

*Der Steilhang bei Montreux veranschaulicht eine mögliche Klimaerwärmung: Steigt man in diesem Hang 600 Höhenmeter ab, erfährt man eine Temperaturerhöhung von 3,6 Grad Celsius.*

BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

# Ursachen des Klimawandels

Die weltweite Klimaerwärmung wird von uns Menschen verursacht. Ihr Verlauf hängt in Zukunft davon ab, inwieweit wir die Emissionen von Treibhausgasen drosseln können. In der Schweiz ist die Erwärmung besonders stark, und es ändern sich auch die Niederschläge. Mögliche Auswirkungen für den Wald lassen sich durch den Vergleich mit tiefer gelegenen Höhenstufen veranschaulichen.

**Von Barbara Allgaier Leuch, Kathrin Streit, Sabine Augustin, Peter Brang.**

Der Juni fiel dieses Jahr ins Wasser. Überschwemmungen und Geröllmassen verursachten lokal Schäden, und an einzelnen Messstationen wurde einer der nassesten Juniemonate seit Messbeginn registriert. Und trotzdem lagen die Junitemperaturen im landesweiten Mittel 0,2 Grad Celsius über der Norm 1981–2010 (MeteoSchweiz 2016a).

Es wird wärmer in der Schweiz, darüber kann auch ein verregneter Monat nicht hinwegtäuschen. So reiht sich der

Juni 2016 nahtlos in eine Serie von überdurchschnittlich warmen Monaten und Jahren ein. Dies zeigen die Aufzeichnungen von MeteoSchweiz (Abb. 1 auf Seite 37), nach denen die Jahresmitteltemperaturen seit 1986 konstant über der Norm 1961–1990 liegen.

Um angesichts der starken Erwärmung in den letzten Jahrzehnten das Klimageschehen angemessen beschreiben zu können, wurde eine zweite Normperiode eingeführt: Sie umfasst die Jahre 1981–2010

und zeigt eine um 0,8 Grad höhere Temperatur als die Norm 1961–1990 (Abb. 1, gestrichelte Linie).

Die Klimaerwärmung hat jedoch bereits vor 1986 eingesetzt (Abb. 1). Insgesamt hat sich die Jahresmitteltemperatur in der Schweiz zwischen 1864 – dem Beginn der Aufzeichnungen – und dem Jahr 2000 um 1,8 Grad erhöht (Begert et al. 2005). Dies ist rund doppelt so viel wie im weltweiten Durchschnitt, wo im etwa gleichen Zeitraum (1880–2012) eine Er-

