei. Diesen Forderungen, die aus spieltheoretischen Überlegungen<sup>1</sup> abgeleitet werden, fehlt weitgehend eine empirische Basis. Das UN-Klimaregime geniesst trotz der schwierigen Verhandlungsphase seit dem Scheitern der Konferenz von Kopenhagen 2009 weiterhin eine grosse Anerkennung, was sich auch daran zeigt, dass es der Pariser Vertragsstaatenkonferenz 2015 gelang, mit dem Übereinkommen von Paris alle Staaten in Minderungsverpflichtungen einzubinden. Im Bereich des

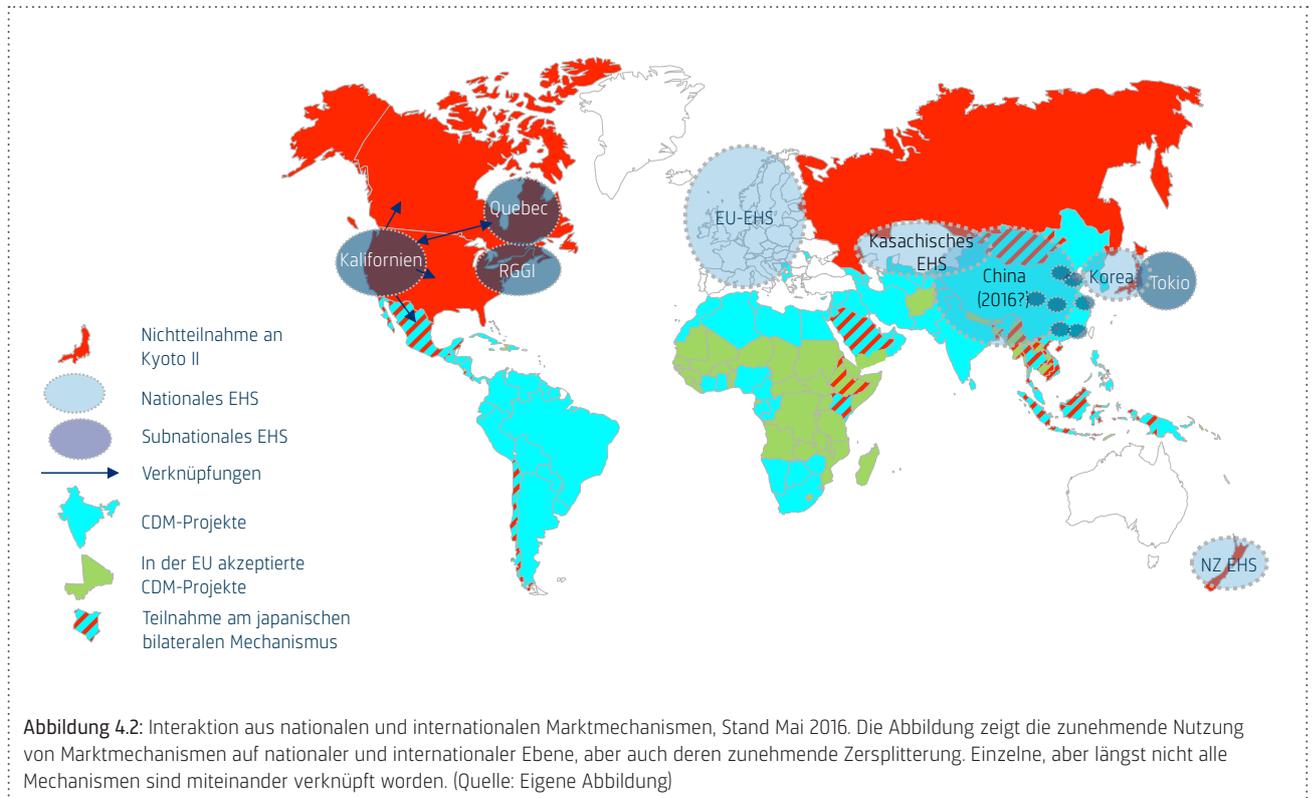
Klimaschutzes haben internationale Kooperationsversuche ausserhalb dieses Regimes bislang keine signifikante Wirkung gehabt. Die einzige Ausnahme ist das Montrealer Protokoll zur Minderung ozonzerstörender Substanzen, das – als Nebeneffekt – zu einer starken Verringerung von hochpotenten Treibhausgasen führte.

Die Emissionsziele des 1997 verabschiedeten und 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Protokolls wurden in der Verpflichtungsperiode 2008–2012 übererfüllt. Dabei profitierten die Industrieländer – die einzigen Länder mit einem verpflichtenden Emissionsziel –, allerdings von der Emissionsminderung, die durch den Zusammenbruch der Schwerindustrie in den Transformationsländern Osteuropas und der ehemaligen Sowjetunion quasi kostenlos erfolgte, und die bei der Festlegung der Emissionsziele für diese Länder in Kyoto nicht hinreichend berücksichtigt worden war. Da das Kyoto-Protokoll in der Verpflichtungsperiode 2013–2020 nur noch einen geringen Teil der globalen Emissionen abdeckt, wird seine Wirkung deutlich zurückgehen.

### Milliarden an Emissionsgutschriften – die Marktmechanismen des Kyoto-Protokolls

Die innovativsten Elemente des Kyoto-Protokolls sind seine internationalen Marktmechanismen. Sie ermöglichen den Industrieländern mit einer Zielverpflichtung den Ankauf von Emissionsminderungszertifikaten aus dem Ausland. Der Mechanismus für eine umweltverträgliche Entwicklung (CDM) hat seit 2005 über 7500 Emissionsminderungsprojekte in über 90 Entwicklungsländern in Gang gesetzt; weit mehr als ursprünglich erwartet. Diese Projekte haben über 1,7 Milliarden Emissionszertifikate erzeugt. Gleichzeitig hat sich eine spezialisierte Branche an Beratungsunternehmen, Projektentwicklern und Finanzdienstleistern herausgebildet. Bei der Umsetzung des CDM kam es allerdings zu Problemen bei der Bestimmung

<sup>1</sup> In der Spieltheorie werden Akteure abgebildet, die ihr Eigeninteresse verfolgen und strategisch handeln, um ihren Nutzen zu maximieren



der Referenzentwicklung der Emissionen im «Business as usual»-Fall, die zur Berechnung der Emissionsminderung unerlässlich sind. So kam es anfänglich zu Mitnahmeeffekten, da Projekte zugelassen wurden, die auch ohne die Einnahmen aus dem Verkauf der Zertifikate umgesetzt worden wären. Jedoch gelang es den Regulierern des CDM, auf diese Herausforderungen zu reagieren und die Umweltintegrität des Mechanismus zu verbessern. Die Nachfrage nach Zertifikaten hat nach 2012 abgenommen; zum einen weil die Industrieländer sich wenig anspruchsvolle Emissionsziele gesetzt haben, zum andern wegen der Einführung von Beschränkungen des Zertifikatsimports durch viele Industrieländer. Diese Handelsbarrieren wurden offiziell mit Zweifeln über die Umweltintegrität der CDM-Zertifikate begründet, waren aber auch im Interesse heimischer Anbieter von Minderungstechniken. In Folge sind die Zertifikatspreise von über 15 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> auf wenige Rappen gefallen, was zu einer Abwanderung aus der Branche und einem abrupten Zusammenbruch der Projektentwicklung geführt hat.

