

OcCC

Organe consultatif sur les changements climatiques
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung

Das Klima ändert – auch in der Schweiz

**Die wichtigsten Ergebnisse des
dritten Wissensstandsberichts des IPCC
aus der Sicht der Schweiz**

Impressum

Autoren des Berichts

Christian Albrecht	Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern
Peter Baccini	Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich
Andrea Baranzini	Université de Genève, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Martin Beniston	Institut de Géographie, Université de Fribourg
Harald Bugmann	Departement Forstwissenschaften, ETH Zürich
Thomas Bürki	Thomas Bürki GmbH, Benglen
Samuel Fankhauser	European Bank for Reconstruction and Development, London
Andreas Fischlin	Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich
Jürg Fuhrer	Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich
Yves Gonseth	Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel
Sabine Güsewell	Geobotanisches Institut, ETH Zürich
Roland Hohmann	ProClim-, Bern
Josef Janssen	Institut für Wirtschaft und Ökologie, Universität St. Gallen
Fortunat Joos	Klima- und Umweltphysik, Universität Bern
Wolfram Kägi	B.S.S. Economic Consultants, Basel
Daniel K. Keuerleber-Burk	MeteoSchweiz, Zürich
Nino Künzli	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Lucy Oglesby	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Pascal Previdoli	Bundesamt für Energie, Bern
Bruno Schädler	Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
Thomas Stocker	Klima- und Umweltphysik, Universität Bern

Begutachter

Wilfried Haerberli	Geographisches Institut, Universität Zürich
Eberhard Jochem	Center for Energy Policy and Economics, ETH Zürich
Atsumu Ohmura	Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, ETH Zürich
Christoph Schär	Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, ETH Zürich
Heinz Wanner	Geographisches Institut, Universität Bern
Alexander Wokaun	Paul Scherrer Institut, Villigen

Autoren zusätzlicher Beiträge

Wilfried Haerberli	Geographisches Institut, Universität Zürich
Hans Hurni	Geographisches Institut, Universität Bern
Eberhard Jochem	Center for Energy Policy and Economics, ETH Zürich
Nino Künzli	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Hansruedi Müller	Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Universität Bern
Urs Neu	ProClim-, Bern
Alexander Wokaun	Paul Scherrer Institut, Villigen

Begleitgruppe OcCC

Gabi Hildesheimer	Vereinigung für ökologisch bewusste Unternehmensführung, Zürich
Ruth Kaufmann-Hayoz	Interfakultäre Koordinationsstelle für Allgemeine Ökologie, Universität Bern
Hansruedi Müller	Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Universität Bern

Projektleitung und Redaktion

Roland Hohmann	ProClim-, Bern
----------------	----------------

Redaktionelle Mitarbeit

Bettina Büchler	ProClim-, Bern
Theres Grau	ProClim-, Bern
Sonja Trappe	ProClim-, Bern

Layout

Roland Hohmann	ProClim-, Bern
Gabriele Müller-Ferch	ProClim-, Bern

Korrektorat

Lektorama, Freystrasse 26, 8036 Zürich

Übersetzung ins Französische

Jean-Jacques Dätwyler, Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Bern

Der vorliegende Bericht wurde am 10. Januar 2002 vom OcCC gutgeheissen.

Inhaltsverzeichnis

Editorial	4
Vorwort	5
Zusammenfassung	7
1. Beschreibung der globalen Klimaänderung	9
1.1. Beobachtete Klimaänderung	9
1.2. Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde	13
1.3. Die Ursache der Klimaänderung der letzten 50 Jahre	14
1.4. Abschätzung künftiger Veränderungen bis 2100	15
1.5. Stabilisierungsszenarien und ihre Konsequenzen	19
2. Auswirkungen der Klimaänderung	21
2.1. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft	21
2.2. Auswirkungen der Klimaänderung auf Ökosysteme	22
2.3. Veränderung des CO ₂ -Senkenpotentials	25
2.4. Gesundheit	27
2.5. Versicherungswesen und Finanzsektor	29
2.6. Siedlungsgebiete, Energieverbrauch und Tourismus	31
3. Strategien zur Abschwächung der Klimaänderung	33
3.1. Technisches Potential zur Reduktion der Emissionen	33
3.2. Reduktion der CO ₂ -Konzentration durch Kohlenstoffsinken	34
3.3. Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten	36
3.4. Instrumente und Massnahmen	37
3.5. Kosten der Abschwächung der Klimaänderung	39
Literatur	42
Glossar	43

Noch hat das Satellitenbild des Alpenbogens grössere weisse Bereiche. Die alpinen Gletscher, die einen unermesslichen Wert unseres Landes ausmachen, sind deutlich erkennbar. Wie lange noch?

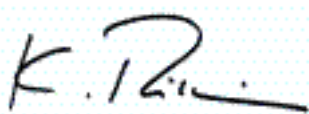
Der umfangreiche wissenschaftliche IPCC-Klimabericht, der von Hunderten von Forscherinnen und Forschern abgefasst und beurteilt wurde, zeigt die zu erwartenden Klimatrends und deren Folgen auf. Immer wieder gab es Zweifel, ob eine Erwärmung der Erdatmosphäre wirklich stattfindet. Nun sprechen die wissenschaftlichen Fakten eine deutliche Sprache: Der Treibhauseffekt verändert unsere Umwelt.

Im vorliegenden Bericht sind die für die Schweiz relevanten Aussagen des IPCC-Berichts zusammengefasst. Viele Folgen der Klimaänderung sind evident. Höhere Durchschnittstemperaturen lassen die Eismassen schmelzen. In der Schweiz sind die meisten Gletscher seit Jahren im Rückzug. Welche Konsequenzen wird die schwindende Schneesicherheit für die Wintersportorte haben? Höhere Temperaturen führen aber auch zum Rückgang der Permafrostböden. Instabile Böden, Rutschungen und Murgänge sind zu befürchten.

In unseren geographischen Breiten ist mit mehr Niederschlägen, häufigeren Unwettern und mehr Überschwemmungen zu rechnen. Damit werden grössere Schadenfälle – und mehr menschliches Leid – verbunden sein. Ein wärmeres Klima wird die Vegetationsdecke und die Zusammensetzung des Baumbestandes in den Wäldern verändern. Laubwälder sollen gegenüber Nadelwäldern bessere Wachstumsbedingungen vorfinden. Gewisse Pflanzen werden rascher wachsen. Was bedeutet dies für unser Ökosystem? Welche Auswirkungen sind für unsere Landwirtschaft zu erwarten?

Die Politik ist gefordert. Im 19. Jahrhundert hatten sich in der Schweiz Naturkatastrophen – Überschwemmungen, Steinschläge, Rutschungen und Lawinen gehäuft. Diese Katastrophen haben unsere Vorfahren vor 125 Jahren gezwungen, den Wald rigoros zu schützen. Es entstand das erste Forstgesetz. „Die Schweiz hat den Wald reden gehört, seine Warnungen ernst genommen und mit dem modernen Umweltschutz begonnen. Heute wollen wir nicht Katastrophen abwarten, sondern in der Umweltpolitik vorausschauend handeln,“ schreibt Bundespräsident Moritz Leuenberger. Das revolutionäre 125-jährige Forstpolizeigesetz beruhte auf dem Grundsatz der Nachhaltigkeit. Es durfte nur so viel Holz genutzt werden, wie nachwachsen konnte. Die Waldfläche musste konstant bleiben. Das Forstpolizeigesetz von 1876 war und ist internationales Vorbild.

So erwarte ich, dass unsere Regierung und unser Parlament vorausschauend die notwendigen Konsequenzen aus den Resultaten des Wissensstandsberichts des IPCC ziehen. Die Schweiz muss alles in ihrer Möglichkeit Stehende tun, um die Ursachen des weltumspannenden Problems der Klimaerwärmung zu beheben. Die aktive Beteiligung an der weltweiten Umsetzung der Kyoto-Protokolls ist notwendig. So wie unsere Vorfahren in weiser Voraussicht ein vorbildliches Schweizer Forstgesetz geschaffen haben. Es braucht aber auch möglichst viele persönliche Massnahmen zum sparsamen Umgang mit den fossilen Brenn- und Treibstoffen. Viele konstruktive Vorschläge liegen vor. Nehmen wir sie auf.