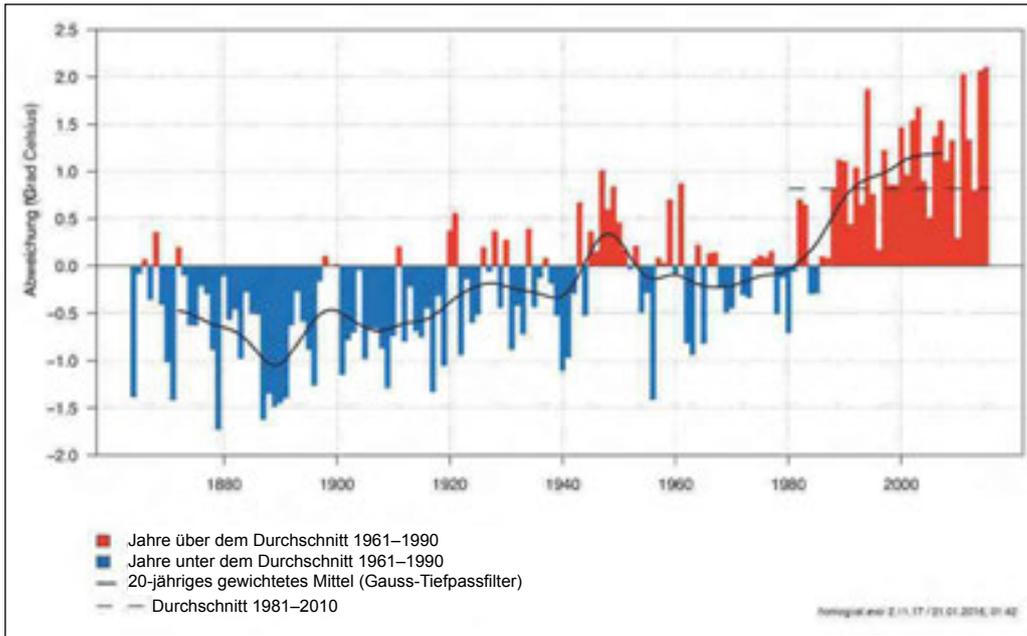


Abb. 1 Abweichung der Jahresmitteltemperatur von 1864 bis 2015 vom langjährigen Durchschnitt (Norm 1961–1990). Zum Vergleich ist die Normperiode 1981–2010 als gestrichelte Linie eingetragen. Quelle: MeteoSchweiz (2016b; verändert)

wärmung um 0,85 Grad zu verzeichnen war (IPCC 2014). Dass die Erwärmung in der Schweiz deutlich stärker ist, hat verschiedene Ursachen. Eine Rolle spielen u.a. die meerferne Lage, die Berge, welche durch ihre Masse mehr Wärme aufnehmen können als das Flachland (Massenerhebungseffekt), und die abnehmende Reflexion der Sonneneinstrahlung durch die

schwindenden Gletscher- und Schneeflächen (Albedoeffekt).

Dass sich die Erde seit den 1950er-Jahren in rasanten Tempo erwärmt, ist mittlerweile eindeutig belegt (IPCC 2014). Ebenso erwiesen ist, dass der Mensch dafür der Hauptverantwortliche ist. Es ist die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, die dazu

führt, dass weniger Energie in den Weltraum abgestrahlt werden kann und sich die Erde so wie ein Treibhaus aufheizt. Das mit Abstand wichtigste Treibhausgas ist Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>; Abb. 2). Dieses wird bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie durch die weltweite Abholzung freigesetzt.

Weitere Treibhausgase sind Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und fluorierte Gase. Die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind heute so hoch wie nie in den letzten 800 000 Jahren (IPCC 2014).

### Das 2-Grad-Ziel

Die Staatengemeinschaft bemüht sich seit längerem um eine Begrenzung der globalen Erwärmung (vgl. auch Box «Der UNO-Weltklimarat IPCC», Seite 38). So wurde bereits 1992 in Rio de Janeiro die UN-Klimarahmenkonvention verabschiedet, mit dem Ziel, «eine gefährliche Störung des Klimasystems durch den Menschen zu verhindern».

An der Klimakonferenz in Cancún von 2010 wurde sodann das sogenannte «2-Grad-Ziel» beschlossen. Dieses Ziel bedeutet, dass die Erwärmung gegenüber vorindustrieller Zeit global gesehen nicht mehr als 2 Grad betragen soll. Seit

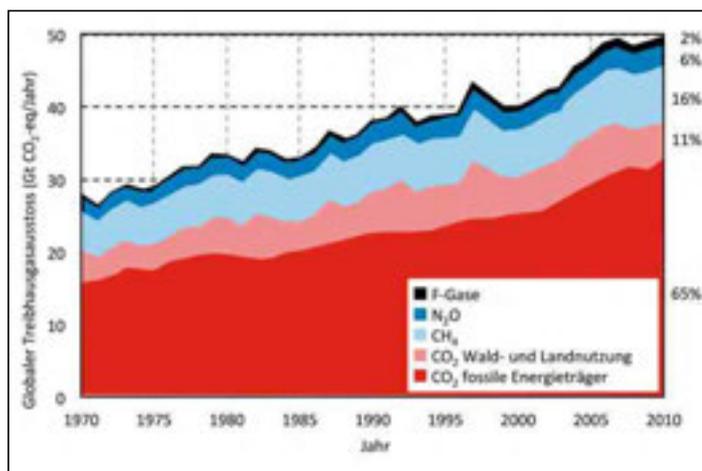


Abb. 2 Entwicklung des anthropogenen Treibhausgasausstosses von 1970–2010 in Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas) sowie aus der Wald- und Landnutzung (hauptsächlich Abholzung), Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und fluorierte Treibhausgase (F-Gase). Die prozentualen Anteile der Gase am globalen Treibhausgasausstoss von total 49 Gt CO<sub>2</sub>-eq/Jahr im Jahr 2010 sind am rechten Rand aufgeführt.