Wegen institutioneller Probleme und des Überhangs an Zertifikaten in den Transformationsländern blieben die anderen beiden Mechanismen «Gemeinsame Umsetzung» (JI) und «Internationaler Emissionshandel» (IET) deutlich hinter dem CDM zurück.

## Klimapolitiken auf Länderebene – Abdeckung nimmt zu, Wirkung lässt auf sich warten

Vor dem Hintergrund der Entwicklung der internationalen Klimapolitik, vor allem des Kyoto-Protokolls, befassten sich nationale Regierungen zunehmend mit der Ausarbeitung nationaler Klimaschutzstrategien. Daher sind nationale Emissionsminderungspolitiken weltweit auf dem Vormarsch. Während 2007 nur 45 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen durch Klimaschutzpolitiken abgedeckt waren, waren es 2012 bereits 67 Prozent. Das ist vor allem auf Fortschritte in den grossen asiatischen Schwellenländern sowie in Lateinamerika zurückzuführen. Allerdings sind auf globaler Ebene bisher keine durchgreifenden Wirkungen dieser Politiken feststellbar. Während in den 1990er-Jahren die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2,5 Milliarden Tonnen zunahmen, stiegen sie in den 2000er-Jahren um fast das Dreifache, nämlich um 6,8 Milliarden Tonnen. Noch problematischer ist, dass die Kohlenstoffintensität<sup>2</sup> der Energiebereitstellung in den 2000er-Jahren wieder zunahm, während sie in den vorherigen Jahrzehnten gleichmässig zurückgegangen war. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in wichtigen Ländern der Anteil der Kohle an der Stromerzeugung deutlich ange-

<sup>2</sup> CO<sub>2</sub>-Emission pro Energieeinheit

stiegen ist, während die Anteile des vergleichsweise klimafreundlichen Erdgases sowie der Atomenergie rückläufig sind.

Aufgrund des erwähnten Problems des Trittbrettfahrens sind nationale Klimaschutzpolitiken vor allem dann attraktiv, wenn sie über die Emissionsminderung hinaus Zusatznutzen mit sich bringen. Dabei kann je nach Situation die Verringerung lokaler Umweltverschmutzung, die Erhöhung der Energiesicherheit oder die Förderung industriepolitischer Ziele im Vordergrund stehen und sogar einen Alleingang begünstigen/rechtfertigen. Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2014/WGIII/Chap.15) wurden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Erfahrung mit den unterschiedlichen nationalen Minderungspolitikinstrumenten – Regulierungen, Emissionsabgaben und Emissionshandelssysteme – hinsichtlich ihrer Effektivität, Effizienz und politischen Durchsetzbarkeit zusammengefasst. Die Wirkung der Instrumente auf die technische Innovation ist noch unklar.

## Direkte Regulierungen

Die bei Ökonomen bisher generell verpönten direkten Regulierungen werden inzwischen unter bestimmten Bedingungen als sehr wirksam und gleichzeitig kostengünstig eingestuft. Dies gilt vor allem, wenn nicht-monetäre Barrieren verhindern, dass Emittenten auf ökonomische Instrumente reagieren. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Informationskosten hoch sind und es problematische Anreizstrukturen gibt. Ein klassisches Beispiel ist hier das Eigner-Nutzer-Dilemma im Gebäudebereich: Der Gebäudebesitzer kann die Energiekosten auf die Mieter überwälzen, so dass er keinen Anreiz hat, in langfristige Energieeinsparungen zu investieren. Direkte Regulierungen sind vor allem effektiv für verstreute Emissionsquellen und Haushalte. Ein erfolgreiches Beispiel hierfür sind Effizienzstandards für Gebäude und Haushaltsgeräte, die in vielen Ländern zu erheblichen Emissionsminderungen geführt haben.

## Emissionsabgaben

Emissionsabgaben existieren seit 20 Jahren in einem Dutzend Ländern – vor allem in Skandinavien; in etwa der Hälfte dieser Länder kam es zu regelmässigen Erhöhungen der Abgabesätze. Generell haben die Abgaben zu signifikanten Emissionsminderungen geführt, während negative Wirkungen auf die industrielle Wettbewerbsfähigkeit bisher ausgeblieben sind. Hier ist allerdings zu betonen, dass die Industrie in den meisten Ländern nicht voll besteuert oder gar ausgenommen wird. Ein Vorteil von Abgaben ist, dass es zu keinen problematischen Wechselwir-

kungen mit anderen Politikinstrumenten kommt, wie dies beim Emissionshandel der Fall ist.

## Emissionshandelssysteme

Seit zehn Jahren sind vielerorts Emissionshandelssysteme eingeführt worden. Diese leiden grundsätzlich unter zu laxen Emissionsobergrenzen. Das liegt am Druck von gut organisierten Emittentenlobbys auf die politischen Entscheidungsträger. Im Regelfall kam es nach Bekanntwerden des Überhangs an Emissionszertifikaten zu einem raschen Preisverfall, der zeigt, dass der Markt auf Knappheitssignale reagiert. Vor allem in der EU ist der Preisrückgang auch auf Effekte anderer Politikmassnahmen zurückzuführen, welche die Nachfrage nach Zertifikaten drosseln – wie beispielsweise die Subventionierung erneuerbarer Energien, die zum Rückgang des Verbrauchs an fossilen Ressourcen führte.

Die Erfahrungen bei der Umsetzung nationaler Klimapolitikinstrumente weltweit können bei der Weiterentwicklung des Schweizer Instrumentariums eingebracht werden. Insgesamt zeichnet sich ab, dass eine auf einen möglichst hohen Anteil der nationalen Treibhausgasemissionen erhobene Emissionsabgabe sowie der Ankauf von Minderungszertifikaten aus Marktmechanismen im Ausland zumindest mittelfristig die wirksamste Instrumentenkombination darstellen.

## Referenzen

- Bruvoll A, Larsen M (2004) **Greenhouse gas emissions in Norway: do carbon taxes work?** *Energy Policy* 32: 493–505.
- Elzen den M, Hof A, Roelfsema M (2011) **The emissions gap between the Copenhagen pledges and the 2°C climate goal: Options for closing and risks that could widen the gap.** *Global Environmental Change* 21: 733–743.
- Fankhauser S, Hepburn C, Park J (2011) **Combining multiple climate policy instruments: how not to do it.** *Climate Change Economics* 1: 209–225.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Löfgren A, Wråke M, Hagberg T, Roth S (2014) **Why the EU ETS needs reforming: an empirical analysis of the impact on company investments.** *Climate Policy* 14: 537–558.
- Michaelowa A, Buen J (2012) **The CDM gold rush.** In: Michaelowa, Axel (ed.): *Carbon markets or climate finance?* Routledge, Abingdon: 1–38.