Nationalrätin Dr. Kathy Riklin
Präsidentin des OcCC

Vorwort

Der dritte Wissensstandsbericht (TAR) des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) wurde 2001 veröffentlicht. Am TAR haben über 2500 Fachpersonen mitgearbeitet. Der Bericht fasst auf über 3000 Seiten das vorhandene Wissen zusammen und hat einen gründlichen Begutachtungsprozess durchlaufen. Er besteht aus den drei Bänden der Arbeitsgruppen I, II und III sowie dem Synthesebericht (auf dem Web abrufbar unter www.ipcc.ch/pub/tar):

- Der Bericht der Arbeitsgruppe I (*Klimaänderung 2001: Die wissenschaftliche Basis*) behandelt das Klimasystem, die Ursachen der Klimaänderung, Analysen des vergangenen Klimas und Abschätzungen von zukünftigen Klimaänderungen sowie die Erkennung und Zuordnung von menschlichen Einflüssen auf das Klima der letzten 50 Jahre.
- Der Bericht der Arbeitsgruppe II (*Klimaänderung 2001: Auswirkungen, Anpassung und Anfälligkeit*) behandelt die Anfälligkeit, Anpassungsfähigkeit und Verwundbarkeit von natürlichen und sozioökonomischen Systemen bezüglich der Klimaänderung sowie die möglichen Folgen und Anpassungsmöglichkeiten auf regionaler und globaler Ebene.
- Der Bericht der Arbeitsgruppe III (*Klimaänderung 2001: Verminderung*) befasst sich mit den technologischen und biologischen Optionen zur Abschwächung der Klimaänderung, deren Kosten und Zusatznutzen, den Hindernissen für deren Anwendung sowie mit den politischen Anstrengungen, Massnahmen und Instrumenten zur Überwindung dieser Hindernisse.
- Der Synthesebericht (*Klimaänderung: Synthesebericht*) beantwortet Fragen zu bestimmten politischen Belangen, die im Zusammenhang mit der Rahmenkonvention zur Klimaänderung aufgebracht wurden.

IPCC wurde 1988 von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Seit 1990 hat IPCC eine Reihe von Wissensstandsberichten, Spezialberichten, Technischen Dokumenten und anderen Produkten erarbeitet. Als Standardwerke werden sie von politischen Entscheidungsträgern, Forschenden und anderen Experten häufig gebraucht.

Das Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) hat sich zur Aufgabe gemacht, die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Berichte der Arbeitsgruppen I, II und III in allgemein verständlicher Sprache darzustellen. 21 Fachpersonen wurden damit beauftragt, einzelne Kapitel zu lesen und die relevanten Aussagen für die Schweiz zusammenzufassen. Die Autoren waren angehalten, sich inhaltlich möglichst genau an die Vorlage zu halten und neue oder eigene Forschungsergebnisse, die im TAR nicht berücksichtigt sind, zu ignorieren. Ihr Interpretationsspielraum bestand in der Auswahl und Gewichtung der Aussagen. Die Zusammenfassung wurde von sechs unabhängigen Fachpersonen begutachtet und revidiert. Um den Bezug zur Schweiz zu verstärken, wird der Bericht ergänzt durch sieben Texte von Experten zu ausgewählten Themen (gelb unterlegt). Sie enthalten auch Informationen, die nicht Teil des TAR sind. Der vorliegende Bericht wurde am 10. Januar 2002 vom OcCC gutgeheissen.

Mit dieser Zusammenfassung möchte das OcCC den Inhalt des TAR einer breiteren interessierten Leserschaft zugänglich machen. Als weitere Dienstleistung wurden die Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger der drei Arbeitsgruppen und der Synthesebericht von ProClim- und dem OcCC in Zusammenarbeit mit deutschen und österreichischen Forschungsorganisationen übersetzt. Die Berichte können auf Deutsch und Französisch bei ProClim- bezogen werden.

Zusammenfassung

Der dritte Wissensstandsbericht (TAR) des IPCC liegt vor. Eine Arbeitsgruppe des OcCC hat die wichtigsten Ergebnisse des TAR aus der Sicht der Schweiz zusammengefasst:

Beobachtungen zeigen insgesamt eine Erwärmung der Erde und weitere Veränderungen des Klimasystems.

Die 1990er Jahre waren wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 war das wärmste Jahr der letzten 1000 Jahre. Im 20. Jahrhundert nahmen Niederschläge über den Kontinenten in mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre zu. Schnee- und Eisbedeckung nahmen ab und der Meeresspiegel ist angestiegen.

Der grösste Teil des Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre ist wahrscheinlich den Aktivitäten des Menschen zuzuschreiben. Die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas haben seit Beginn der Industrialisierung stark zugenommen. Klimamodelle können die beobachtete Erwärmung der letzten 50 Jahre nur simulieren, wenn sie den Anstieg der Treibhausgase berücksichtigen.

Menschliche Einflüsse werden die Zusammensetzung der Atmosphäre weiter verändern. Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird die globale mittlere Temperatur um 1.4 bis 5.8°C steigen. Die Temperatur wird über Land und im Alpenraum sehr wahrscheinlich stärker ansteigen als im globalen Mittel. Schnee- und Eisbedeckung werden weiter abnehmen und der Meeresspiegel wird weiter ansteigen.

Die durch den Menschen verursachte Klimaänderung wird mehrere Jahrhunderte andauern. Eine Stabilisierung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes verlangt, dass die globalen Emissionen unter die heutigen Werte gesenkt werden. Langfristig müssten die Emissionen auf einen Bruchteil der heutigen Werte abfallen.

Die Klimaänderung hat Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft.

Als Folge der Klimaänderung wird der Rückgang der Gletscher und des Permafrosts in den Bergen anhalten. In den Alpen werden die Niederschläge in Form von Schnee abnehmen und in einzelnen Regionen sogar ganz ausbleiben. In vielen Regionen dürften insbesondere im Winter Häufigkeit und Stärke der Hochwasser zunehmen.

Die Wirkung der Klimaänderung auf Ökosysteme ist regional unterschiedlich und erfolgt im Zusammenspiel mit anderen Umwelteinflüssen. Die Artenzusammensetzung der natürlichen Ökosysteme wird sich verändern. In der Landwirtschaft wird die ertragssteigernde Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen und wärmerer Temperaturen durch andere Faktoren begrenzt.

Durch die Klimaänderung ist anfänglich mit einer Zunahme der Senkenwirkung von Landökosystemen zu rechnen. Bei einer sich weiter fortsetzenden Klimaänderung können sich die Ökosysteme aber auch wieder in Kohlenstoff-Quellen verwandeln.

In gemässigten Klimazonen werden wärmere Sommer und häufigere Hitzewellen zu mehr Todesfällen führen. Gesundheitliche Auswirkungen der Luftverschmutzung werden durch die Klimaänderung wahrscheinlich noch verstärkt. Die Verbreitung und Häufigkeit von Infektionskrankheiten wird sich verändern.

Volkswirtschaftliche und versicherte Schäden durch wetterbedingte Naturkatastrophen haben global stark zugenommen. Im Finanzsektor sind vor allem die Versicherungen direkt betroffen. Ein klarer Zusammenhang zwischen wachsenden Schäden und Klimaänderung lässt sich noch nicht herstellen.

Es gibt Möglichkeiten, die Emissionen von Treibhausgasen durch technische Massnahmen zu senken und den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen durch biologische Massnahmen abzuschwächen.

Fehlende ökonomische und ausbleibende politische Massnahmen erschweren oft die technisch mögliche Reduktion der Treibhausgasemissionen. Hemmnisse und Markunvollkommenheit behindern die Verbreitung von Technologien und Verfahrensweisen.