Quelle: IPCC (2014: 5; verändert)

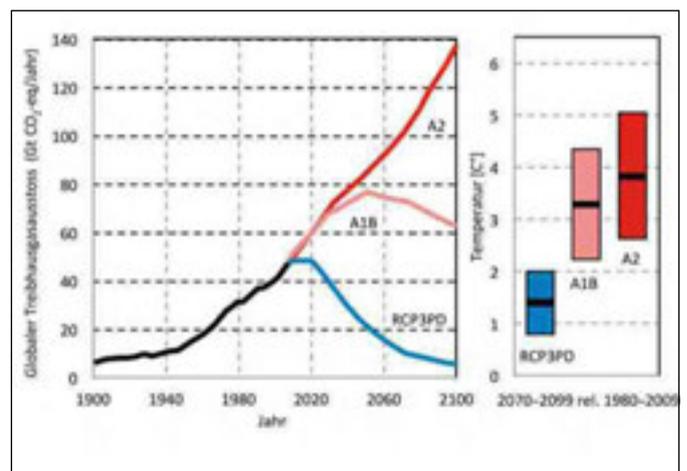


Abb. 3 Globaler Treibhausgasausstoss (links; bisher [schwarz] sowie mit drei Emissionsszenarien modellierte künftige Entwicklung) und daraus abgeleitete Zunahme der Jahresmitteltemperatur in der Schweiz im 21. Jahrhundert (rechts; Periode 2070–2099 im Vergleich zur Periode 1980–2009). Quelle: C2SM (2011; verändert). Emissionsszenarien: RCP3PD = Reduktionsszenario, mit welchem sich die globale Erwärmung gegenüber der vorindustriellen Zeit auf max. 2 Grad Celsius begrenzen liesse, A1B = mittleres Szenario, A2 = extremeres Szenario (mit ungebremstem CO<sub>2</sub>-Ausstoss).

der Klimakonferenz vom vergangenen Dezember in Paris soll die Erwärmung gar deutlich unter 2 Grad gehalten werden. Damit dies gelingt, müssen die Treibhausgasemissionen rasch und markant gesenkt werden.

«Rasch und markant» bedeutet, dass sie bis ins Jahr 2050 im Vergleich zu 1990 global um mindestens die Hälfte und in den Industrieländern um 80 bis 95% reduziert werden müssten (Manser et al. 2015, C2SM 2011). Selbst wenn wir das schaffen, dürfte die Erwärmung in der Schweiz deutlich mehr als 2 Grad betragen (Abb. 3 auf Seite 37).

Wie stark sich das Klima in Zukunft verändert, ist also abhängig vom globalen Treibhausgasausstoss und damit von den gesellschaftlichen, technologischen, wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen weltweit.

Diese Entwicklungen vorauszusagen, ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Um trotzdem Aussagen zur klimatischen Veränderung machen zu können, wird mithilfe von Emissionsszenarien, die von unterschiedlichen Verläufen der Treibhausgasemissionen ausgehen, und hochkomplexen Klimamodellen, die die klimarelevanten physikalischen Vorgänge auf der Erde beschreiben, die Entwicklung von Temperatur und Niederschlag auf globaler wie auch regionaler Ebene abgeschätzt.

## Verschiedene Szenarien

In Abb. 3 sind in der linken Grafik drei Emissionsszenarien und in der rechten die entsprechende Erwärmung eingetragen. Das RCP3PD-Szenario steht für eine Entwicklung, bei welcher sich die globale Klimaerwärmung gegenüber vorindustrieller Zeit bis Ende des Jahrhunderts auf maximal 2 Grad begrenzen liesse (Reduktionsszenario).