## 4.5 Internationale Kooperation

Der Klimawandel ist ein globales Problem und der Klimaschutz ein Beitrag zu einem öffentlichen Gut. Die Emissionsminderungen eines Landes haben für das Land selbst einen wirtschaftlichen Preis, während vom entsprechenden Nutzen getroffener Massnahmen alle Länder profitieren. Sollen die globalen Treibhausgasemissionen und die Auswirkungen des Klimawandels bedeutend vermindert werden, ist deshalb eine internationale Zusammenarbeit von Staaten und Nichtregierungsorganisationen unabdingbar. Die Möglichkeit, ohne Eigenleistungen von anderen zu profitieren, beinhaltet indessen die Versuchung des Trittbrettfahrens. Sie erschwert die internationale Zusammenarbeit erheblich, zumal sich Schwellenländer auf den Standpunkt stellen, dass die historische Hauptverantwortung bei den Industriestaaten liege. Charakteristisch für die heutige internationale Zusammenarbeit sind eine zunehmende Hinwendung zu unilateralen Massnahmen, eine institutionelle Vielfalt, die Aufweichung von internationalen Verpflichtungen und die sich verändernde Unterscheidung zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern. Das zeigt sich mitunter in der unilateralen Anwendung innovativer Politikinstrumente, die bisweilen Gegenstand von gerichtlichen Auseinandersetzungen im Rahmen der WTO sind sowie in der zunehmenden Bedeutung lokaler und nichtstaatlicher Akteure.

*Thomas Cottier (Universität Bern), Kateryna Holzer (Universität Bern)*

### Die institutionelle Vielfalt der internationalen Kooperation

Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2014/WGIII) wird die institutionelle Vielfalt der internationalen Zusammenarbeit im Bereich des Klimawandels hervorgehoben. Diese Vielfalt geht teilweise zurück auf die zunehmende Befassung mit Fragen der Klimapolitik auch in anderen Foren und Regelungsbereichen, zum Beispiel in der nachhaltigen Entwicklung, im internationalen Handel und im Bereich der Menschenrechte. Verknüpfungen zwischen verschiedenen internationalen Foren reflektieren die Natur des Klimawandels als ein Querschnittsproblem über die Regelungen der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) hinaus. Solche Verknüpfungen haben positive und negative Seiten. Negativ zu werten sind damit verbundene Probleme der Kohärenz, wie Kompetenzkonflikte, Forum Shopping<sup>1</sup> oder erhöhte Verhandlungskosten, welche die Erreichung und Umsetzung klimapolitischer Ziele erschweren.

Bestehende und vorgeschlagene Vereinbarungen über die internationale Zusammenarbeit im Bereich des Klimawandels unterscheiden sich in ihrem Schwerpunkt, im Zentralisierungsgrad und in der gesetzlichen Verbindlichkeit. Die Vereinbarungen umfassen multilaterale Abkommen und die Harmonisierung nationaler und regionaler Politiken. Sie befassen sich mit der Minderung von schädlichem Ausstoss, mit der Anpassung an veränderte Verhältnisse, mit Klimasenken und mit Finanzierung – aber erst am Rande mit Ausbildung,

Bewusstsein und Kommunikation. Teilweise wurden Politikinstrumente zentralisiert, so zum Beispiel mit dem Mechanismus für eine umweltverträgliche Entwicklung (CDM) (s.a. Kap. 4.4 Klimapolitik weltweit: Erfahrungen mit klimapolitischen Massnahmen, S. 202). Teilweise sind die Instrumente dezentral, namentlich im Bereich des Emissionshandels (ETS) und stossen auf entsprechende Schwierigkeiten in der internationalen Zusammenarbeit.

Die UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) ist neben der Welthandelsordnung der WTO das einzige internationale Forum der Klimapolitik mit einer breit abgestützten Legitimität, die ihr dadurch verliehen wird, dass beinahe alle Staaten Mitglied sind. Mit dem darauf gestützten Übereinkommen von Paris vom Dezember 2015 wurde diese Legitimität weiter gestärkt. Die Einschränkung von Emissionsminderungsverpflichtungen auf die Industriestaaten wurde aufgehoben; dies allerdings zum Preis nunmehr fehlender international vereinbarter verbindlicher Minderungsziele. Die Staaten sind fortan autonom in der Entscheidung, in welchem Masse sie beitragen wollen zum Erreichen des Zieles einer Beschränkung der Erwärmung auf höchstens 2 Grad Celsius und des Zieles einer Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius gemessen an vorindustriellen Durchschnittswerten. Offen ist, ob sich dies bewähren wird und welche Rolle nunmehr vermehrt anderen Foren zukommen wird, insbesondere im Bereich der internationalen Handelsregulierung.

<sup>1</sup> Ausnutzen parallel bestehender Zuständigkeiten verschiedener Foren mit dem Ziel, das für den Kläger günstigste Urteil zu erlangen

UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC)	Kyoto-Protokoll	Weltbank und UNO-Klimawandelprogramme
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gründungsmitglied</li> <li>• Verpflichtet sich bis zum Jahr 2020 zu einer Emissionsminderung von 20 bis 30 Prozent im Vergleich zu 1990 («Copenhagen Pledge»)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beteiligt sich im Rahmen der Verpflichtungsperiode (2008–2012) mit einer Verpflichtung zur Emissionsminderung von acht Prozent im Vergleich zu 1990</li> <li>• Beteiligt sich im Rahmen der zweiten Verpflichtungsperiode (2013–2020) mit einer Verpflichtung zur Emissionsminderung von 15,8 Prozent im Vergleich zu 1990</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Finanziert «REDD+»-Initiativen, die Entwicklungsländern Ausgleichszahlungen zukommen lassen, wenn diese die Entwaldung und die Degradierung von Wäldern auf ihrem Territorium nachweislich reduzieren</li> <li>• Finanziert die UNO-«CC:Learn»-Partnerschaft, die im Bereich Klimawandel den Informationsaustausch und die Schulung fördert</li> </ul>

Abbildung 4.3: Beiträge der Schweiz an ein globales Handeln mit Bezug auf den Klimawandel. Die 1992 unterzeichnete **UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC)** ist ein multilateraler Umweltvertrag, der internationale Strategien im Kampf gegen den Klimawandel enthält und die Vertragsstaaten ermuntert, entsprechende Massnahmen zum Klimaschutz zu ergreifen. Der Vertrag auferlegt seinen Parteien zwar keine rechtlich verbindlichen Verpflichtungen, stellt aber den Rahmen für die Aushandlung von Verträgen dar, die verbindliche Einschränkungen für die Emission von Treibhausgasen für einzelne Staaten enthalten können. Das 1997 unterzeichnete *Kyoto-Protokoll* ist ein multilateraler Umweltvertrag, der unter der UN-Klimarahmenkonvention abgeschlossen wurde und rechtlich verbindliche Verpflichtungen für Industriestaaten zur Minderung von Treibhausgasen enthält. Bei der UN-Klimarahmenkonvention geht es damit um Grundsätze und Zielsetzungen, beim Kyoto-Protokoll um die rechtlich verbindliche Umsetzung der UN-Klimarahmenkonvention. (Quelle: UNFCCC 2015)