Zur Reduktion der Treibhausgase stehen zahlreiche Politikoptionen zur Verfügung. Dabei ermöglicht eine Kombination von Massnahmen eine erfolgreiche Klimapolitik. International sollten die Massnahmen und politischen Strategien koordiniert und harmonisiert werden.

Eine zentrale Rolle spielen die Kosten der Massnahmen zur Abschwächung der Klimaänderung. Durch die flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls können sie entscheidend gesenkt werden. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Höhe einer CO₂-Steuer und der Entwicklung des BIP.

1. Beschreibung der globalen Klimaänderung

Im ersten Kapitel sind die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Arbeitsgruppe I des dritten Wissensstandsberichts (TAR) des IPCC zusammengefasst. Der Bericht zeigt auf fast 900 Seiten die Erkenntnisse der Klimaforschung der letzten 5 Jahre bezüglich der Klimaänderung.

Die Klimaänderung ist ein globaler Prozess. Ihre Beschreibung hat deshalb auch im Rahmen dieser Zusammenfassung globalen Charakter. Behandelt werden die bisherige beobachtete Klimaänderung, die Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde, die Ursachen der beobachteten Klimaänderung, die Abschätzung der künftigen Klimaänderung und die Szenarien zur Stabilisierung der Treibhausgase.

Für Abschätzungen der Unsicherheit werden in diesem Kapitel die Begriffe der Arbeitsgruppe I des IPCC verwendet: *praktisch sicher* (>99% Wahrscheinlichkeit, dass die Aussage zutrifft), *sehr wahrscheinlich* (90–99%), *wahrscheinlich* (66–90%), *mittlere Wahrscheinlichkeit* (33–66%), *unwahrscheinlich* (10–33%), *sehr unwahrscheinlich* (1–10%), *äusserst unwahrscheinlich* (<1%).

1.1. Beobachtete Klimaänderung

Beobachtungen zeigen insgesamt eine Erwärmung der Erde. Die mittlere Oberflächentemperatur der Nordhemisphäre ist im 20. Jahrhundert wahrscheinlich stärker angestiegen als in vergleichbaren Perioden während der letzten 1000 Jahre. Die 1990er Jahre waren wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 war das wärmste Jahr der letzten 1000 Jahre. Zugleich nahmen Schnee- und Eisbedeckung im 20. Jahrhundert ab, Niederschläge sehr wahrscheinlich zu, und der Meeresspiegel ist angestiegen.

Die Erde wird wärmer:

Die Temperaturschwankungen der letzten 1000 Jahre können deutlich besser abgeschätzt werden als noch 1995 im zweiten Wissensstandsbericht (SAR). Dies ermöglicht, den Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts in eine längerfristige Perspektive

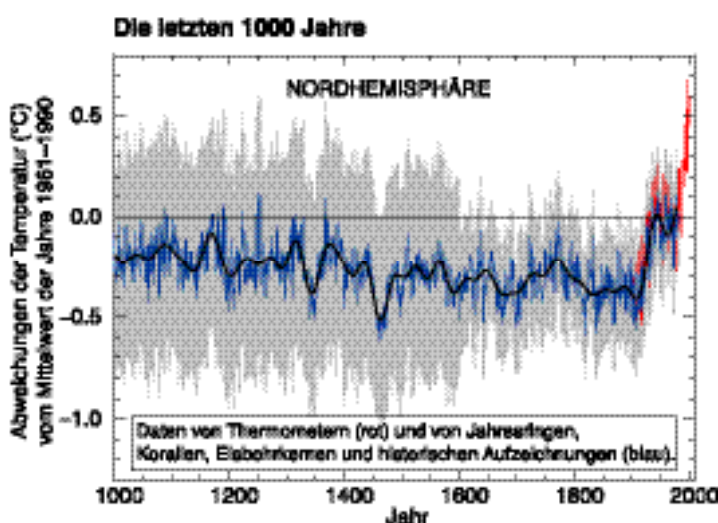


Abbildung 1: Temperaturanstiege wie seit 1910 sind in dieser Dauer und Grösse in den letzten 1000 Jahren nie aufgetreten. Direkte Messungen in Rot, rekonstruierte Werte in Blau, Mittelwertskurve (50-Jahr gleitendes Mittel) in Schwarz. Unsicherheiten (grau) werden mit zunehmendem Alter der Daten grösser.

einzuordnen (Abbildung 1). Während des 11. bis 14. Jahrhunderts waren die Temperaturen auf der Nordhemisphäre wärmer als während des 15. bis 19. Jahrhunderts (Kleine Eiszeit). Es gibt jedoch keine Hinweise, dass diese Schwankung weltweit gleichzeitig erfolgte. Die anhaltende globale Erwärmung im 20. Jahrhundert kann nicht einfach als Ausklang der Kleinen Eiszeit gedeutet werden, da in den letzten 1000 Jahren Temperaturanstiege dieser Dauer und Grösse nicht aufgetreten sind.

Die beobachtete Erwärmung im 20. Jahrhundert erfolgte in zwei Phasen, nämlich von 1910 bis 1945 und ab 1975. Auf der Nordhemisphäre betrug die Erwärmung in der ersten Phase $(0.17 \pm 0.03)^\circ\text{C}/\text{Jahrzehnt}$ und ab 1975 $(0.24 \pm 0.07)^\circ\text{C}/\text{Jahrzehnt}$. Die Erwärmung war deutlich stärker auf der Nord- als auf der Südhemisphäre (Abbildung 2). Nachttemperaturen sind stärker angestiegen als Tagestemperaturen, was zu einer Verlängerung der frostfreien Jahreszeit geführt hat.

Temperatortrends 1976 bis 2000

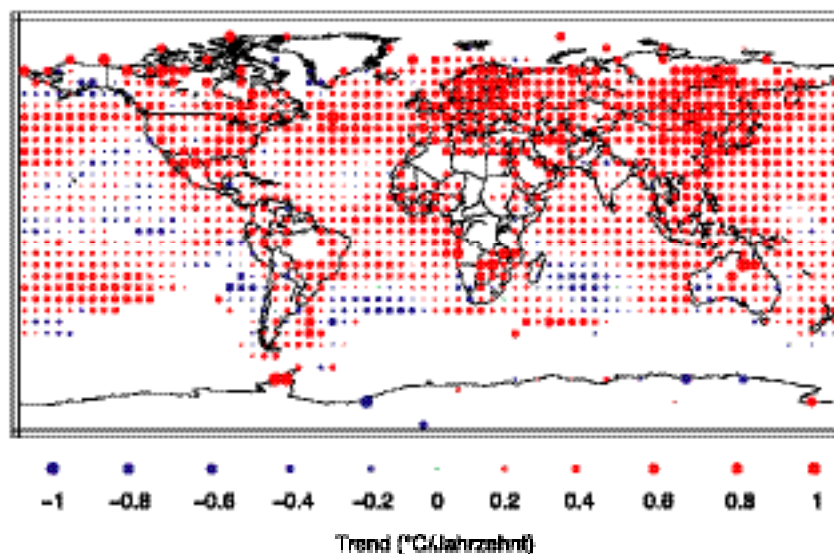


Abbildung 2: Die Nordhemisphäre hat sich stärker erwärmt als die Südhemisphäre. Trends der Oberflächentemperatur in $^\circ\text{C}$ pro Jahrzehnt, aus den Jahresmitteltemperaturen von 1976 bis 2000. Die Trends sind durch die Grössen der Punkte gekennzeichnet (Erwärmung rot, Abkühlung blau).

Weniger Schnee und Eis:

Seit 1960 ist die Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhemisphäre sehr wahrscheinlich um etwa 10% zurückgegangen. Weltweit ziehen sich die Gletscher in den Bergregionen seit Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Obwohl die Temperaturen in den Tropen seit 1980 nur schwach angestiegen sind, ist dort ein schneller Rückzug der Gletscher zu verzeichnen. Die Ausdehnung der arktischen Meereisdecke im Frühjahr und Sommer hat seit 1950 um 10 bis 15% abgenommen, die Dicke ist in dieser Periode sogar um 40% geschrumpft. In der Antarktis wurde dagegen eine schwache Vergrösserung der Meereisfläche festgestellt.