Das A2-Szenario repräsentiert hingegen eine Entwicklung mit ungebremstem Treibhausgasausstoss. Das A1B-Szenario befindet sich dazwischen. Für die Schweiz resultiert mit diesen drei Emissionsszenarien eine Erwärmung bis Ende des Jahrhunderts um durchschnittlich etwa 1,4 Grad (RCP3PD), 3,3 Grad (A1B) und 3,9 Grad (A2) im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 (Abb. 3, rechte Grafik).

Rechnet man die Erwärmung von der vorindustriellen Zeit bis zur Referenzperiode dazu, beträgt die gesamte Erwärmung 2,9 Grad (RCP3PD), 4,8 Grad (A1B) und 5,4 Grad (A2) (C2SM 2011).

Ein Blick auf den schweizweit verregneten Juni 2016 und den Juni davor, der

## Der UNO-Weltklimarat IPCC

Das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), im Deutschen oft als *Weltklimarat* bezeichnet, ist ein internationales Gremium, das von der *Weltorganisation für Meteorologie* (WMO) und vom *Umweltprogramm der Vereinten Nationen* (UNEP) im Jahr 1988 ins Leben gerufen wurde, um für die politischen Entscheidungsträger den Stand der Forschung zum Klimawandel zusammenzufassen und zu bewerten. Der Weltklimarat veröffentlicht in regelmässigen Abständen Sachstandsberichte, an deren Verfassung jeweils Hunderte von Wissenschaftlern beteiligt sind. Dazu gehören auch renommierte Forscher aus der Schweiz, beispielsweise die Klimawissenschaftler *Prof. Dr. Thomas Stocker* von der Universität Bern, *Prof. Dr. Reto Knutti* von der ETH Zürich und *Prof. Dr. Konrad Steffen* von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL. Die Kurzfassungen der Sachstandsberichte (Summary for Policymakers) werden von den Regierungen der UNO-Mitgliedsländer verabschiedet. Durch diesen Akt anerkennen die Regierungen «die Rechtmässigkeit der wissenschaftlichen Inhalte». In der Zusammenfassung des 5. Sachstandsberichts vom November 2014 (IPCC 2014) heisst es:

1. Die Erwärmung des Klimas ist eindeutig.
2. Der Einfluss des Menschen auf das Klima ist klar.
3. Die Beschränkung des Klimawandels erfordert grosse und lang anhaltende Reduktionen der Treibhausgasemissionen.

auf der Alpensüdseite und im Genferseegebiet nur die Hälfte der normalen Niederschläge, in einzelnen Regionen der Ostschweiz aber gegen doppelt so viele brachte, zeigt, dass die Niederschläge wesentlich variabler sind als die Lufttemperaturen. Die Niederschlagsentwicklung ist denn auch schwieriger abzuschätzen.

Dabei zeichnen sich für Europa grossräumig zwei gegenläufige Entwicklungen ab: In Nordeuropa wird eine Zunahme der Niederschläge erwartet, in Südeuropa hingegen eine Abnahme, v.a. im Sommer (C2SM 2011, Fischer et al. 2015).

Diese beiden Niederschlagsregimes verschieben sich im Jahresverlauf über Europa. Gemäss den Modellierungen dürfte sich die Schweiz im Sommer im Einflussbereich des südeuropäischen Niederschlagsregimes befinden, weshalb die Niederschläge im Sommer unter allen Emissionsszenarien bis Ende des Jahrhunderts abnehmen (um 6–10% beim RCP3PD-, um 13–24% beim A1B- und

um 15–28% beim A2-Szenario), am stärksten in der West- und in der Südschweiz (grösserer Wert der angegebenen Spannbreite) und unter dem A2-Szenario.

Im Winter hingegen ist mit einer Zunahme der Niederschläge in der Südschweiz und im östlichen Alpenbogen zu rechnen.

