

TWO GLACIER, ALASKA, IS 4 KIERS OF ICE SPREADING 270 SQUARE MILES. YET THE PETROLEUM ENERGY HUMBLE SUPPLIES AMERICA COULD MELT IT AT THE RATE OF 7 MILLION TONS A DAY!

EACH DAY HUMBLE SUPPLIES ENOUGH **ENERGY** TO MELT 7 MILLION TONS OF GLACIER!

This giant glacier has remained unmelted for centuries. Yet, the petroleum energy Humble supplies—it converted into heat—could melt it at the rate of 80 tons each second! To meet the nation's growing needs for energy, Humble has applied science to nature's resources to become America's Leading Energy Company. Working wonders with oil through research, Humble provides energy in many forms—to help heat our homes, power our transportation, and to furnish industry with a great variety of versatile chemicals. Stop at a Humble station for new Enco Extra gasoline, and see why the "Happy Motoring" Sign is the World's First Choice!

HUMBLE
OIL & REFINING COMPANY
America's Leading **Energy** company



Copyrighted material

From Life Magazine 1962. Slide courtesy by S. Salter.

Der Klimawandel – Was weiß die Wissenschaft und was nicht?

Hauke Schmidt

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany

Bad Honnef, März 2019



- Grundlagen
 - Was ist Klima?
 - Die atmosphärische Energiebilanz
- Der aktuelle Stand der Klimaforschung
 - Beobachtungen
 - Ursachen von Klimaveränderungen
 - Modelle
 - Projektionen

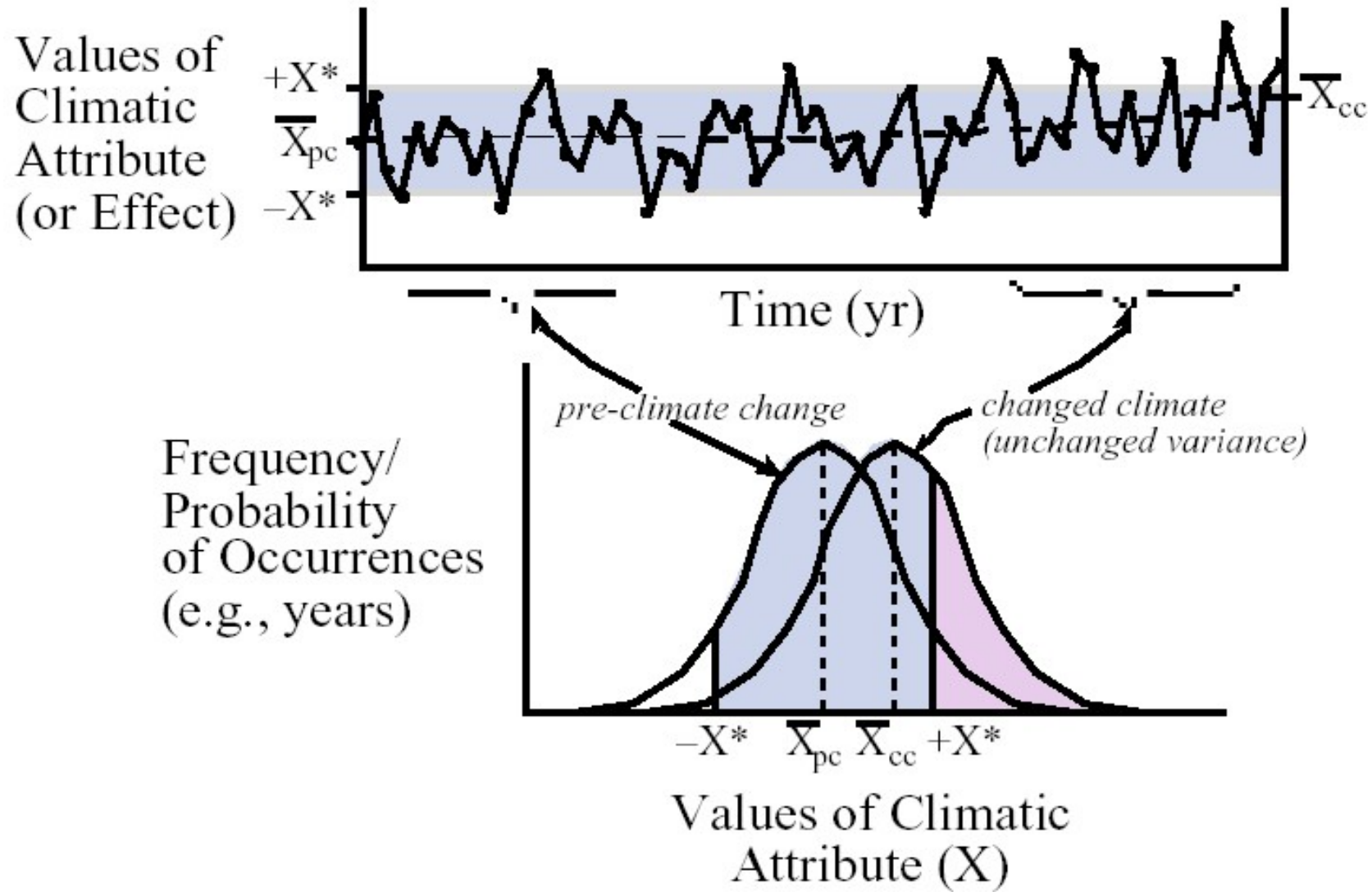


*„Climate is what you expect,
weather is what you get.“*

(Robert A. Heinlein, 1907-1988, amerikanischer Schriftsteller)



Klima als Häufigkeitsverteilung





”Das Wort Klima bezeichnet allerdings zuerst eine spezifische Beschaffenheit des Luftkreises, aber diese Beschaffenheit ist abhängig von dem perpetuierlichen Zusammenwirken einer all- und tiefbewegten, durch Strömungen von ganz entgegengesetzter Temperatur durchfurchten Meeresfläche mit der wärmestrahrenden trockenen Erde: die mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt, oder mit Wald und Kräutern bedeckt ist.”

A. v. Humboldt, *“Kosmos – Entwurf einer physischen Weltbeschreibung“*, 1845-1862

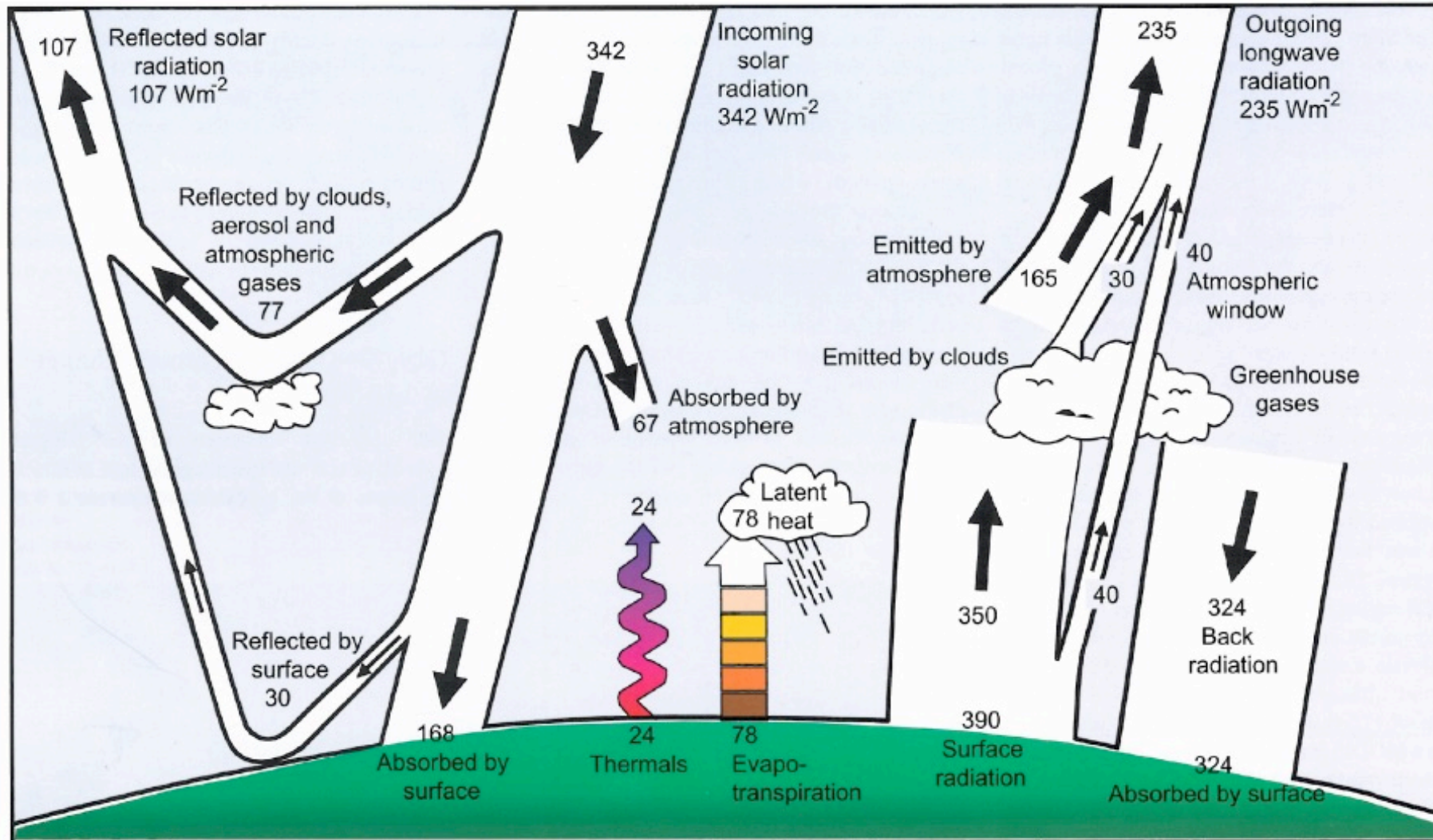




Das Energiebudget der Erdatmosphäre



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(Kiehl and Trenberth, 1997)



IPCC – der „Weltklimarat“



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Erstmals zusammengerufen 1988 von WMO und UNEP

Das IPCC organisiert sich in drei Arbeitsgruppen:

- Arbeitsgruppe I befasst sich mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Klimasystems und der Klimaänderung.
- Arbeitsgruppe II befasst sich mit der Verwundbarkeit von sozioökonomischen und ökologischen Systemen durch Klimaänderungen.
- Arbeitsgruppe III befasst sich mit Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels.

Etwa alle 6 Jahre werden Berichte erstellt, die den Stand der Wissenschaft in den drei Teilbereichen zusammenfassen. Daran sind Hunderte von Wissenschaftlern beteiligt. Der sogenannte „Fünfte Assessment Report“ (AR5) erschien 2013/14.

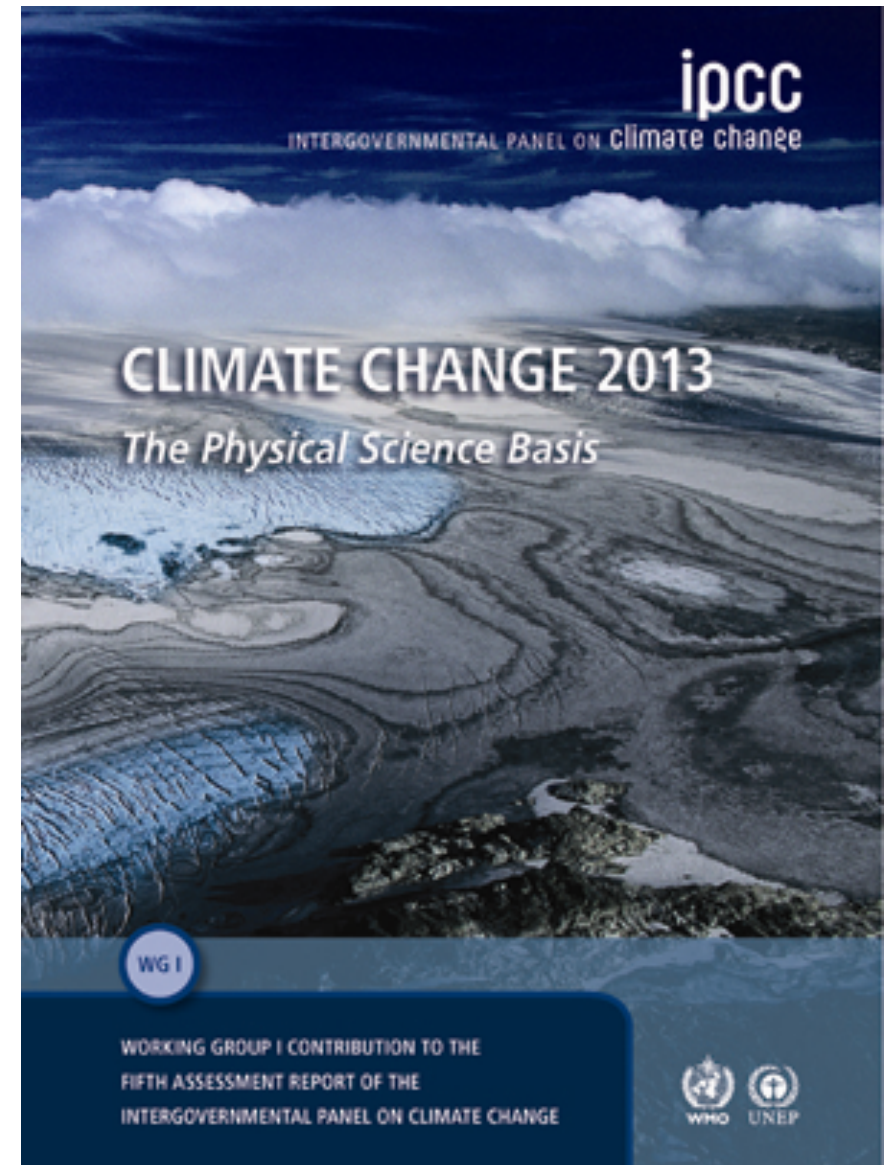
Downloads: www.ipcc.ch





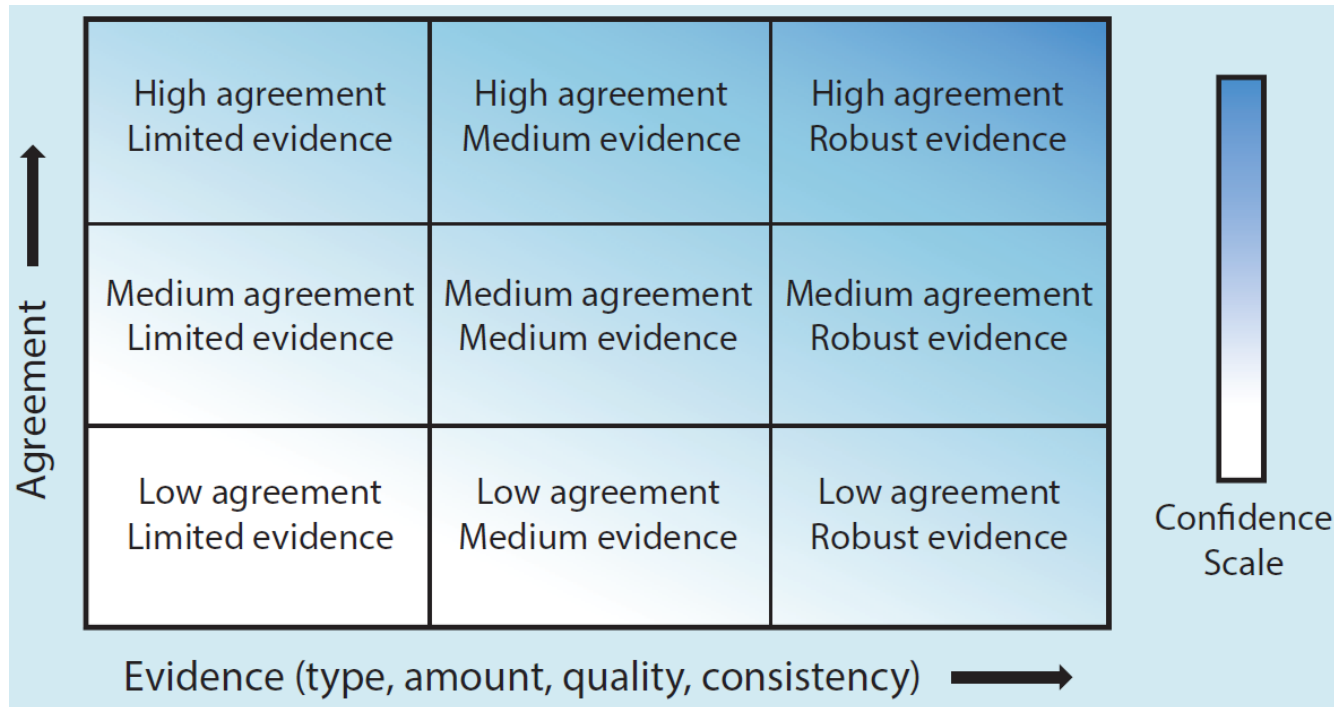
WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO
THE IPCC AR5
CLIMATE CHANGE 2013: THE PHYSICAL
SCIENCE BASIS

(<http://www.ipcc.ch>)





Unsicherheiten – Die Sprache des IPCC



The following terms have been used to indicate the assessed likelihood, and typeset in italics:

Term*	Likelihood of the outcome
<i>Virtually certain</i>	99–100% probability
<i>Very likely</i>	90–100% probability
<i>Likely</i>	66–100% probability
<i>About as likely as not</i>	33–66% probability
<i>Unlikely</i>	0–33% probability
<i>Very unlikely</i>	0–10% probability
<i>Exceptionally unlikely</i>	0–1% probability

* Additional terms (*extremely likely*: 95–100% probability, *more likely than not*: >50–100% probability, and *extremely unlikely*: 0–5% probability) may also be used when appropriate.