Mehr Niederschläge:

Im 20. Jahrhundert haben die Niederschläge auf den Kontinenten in den mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre sehr wahrscheinlich um 0.5 bis 1% pro Jahrzehnt zugenommen. Messungen und Satellitenbeobachtungen zeigen, dass der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre seit den 1970er Jahren wahrscheinlich um mehrere Prozent pro Jahrzehnt gestiegen ist. Die Wolkenbedeckung hat im 20.

Jahrhundert in mittleren und hohen geographischen Breiten wahrscheinlich um 2% zugenommen. Mehr Wolken haben zu der beobachteten Verringerung der Tagesschwankungen der Temperaturen beigetragen.

In Regionen, in denen der Niederschlag gesamthaft zugenommen hat, sind sehr wahrscheinlich auch schwere und extreme Niederschlagsereignisse häufiger aufgetreten. Hingegen gibt es keine Hinweise, dass die Häufigkeit und Stärke von tropischen und aussertropischen Stürmen zugenommen hat.

Temperaturentwicklung in der Schweiz im 20. Jahrhundert

Der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert ist in der Schweiz deutlich stärker als im globalen Mittel. Die Zunahme ist wie beim globalen Mittel hauptsächlich auf den starken Anstieg in den letzten drei Jahrzehnten zurückzuführen.

In den Schweizer Stationen ist kein signifikanter Unterschied in der Entwicklung zwischen verschiedenen Höhengniveaus zu erkennen. Dagegen sind regionale Unterschiede zwischen der West- und Ostschweiz und zwischen der Alpennordseite und der Alpensüdseite erkennbar. Für das 20. Jahrhundert ergeben sich folgende lineare Trends¹:

- Deutschschweiz² : 1.3 °C (1.2 – 1.5)
- Westschweiz³ : 1.6 °C (1.5 – 1.7)
- Alpensüdseite⁴ : 1.0 °C

Das entsprechende globale Mittel beträgt 0.6°C.

Auch in den letzten 30 Jahren ist die Temperaturzunahme in der Schweiz mit rund 0.4 – 0.6 °C pro Jahrzehnt deutlich grösser als im globalen Mittel (0.1 – 0.2 °C pro Jahrzehnt). Die linearen Trends 1971 bis 2000 sind in mittleren Höhenlagen und auf der Alpensüdseite etwas tiefer (ca. 0.5°C/ Jahrzehnt) als im Mittelland (ca. 0.6°C/ Jahrzehnt).

Für die im Vergleich zum globalen Mittel deutlich stärkere Temperaturzunahme in der Schweiz gibt es viele mögliche Gründe, wobei wahrscheinlich mehrere Faktoren beteiligt sind. Es sind dies zum Beispiel:

- Die Temperatur über den Landmassen nimmt allgemein stärker zu als das globale Mittel.
- Die Abnahme der Schneebedeckung in Gebirgsräumen führt durch die Änderung der Albedo (bzw. der Absorption der Sonnenstrahlung) zu einer zusätzlichen Erwärmung (positive Feedback).
- Interne Schwankungen im Klimasystem mit Perioden von einigen Jahrzehnten (z.B. Nordatlantische Oszillation) können durch Überlagerung zu einer Verstärkung (oder auch Abschwächung) der Erwärmung führen. Solche natürlichen Schwankungen könnten allerdings auch durch die globale Erwärmung dauerhaft verändert werden.

Welcher dieser Faktoren wieviel zur Verstärkung der Erwärmung beiträgt, ist nur schwer abzuschätzen. Durch zur Zeit noch nicht vorliegende statistische Analysen liesse sich ev. der Anteil, der über zufällige Schwankungen hinausgeht, bestimmen. Regionale physikalische Modellrechnungen zeigen im Übrigen fast durchwegs ebenfalls eine verstärkte Erwärmung im Alpenraum. Zur Zeit deutet nichts auf eine Abschwächung des Trends der letzten 30 Jahre hin.

Dr. Urs Neu

¹ Für die Trendberechnung wurden die homogenisierten Messreihen (Jahresmittel, 12 Stationen) der Monatsdatenbank der MeteoSchweiz verwendet.

² Säntis, Davos, Zürich, Engelberg, Bern, Basel, Chaumont

³ Chateaux d'Oex, Sion, Genf

⁴ Lugano, Sils-Maria

Der Meeresspiegel steigt:

Aufgrund von Gezeitenmessungen wird gefolgert, dass der Meeresspiegel während der letzten 100 Jahre um 1 bis 2 mm pro Jahr angestiegen ist. Die durchschnittliche Erhöhung war im 20. Jahrhundert grösser als im Jahrhundert davor.

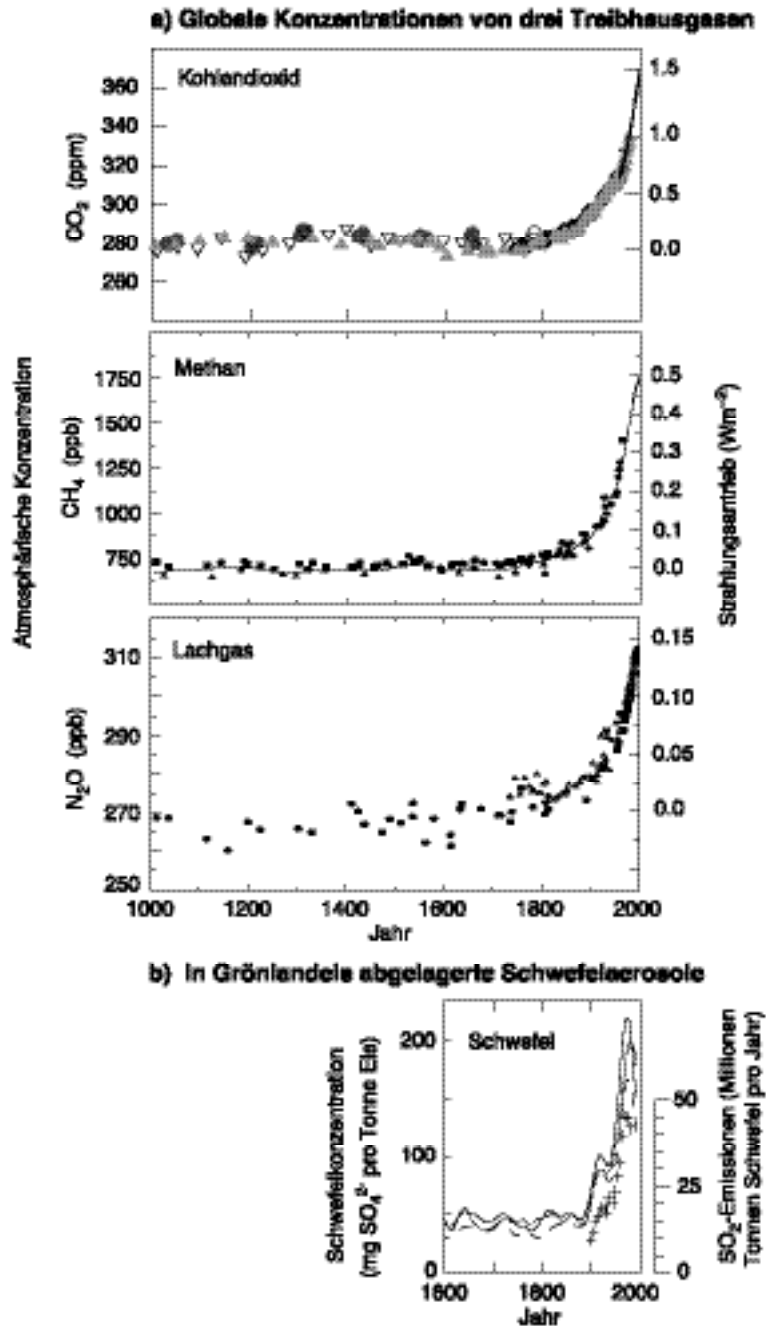


Abbildung 3: (a) Die Konzentrationen der drei Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) in der Atmosphäre steigen seit dem Beginn des industriellen Zeitalters (1750) markant an. Messungen für die letzten 1000 Jahre in Luftblasen aus verschiedenen polaren Eisbohrkernen als Symbole, direkte Messungen für die letzten Jahrzehnte als Kurve (Kohlendioxid) oder Kurventeil (Methan). (b) Die Schwefelkonzentration in grönländischem Eis (Kurven) ist ein Mass für die regionale Konzentration von Schwefelaerosolen in der Atmosphäre. Die seit 1900 gemessenen Schwefelemissionen (+) steigen in ähnlicher Weise an.