## Welthandel: Mittel zur Förderung der Zusammenarbeit

Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2014/WGIII) wird auch die Bedeutung wirtschaftlicher Anreize dargelegt, wie Geldüberweisungen, marktbasierende Mechanismen, Technologietransfer und handelsbezogene Massnahmen für die Ausdehnung der internationalen Zusammenarbeit im Bereich des Klimawandels. Insbesondere der Welthandel bietet sowohl positive als auch negative Anreize für die Förderung der internationalen Zusammenarbeit zur Bekämpfung des Klimawandels. Die Kapitel des IPCC-Sachstandsberichts über internationale und regionale Zusammenarbeit (IPCC 2014/WGIII/Chap.13 und Chap.14) betonen einerseits das Potenzial von Handelsmassnahmen für die Förderung des Übergangs zu einer CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft, andererseits mögliche Spannungsfelder zwischen diesen Massnahmen und den internationalen Handelsregeln der Welthandelsorganisation (WTO). Im Mittelpunkt des Interesses stehen heute Fragen der Subventionierung von fossilen und von erneuerbaren Energien und deren Vereinbarkeit mit den Regeln der WTO sowie die Berücksichtigung von produktbezogenen Verfahren und Produktionsmethoden. Klimarelevante Regelungen stellen immer mehr darauf ab, ob Produkte (Güter und Dienstleistungen) auf nachhaltige und klimaschonende Art und Weise produziert werden. Im Rahmen der grundlegenden Prinzipien der Inländerbehandlung und der Meistbegünstigung von gleichen und substituierbaren Produkten stellt sich die Frage, inwieweit darauf etwa bei der Besteuerung oder der Ausgestaltung von tarifären und nicht-tarifären Massnahmen abgestellt werden darf. Die Rechtsentwicklung erlaubt zunehmend die Berücksichtigung nachhaltiger Entwicklung (Holzer 2014; Conrad 2011). Eng verbunden damit sind Fragen eines

verstärkten Technologietransfers, wo Anreizsysteme der Aushandlung warten. Sektorspezifisch stehen künftige Verhandlungen im Energiebereich im Rahmen der WTO im Vordergrund.

## Trends in der internationalen Zusammenarbeit

Neben der zunehmenden institutionellen Vielfalt machen aktuelle Studien auf weitere Trends in der internationalen Zusammenarbeit im Bereich Klimawandel aufmerksam (van Asselt et al. 2014; Nachmany et al. 2015):

- die Aufweichung von völkerrechtlichen Verpflichtungen,
- die sich verändernde Unterscheidung zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern,
- die Anwendung innovativer Politikinstrumente wie differentielle Energiebesteuerung gestützt auf produktbezogene Verfahren und Produktionsmethoden oder der Einsatz von Zertifikaten als Nachweis für die Minderung von Treibhausgasen im Handel,
- der zunehmende Fokus auf Gerichtsverfahren und Rechtsentwicklung im Fallrecht der EU und der WTO;
- der Zuwachs in der nationalen Gesetzgebung,
- die wachsende Bedeutung nichtstaatlicher, lokaler sowie insbesondere privatwirtschaftlicher Akteure.

Die internationale Zusammenarbeit im Bereich Klimawandel zeichnet sich in den letzten Jahren durch eine Aufweichung von völkerrechtlichen Verpflichtungen aus. Informelle Komitees mit beschränkter Mitgliedschaft und Repräsentativität und ohne eigentliches Verhandlungsmandat definieren zunehmend die politische Agenda der internationalen Zusammenarbeit. Regionale oder sektore-

rielle Initiativen geniessen heute grössere Unterstützung als multilaterale Unterfangen mit universeller Beteiligung. Freiwillige Zusagen ersetzen zunehmend verbindliche Engagements. Beobachtet wird, dass private Akteure anstelle von Gerichten oder anstelle der Staatengemeinschaft vermehrt die Frage beantworten, ob Regeln eingehalten werden (Asselt et al. 2014). Gleichzeitig lässt sich eine Zunahme nationaler Gesetze erkennen (Nachmany et al. 2015) und eine Verlagerung von Massnahmen auf die lokale Ebene. Städte und Regionen nehmen heute eine oft führende Rolle in der autonomen Umsetzung von Klimazielen ein, namentlich in Nordamerika. Die Vielfalt nationaler Regelungen dürfte künftig zu einer Zunahme von Streitbeilegungsverfahren im Rahmen der WTO oder von Präferenzabkommen führen, wo autonome Regelungen mit Handelsbeschränkungen verbunden sind. Gleiches gilt auch für Investitionen im Rahmen von bilateralen Investitionsschutzverträgen oder präferenziellen Handelsabkommen, wo diese durch klimapolitisch motivierte Regelungen und Auflagen nachträglich in ihrer Rendite beschränkt werden.

### Ergebnisse internationaler Kooperation mit Bezug auf den Klimawandel

Politiken zum Klimawandel können nach Auffassung des IPCC anhand von vier Kriterien beurteilt werden (IPCC 2014/WGIII):

- Umwelteffizienz,
- gesamtwirtschaftliche Leistungsfähigkeit,
- Verteilungseinflüsse und
- institutionelle Durchführbarkeit.

Die Bewertung beinhaltet eine Abwägung unter den vier Kriterien, die ihrerseits von der Ausgestaltung und den Regulierungsmechanismen eines Vorschlags abhängen. So braucht es beispielsweise eine Abwägung zwischen einer breiten Teilnahme auf der einen und der institutionellen Durchführbarkeit eines anspruchsvollen ökologischen Leistungsziels auf der anderen Seite. Das Ergebnis der Abwägung kann von finanziellen Leistungen, staatlichen Vollstreckungsmechanismen und der Aufteilung der Anstrengungen zur Emissionsminderung abhängen.

### Montrealer Protokoll

Gemessen an den vorstehenden Kriterien kann das Montrealer Protokoll von 1987 mit dem Ziel, die stratosphärische Ozon-Schicht zu schützen, als erfolgreich bezeichnet werden. Beschränkt auf eine begrenzte Zahl von Substanzen und deren Eliminierung, womit nur wenige Industrien betroffen und Ersatzprodukte vorhanden waren, hat das Abkommen als Nebeneffekt eine bedeutende Minde-

rung von Treibhausgasen erzielt. Für die Entwicklung des internationalen Abkommens über den Klimawandel kann die aus dem Montrealer Protokoll gewonnene Erkenntnis nützlich sein, dass finanzielle und technische Transfers aber auch die Möglichkeit von Handelssanktionen, die Teilnahme an einem internationalen Umweltschutzabkommen mit einem fokussierten und sektoriellen Anwendungsbereich stimulieren.