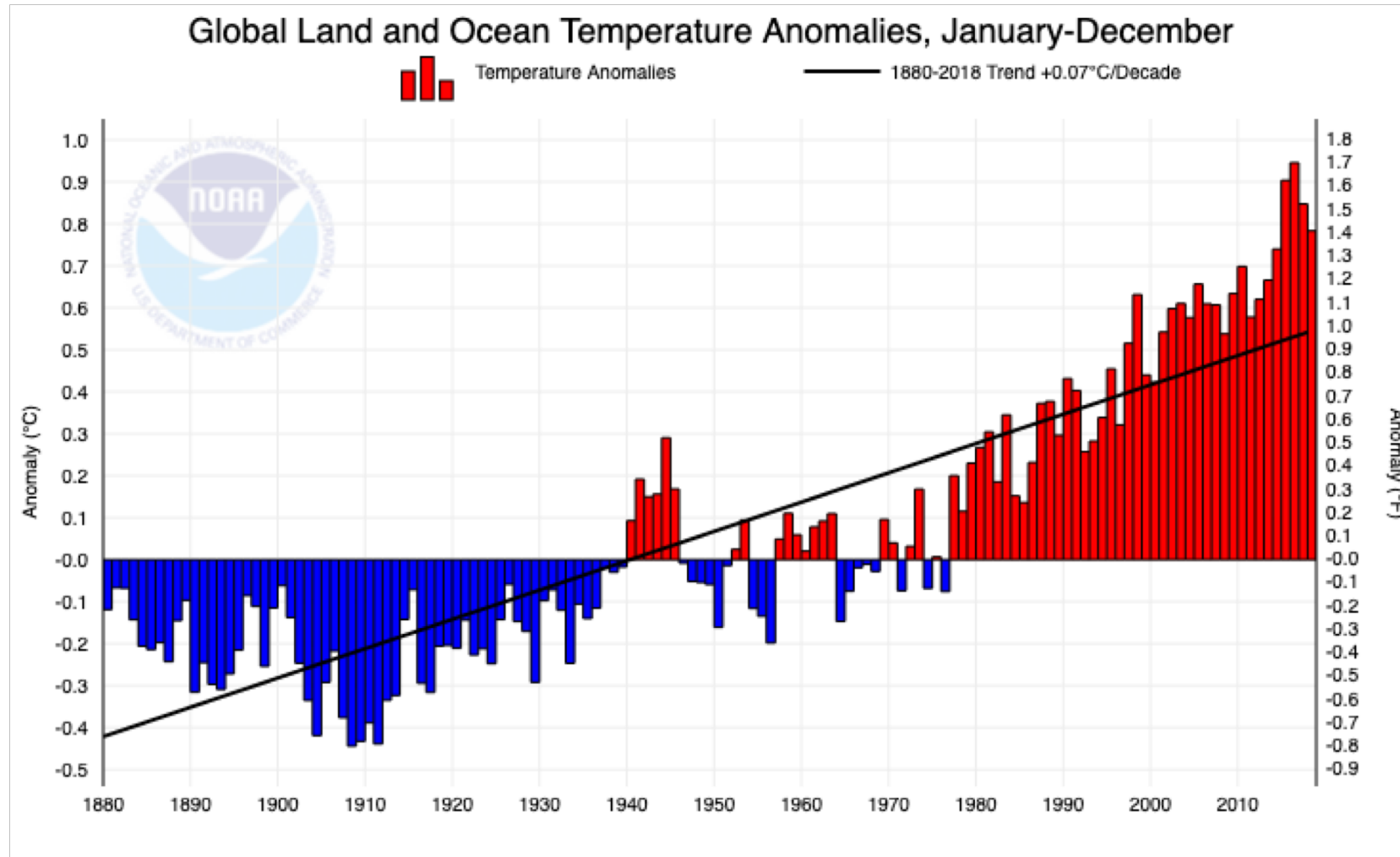
Beobachtete Klimaänderungen



Bodennahe Lufttemperaturen 1880-2018 - Global



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(<https://www.ncdc.noaa.gov>; see also: <http://berkeleyearth.org>)



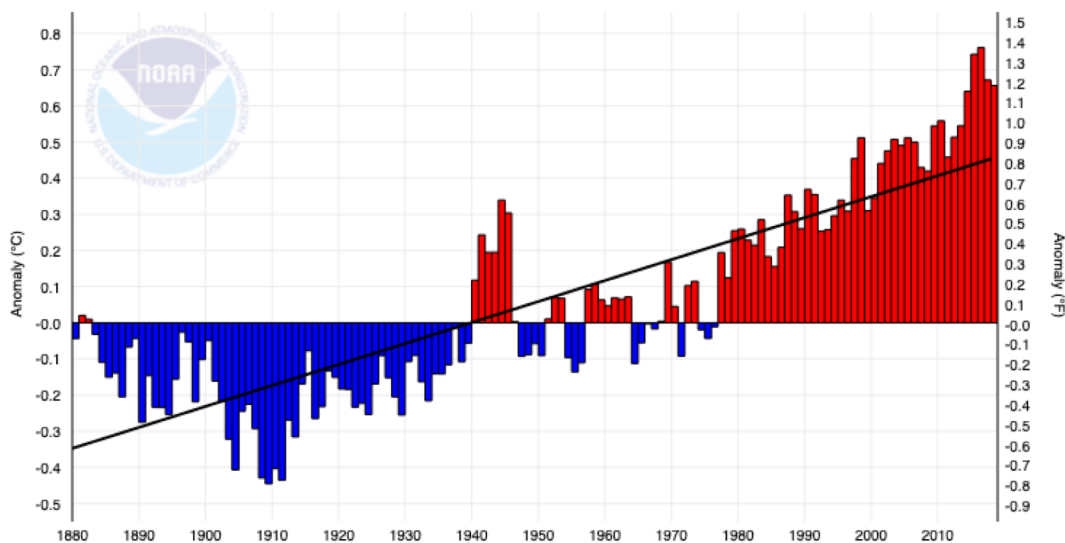
Erwärmung über Ozean und Land



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

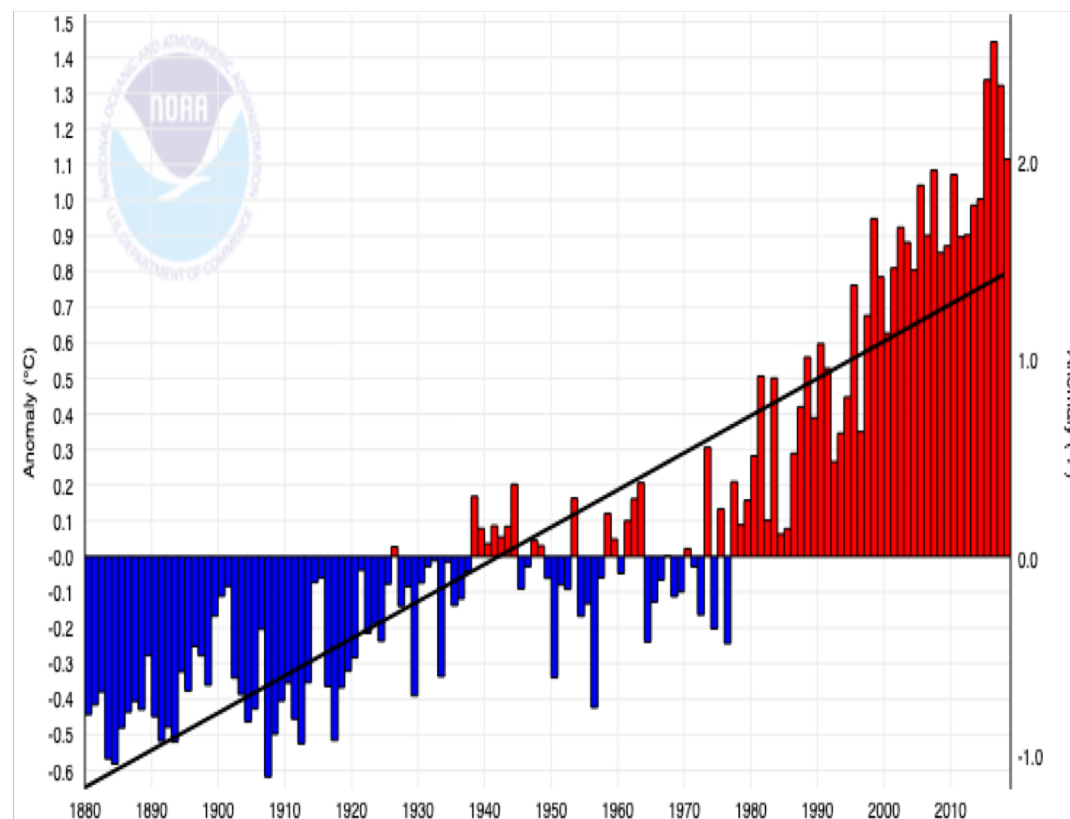
Global Ocean Temperature Anomalies, January-December

Temperature Anomalies — 1880-2018 Trend +0.06°C/Decade



Global Land Temperature Anomalies, January-December

Temperature Anomalies — 1880-2018 Trend +0.10°C/Decade



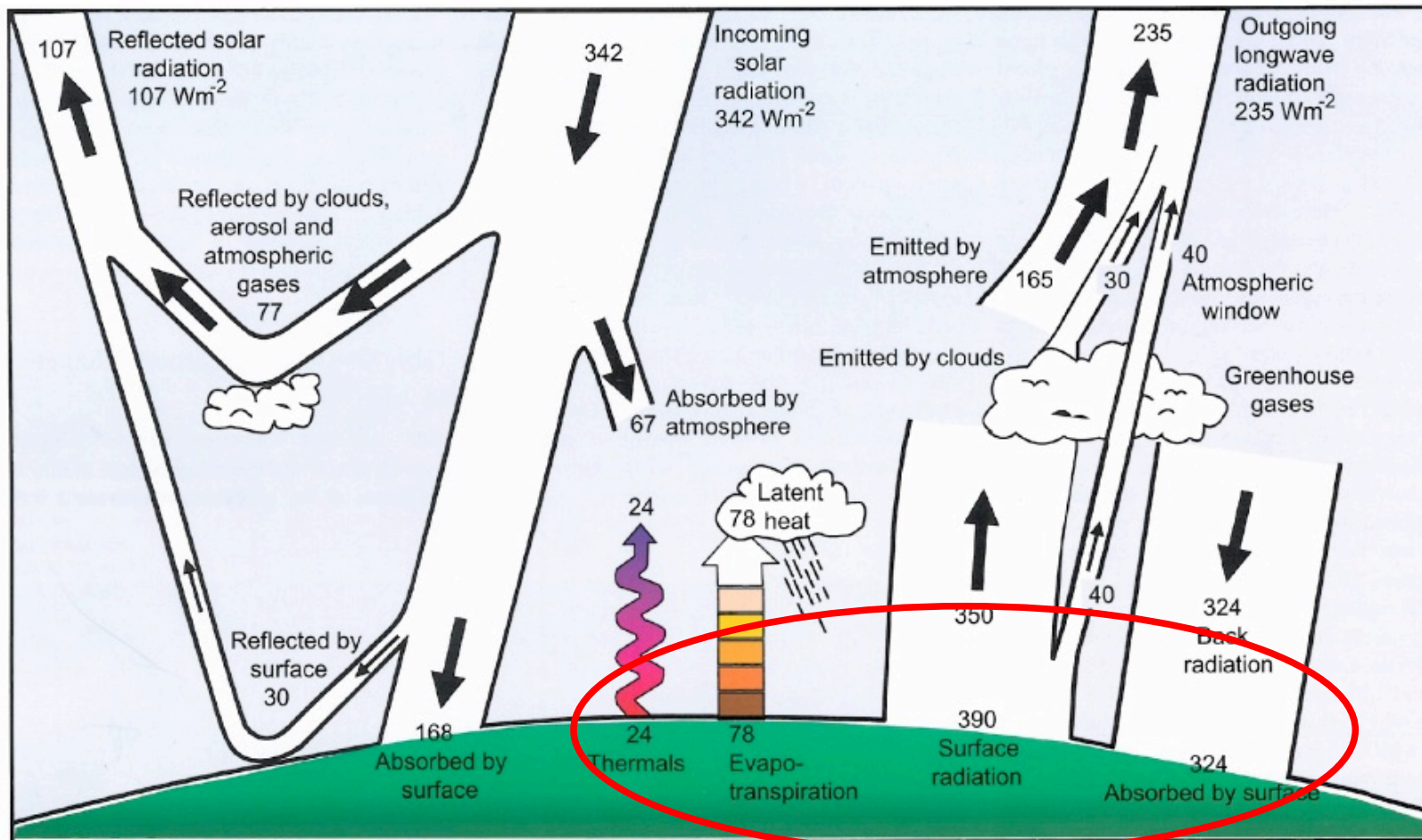
(<https://www.ncdc.noaa.gov>)



Warum ist die Erwärmung über Land größer als über Ozeanen?



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(Kiehl and Trenberth, 1997)

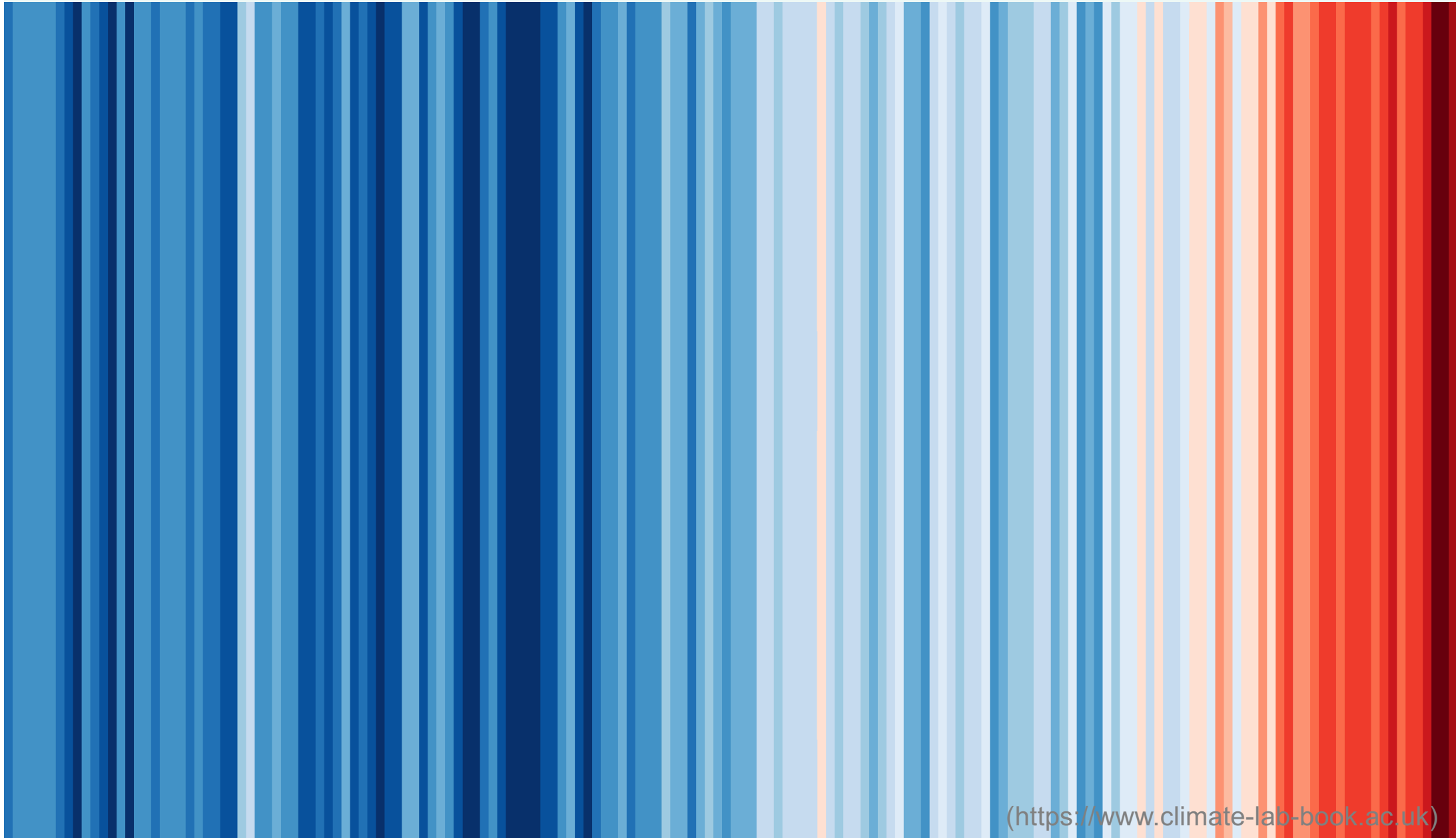
Erhöhte langwellige Einstrahlung am Boden wird durch Erwärmung kompensiert, da diese zu mehr langwelliger Ausstrahlung, sowie mehr sensiblem und latentem Wärmetransport führt. Über trockenen Landregionen ist die Verdunstung und damit die latente Wärme limitiert.