1.2. Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde

Menschliche Aktivitäten, die mit Emissionen von Aerosolen und Treibhausgasen verbunden sind, verändern die Atmosphäre und damit die Strahlungsbilanz der Erde (Summe von Ein- und Abstrahlung). Davon wird eine Jahrhunderte andauernde Wirkung auf das Klima erwartet. Natürliche Faktoren (Sonneneinstrahlung und vulkanische Aerosole) haben dagegen wenig zur Veränderung der Strahlungsbilanz während der letzten 100 Jahre beigetragen.

Treibhausgase in der Atmosphäre sind wichtig für das Leben auf der Erde. Sie verändern die Strahlungsbilanz der Erde, weil sie zwar für die kurzwellige Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung) durchlässig sind, aber die langwellige Abstrahlung der Erde (Infrarot-Strahlung) zum Teil zurückhalten. Dadurch erwärmt sich die Erde und wird bewohnbar. Dieser natürliche Effekt wird durch die menschliche Produktion von Treibhausgasen verstärkt.

Mehr Treibhausgase in der Atmosphäre:

Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) sind neben Wasserdampf die wichtigsten Treibhausgase. Ihre Konzentrationen haben in den letzten 200 Jahren stark zugenommen (Abbildung 3a). Seit 1750 sind die CO_2 - und die Methankonzentrationen um 31% beziehungsweise 151% angestiegen und sind höher als je zuvor in den letzten 420'000 Jahren. Seit mindestens 20'000 Jahren wurde kein so schneller CO_2 -Anstieg beobachtet.

Etwa 75% der CO_2 -Emissionen der letzten 20 Jahre sind auf die Verbrennung fossiler Energieträger (Erdöl, Kohle, Gas) zurückzuführen, und etwa 25% auf veränderte Landnutzung, vor allem Abholzung von Wäldern. Die Emission durch Landnutzungsänderung wurde in den letzten 20 Jahren allerdings durch eine vermehrte Aufnahme von Kohlenstoff durch die Vegetation in den Tropen und mittleren Breiten überkompensiert. Diese CO_2 -Senken sind möglicherweise durch grösseres Pflanzenwachstum dank höherer atmosphärischer CO_2 -Konzentration und erhöhtem Eintrag von Stickstoff sowie durch das Nachwachsen von Wäldern in brachliegenden Gebieten mittlerer Breite entstanden.

Der durch menschliche Aktivitäten bedingte Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen erhöht die Strahlungsbilanz der Troposphäre um etwa $+2.43 \text{ Wm}^{-2}$. Die Veränderung mit positivem Vorzeichen bedeutet eine Erwärmung der Troposphäre. Zu diesem zusätzlichen Treibhauseffekt trägt heute CO_2 etwa 1.46 Wm^{-2} , Methan etwa 0.48 Wm^{-2} und Lachgas etwa 0.15 Wm^{-2} bei. Weitere Treibhausgase sind halogenierte Kohlenwasserstoffe (0.34 Wm^{-2}) und troposphärisches Ozon (0.35 Wm^{-2}).

Unsicherer Einfluss der Aerosole:

Aerosole, kleinste Schwebeteilchen aus Verbrennungsprozessen (Schwefel, Russ und organische Kohlenstoffteilchen), tragen im Allgemeinen zu einer Abkühlung bei, indem sie einfallendes Sonnenlicht streuen. Messungen in Grönlandeis zeigen, dass die Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre seit 1900 stark gestiegen sind und erst Ende des 20. Jahrhunderts dank technologischer Fortschritte wieder sinken (Abbildung 3b). Ihr Einfluss auf die Strahlungsbilanz ist aber nach wie vor unsicher ($\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$).

Geringer Einfluss von Sonne und Vulkanen:

Die letzten zwei Sonnenaktivitätszyklen (11-Jahres-Zyklus) bewirkten gemäss Satellitenmessungen jeweils Schwankungen der Strahlungsbilanz im Bereich von etwa 0.2 Wm^{-2} . Über die gesamte Zeit seit 1750 wird der Einfluss der Sonnenaktivität auf die Strahlungsbilanz auf $(0.3 \pm 0.2) \text{ Wm}^{-2}$ geschätzt. Schwankungen auf längeren Zeitskalen könnten grössere Veränderungen verursacht haben, doch sind

deren Abschätzungen noch ungenügend abgesichert. Verglichen mit der Erhöhung der Strahlungsbilanz um 2.43 Wm^{-2} durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen sind sie relativ klein.

Kleine Schwankungen der Sonneneinstrahlung und eine verstärkte Vulkanaktivität zwischen 1960 und 1991 hatte gesamthaft eine abkühlende Wirkung während der letzten 20 und wahrscheinlich während der letzten 40 Jahre.

1.3. Die Ursache der Klimaänderung der letzten 50 Jahre

Aufgrund neuer und klarer Belege ist wahrscheinlich, dass der grösste Teil des Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre den Aktivitäten des Menschen zuzuschreiben ist. Simulationen mit Klimamodellen, die die Erhöhung der Treibhausgase nicht berücksichtigen, können die Erwärmung der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht erklären.

Die heutigen computergestützten Klimamodelle können die beobachtete Erwärmung der letzten 50 Jahre nur quantitativ simulieren, wenn sie den Anstieg der Treibhausgase berücksichtigen (Abbildung 4). Bis etwa 1950 beeinflussen natürliche Schwankungen der Strahlungsbilanz aufgrund von Sonnenzyklen und Vulkanausbrüchen die mittlere globale Temperatur wesentlich. Der Temperaturanstieg nach 1950 ist jedoch nicht mit natürlichen Faktoren allein erklärbar. Mehrere Simulationen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen bestätigen dieses Resultat.