### Kyoto-Protokoll

Das Kyoto-Protokoll von 1997 bildet den ersten verbindlichen Schritt hin zur Umsetzung der Grundsätze und Zielsetzungen der UN-Klimarahmenkonvention von 1992. Das Protokoll ist weniger erfolgreich als erwartet. Der beschränkte Einfluss auf die Umsetzung von Minderungszielen und die Umwelt kann zum einen mit der unvollständigen Teilnahme und Vertragstreue der Annex-I-Länder<sup>2</sup> erklärt werden. Zum anderen ist der beschränkte Einfluss des Kyoto-Protokolls auf die Anrechnung von Emissionsminderungen in Annex-I-Ländern (so genannte «hot air»<sup>3</sup>) zurückzuführen. Der im Rahmen des Protokolls vereinbarte Mechanismus für eine umweltverträgliche Entwicklung (CDM) hat zudem nicht zum erwünschten Transfer von Technik und Wissen geführt. Auch umfasst der Anwendungsbereich des Kyoto-Protokolls keine Emissionen von Ländern, die nicht unter Annex I fallen (d.h. Entwicklungs- und Schwellenländer). Deren Emissionen haben aber zahlenmässig im letzten Jahrzehnt stark zugenommen und übertreffen inzwischen die Emissionen der Annex-I-Länder.

### Übereinkommen von Paris

Das am 22. April 2016 von einer grossen Anzahl Staaten unterzeichnete Übereinkommen löst ab 2020 das Kyoto-Protokoll ab und damit auch die auf die Industriestaaten beschränkte Wirkung. Es ergänzt die bereits früher im Rahmen der Vereinbarungen von Kopenhagen und Cancun eingegangenen Versprechen. Das Übereinkommen umfasst eingehende Bestimmungen zu Minderung, Anpassung, Finanzierung, Technologietransfer, Entschädigung, Transparenz und Entwicklungszusammenarbeit. Die wesentliche Errungenschaft liegt wie genannt im Einschluss der Schwellenländer, deren Beteiligung für eine effektive Minderung der Emissionen heute notwendig ist; dies im

<sup>2</sup> Anhang I der Klimarahmenkonvention umfasst diejenigen Staaten, die sich im Rahmen dieser Konvention verpflichtet haben, ihre Treibhausgasemissionen zu mindern. Dazu gehören auch die OECD-Staaten sowie die mittel- und osteuropäischen Transformationsländer.

<sup>3</sup> Aufgrund der Deindustrialisierung in Osteuropa wurden Emissionen ohne aktive Klimaschutzmassnahmen vermindert. Der dadurch im Referenzjahr 1990 möglicherweise zu hoch eingeschätzte Bedarf an Emissionsrechten führt zu überzähligen Emissionszertifikaten, die im Emissionshandel verkauft werden dürfen.

Gegenzug zu Finanzierungsversprechen seitens der Industriestaaten im Rahmen der geteilten und differenziellen Verantwortung. Während die Berufung auf common concern of humankind fortbesteht, beinhaltet das Übereinkommen das Prinzip der geteilten aber differenziellen Verantwortung, das einen flexiblen und dezentralen Ansatz erlaubt. Die bereits genannten Emissionsziele werden durch einseitige Verpflichtungen wahrgenommen, deren völkerrechtliche Stellung umstritten sein wird. Eine Bewertung des Übereinkommens ist verfrüht. Wesentlich ist vor allem das positive Signal einer breiten Beteiligung und eines breiten Grundkonsenses der internationalen Gemeinschaft zu den Emissionszielen an die Finanzmärkte, die ihre Finanzflüsse klimafreundlich ausrichten sollen. So sollen sie Investitionen in erneuerbare Energien unterstützen und damit zum Rückbau fossiler Energieträger beitragen. Das Übereinkommen kann Basis für die weitere Entwicklung von Instrumenten zur Finanzierung und zum Technologietransfer sein und als Referenzwerk auch im Rahmen von Handelsstreitigkeiten der WTO dienen.

### Beteiligung der Schweiz an der internationalen Kooperation

Die Schweiz ist den Bemühungen zum Klimaschutz auf internationaler Ebene stark verpflichtet. Sie beteiligt sich aktiv an der UN-Klimarahmenkonvention, am Kyoto-Protokoll und weiteren sich mit dem Klimawandel befassenden Organisationen, Abkommen und Programmen (Abb. 4.3). Sie hat das Übereinkommen von Paris am 22. April 2016 unterzeichnet.

Was die Minderungsziele für Treibhausgase betrifft, ist die Position der Schweiz mit derjenigen der EU vergleichbar. In der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2008–2012) ging die Schweiz die gleichen rechtlichen Verpflichtungen wie die EU ein: ein Abbau der Treibhausgasemissionen auf durchschnittlich acht Prozent unterhalb der Werte von 1990. Darüber hinaus hat sich die Schweiz völkerrechtlich verpflichtet, an der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2013–2020) teilzunehmen. Sie gehört zu den Annex-I-Ländern, die quantifizierte Emissionsbeschränkungs- und Emissionsabbauverpflichtungen (QELRC) eingegangen sind. Für die zweite Verpflichtungsperiode hat die Schweiz einen QELRC-Level von 84,2 vorgelegt. Diese Zahl wurde von einem Minderungsziel der Emissionen um 20 Prozent bis 2020 gegenüber 1990 abgeleitet, denn dieses Ziel entspricht im Durchschnitt der Jahre 2013 bis 2020 einer Minderung von 15,8 Prozent (s. a. Kap. 4.2 Schweizer Klimapolitik, S. 194).

### Schweiz mit diversen Engagements

Die Schweiz unterstützt das 2-Grad-Ziel und zeigte sich bereit, ihre Emissionen bis 2020 um bis zu 30 Prozent zu mindern im Vergleich mit den Werten von 1990, sofern sich andere Industrieländer für gleichwertige Ziele einsetzen und Schwellenländer gemäss ihren Fähigkeiten das ihre zur Emissionsminderung beitragen. Sie strebt im Rahmen des Übereinkommens von Paris eine Minderung der Emissionen von 50 Prozent bis 2030 und von 70–85 Prozent bis 2050 an. Berücksichtigt werden dabei nicht nur Minderungen in der Schweiz, sondern auch Emissionsminderungen im Ausland (UNFCCC 2015).

Die Schweiz beteiligt sich auch am REDD+-Mechanismus zur Minderung von Treibhausgasen, die durch Entwaldung entstehen. Unter dem REDD+ hat sie bislang mit 20 Millionen Schweizer Franken an die Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) der Weltbank und an weitere bilaterale Projekte beigetragen. Dadurch unterstützt die Schweiz die Entwicklungsländer bei wichtigen Grundlagenarbeiten und bereitet diese auf den REDD+-Mechanismus vor. Darüber hinaus ist die Schweiz verpflichtet, einen Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel zu erbringen und fördert innovative Denkansätze zur Anpassung und zur Finanzierung von Klimaprojekten in Entwicklungsländern.