Globaler Temperaturanstieg, 1850-2017, $\Delta T=1,35^{\circ}\text{C}$



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

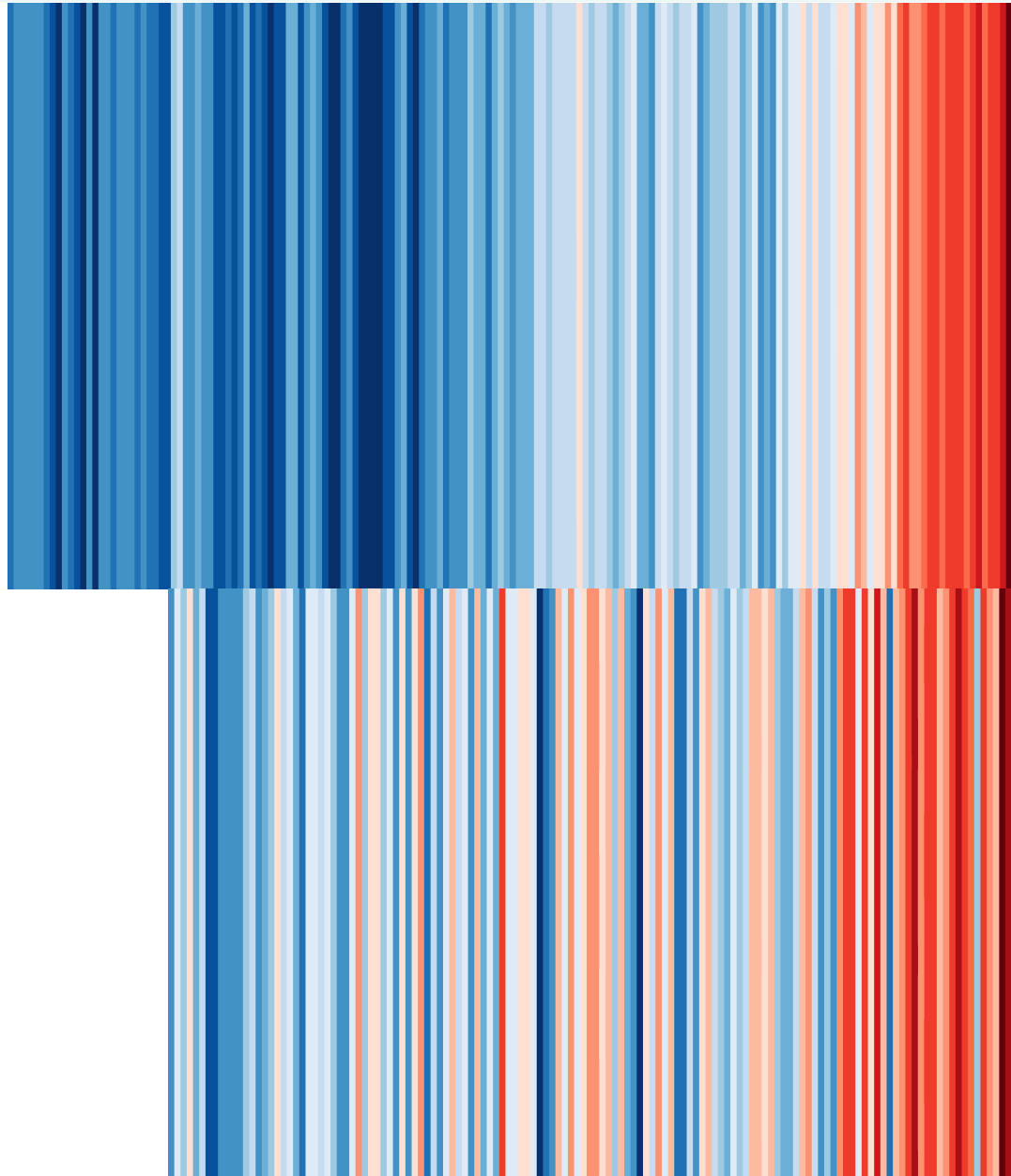




Temperaturanstieg, Global vs. Deutschland



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



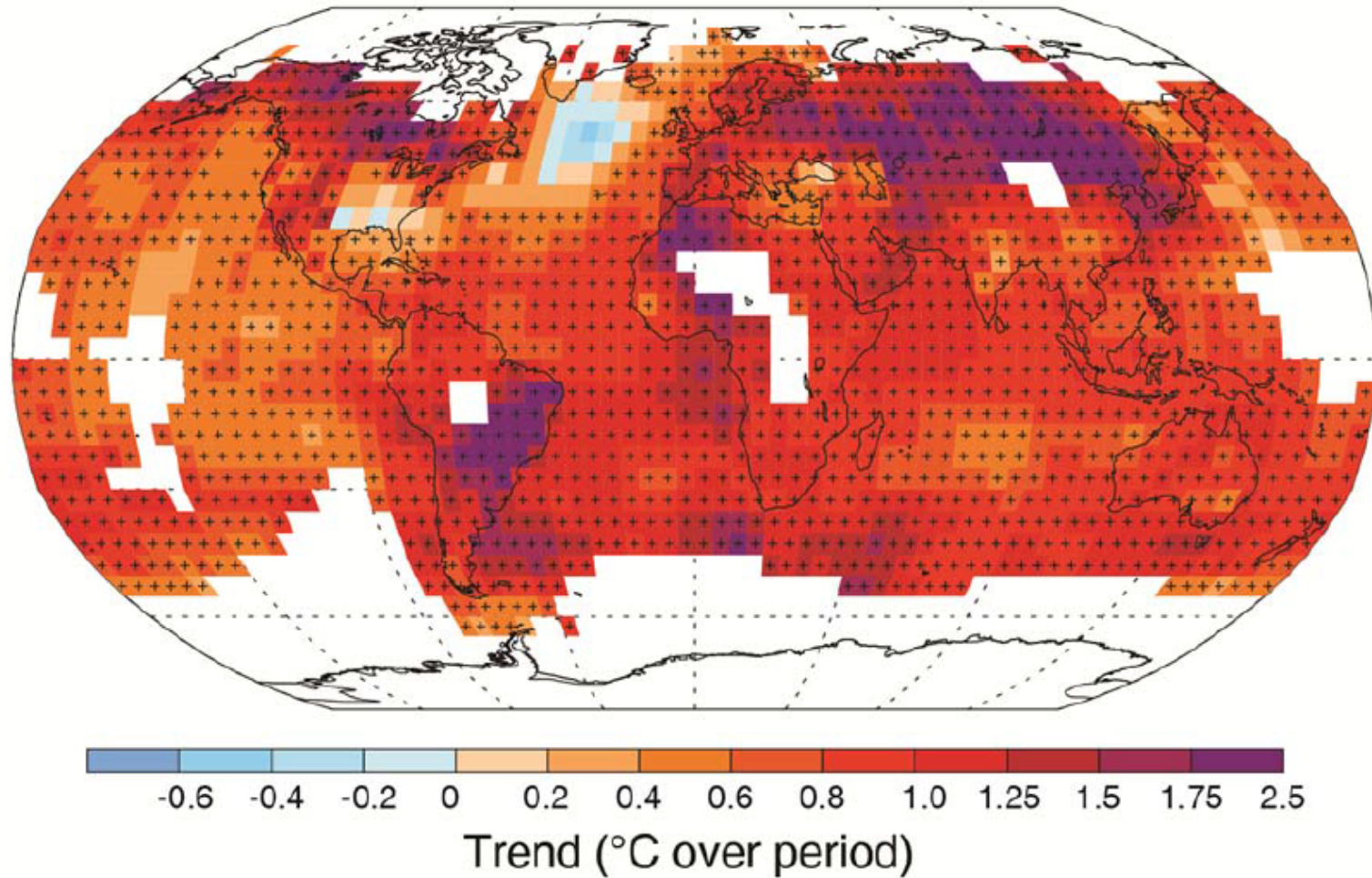
global, 1850-2017, $\Delta T=1,35^{\circ}\text{C}$

Deutschland, 1881-2017, $\Delta T=3,7^{\circ}\text{C}$)

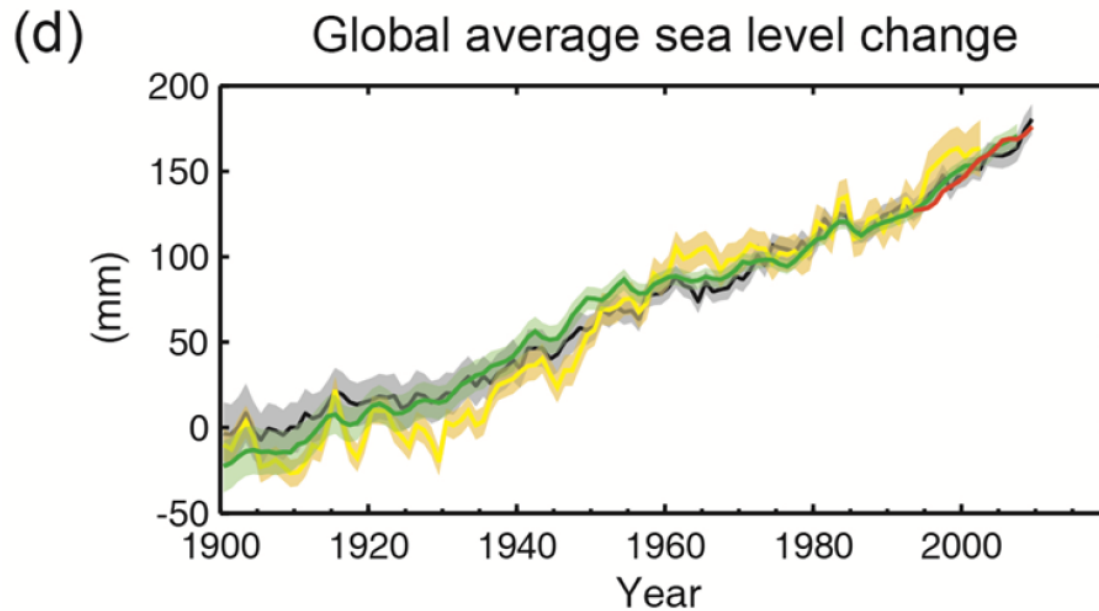
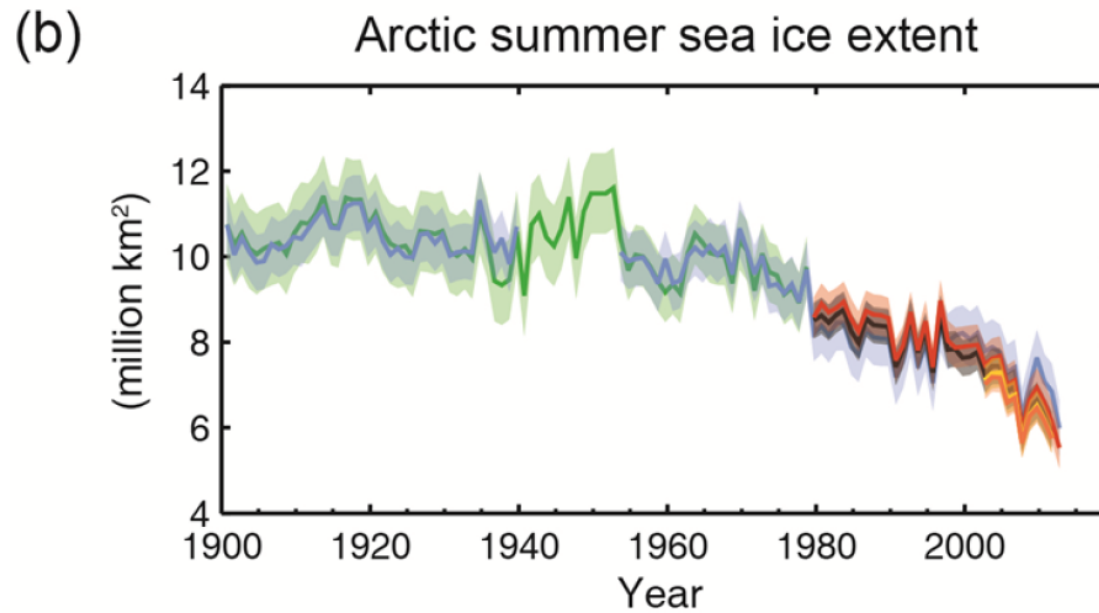
(<https://www.climate-lab-book.ac.uk>)



(b) Observed change in average surface temperature 1901–2012



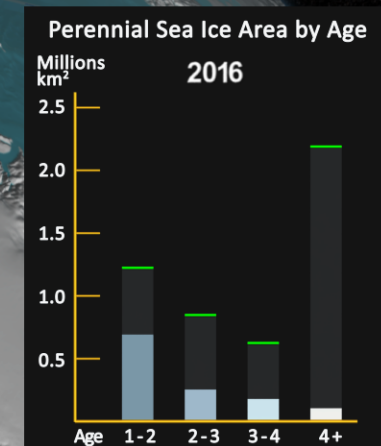
(IPCC AR5, SPM, 2013)



(IPCC AR5, SPM, 2013)



"Für jede Tonne CO₂, die irgendjemand freisetzt, schwindet das Arktische Sommermeereis um 3 m²,"
Notz and Stroeve, Science, 2016

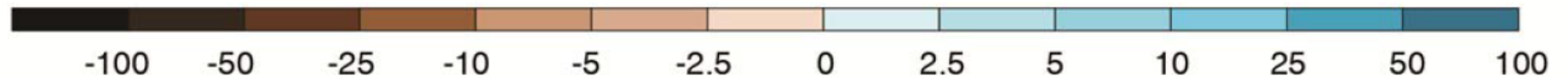
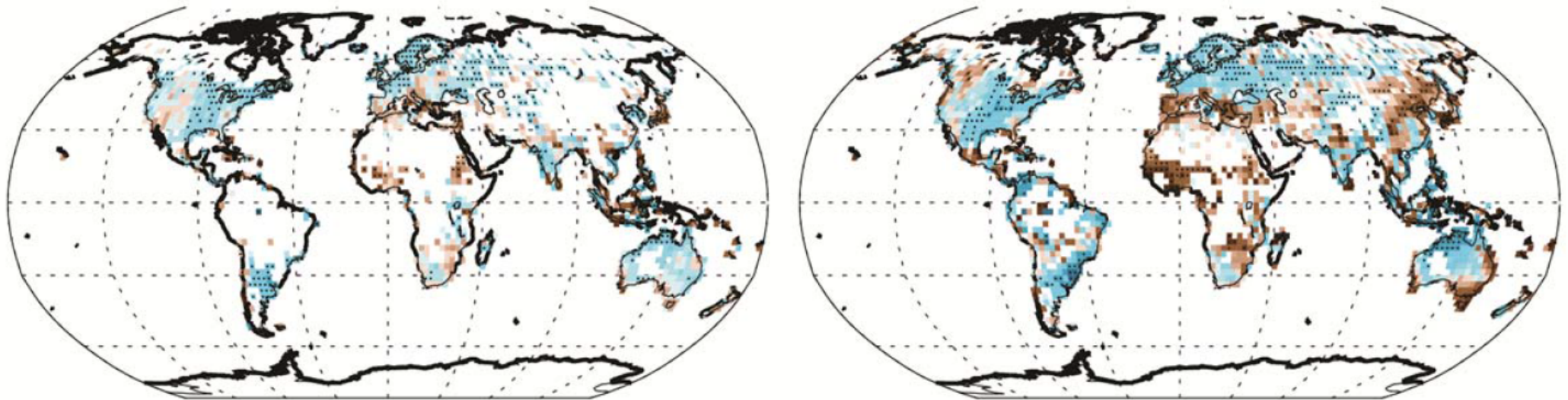




Observed change in precipitation over land

1901–2010

1951–2010



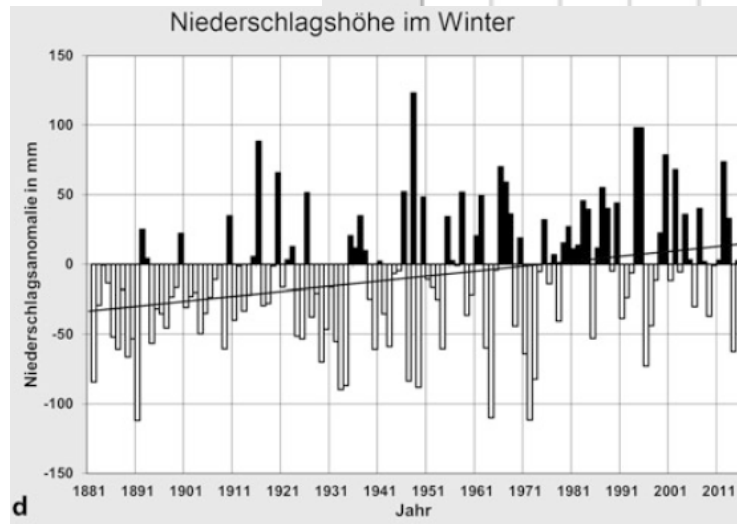
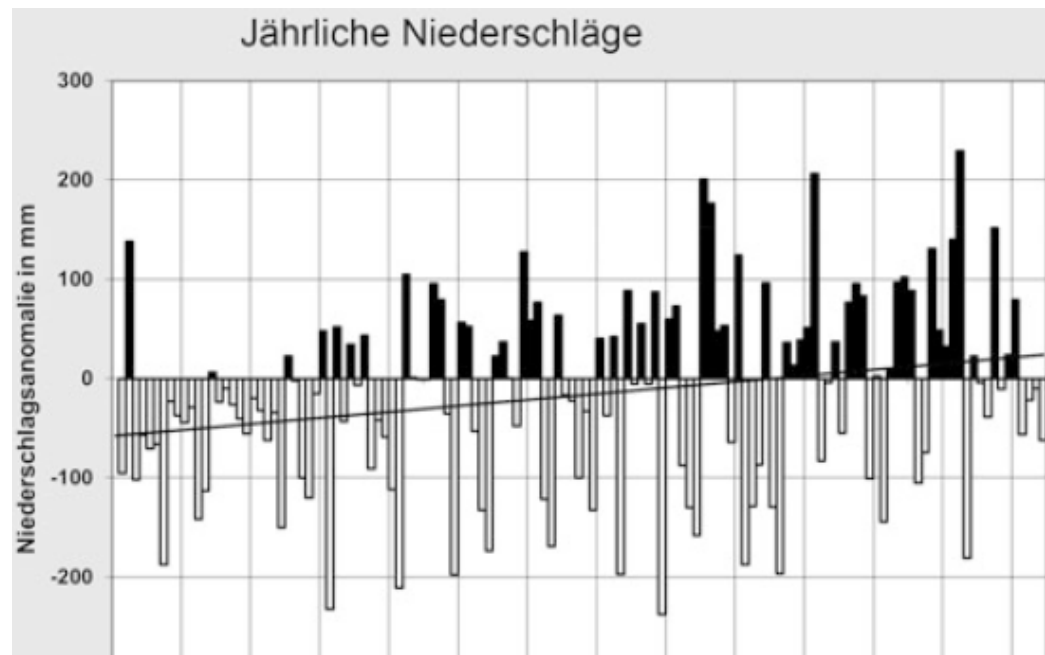
Trend (mm/year/decade)



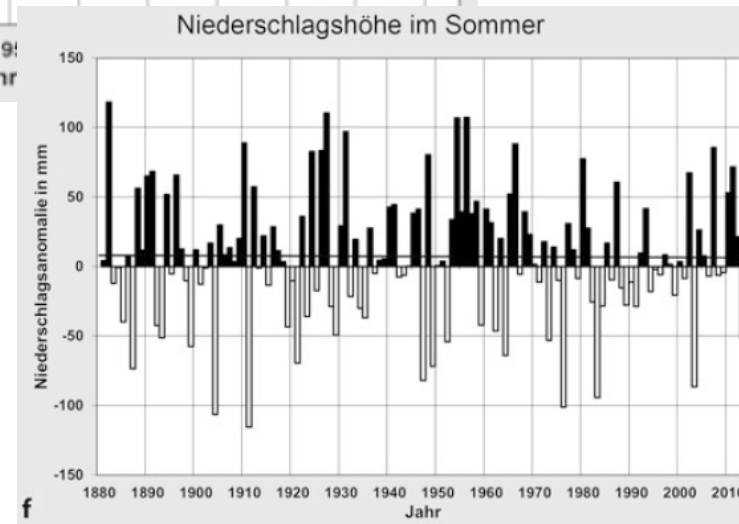
Niederschlag - Deutschland



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



1930 1940 1950
Jahr



(Brasseur et al. (Hrsg.), Springer, 2017)



Ursachen für Klimaänderungen



Natürliche Klimaantriebe

- Vulkanausbrüche
- Schwankungen der Sonnenaktivität
- Veränderung der Erdumlaufbahn um die Sonne