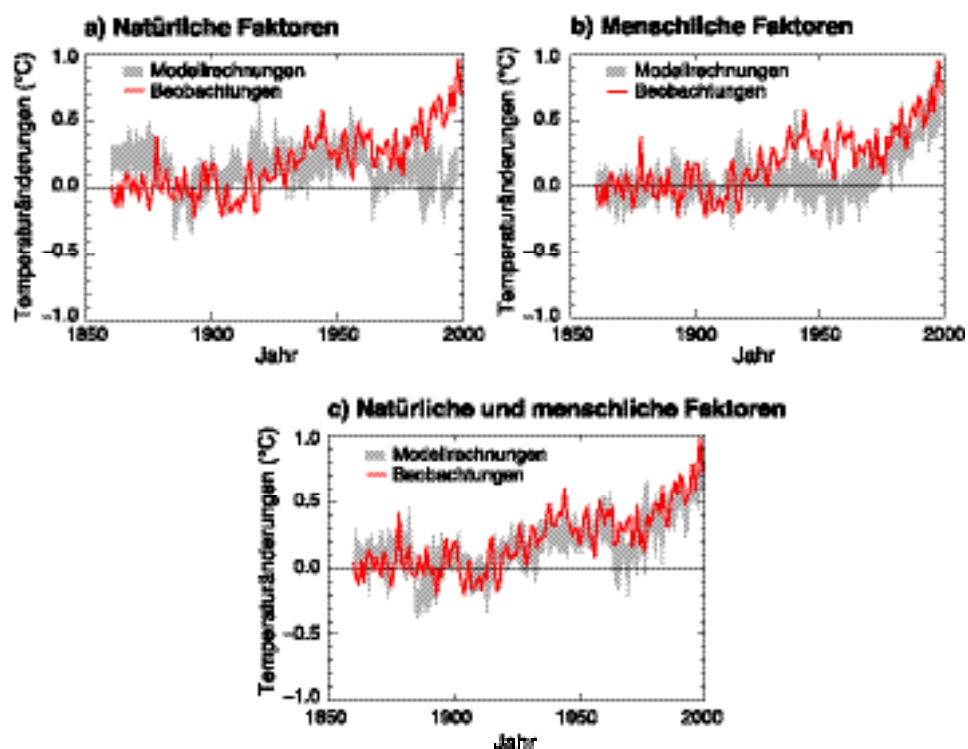


Abbildung 4: Die Erwärmung der letzten 50 Jahre kann ohne den Beitrag der Treibhausgase und Aerosole nicht quantitativ simuliert werden. Veränderung der globalen mittleren Temperatur von 1850 bis 2000 basierend auf vier Modellsimulationen (graues Band) im Vergleich mit den beobachteten Temperaturen (rote Kurve). Drei Einflüsse auf die Strahlungsbilanz wurden untersucht: (a) natürliche Faktoren (Sonnenzyklen und Vulkanaktivität); (b) menschliche Faktoren (Anstieg der Treibhausgase und der Aerosole); (c) Berücksichtigung der natürlichen und menschlichen Faktoren.

Dank neuer statistischer Methoden und Modelle können die beobachteten Veränderungen der letzten Jahrhunderte verschiedenen Ursachen zugeordnet werden. Die meisten Studien zeigen, dass die deutliche Erwärmung während der letzten 50 Jahre dem Anstieg der Treibhausgase zugeschrieben werden kann. Die in diesen Studien berücksichtigten Ursachen der Veränderung der Strahlungsbilanz können die beobachteten Temperaturveränderungen vollständig erklären. Dies schließt nicht aus, dass auch andere Effekte zur beobachteten Erwärmung beigetragen haben könnten. Unsicher sind nach wie vor die Abschätzung der natürlichen Klimaschwankungen, die verschiedenen Einflüsse der Aerosole und die Rekonstruktion der Stärke von Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität. Trotz dieser Unsicherheiten ist für die letzten 50 Jahre der Effekt der vom Menschen verursachten Treibhausgase sichtbar.

1.4. Abschätzung künftiger Veränderungen bis 2100

Menschliche Einflüsse werden die Zusammensetzung der Atmosphäre weiterverändern. Die mittlere globale Temperatur steigt in allen Szenarien ohne klimapolitische Massnahmen an. In nördlichen Breiten werden die Niederschläge wahrscheinlich zunehmen.

Verschiedene Szenarien:

Für den IPCC-Spezialbericht über Emissions-Szenarien (*Special Report on Emission Scenarios*, SRES) wurden 40 Szenarien entwickelt, die die möglichen Emissionen wichtiger Treibhausgase und Aerosole für die Periode zwischen 1990 und 2100 beschreiben. Die Szenarien bilden die Grundlage für die Modelle zur Vorhersage des zukünftigen Klimas. Sie beruhen auf unterschiedlichen, aber plausiblen Annahmen über die technologische Entwicklung, die Bevölkerungsentwicklung, das wirtschaftliche Wachstum und die Globalisierung. Sie beinhalten jedoch keine politischen Massnahmen zur Verminderung der Klimaänderung.

Die Szenarien lassen sich in vier Familien A1, A2, B1 und B2 unterteilen, die je einem Sektor des Quadrates in Abbildung 5 entsprechen. A1 und A2 sind somit eher wirtschaftsorientiert, während B1 und B2 eher auf nachhaltiger Entwicklung beruhen. A1 und B1 sind eher global, A2 und B2 rechnen dagegen mit regionalen Unterschieden. Abweichende Szenarien innerhalb einer Familie sind in Gruppen gegliedert, wie in Familie A1 die Gruppen FI, T und B. Die sechs Szenarien A1FI, A1T, A1B, A2, B1 und B2 heissen *illustrative Szenarien* und stehen, als jeweils eine mögliche Entwicklung der Menschheit, stellvertretend für die verschiedenen Szenarien des entsprechenden Sektors:

- A1, wirtschaftsorientiert und global: Schnelles wirtschaftliches Wachstum, Bevölkerungshöhepunkt um 2050, schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien, Verkleinerung der globalen ökonomischen Unterschiede. Die drei Szenariengruppen, die je eine unterschiedliche technologische Entwicklung des Energiesystems beschreiben, sind A1FI (fossile Energiequellen), A1T (nicht-fossile Energiequellen) und A1B (ausgewogener Energie-Mix).
- A2, wirtschaftsorientiert und regional: Ungleiche Entwicklung der Welt, steigende Bevölkerung, regional unterschiedliche, sich langsam entwickelnde und wenig vernetzte Ökonomien.
- B1, nachhaltigkeitsorientiert und global: Schneller Wechsel zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft, Bevölkerungshöhepunkt um 2050, schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien, Angleichung der Kontinente, „weltweite Nachhaltigkeit“.

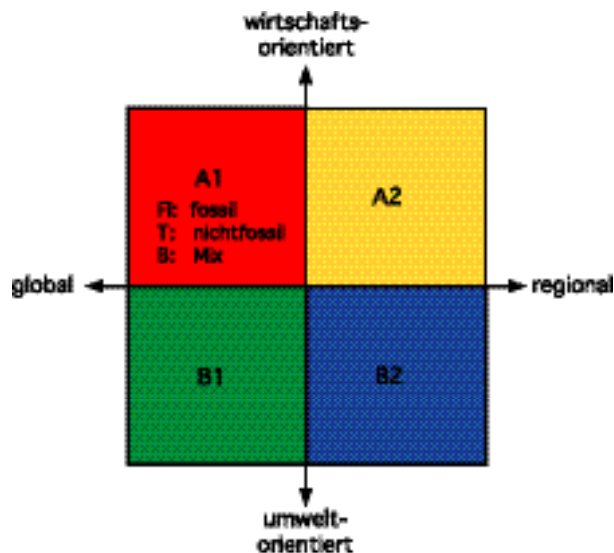


Abbildung 5: Die vier Familien A1, A2, B1 und B2 der IPCC-Emissions-Szenarien entsprechen je einem Sektor des Szenarienquadrats. Ein repräsentatives, so genannt illustratives Szenario vertritt die verschiedenen möglichen Szenarien innerhalb jedes Sektors. Die Familie A1 wird durch die drei Szenarien FI, T und B vertreten, die andere Energiesysteme einsetzen und sich in ihren Konsequenzen stark unterscheiden.

- B2, nachhaltigkeitsorientiert und regional: Regionale Lösung der Probleme, langsam steigende Bevölkerung, mässiges Wirtschaftswachstum mit regionalen Unterschieden, „lokale Nachhaltigkeit“.

CO₂-Emissionen im 21. Jahrhundert:

Die verschiedenen Szenarien führen zu einer grossen Bandbreite möglicher Emissionsverläufe. Für die sechs illustrativen Szenarien liegen die kumulierten Emissionen von Kohlendioxid bis 2100 im Bereich von 980 bis 2100 Gigatonnen Kohlenstoff (1 GtC = 10¹² kg Kohlenstoff = 3.67 10¹² kg CO₂). Zum Vergleich: die Atmosphäre enthielt zu vorindustrieller Zeit 590 GtC und die fossilen Ressourcen werden auf ungefähr 5000 GtC geschätzt.