Bei den internationalen Verhandlungen ist die Schweiz Teil der Environmental Integrity Group, zusammen mit Mexiko, Südkorea, Monaco und Liechtenstein. Die Gruppe setzte sich für ein rechtlich verbindliches, effektives und faires Abkommen für die Zeit nach 2020 ein, in welchem jeder Staat entsprechend seiner sich ändernden Verantwortung und Kapazität eingebunden wird. Die Gruppe betonte die Notwendigkeit von Anpassungsmassnahmen und wollte, dass entwickelte und aufstrebende Wirtschaften gegenüber Entwicklungsländern eine grössere finanzielle Verantwortung übernehmen (Ingold & Pflieger 2016). Diese Ziele konnten mit dem Übereinkommen von Paris nur zum Teil verwirklicht werden, sind aber weiterhin Leitlinie für die weiteren Arbeiten im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention und für die Umsetzungsmodalitäten des Übereinkommens von Paris.

Die Schweiz hat die Schaffung und Umsetzung der Kurzfristfinanzierung von Klimaprojekten in Entwicklungsländern von 30 Milliarden US-Dollar für die Jahre 2010 bis 2012 klar unterstützt. Ebenso hat sie sich für eine zunehmende langfristige finanzielle Unterstützung durch den neu geschaffenen Green Climate Fund (GCF) ausgesprochen. Der GCF wurde von den Mitgliedern der Klimarahmenkonvention mit dem Ziel gegründet, finanzielle Mittel für Klimaprojekte in Entwicklungsländern bereit-

zustellen zur Minderung von Treibhausgasen und zur Anpassung an den Klimawandel.

## Referenzen

Conrad C (2011) **Processes and Production Methods (PPMs) in WTO Law: Interfacing Trade and Social Goals**. Cambridge University Press, Cambridge.

Holzer K (2014) **Carbon-related Border Adjustment and WTO Law**. Edward Elgar, Camberley Surrey, 352 pp.

Ingold K, Pflieger G (2016) **Two levels, two strategies: explaining the gap between Swiss national and international responses towards Climate Change**. *Environmental Policy Analysis Journal* 2: 20–38.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 14 «Regional Development and Cooperation». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)

Nachmany M, Frankhauser S, Davidová J, Kingsmill N, Landesman T, Roppongi H, Schleifer P, Setzer J, Sharman A, Singleton CS, Sundaresan J, Townshend T (2015) **The Global Climate Legislation Study**. LSE, Grantham Research Institute.

UNFCCC (2011) **FCCC/CP/2011/9/Add.1, Decision 1/CP.17, Establishment of an Ad Hoc Working Group on the Durban Platform for Enhanced Action**.

UNFCCC (2015) **Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information**. [www4.unfccc.int/submissions/indc](http://www4.unfccc.int/submissions/indc)

van Asselt H, Mehling M, Kehler SC (2014) **The Changing Architecture of International Climate Change Law**. In: Van Calster G, Vandenberghe W, Reins L (eds.), *Research Handbook on Climate Change Mitigation Law*. Edward Elgar, Camberley Surrey.

## Gutachterinnen und Gutachter

### Dr. Stephan Bader

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bereich Analyse und Prognose, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich-Flughafen

### Prof. Dr. Thomas Bernauer

Professor für Politikwissenschaften, Institut für Umweltentscheidungen (IED), ETH Zürich

### Dr. Peter Brang

Leiter, Forschungsprogramm Wald und Klimawandel, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

### Dr. Reto Burkard

Sektionschef, Sektion Klimapolitik, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

### Melanie Butterling

Projektleiterin, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Ittigen

### Dr. Pierluigi Calanca

Leitender Forscher, Forschungsgruppe Klima und Lufthygiene, Agroscope, Zürich

### Daniel Felder

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachbereich Agrarumweltsysteme und Nährstoffe, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern

### Prof. Dr. em. Heinz Gutscher

Vorsitzender, ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern  
Professor (em.) für Sozialpsychologie, Universität Zürich

### Prof. Dr. em. Wilfried Haerberli

Professor (em.) für Geographie, insbesondere Physische Geographie, Geographisches Institut, Universität Zürich

### Dr. Stefan Hirschberg

Leiter, Labor für Energiesystem-Analyse (LEA/ENE), Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen

### Prof. Dr. Martin Hoelzle

Professor für Physische Geographie, Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg

### Dr. Roland Hohmann

Sektionschef, Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

### Prof. Dr. Fortunat Joos

Professor für Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

### Martin Kamber

Bis Juni 2016: Direktor, Interkantonaler Rückversicherungsverband (IRV), Bern

### Dr. Pamela Köllner

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

### Prof. em. Dr. DDr h.c. Christian Körner

Professor (em.) für Botanik, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel

### Dr. Michael Kost

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Sektion Analysen und Perspektiven, Bundesamt für Energie (BFE), Ittigen

### Christian Küchli

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Sektion Waldleistungen und Waldpflege, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

### Dr. Mark Liniger

Leiter, Klimaprognosen, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich-Flughafen

### Dr. Jon-Andri Lys

Geschäftsführer, Kommission für Forschungspartnerschaften mit Entwicklungsländern (KFPE), Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

### Dr. Nicole Mathys

Leiterin, Grundlagen, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Ittigen

### Prof. Dr. Etienne Piguet

Professor für Mobilitätsgeographie, Geographisches Institut, Universität Neuenburg

### Prof. Dr. Christoph C. Raible

Professor für Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern

### Dr. Christoph Ritz

Bis März 2016: Geschäftsleiter, ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

### Dr. Stefan Ritz

Naturkatastrophenanalyst, Tokio Millennium Re AG, Zürich

### Dr. Christian Rixen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Gruppe Gebirgsökosysteme, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos Dorf

### Prof. Dr. Martin Röösli

Professor, Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, Universität Basel

### Dr. Thomas Scheurer

Geschäftsführer, Interakademische Kommission Alpenforschung (ICAS), Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern

### Dr. Rolf Schmitz

Leiter, Energieforschung, Bundesamt für Energie (BFE), Ittigen

### Prof. Dr. Werner K. Schmutz

Direktor, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center, Davos Dorf

### Prof. Dr. Konrad Steffen

Direktor, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

### Prof. Dr. Thomas F. Stocker

Professor für Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern  
Ko-Vorsitzender Arbeitsgruppe I  
Fünfter IPCC-Sachstandsbericht

### Prof. Dr. Philippe Thalmann

Professor für die Ökonomie der Natürlichen und Gebauten Umwelt, Institut für Architektur und Städtebau, ETH Lausanne

### Dr. Damiano Urbinello

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Direktionsbereich Gesundheitspolitik, Bundesamt für Gesundheit (BAG), Liebefeld

### Dr. David Volken

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Sektion Hydrologische Vorhersagen, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen

### Prof. Dr. Rolf Weingartner

Professor für Hydrologie, Geographisches Institut, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

### Prof. Dr. Heini Wernli

Professor für Atmosphärendynamik, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Prof. Dr. Martin Wild

Professor für Globale Klimaveränderung, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich

### Dr. Christine Zundel

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Fachbereich Agrarumweltsysteme und Nährstoffe, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern

## Referenzierung IPCC

Vollständige Referenzierung nach IPCC	Referenzierung am Kapitelende	Referenzierung im Fliesstext
<b>WGI</b>		
IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., doi:10.1017/CB09781107415324. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI)
IPCC (2013) <b>Summary for Policymakers</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–30, doi:10.1017/CB09781107415324.004. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Summary for Policymakers (SPM). www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/SPM)
Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener FJ, Dlugokencky EJ, Easterling DR, Kaplan A, Soden BJ, Thorne PW, Wild M, Zhai PM (2013) <b>Observations: Atmosphere and Surface</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 159–254, doi:10.1017/CB09781107415324.008. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.2)
Rhein M, Rintoul SR, Aoki S, Campos E, Chambers D, Feely RA, Gulev S, Johnson GC, Josey SA, Kostianoy A, Mauritzen C, Roemmich D, Talley LD, Wang F (2013) <b>Observations: Ocean</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 255–316, doi:10.1017/CB09781107415324.010. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 3 «Observations: Ocean». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.3)
Vaughan DG, Comiso JC, Allison I, Carrasco J, Kaser G, Kwok R, Mote P, Murray T, Paul F, Ren J, Rignot E, Solomina O, Steffen K, Zhang T (2013) <b>Observations: Cryosphere</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 317–382, doi:10.1017/CB09781107415324.012. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 4 «Observations: Cryosphere». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.4)
Masson-Delmotte V, Schulz M, Abe-Ouchi A, Beer J, Ganopolski A, González Rouco JF, Jansen E, Lambeck K, Luterbacher J, Naish T, Osborn T, Otto-Bliessner B, Quinn T, Ramesh R, Rojas M, Shao X, Timmermann A (2013) <b>Information from Paleoclimate Archives</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 383–464, doi:10.1017/CB09781107415324.013. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.5)
Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni RB, Piao S, Thornton P (2013) <b>Carbon and Other Biogeochemical Cycles</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 465–570, doi:10.1017/CB09781107415324.015. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.6)
Bindoff NL, Stott PA, AchutaRao KM, Allen MR, Gillett N, Gutzler D, Hansingo K, Hegerl G, Hu Y, Jain S, Mokhov II, Overland J, Perlwitz J, Sebbari R, Zhang X (2013) <b>Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional</b> . In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 867–952, doi:10.1017/CB09781107415324.022. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b> . Chapter 10 «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1	(IPCC 2013/WGI/Chap.10)

<p>Kirtman B, Power SB, Adedoyin JA, Boer GJ, Bojariu R, Camilloni I, Doblas-Reyes FJ, Fiore AM, Kimoto M, Meehl GA, Prather M, Sarr A, Schär C, Sutton R, van Oldenborgh GJ, Vecchi G, Wang HJ (2013) <b>Near-term Climate Change: Projections and Predictability</b>. In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 953–1028, doi:10.1017/CB09781107415324.023. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>(IPCC 2013/WGI/Chap.11)</p>
<p>Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichetef T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski WJ, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver AJ, Wehner M (2013) <b>Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility</b>. In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1029–1136, doi:10.1017/CB09781107415324.024. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>(IPCC 2013/WGI/Chap.12)</p>
<p>Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne MA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D, Unnikrishnan AS (2013) <b>Sea Level Change</b>. In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137–1216, doi:10.1017/CB09781107415324.026. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 13 «Sea Level Change». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>(IPCC 2013/WGI/Chap.13)</p>
<p>Christensen JH, Krishna Kumar K, Aldrian E, An S-I, Cavalcanti IFA, de Castro M, Dong W, Goswami P, Hall A, Kanyanga JK, Kitoh A, Kossin J, Lau N-C, Renwick J, Stephenson DB, Xie S-P, Zhou T (2013) <b>Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change</b>. In: 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 TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1217–1308, doi: 10.1017/CB09781107415324.028. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 14 «Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>(IPCC 2013/WGI/Chap.14)</p>
<p>Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P (2013) <b>Technical Summary</b>. In: <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis</b>. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115, doi:10.1017/CB09781107415324.005. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>	<p>(IPCC 2013/WGI/TS)</p>
<b>WGII</b>		
<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII)</p>
<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII)</p>

<p>IPCC (2014) <b>Summary for Policymakers</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/SPM)</p>
<p>Jiménez Cisneros BE, Oki T, Arnell NW, Benito G, Cogley JG, Döll P, Jiang T, Mwakalila SS (2014) <b>Freshwater resources</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 3 «Freshwater resources». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.3)</p>
<p>Settele J, Scholes R, Betts R, Bunn SE, Leadley P, Nepstad D, Overpeck JT, Taboada MA (2014) <b>Terrestrial and inland water systems</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.4)</p>
<p>Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, Saito Y, Sallenger A (2014) <b>Coastal systems and low-lying areas</b>. In: <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 361-409. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 5 «Coastal systems and low-lying areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.5)</p>
<p>Pörtner H-O, Karl D, Boyd PW, Cheung W, Lluich-Cota SE, Nojiri Y, Schmidt DN, Zavalov P (2014) <b>Ocean systems</b>. In: <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 411-484. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 6 «Ocean systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.6)</p>
<p>Porter JR, Xie L, Challinor AJ, Cochrane K, Howden SM, Iqbal MM, Lobell DB, Travasso MI (2014) <b>Food security and food production systems</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485-533. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 7 «Food security and food production systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.7)</p>
<p>Revi A, Satterthwaite DE, Aragón-Durand F, Corfee-Morlot J, Kiunsi RBR, Pelling M, Roberts DC, Solecki W (2014) <b>Urban areas</b>. In: <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535-612. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 8 «Urban Areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.8)</p>
<p>Dasgupta P, Morton JF, Dodman D, Karapinar B, Meza F, Rivera-Ferre MG, Toure Sarr A, Vincent KE (2014) <b>Rural areas</b>. In: <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 613-657. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 9 «Rural Areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.9)</p>