Anthropogene Klimaantriebe

- Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) (z.B. CO₂, Schwefeldioxid, Schmutzpartikel (=Aerosole))
- Emission von Methan (z.B. aus Rinder- und Schafzucht; Reisfeldern, defekten Erdgasleitungen)
- Landnutzungsänderungen (z.B. Abholzung, Brandrodung, Urbanisierung)



Die Pinatubo-Eruption



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



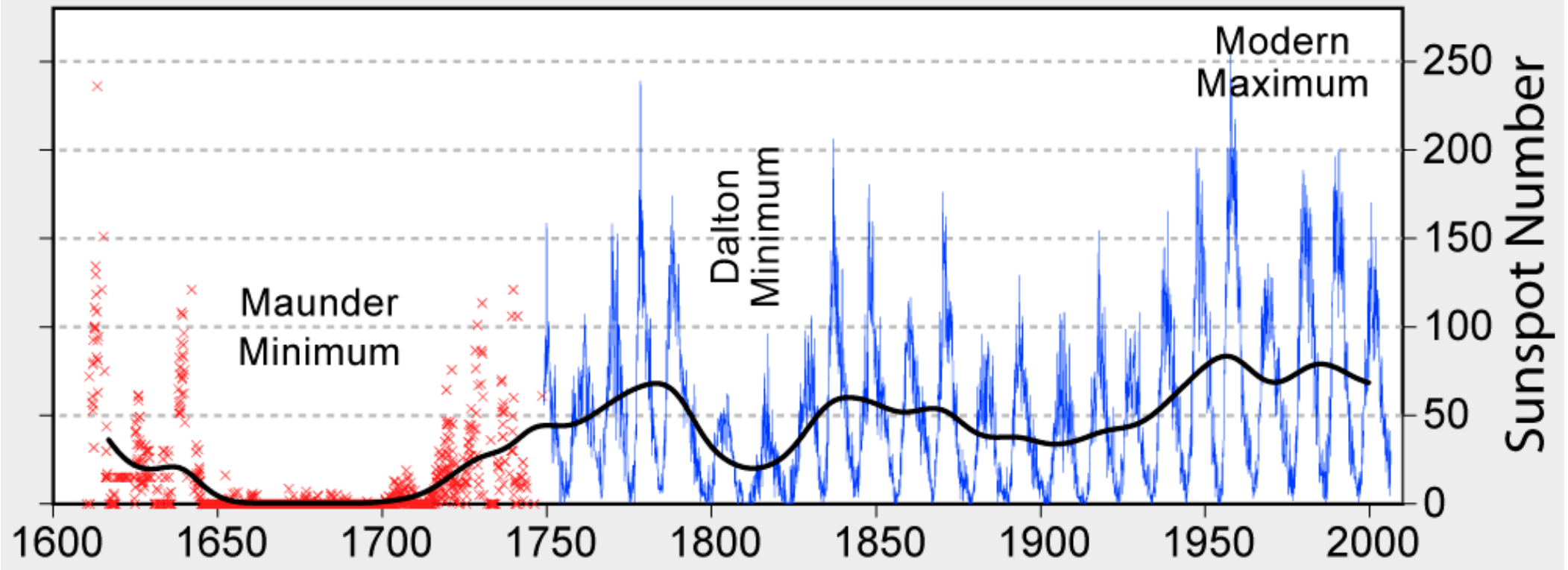
Im Jahr nach der
Eruption des Pinatubo
verringerte sich die
Oberflächentemperatur
der Erde um etwa 0.4°C .



USGS Photo by Rick Hoblitt, June 12, 1991



400 Years of Sunspot Observations



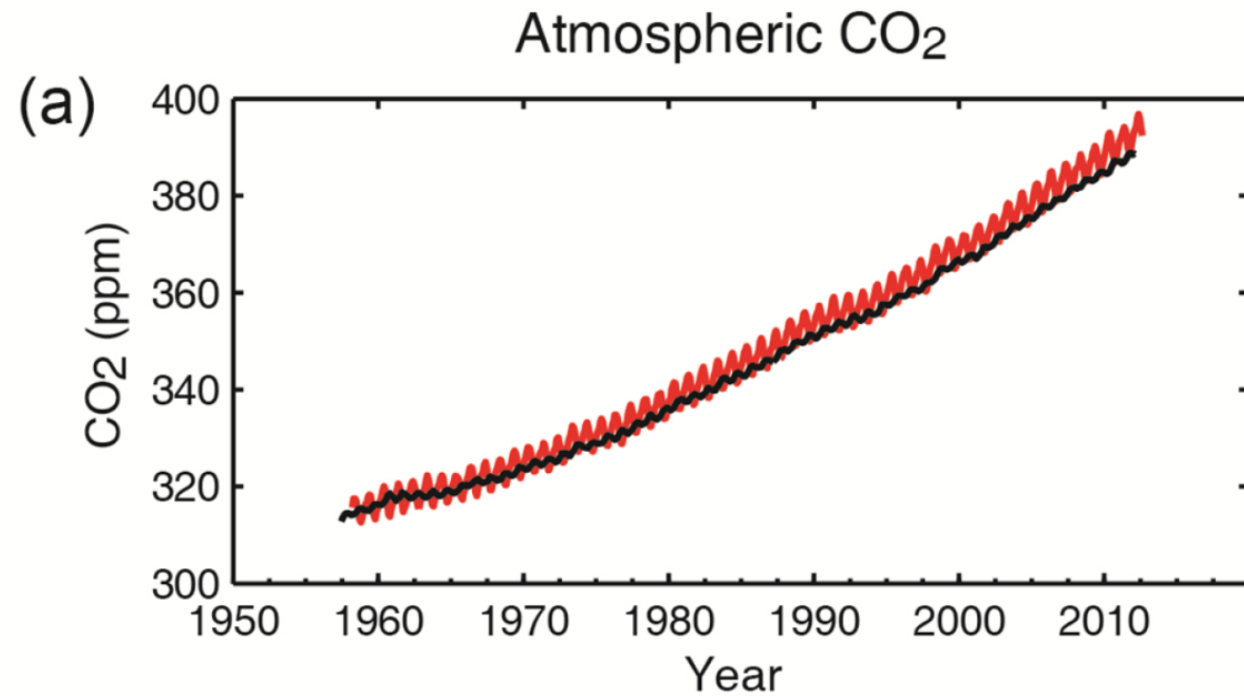
(source: Wikipedia)



CO₂ in der Atmosphäre



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(IPCC AR5, SPM, 2013)

Daily CO₂

Mauna Loa Observatory | Atmospheric CO₂ Concentrations

March 19, 2019	412.97 ppm	NOAA-ESRL
March 19, 2018	408.22 ppm	NOAA-ESRL

daily mean concentrations | ppm = parts per million

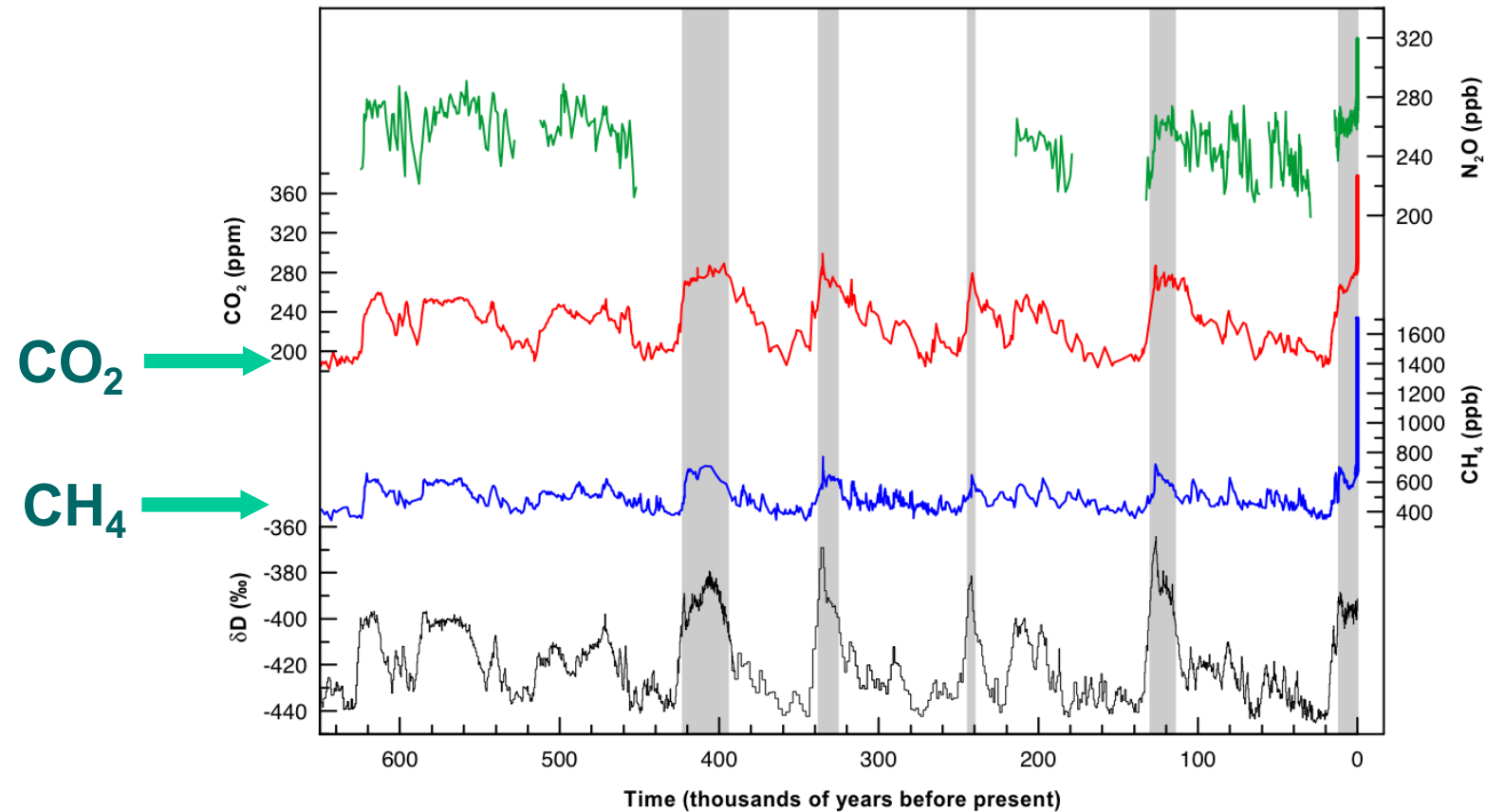
(www.co2.earth)



Treibhausgase in Eisbohrkernen



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(IPCC, 2007)



Svante Arrhenius (1859-1927)



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS*.

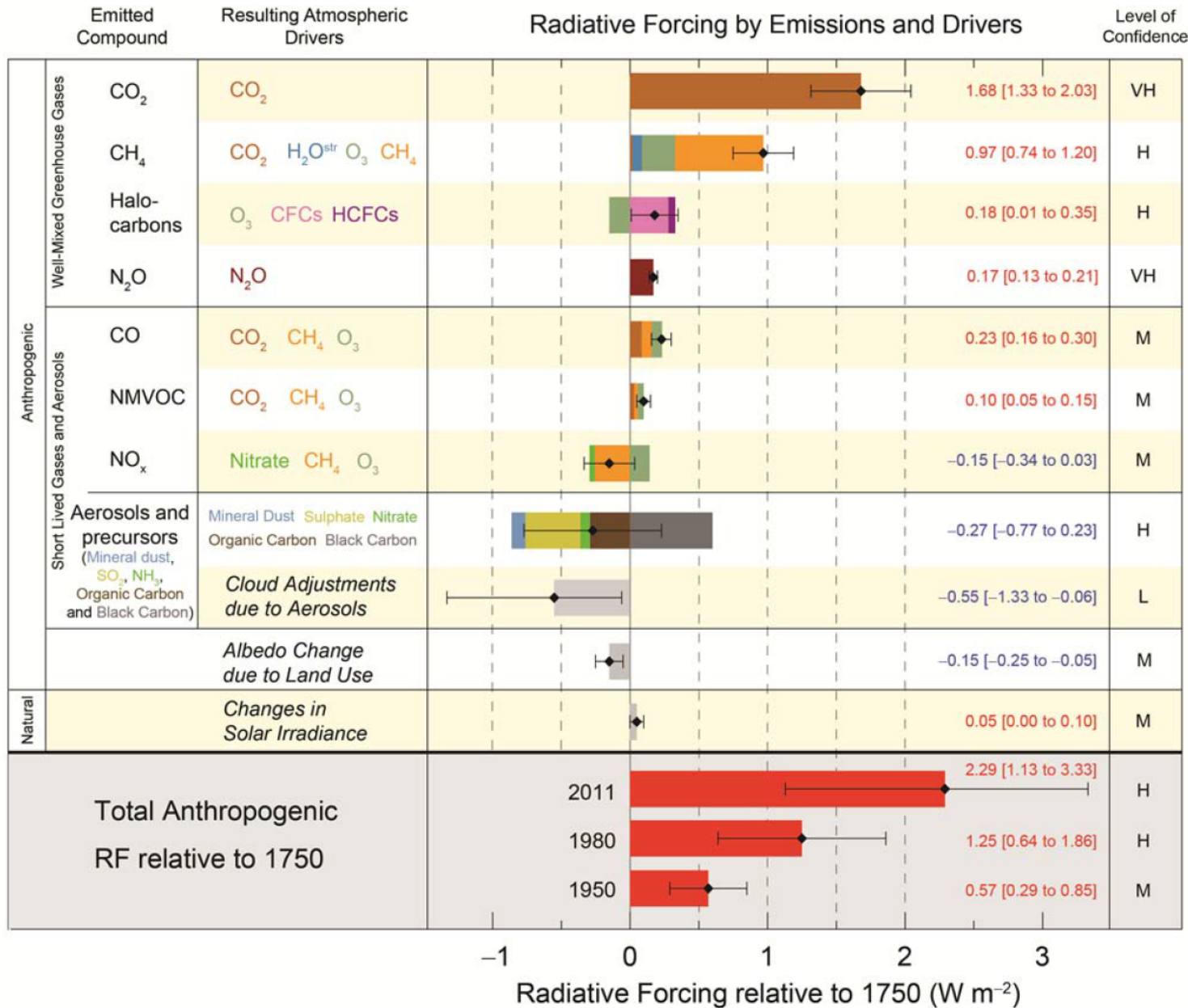
One may now ask, How much must the carbonic acid vary according to our figures, in order that the temperature should

See Tyndall Lecture by Raymond Pierrehumbert, AGU, 2012:
https://www.youtube.com/watch?v=RICBu_P8JWI

In order to get the temperature of the ice age between the 40th and 50th parallels, the carbonic acid in the air should sink to 0.62–0.55 of its present value (lowering of temperature 4°–5° C.). The demands of the geologists, that at the genial