Treibhausgaskonzentrationen im 21. Jahrhundert:

Die kombinierte Wirkung aller Treibhausgase und Aerosole führt für jedes SRES-Szenario zu einer positiven Änderung der Strahlungsbilanz (Erwärmung) der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre. Die Veränderungen der atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen sowie die Klimaänderung wurden mit Modellen abgeschätzt. Für die sechs illustrativen Szenarien steigt die atmosphärische CO₂-Konzentration bis ins Jahr 2100 auf 540 bis 970 ppm an, 90 bis 250% über die vorindustrielle Konzentration von 280 ppm (Abbildung 6a). Da das Verständnis des Kohlenstoffkreislaufes noch unvollständig ist, wird die relative Unsicherheit dieser Projektionen auf –10% bis +30% geschätzt. Es ist aber praktisch sicher, dass hauptsächlich die Freisetzung von CO₂ bei der Nutzung fossiler Brennstoffe diesen Anstieg des atmosphärischen CO₂ verursacht. Veränderte Landnutzungen, wie zum Beispiel in Artikel 3.3 und 3.4 des Kyoto-Protokolls erwähnt, können als Kohlenstoff-Senken die atmosphärische CO₂-Konzentration beeinflussen. Solche Massnahmen reduzieren die atmosphärische CO₂-Konzentration um maximal 40 bis 70 ppm bis ins Jahr 2100, also nur um ungefähr 10% der Zunahme in den illustrativen Szenarien.

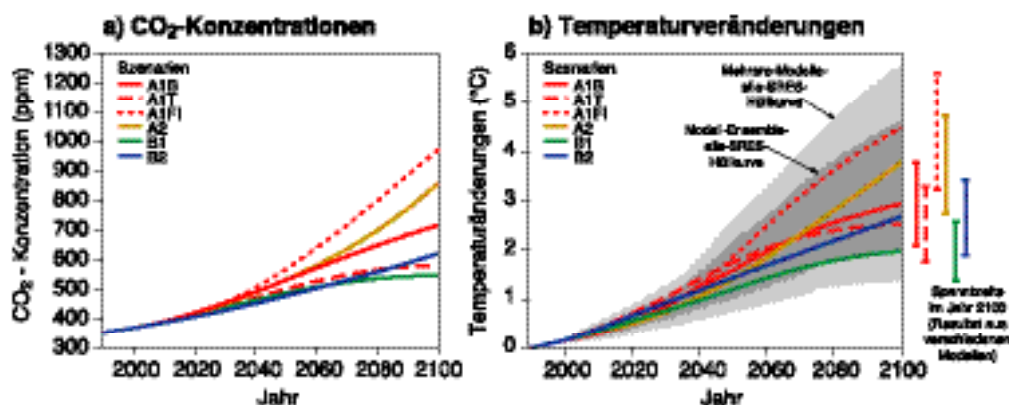


Abbildung 6: (a) Modellrechnungen des globalen Kohlenstoffkreislaufes zeigen, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration in den nächsten 100 Jahren für die sechs illustrativen SRES-Szenarien auf 540 bis 970 ppm ansteigen wird. (b) Für die SRES-Szenarien wird vorausgesagt, dass die globale mittlere Temperatur von 1990 bis 2100 um 1.4 bis 5.8°C ansteigt. Mit Hellgrau ist der Bereich der Temperaturänderungen aus allen Szenarien und allen Modellen angegeben, mit Dunkelgrau der Bereich des Durchschnitts aller Modelle für alle Szenarien.

Die vorausgesagten Konzentrationen weiterer Treibhausgase (Methan, Ozon, Lachgas, halogenierte Verbindungen) variieren erheblich für die sechs illustrativen Szenarien. Beispielsweise nimmt die Methankonzentration von heute 1760 ppb um 190 ppb ab (Szenario B1) oder um bis zu 1970 ppb zu (Szenario A2). Die starke Zunahme der Emissionen von Treibhausgasen und anderen Luftschadstoffen führt in einigen Szenarien durch eine erhöhte Grundkonzentration von bodennahem Ozon zu einer starken Luftqualitätseinbuße. Als Folge des Einsatzes neuer Technologien zur Verbesserung der Luftreinhaltung fallen die globalen Emissionen von Schwefeldioxid und die mittlere Konzentration der Schwefelaerosole in allen illustrativen Szenarien bis 2100 unter die heutigen Werte ab. Damit vermindert sich die kühlende Wirkung der Schwefelaerosole auf die Erdoberflächentemperatur.

Temperaturerhöhung im 21. Jahrhundert:

Von 1990 bis 2100 steigt die globale mittlere Temperatur um 1.4 bis 5.8°C (Abbildung 6b). Dieser Bereich ergibt sich aus den SRES-Szenarien und verschiedenen Klimamodellen. Die Erwärmung ist 2- bis 10-mal grösser als diejenige im 20. Jahrhundert und ist sehr wahrscheinlich einzigartig seit dem Ende der letzten Eiszeit vor ungefähr 10'000 Jahren.

Klimaänderungen sind regional sehr unterschiedlich. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Temperatur über Land und im Alpenraum stärker erhöht als im globalen Mittel. Es ist ebenfalls sehr wahrscheinlich, dass Häufigkeit und Intensität von sommerlichen Hitzewellen in ganz Europa zunehmen und dass die Anzahl Frosttage abnimmt.

Niederschläge im 21. Jahrhundert:

Niederschläge werden wahrscheinlich in mittleren bis hohen nördlichen Breiten zunehmen. In den meisten Gebieten mit zunehmenden Niederschlägen werden Schwankungen im jährlichen Niederschlag sehr wahrscheinlich grösser. Für den Alpenraum zeigen die Modelle tendenziell eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme der Niederschläge im Winter.

Es ist wahrscheinlich, dass die Häufigkeit von Starkniederschlägen, vor allem im Winter, in Europa zunimmt. Für einige weitere extreme Wetterphänomene gibt

es zurzeit nur ungenügende Information, um Trends abschätzen zu können, weil die globalen Klimamodelle für verlässliche Vorhersagen noch nicht genügend räumlich aufgelöst sind. Zum Beispiel werden kleinräumige Wetterphänomene wie Gewitter, Tornados und Hagel in Klimamodellen nicht simuliert.

Schnee- und Eisbedeckung im 21. Jahrhundert:

Gemäss Modellstudien werden Schnee- und Meereisbedeckung auf der Nordhemisphäre weiter abnehmen und alpine Gletscher weiter abschmelzen.

Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert:

Der globale mittlere Meeresspiegel steigt von 1990 bis 2100 zwischen 9 cm und 88 cm an. Hauptursache ist die thermische Ausdehnung des Ozeans. Dieser Bereich ergibt sich aus den SRES-Szenarien und den verschiedenen Klimamodellen.