## Auswirkungen auf den Wald

Was bedeutet eine Erwärmung um 1,4 Grad, um 3,3 Grad oder gar um 3,9 Grad bis Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 für den Wald? Ein virtueller Spaziergang durch einen Steilhang in den westlichen Voralpen hilft, die mögliche Veränderung zu fassen (Foto auf Seite 36): Wer in diesem Hang unterwegs ist, erfährt nach einem Abstieg von 600 Höhenmetern einen Temperaturanstieg von etwa 3,6 Grad. Dabei verlässt er die Nadelwälder der obermontanen Stufe und steigt

## Das BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»

Im BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» wird Grundlagenwissen erarbeitet, damit die mit dem Klimawandel verbundenen Risiken im Wald und die Anpassungsfähigkeit des Waldes eingeschätzt und wirksame Anpassungsmassnahmen getroffen werden können. Das Forschungsprogramm wurde im Jahr 2009 lanciert und wird Ende 2017 abgeschlossen. 42 Forschungsprojekte sowie mannigfaltige Synthese- und Umsetzungsarbeiten werden durchgeführt. Unter anderem ist eine Merkblattreihe am Entstehen, die Waldbesitzern, Betriebsleitern und Revierförstern Hilfestellungen bei der Waldbewirtschaftung bieten soll. Der vorliegende Artikel bildet den Auftakt zu einer in loser Folge erscheinende Artikelserie in den Zeitschriften «WALD und HOLZ» und «La Forêt». Am 29. November 2016 findet an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL in Birmensdorf das «Forum für Wissen 2016» statt, an welchem Ergebnisse aus dem Forschungsprogramm sowie das aus dem Forschungsprogramm hervorgegangene Buch «Wald im Klimawandel – Grundlagen für Adaptationsstrategien» präsentiert werden.

hinunter in die Laubwälder der submontanen. Diese rasante klimatische Veränderung wird uns bis zum Ende des Jahrhunderts prognostiziert.

Der Wald dürfte dieser Klimaänderung verzögert folgen. So vermögen die meisten Bäume auch unter höheren Temperaturen zu wachsen. Die Konkurrenzverhältnisse verschieben sich aber allmählich, und die zunehmende Sommertrockenheit sowie Schädlinge setzen den einzelnen Baumarten in unterschiedlicher Masse zu.

Je nach Standort und Bestockung sind die Auswirkungen des Klimawandels entsprechend unterschiedlich. Wie sich die klimatischen Veränderungen auf den Wald auswirken, wo die Risiken für die Waldleistungen am höchsten sind und welche

Anpassungsmassnahmen den Waldbewirtschaftern zur Verfügung stehen, soll in weiteren Beiträgen erläutert werden (vgl. Box «Das BAFU/WSL-Forschungsprogramm Wald und Klimawandel»).

### Die Autoren

Dr. Sabine Augustin von der Abteilung Wald des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und Dr. Peter Brang von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) leiten das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Barbara Allgaier Leuch und Dr. Kathrin Streit arbeiten an der WSL für das Programm.

### Weitere Infos

[www.wsl.ch/wald\\_klima](http://www.wsl.ch/wald_klima)  
<http://ipcc.ch>

### Literatur

Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int J Climatol* 25: 65–80.

C2SM (2011): *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Zürich: C2SM. 88 p.

Fischer AM, Liniger M, Appenzeller C (2015): *Climate scenarios of seasonal means: extensions in time and space*. Zürich: C2SM, CH2011 Extension Series No. 2. 18 p.

IPCC (2014): *Climate Change 2014. Synthesis report. Summary for Policymakers*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. 31 p.

Manser R, Steffen K, Meier U, Kuechli C (2015): *Forschung zur richtigen Zeit, umsetzungsorientiert und politisch eingebettet*. Schweiz Z Forstwes 166: 348–351.

MeteoSchweiz (2016a) *Klimabulletin Juni 2016*. Zürich: MeteoSchweiz. 11 p.

MeteoSchweiz (2016b) *Klimabulletin Jahr 2015*. Zürich: MeteoSchweiz. 10 p.