Der Strahlungsantrieb des Klimasystems

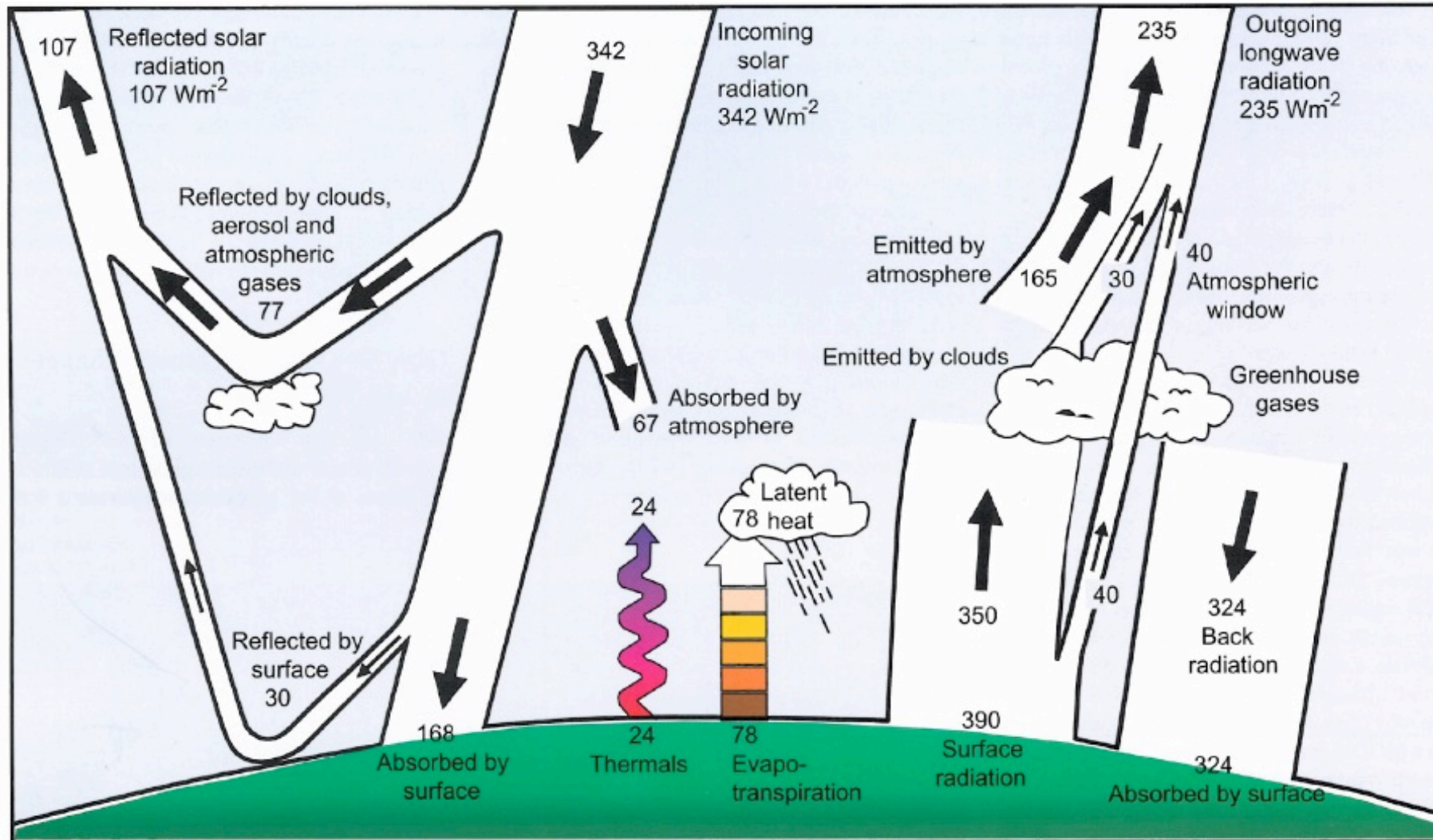




Klimamodelle



Radiative-Convective Equilibrium



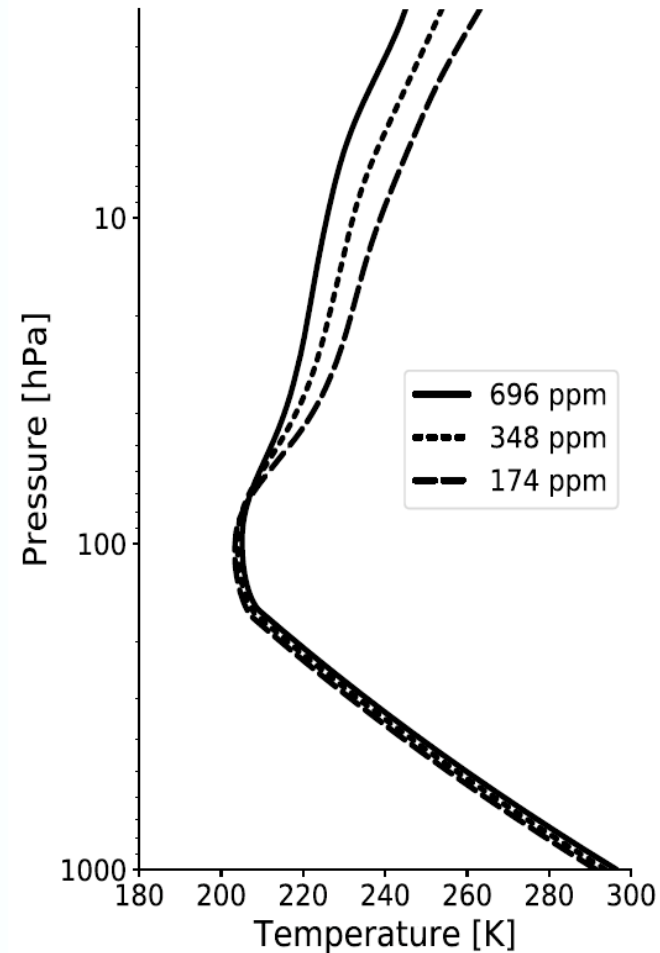
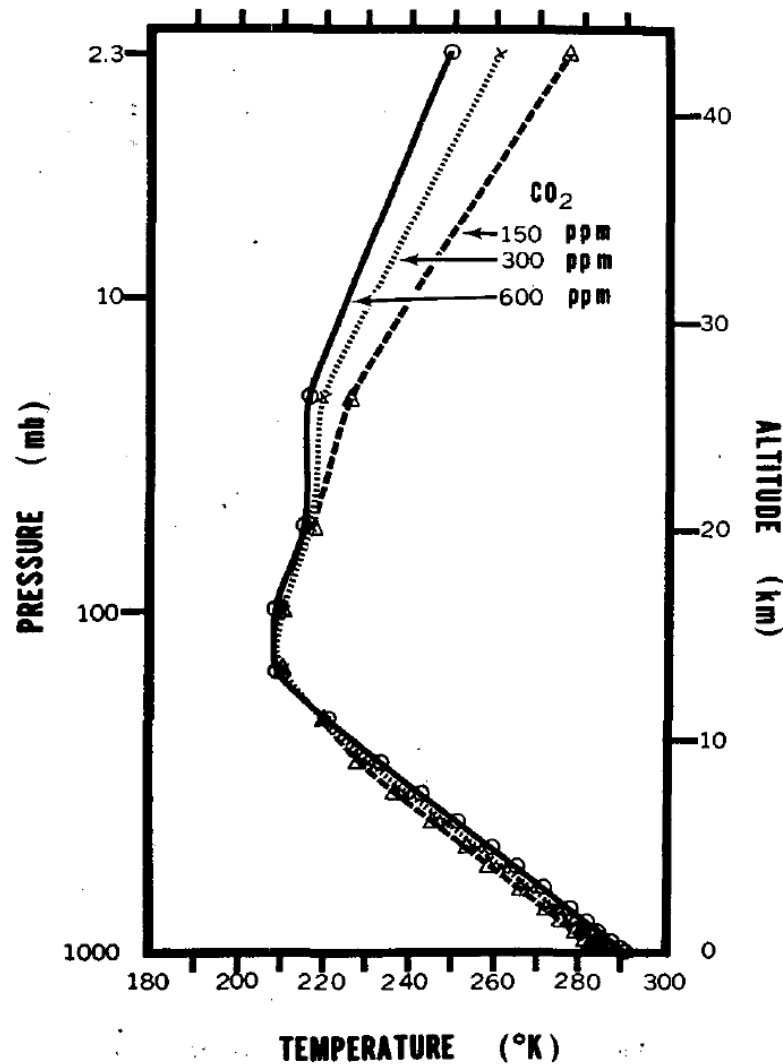
(Kiehl and Trenberth, 1997)



Eine bemerkenswert robuste Vorhersage in einem RCE-Modell



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



Manabe & Wetherald (JAS, 1967) berechneten eine Erwärmung von 2,7 K bei einer Verdopplung des atmosphärischen CO₂-Gehalts. Wir (Kluft et al., eingereicht, 2019) haben Ihre Berechnungen wiederholt und kommen auf 2,8 K.

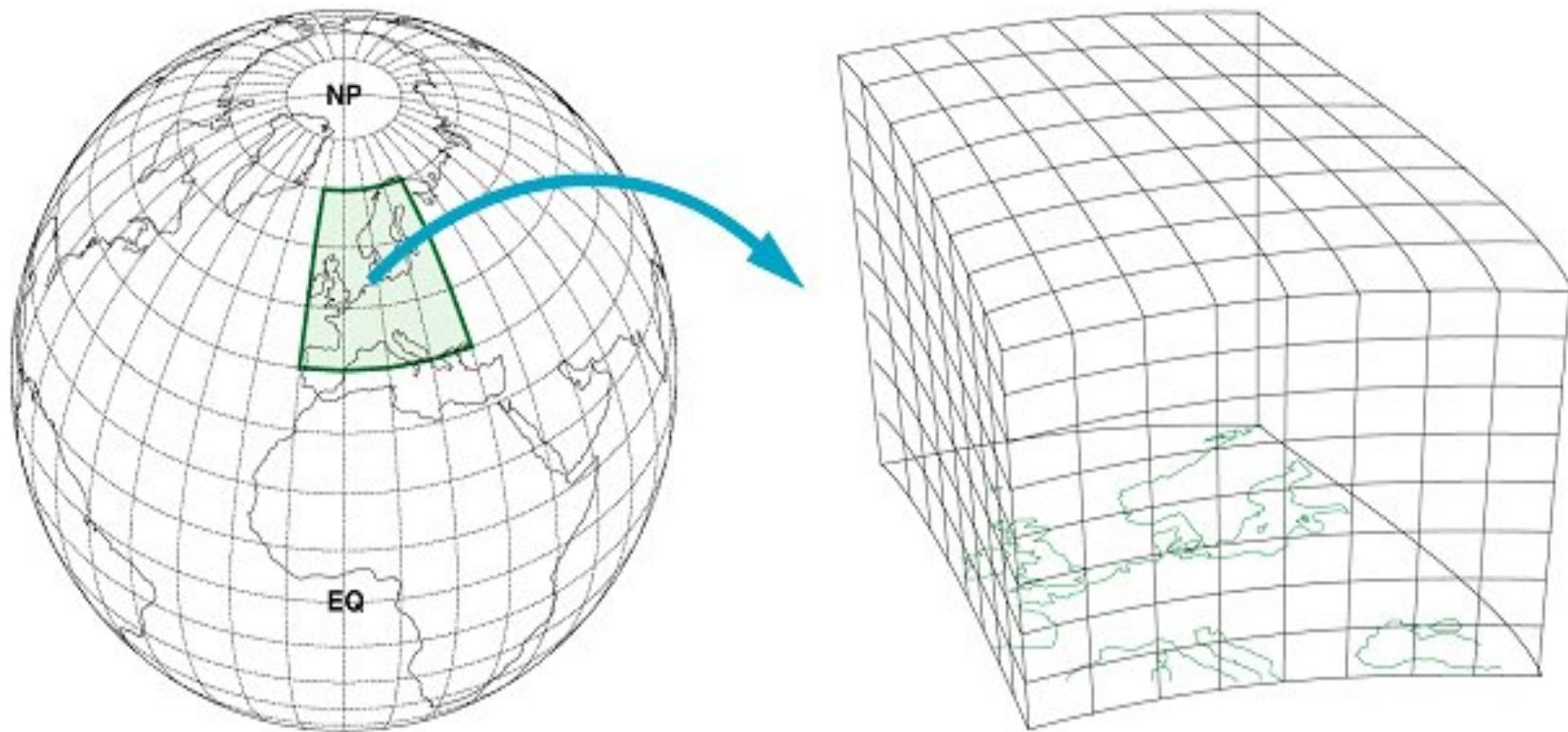


$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= - (f + \xi) \mathbf{k} \times \mathbf{v} - \nabla K - \dot{\eta} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \eta} - \frac{R_d T}{p} \nabla p - \nabla \phi + \mathbf{F}_v \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= - \mathbf{v} \cdot \nabla T - \dot{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{R_d T}{C_p p} \frac{dp}{dt} + F_T \\ 0 &= \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \frac{R_d T}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right) &= - \nabla \cdot \left(\mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + F_\rho \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(c_i \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) &= - \nabla \cdot \left(\mathbf{v} c_i \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} c_i \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + F_{c_i} \\ &\quad (i = 1, 2, 3, \dots)\end{aligned}$$

ξ : vorticity; K : kinetic energy; η : vertical coordinate; c_i : mixing ratio of tracer i
 F : external forcing. Other symbols have their conventional meanings.

mit Papier und Bleistift nicht lösbar ...

... aber eine näherungsweise Lösung auf einem 3D-Gitter ist möglich.



Subgridskalige Prozesse müssen jedoch paramerisiert werden.

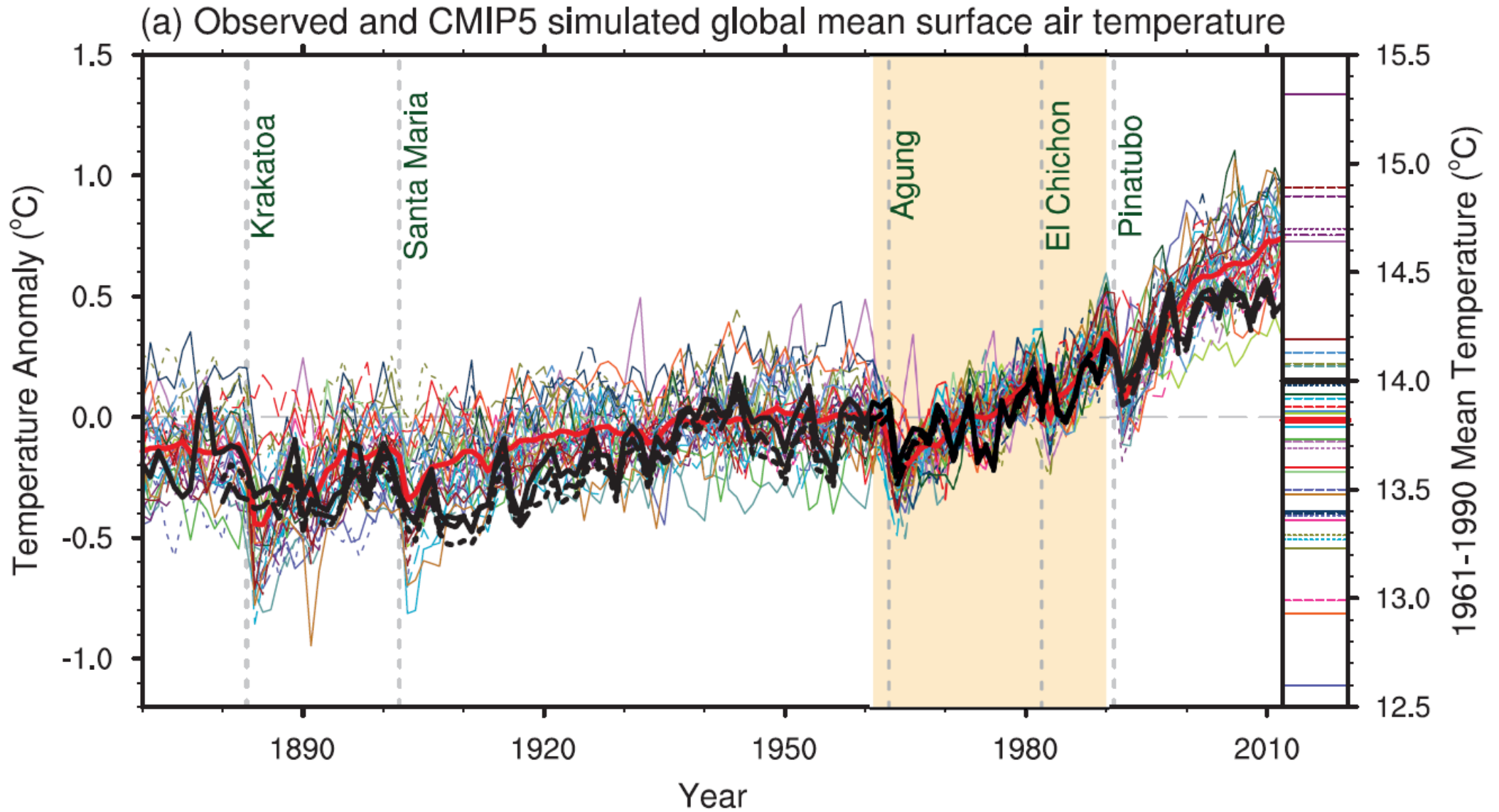


Gleichungen für einen Wald ...?



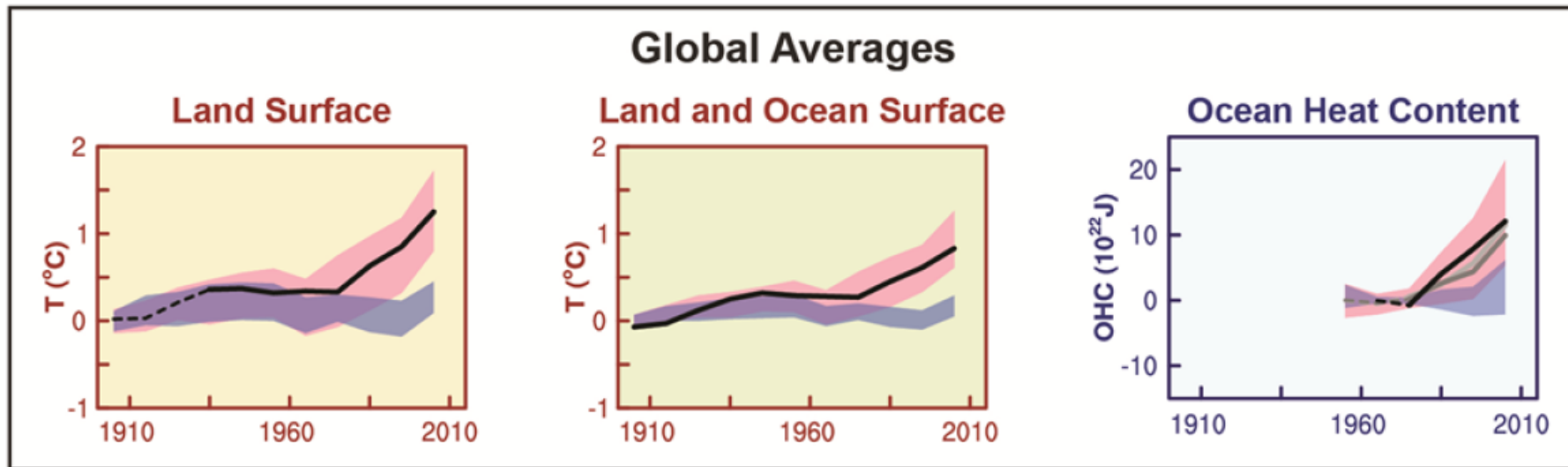
Max-Planck-Institut
für Meteorologie







Ist der Temperaturanstieg anthropogen?



— Observations

■ Models using only natural forcings

■ Models using both natural and anthropogenic forcings



Klimasensitivität



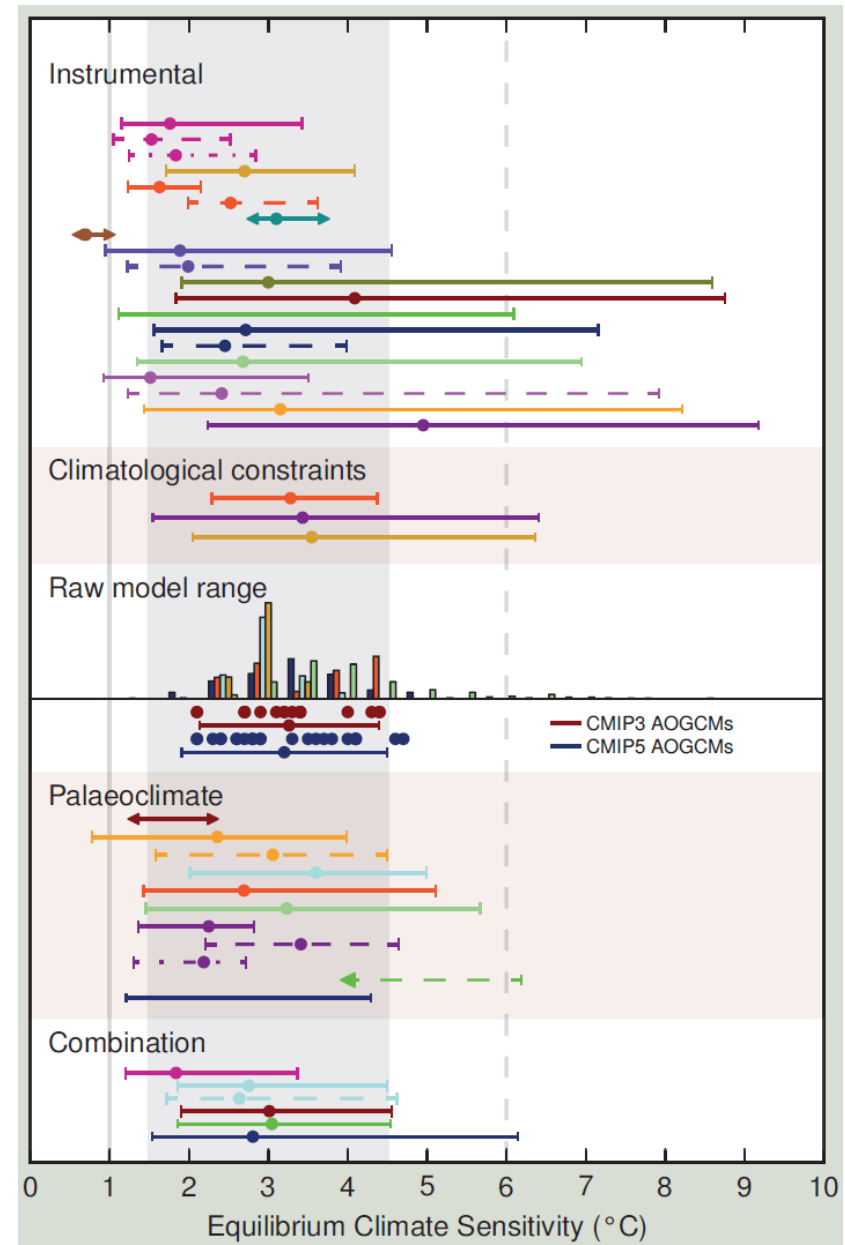
Klimasensitivität:
Temperaturanstieg ΔT , der aus einem Strahlungsantrieb ΔF an der Tropopause resultiert.