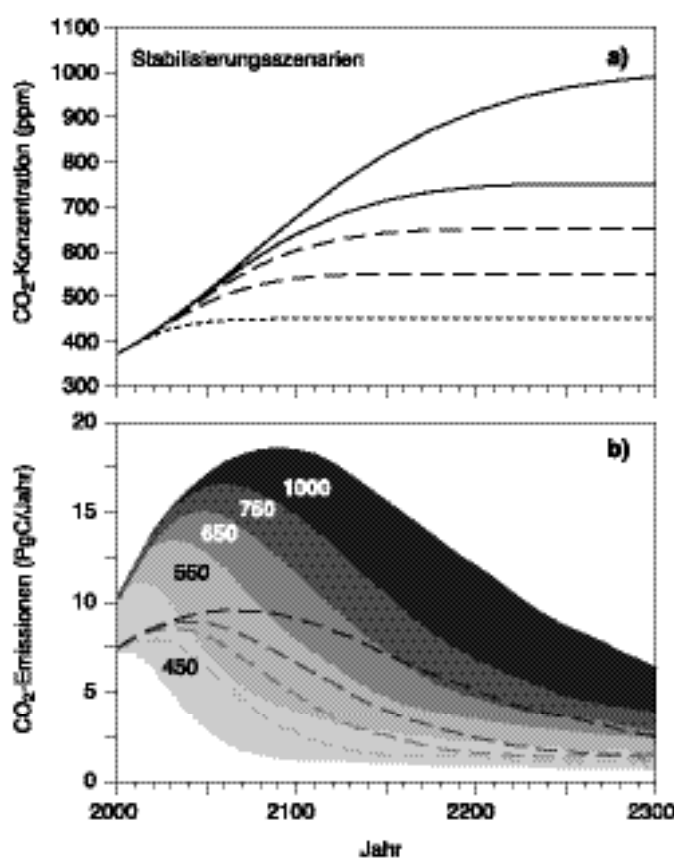


Abbildung 7: Die globalen CO₂-Emissionen müssen unter die heutigen Werte gesenkt werden, um die atmosphärische CO₂-Konzentration zu stabilisieren. (a) Verschiedene Szenarien für eine mittel- bis langfristige (50 bis über 300 Jahre) Stabilisierung der CO₂-Konzentration, die möglich würde, falls die Emissionen in den entsprechenden Bereichen in (b) verlaufen. Der mögliche Bereich der Emissionen für jedes Profil (grau) gibt die Unsicherheiten im Verständnis des Kohlenstoffkreislaufes an. Wo die Bereiche überlappen, ist die untere Grenze der Unsicherheit gestrichelt angegeben.

1.5. Stabilisierungsszenarien und ihre Konsequenzen

Die durch den Menschen verursachte Klimaänderung wird mehrere Jahrhunderte andauern. Um die Veränderungen der Strahlungsbilanz und des Klimas zu begrenzen, ist es nötig, die Emissionen von Treibhausgasen zu senken. Eine Stabilisierung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes verlangt, dass die globalen Emissionen unter die heutigen Werte gesenkt werden.

CO₂ bleibt im Klimasystem:

CO₂-Emissionen verändern die Zusammensetzung der Atmosphäre und das Klima über sehr lange Zeiträume. CO₂ aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern wird praktisch nicht abgebaut, sondern im Klimasystem akkumuliert und zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre verteilt. Mehrere hundert Jahre nach der Freisetzung einer bestimmten Menge von CO₂ befindet sich immer noch ein Viertel davon in der Atmosphäre.

Modelle des Kohlenstoffkreislaufes zeigen, dass die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration eine Reduktion der globalen CO₂-Emissionen unter die Emissionen von 1990 erfordert (Abbildung 7). Langfristig müssten die Emissionen auf einen Bruchteil der heutigen Werte abfallen. Für alle Szenarien, in denen die CO₂-Konzentration zwischen 450 und 1000 ppm stabilisiert wird, beträgt die Erwärmung bis 2100 unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten weniger als 3,5°C (Abbildung 8). Damit wird der obere Bereich der für die SRES-Szenarien vorausgesagten Temperaturerhöhung (bis 5,8°C) vermieden. Je tiefer die CO₂-Konzentration stabilisiert wird, desto kleiner bleibt die Temperaturänderung. Doch auch nach der Stabilisierung der CO₂-Emissionen steigen die Temperaturen noch jahrhundertlang weiter an, da die Ozeane sehr langsam reagieren.

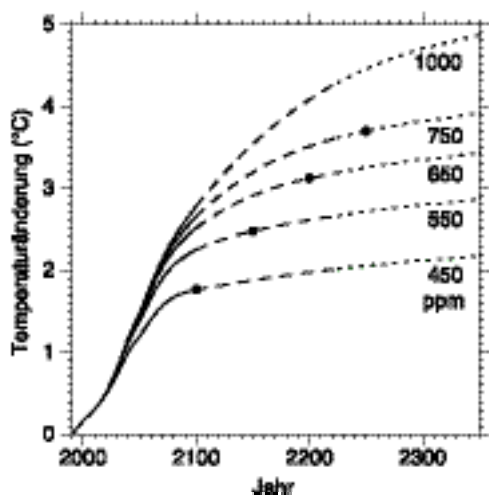


Abbildung 8: Die globale mittlere Oberflächentemperatur steigt für alle CO₂-Stabilisierungsszenarien aus Abbildung 7a bis 2100 weniger als 3,5°C. Ohne Stabilisierung könnte die Temperatur bis 5,8°C steigen. Die schwarzen Punkte zeigen den Zeitpunkt, an dem die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stabilisiert wird (vgl. Abbildung 7a). Die Temperatur steigt auch nach der Stabilisierung weiter an.

Andere Treibhausgase werden abgebaut:

Methan, Ozon und Aerosole werden rasch abgebaut. Die Konzentrationen von troposphärischem Ozon (gesteuert durch Emissionen von CO, NO_x, flüchtigen Kohlenwasserstoffen und Methan) und Aerosolen (Schwefel, Russ und organische Kohlenstoffteilchen) würden sich innerhalb von Tagen bis Wochen und die Konzentration von Methan innerhalb weniger Jahrzehnte nach dem Einfrieren der entsprechenden Emissionen stabilisieren.

Treibhausgase wie Lachgas und halogenierte Verbindungen werden abgebaut, sind aber langlebig. Um die Konzentrationen im Bereich der heutigen Werte zu stabilisieren, müssten ihre Emissionen daher ebenfalls gesenkt werden.

Auswirkungen der Klimaänderung auf Gletscher und Permafrost in den Alpen

Das Eis des Hochgebirges reagiert besonders stark auf Klimaänderungen. Bei einem Schneegrenzanstieg von knapp 100 m hat die Gesamtheit der Alpengletscher seit der Mitte des letzten Jahrhunderts bis in die 1970er Jahre gut einen Drittel ihrer Fläche und rund die Hälfte ihrer Masse verloren. Allein in den letzten 20 Jahren dürfte nochmals ein Viertel bis ein Drittel des verbleibenden Volumens verloren gegangen sein.

Die Entwicklung des Permafrostes, dessen flächenhafte Verbreitung (ca. 5% der Landesfläche) in der Schweiz heute rund doppelt so gross ist wie die verbleibende Gletscherfläche, kann nicht so genau erfasst werden. Nach den neuesten Bohrresultaten scheint die Temperatur exponierter Felsgipfel im vergangenen Jahrhundert europaweit um rund 1°C zugenommen zu haben.

Nach plausiblen Treibhauszenarien dürfte die Schneegrenze in den Alpen bis zur Mitte des kommenden Jahrhunderts um etwa 200 m ansteigen. Ein wesentlicher Teil des zurzeit noch vorhandenen alpinen Gletschervolumens dürfte dabei abschmelzen, und ausgedehnte Permafrosthänge oberhalb der Waldgrenze könnten beschleunigt auftauen. In einem solchen Szenario würden sich Murgang- und Eissturzfahren im Hochgebirge räumlich verlagern und die Hochwassergefahr (jahres-)zeitlich ausdehnen. Langfristig dürfte die Stabilität hoch gelegener Felsflanken abnehmen, wo die Gletscher als Stützen verschwinden, die Temperatur in bisher gefrorenen Felspartien zum Schmelzpunkt ansteigt und sich ehemals eisgefüllte Klüfte für die Wasserzirkulation öffnen. Die Forschung auf diesem Gebiet ist allerdings noch am Anfang.

Am auffälligsten dürften die Veränderungen im Wasserkreislauf und der landschaftliche Wandel im Gebirge werden. Vor allem der Gletscherschwund wird ein leicht erkennbares Zeichen dafür sein, dass sich das Klima mit zunehmender Geschwindigkeit von der historischen Wissensbasis entfernt. Hinsichtlich Naturgefahren werden praxistaugliche, robuste Modelle mehr und mehr die traditionellen, lokal-empirischen Entscheidungsgrundlagen (Chroniken, stumme Zeugen, Statistiken usw.) ersetzen müssen. Dies erfordert die Zusammenarbeit zwischen Behörden und Wissenschaft in Kombination mit einer systematischen Beobachtung, die erkennen lässt, was tatsächlich – in der Natur nämlich – abläuft.

Prof. Wilfried Haerberli