<p>Arent DJ, Tol RSJ, Faust E, Hella JP, Kumar S, Strzepek KM, Tóth FL, Yan D (2014) <b>Key economic sectors and services</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659–708.</p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 10 «Key economic sectors and services». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.10)</p>
<p>Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Olwoch JM, Revich B, Sauerborn R (2014) <b>Human health: impacts, adaptation, and co-benefits</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 709–754. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 11 «Human health: impacts, adaptation, and co-benefits». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.11)</p>
<p>Adger WN, Pulhin JM, Barnett J, Dabelko GD, Hovelsrud GK, Levy M, Oswald Spring Ú, Vogel CH (2014) <b>Human security</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 755–791. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 12 «Human security». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.12)</p>
<p>Olsson L, Opondo M, Tschakert P, Agrawal A, Eriksen SH, Ma S, Perch LN, Zakieldeen SA (2014) <b>Livelihoods and poverty</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 793–832. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 13 «Livelihoods and poverty». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.13)</p>
<p>Cramer W, Yohe GW, Auffhammer M, Huggel C, Molau U, Silva Dias MAF, Solow A, Stone DA, Tibig L (2014) <b>Detection and attribution of observed impacts</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 979–1037. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 18 «Detection and attribution of observed impacts». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.18)</p>
<p>Kovats RS, Valentini R, Bouwer LM, Georgopoulou E, Jacob D, Martin E, Rounsevell M, Soussana J-F (2014) <b>Europe</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267–1326.</p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Chapter 23 «Europe». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/Chap.23)</p>
<p>Field CB, Barros VR, Mach KJ, Mastrandrea MD, van Aalst M, Adger WN, Arent DJ, Barnett J, Betts R, Bilir TE, Birkmann J, Carmin J, Chadee DD, Challinor AJ, Chatterjee M, Cramer W, Davidson DJ, Estrada YO, Gattuso J-P, Hijjoka Y, Hoegh-Guldberg O, Huang H-Q, Insarov GE, Jones RN, Kovats RS, Romero Lankao P, Larsen JN, Losada IJ, Marengo JA, McLean RF, Mearns LO, Mechler R, Morton JF, Niang I, Oki T, Olwoch JM, Opondo M, Poloczanska ES, Pörtner H-O, Redsteer MH, Reisinger A, Revi A, Schmidt DN, Shaw MR, Solecki W, Stone DA, Stone JMR, Strzepek KM, Suarez AG, Tschakert P, Valentini R, Vicuña S, Villamizar A, Vincent KE, Warren R, White LL, Wilbanks TJ, Wong PP, Yohe GW (2014) <b>Technical Summary</b>. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 35–94. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGII/TS)</p>

WGIII		
<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change</b>. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII)</p>
<p>IPCC (2014) <b>Summary for Policymakers</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/ WGIII/SPM)</p>
<p>Bruckner T, Bashmakov IA, Mulugetta Y, Chum H, de la Vega Navarro A, Edmonds J, Faaij A, Fungtammasan B, Garg A, Hertwich E, Honnery D, Infield D, Kainuma M, Khennas S, Kim S, Nimir HB, Riahi K, Strachan N, Wiser R, Zhang X (2014) <b>Energy Systems</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.511–598. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Chapter 7 «Energy Systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/Chap.7)</p>
<p>Sims R, Schaeffer R, Creutzig F, Cruz-Núñez X, D'Agosto M, Dimitriou D, Figueroa Meza MJ, Fulton L, Kobayashi S, Lah O, McKinnon A, Newman P, Ouyang M, Schauer JJ, Sperling D, Tiwari G (2014) <b>Transport</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 599–670. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Chapter 8 «Transport». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/Chap.8)</p>
<p>Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA, Haberl H, Harper R, House J, Jafari M, Masera O, Mbow C, Ravindranath NH, Rice CW, Robledo Abad C, Romanovskaya A, Sperling F, Tubiello F (2014) <b>Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.811–922. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Chapter 11 «Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/Chap.11)</p>
<p>Stavins R, Zou J, Brewer T, Conte Grand M, den Elzen M, Finus M, Gupta J, Höhne N, Lee M-K, Michaelowa A, Paterson M, Ramakrishna K, Wen G, Wiener J, Winkler H (2014) <b>International Cooperation: Agreements and Instruments</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.1001–1082. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/Chap.13)</p>
<p>Agrawala S, Klasen S, Acosta Moreno R, Barreto L, Cottier T, Guan D, Gutierrez-Espeleta EE, Gámez Vázquez AE, Jiang L, Kim YG, Lewis J, Messouli M, Rauscher M, Uddin N, Venables A (2014) <b>Regional Development and Cooperation</b>. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1083–1140. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b>. Chapter 14 «Regional Development and Cooperation». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/Chap.14)</p>

<p>Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Kadner S, Minx JC, Brunner S, Agrawala S, Baiocchi G, Bashmakov IA, Blanco G, Broome J, Bruckner T, Bustamante M, Clarke L, Conte Grand M, Creutzig F, Cruz-Núñez X, Dhakal S, Dubash NK, Eickemeier P, Farahani E, Fischedick M, Fleurbaey M, Gerlagh R, Gómez-Echeverri L, Gupta S, Harnisch J, Jiang K, Jotzo F, Kartha S, Klases S, Kolstad C, Krey V, Kunreuther H, Lucon O, Masera O, Mulugetta Y, Norgaard RB, Patt A, Ravindranath NH, Riahi K, Roy J, Sagar A, Schaeffer R, Schlömer S, Seto KC, Seyboth K, Sims R, Smith P, Somanathan E, Stavins R, Strehow C von, Sterner T, Sugiyama T, Suh S, Ürge-Vorsatz D, Urama K, Venables A, Victor DG, Weber E, Zhou D, Zou J, Zwickel T (2014) <b>Technical Summary. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.</b> Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strehow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).</b> Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>	<p>(IPCC 2014/WGIII/TS)</p>
<p><b>Synthesis Report</b></p>		
<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report.</b> Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/re20port/ar5/syr">www.ipcc.ch/re20port/ar5/syr</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR).</b> <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>	<p>(IPCC 2014/SYR)</p>
<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report.</b> Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>	<p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR).</b> Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>	<p>(IPCC 2014/SYR/SPM)</p>
<p><b>Special Reports</b></p>		
<p>IPCC (2012) <b>Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.</b> A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>	<p>IPCC (2012) <b>Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).</b> <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>	<p>(IPCC 2012/SREX)</p>
<p>Seneviratne SI, Nicholls N, Easterling D, Goodess CM, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C, Zhang X (2012) <b>Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.</b> In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 109–230. <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>	<p>IPCC (2012) <b>Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).</b> Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>	<p>(IPCC 2012/SREX/Chap.3)</p>

## **Wer sind wir?**

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie engagieren sich insbesondere in den Bereichen Früherkennung und Ethik und setzen sich ein für den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz sind ein Verbund der vier wissenschaftlichen Akademien der Schweiz:

- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
- Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW)
- Schweizerische Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW)
- Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW)

sowie der Kompetenzzentren

- Zentrum für Technologiefolgenabschätzung (TA-SWISS)
- Stiftung Science et Cité

## **SCNAT – vernetztes Wissen im Dienste der Gesellschaft**

Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) engagiert sich regional, national und international für die Zukunft von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie stärkt das Bewusstsein für die Naturwissenschaften als zentralen Pfeiler der kulturellen und wirtschaftlichen Entwicklung. Ihre breite Abstützung macht sie zu einem repräsentativen Partner für die Politik. Die SCNAT vernetzt die Naturwissenschaften, liefert Expertise, fördert den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft, identifiziert und bewertet wissenschaftliche Entwicklungen und legt die Basis für die nächste Generation von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern. Sie ist Teil des Verbundes der Akademien der Wissenschaften Schweiz.

**ProClim ist das Forum für Klima und globale Umweltveränderungen** der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT). ProClim dient in diesen Themenbereichen als Schnittstelle zwischen Wissenschaft einerseits, und öffentlicher Verwaltung, Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit andererseits und fördert die Kommunikation zwischen diesen Kreisen.