Üblicherweise wird er definiert als Temperaturanstieg bei einer Verdopplung der CO_2 Konzentration (für die ein Strahlungsantrieb $\Delta F \approx 3.7 \text{ W/m}^2$ angenommen wird).

Laut IPCC AR5 liegt die Gleichgewichtsklimasensitivität (ECS) wahrscheinlich zwischen 1.5 und $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die ECS ist nicht zu verwechseln mit der transienten Klimaantwort (TCR), der Temperaturänderung, die zum Zeitpunkt der CO_2 -Verdoppelung erreicht wird, wenn CO_2 um 1% jährlich ansteigt.

(IPCC AR5, WG1, TFE.6, Fig.1, 2013)

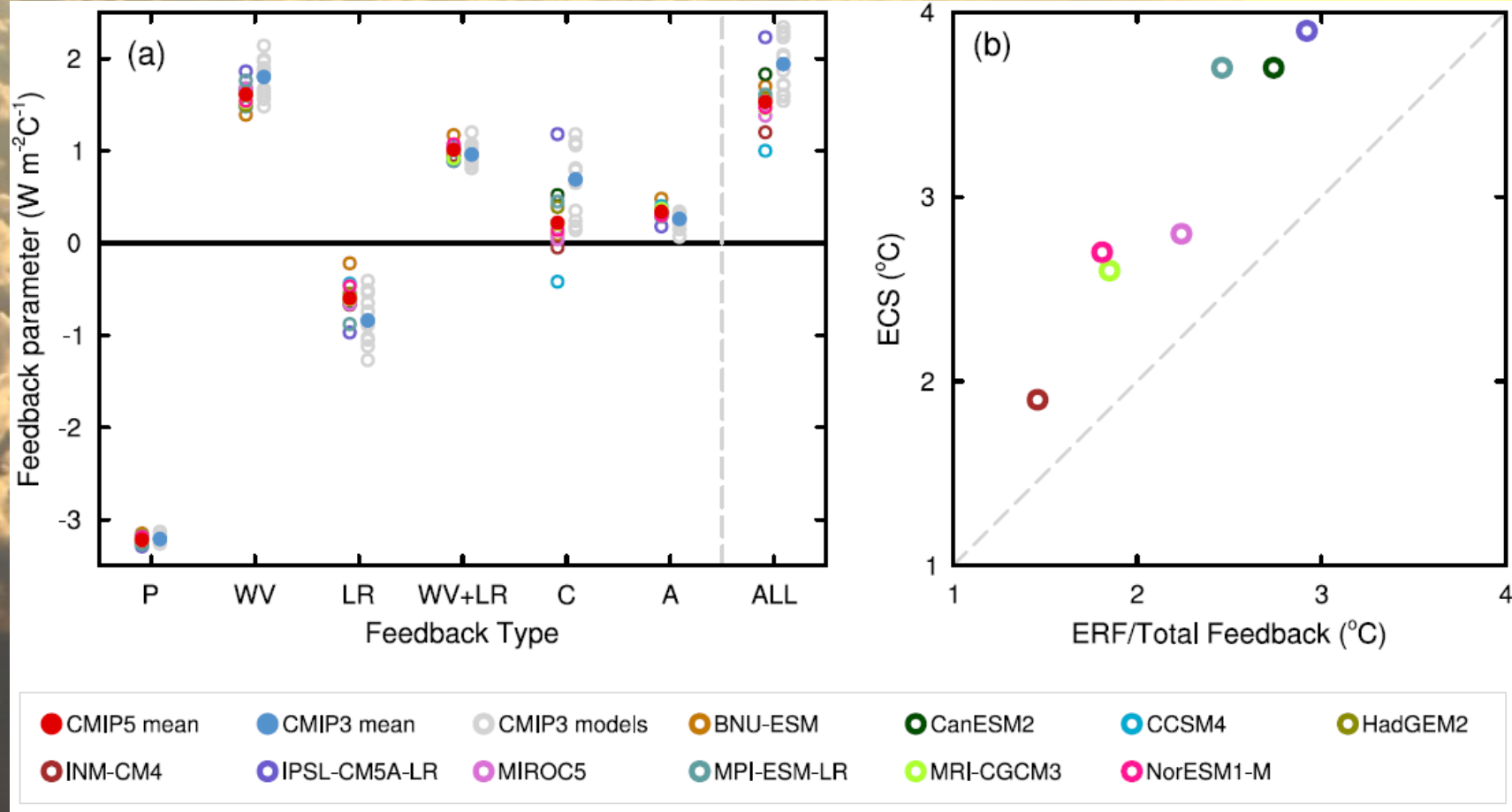




Warum ist Klimasensitivität in Modellen unterschiedlich?



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(IPCC AR5, WG1, Fig.9.43, 2013)



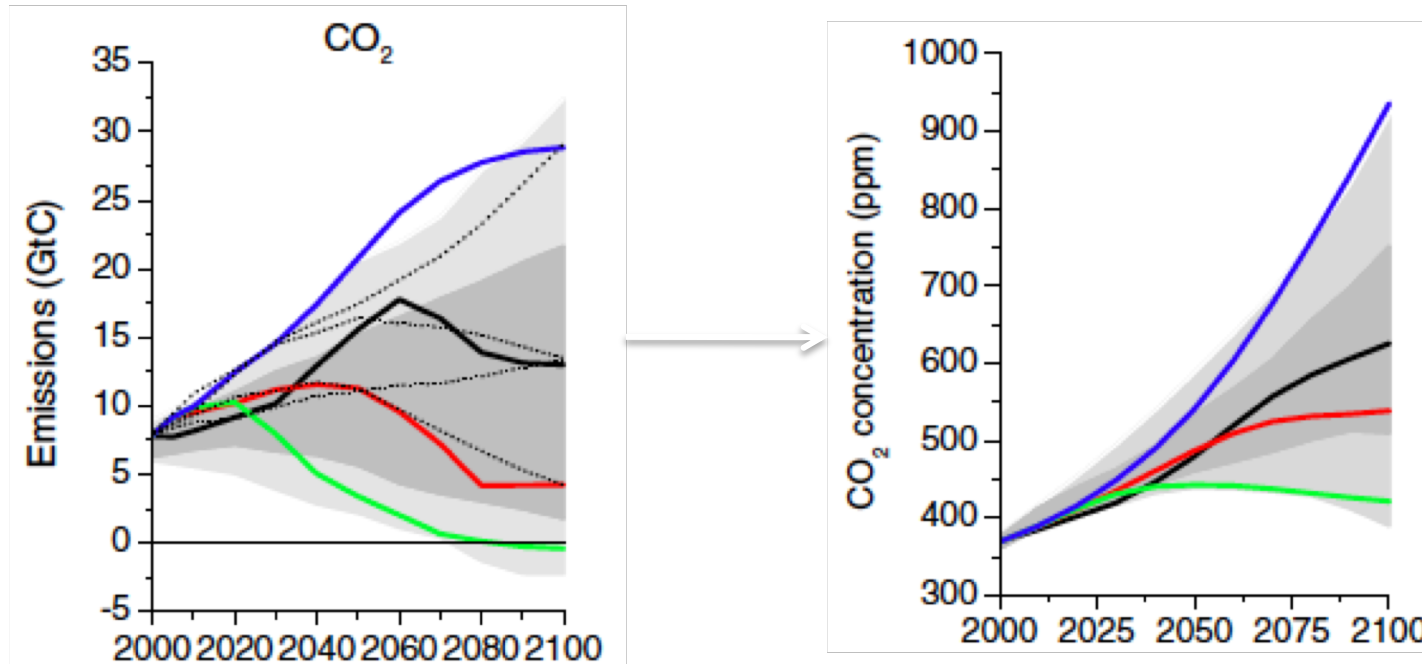
Projektionen des zukünftigen Klimas



RCPs: CO₂-Emissionen und Konzentrationen



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(van Vuuren et al., 2011)

Green: RCP2.6 Red: RCP4.5 Black: RCP6.0 Blue: RCP8.5

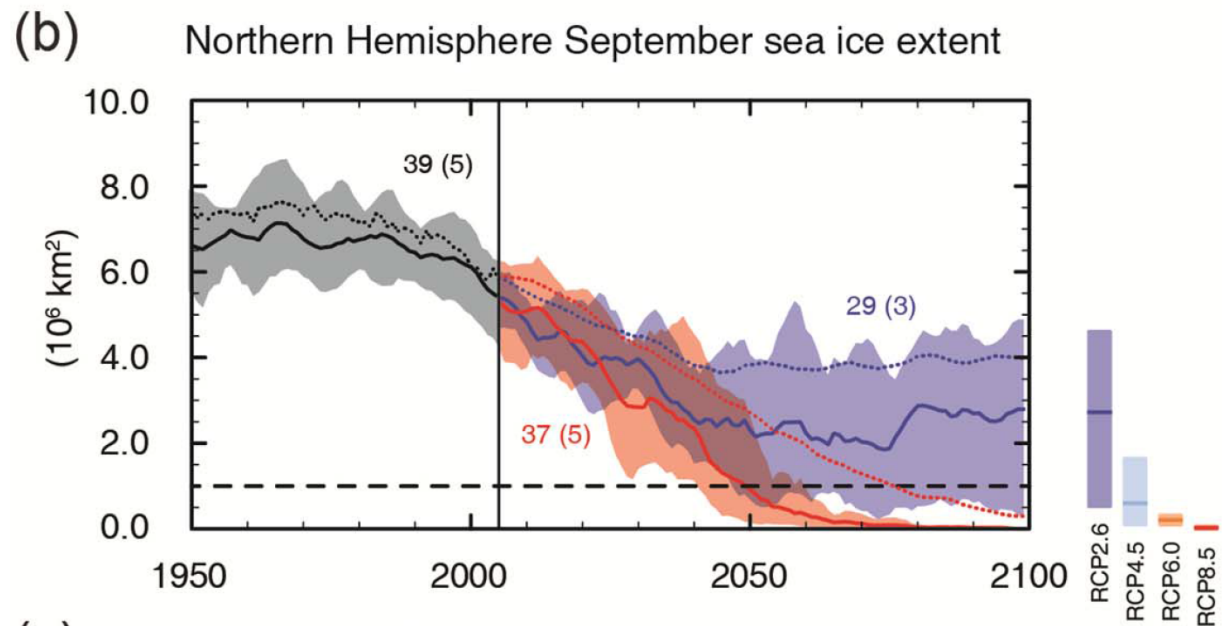
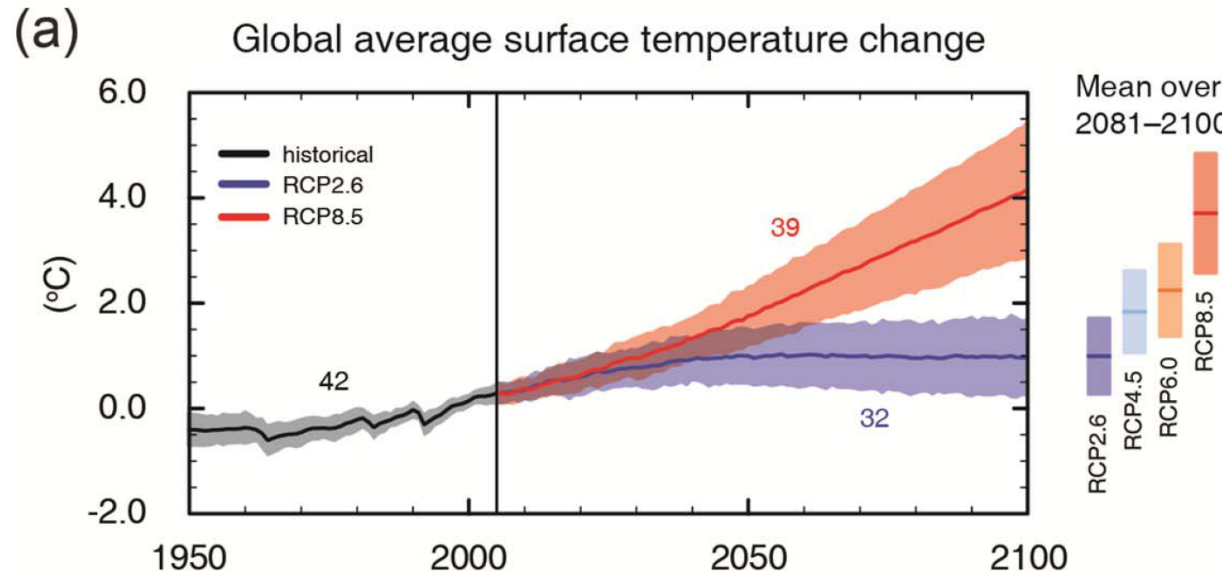
RCP8.5 close to SRES A2, RCP4.5 close to SRES B1



Projektionen: Globale Temperatur, Arktisches Meereis



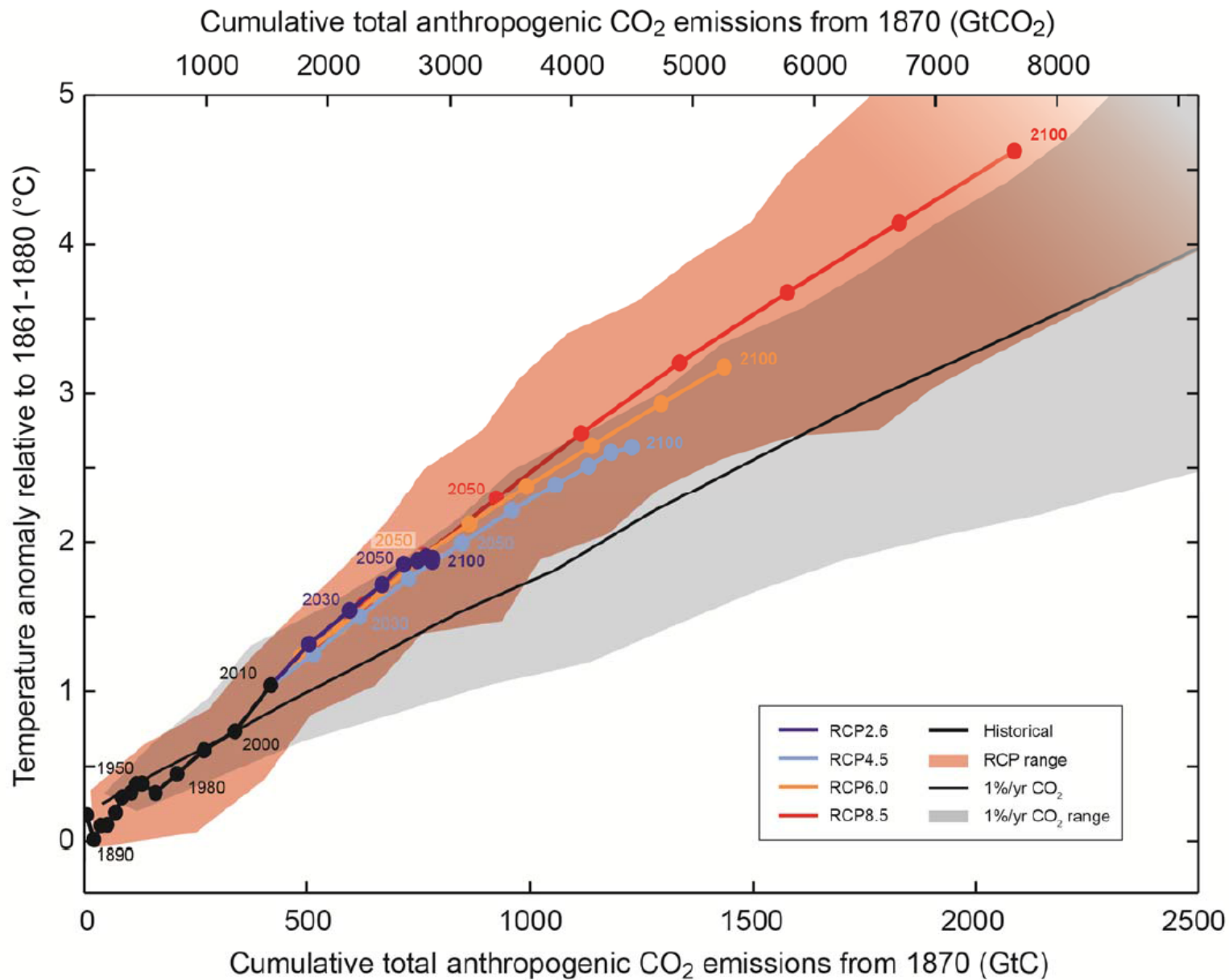
Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(IPCC AR5, SPM, 2013)



Kumulative CO₂-Emissionen und globale Temperatur





Wieviel dürfen wir noch emittieren?



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

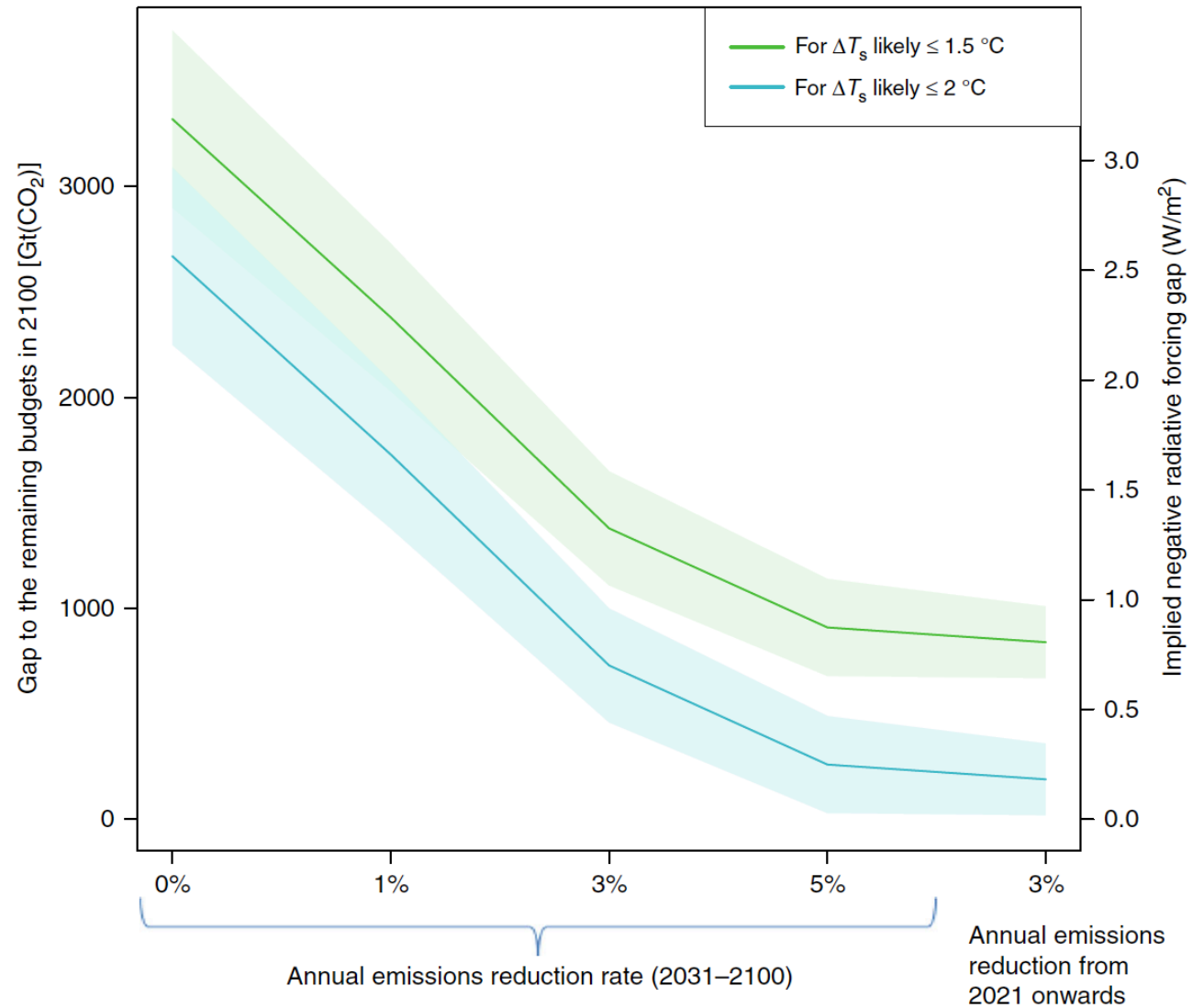
Verbleibendes Budget (ab 2015):

$\Delta T < 1.5^\circ\text{C}$: $650 \pm 130 \text{ Gt}(\text{CO}_2)$

$\Delta T < 2^\circ\text{C}$: $1300 \pm 130 \text{ Gt}(\text{CO}_2)$

Current emission rate:

$\sim 40 \text{ Gt}(\text{CO}_2)/\text{yr}$



(Lawrence et al., Nature Communications, 2018)



Projektionen: Temperatur und Niederschlag

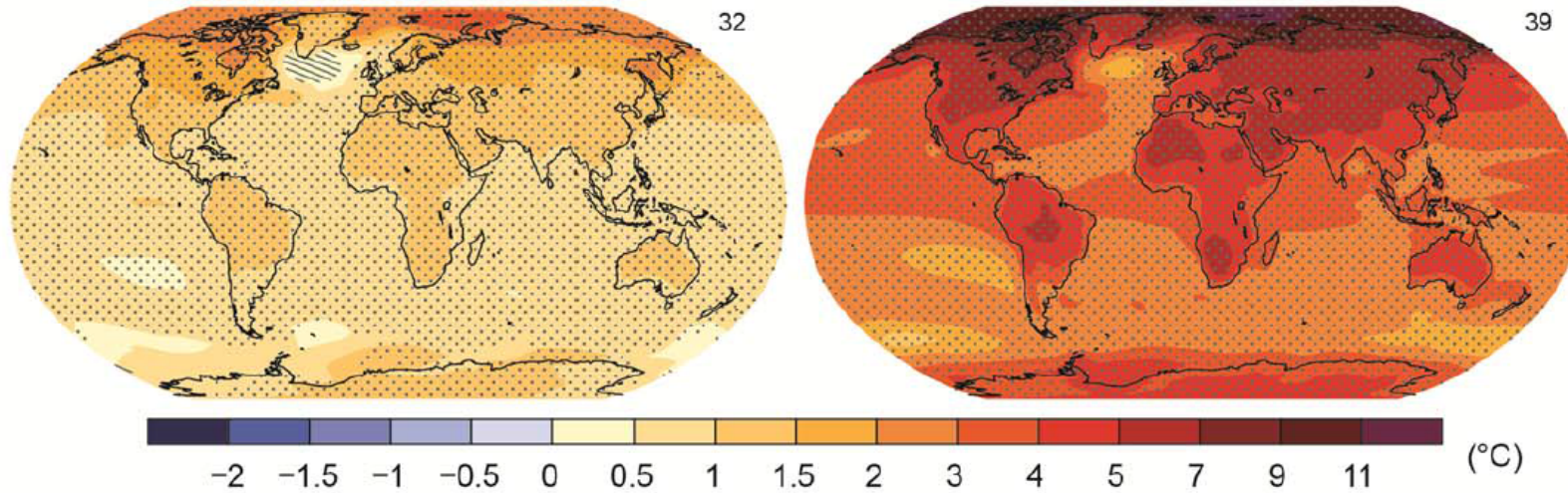


Max-Planck-Institut
für Meteorologie

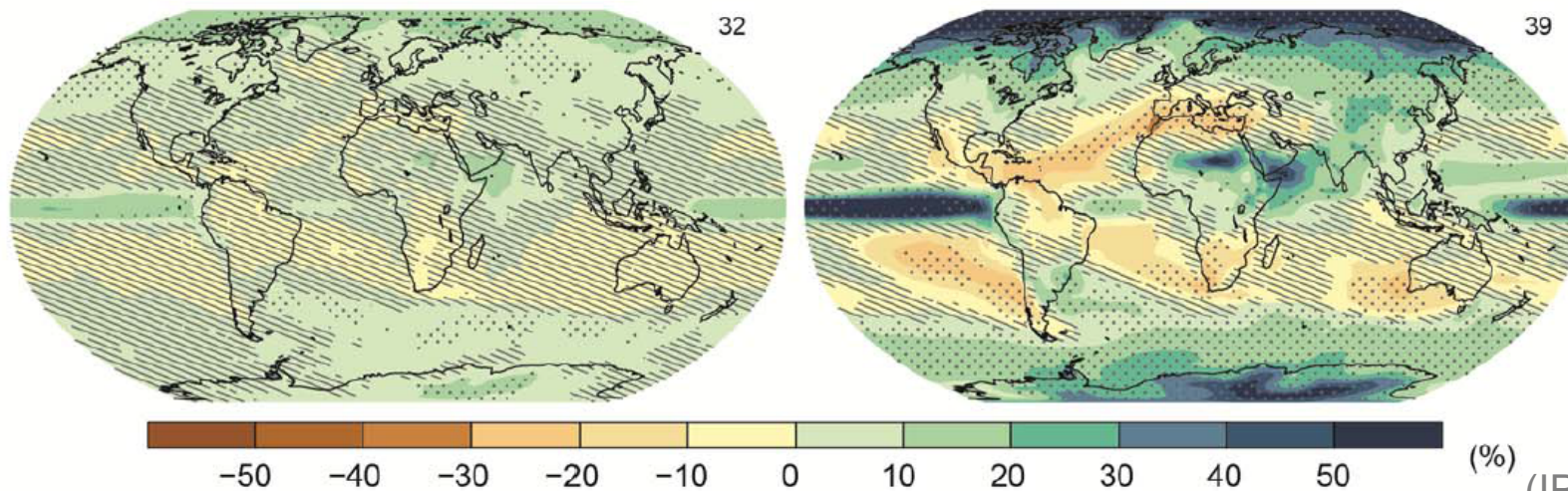
RCP 2.6

RCP 8.5

(a) Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)



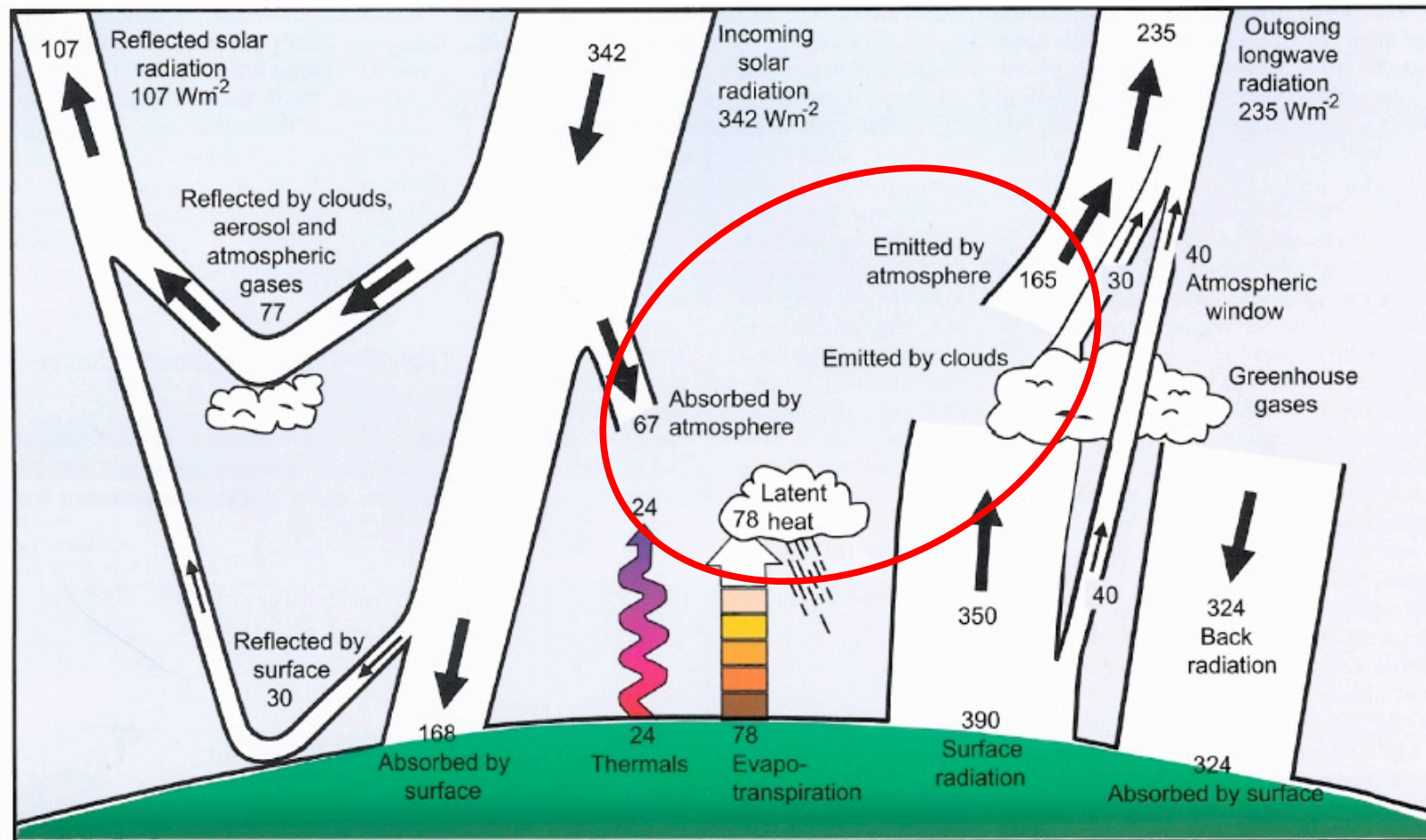
(b) Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)



(IPCC AR5, SPM, 2013)



Warum regnet es (und wieviel mehr bei Erwärmung)?



(Kiehl and Trenberth, 1997)

Die latente Wärme, die bei der Kondensation frei wird, gleicht die Strahlungskühlung der Troposphäre aus. Um 1°C wärmere Luft kann zwar um etwa 7% mehr Wasserdampf aufnehmen (Clausius-Clapeyron), Strahlungskühlung und damit Niederschlag nehmen jedoch durch mehr CO_2 und H_2O , das diese Erwärmung verursacht, nur etwa um 2% zu.

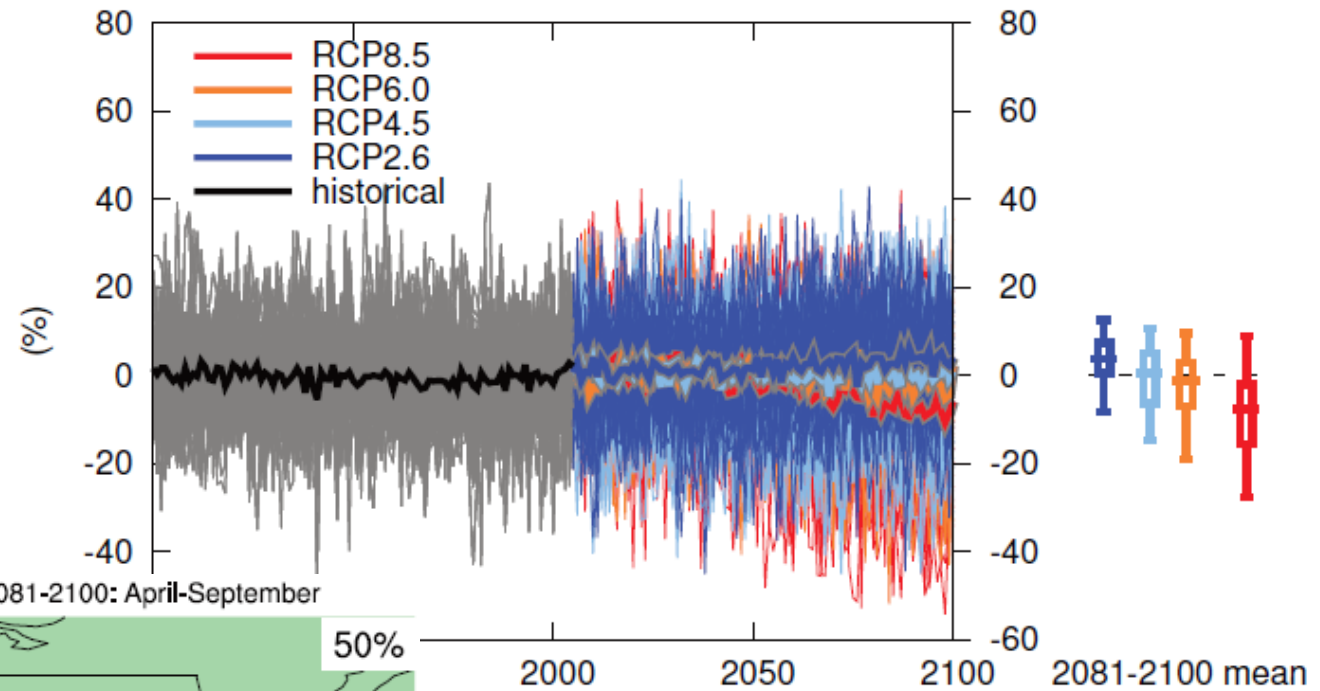


Niederschlagsänderungen in Zentraleuropa - Sommer

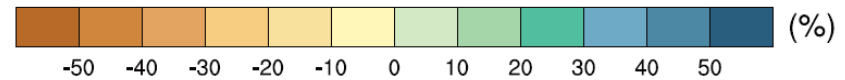
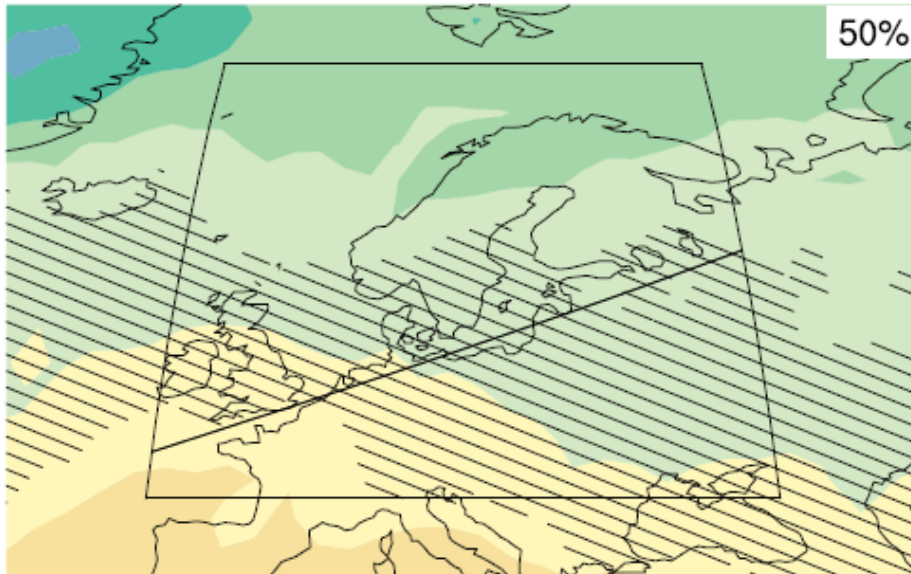


Max-Planck-Institut
für Meteorologie

Precipitation change Central Europe April-September



Precipitation change RCP4.5 in 2081-2100: April-September



(IPCC AR5, WG1, Fig. AI39, 2013)



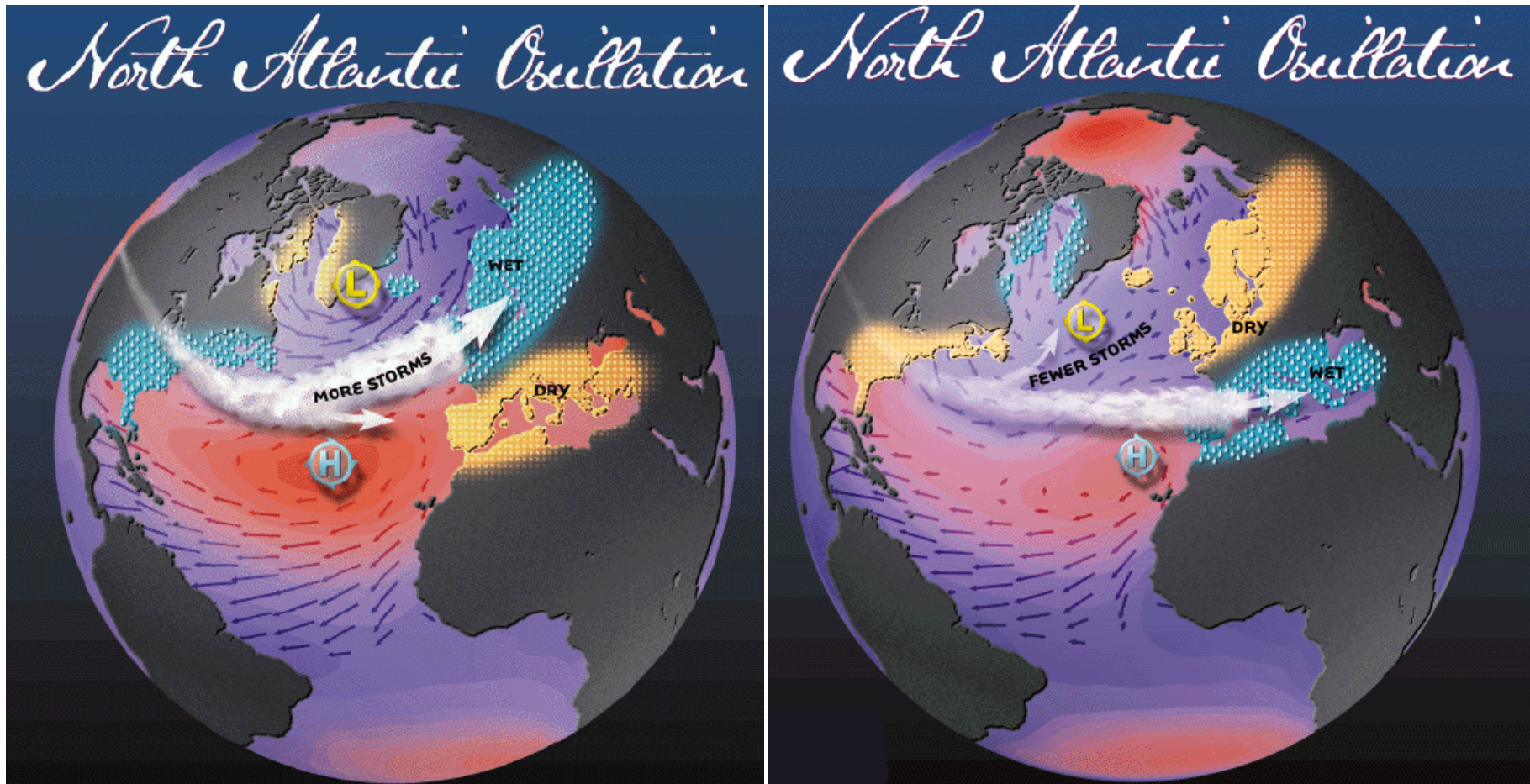
NAO – Die Nordatlantische Oszillation



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

NAO+

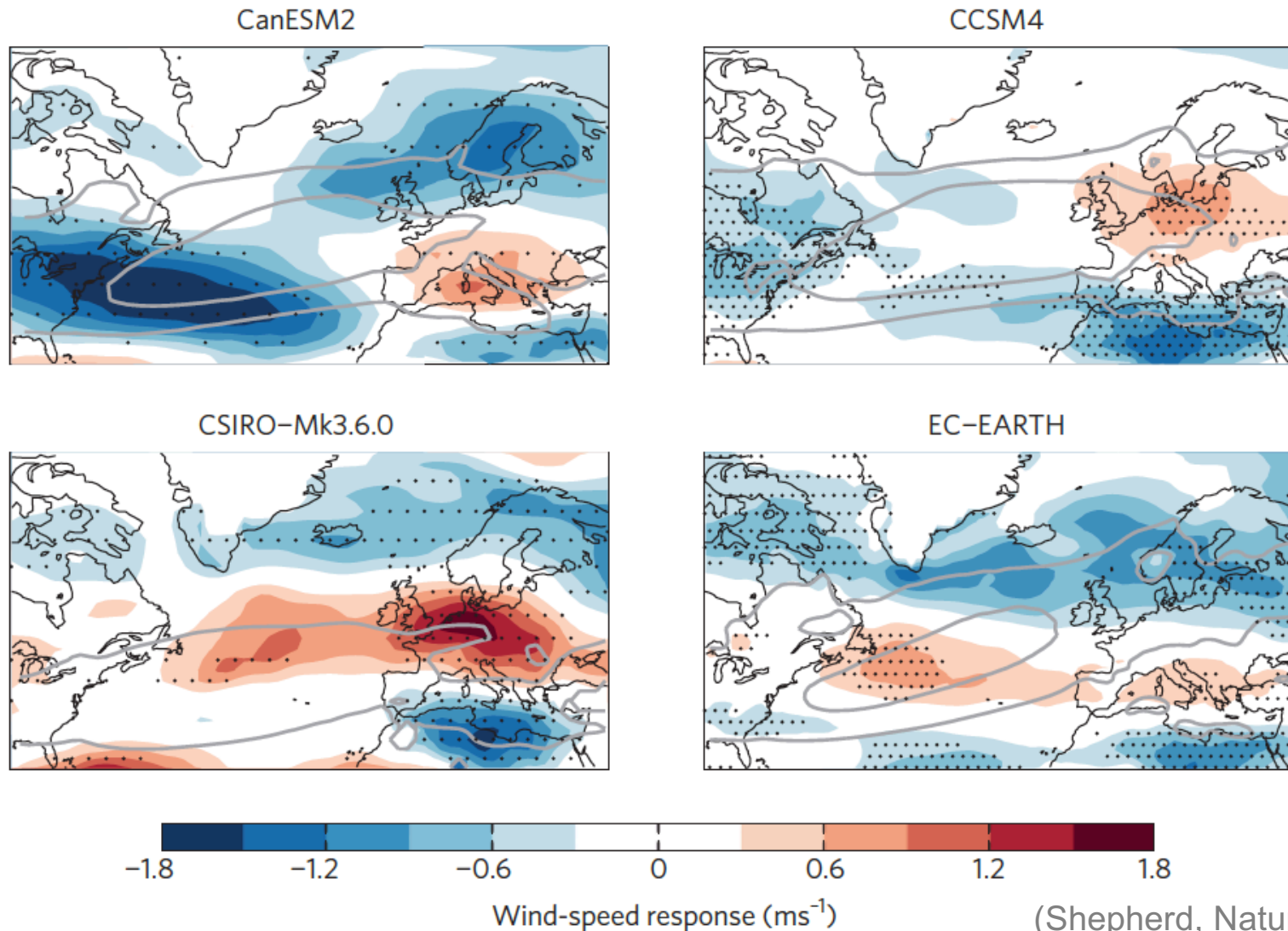
NAO-



(<http://www.ideo.columbia.edu>)

Zwischen etwa 1970 und 2010 wies der NAO-Index einen positiven Trend auf. Aufgrund des Klimawandels? Der Winter 2009/2010, z. B. war von einer extrem negativen NAO gekennzeichnet.

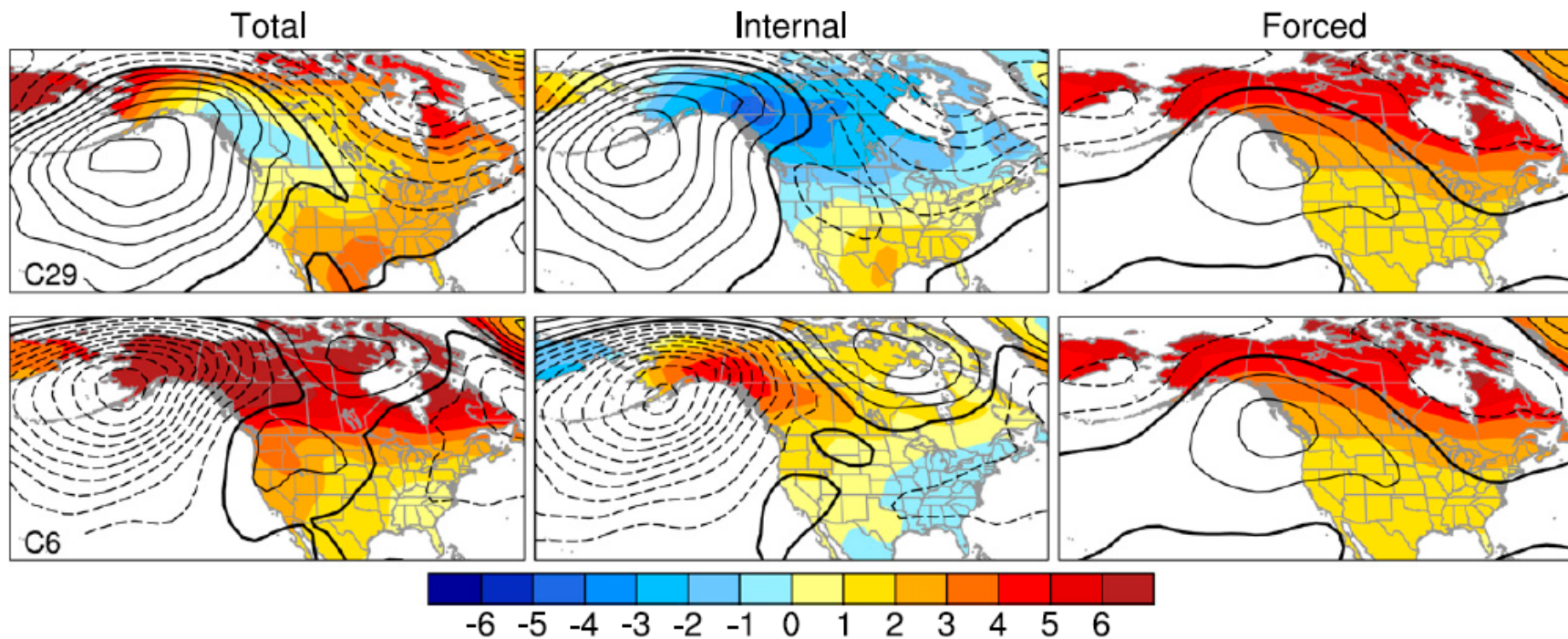
Mittlerer zonaler wind in 850 hPa im Winter (graue Isolinien, 5 m/s) und dessen Änderung im 21. Jahrhundert bei starkem Treibhausgasanstieg



(Shepherd, Nature Geoscience, 2014)

50-year trends (2010-2060) simulated with the CCSM3 model

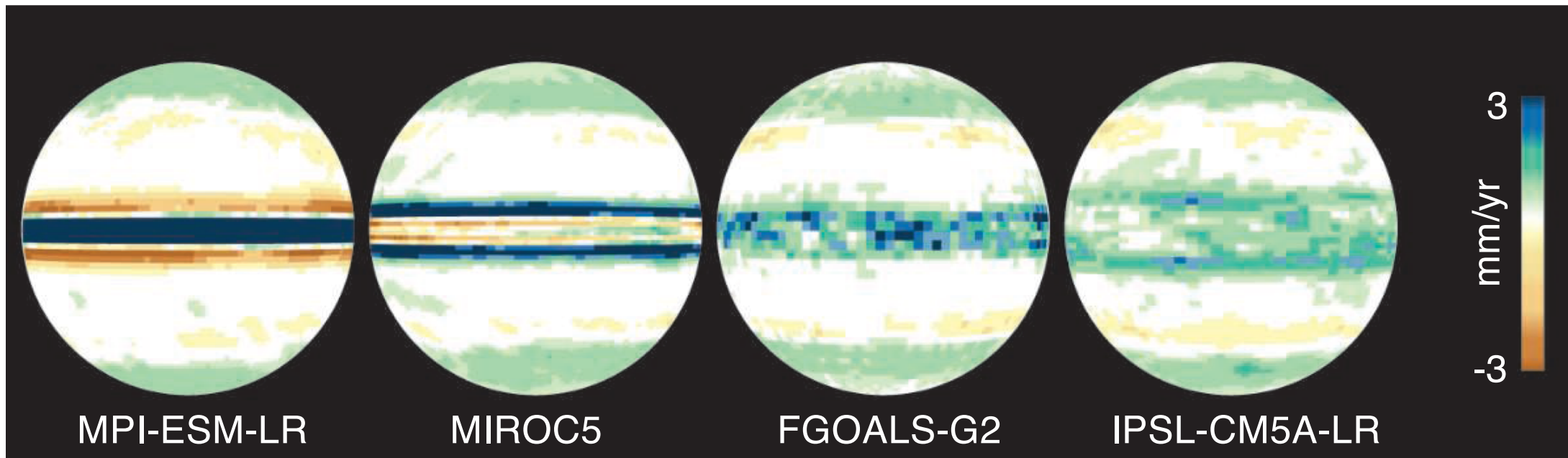
a) Winter SAT and SLP



(Deser et al., J. Climate, 2013)



Änderung des Niederschlags bei einer Erhöhung der Oberflächentemperatur eines Aquaplaneten um 4K

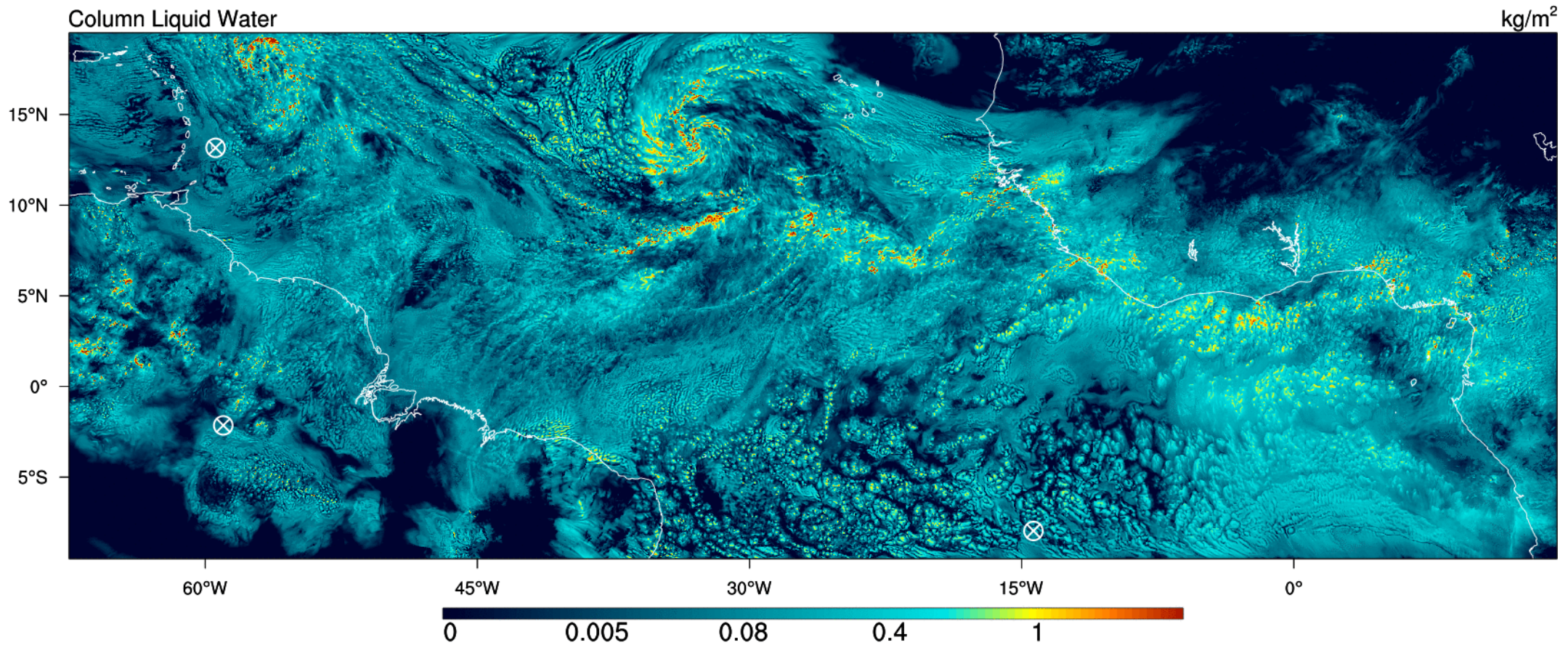


(Stevens et al., Science, 2013)



Tropical Atlantic in ICON, August, 23, 2016

ICON HERZ - NARVAL-II - HD(CP)² Simulations: 20160823 +10.0h



Simulation by Daniel Klocke (DWD) and visualization by Matthias Brueck (MPI-M)



Werden Extremereignisse mit dem Temperaturanstieg zunehmen?



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

- Hitzewellen: sehr wahrscheinlich, global
- Starkniederschläge: sehr wahrscheinlich, Landgebiete in mittleren Breiten und Tropen
- Hochwasser (Ozeane): sehr wahrscheinlich
- Dürreperioden: wahrscheinlich, subtropische Regionen
- Tropische Wirbelstürme: unsicher
- Extratropische Stürme: unsicher

(IPCC AR5, Tab. SPM.1, 2013)





- Es ist „extrem wahrscheinlich“, dass der menschliche Einfluss mehr als die Hälfte des seit 1951 beobachteten Temperaturanstiegs verursacht hat. (IPCC AR5)
- Eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration führt wahrscheinlich zu einem Temperaturanstieg zwischen 1.5 und 4.5 °C. (IPCC AR5)
- Der Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts hängt hauptsächlich von den kumulativen anthropogenen Gesamtemissionen ab. Um die 2(bzw. 1,5)-°C-Grenze nicht zu überschreiten dürfen noch etwa 1200 (550) Gt CO₂ emittiert werden. Bisher wurden etwa 2000 Gt emittiert, aktuell etwa 40 Gt pro Jahr.
- Niederschläge haben wahrscheinlich in trockenen Regionen bereits abgenommen, in feuchten Regionen zugenommen. Dieser Trend wird sich sehr wahrscheinlich fortsetzen. Im globalen Mittel ist ein Anstieg von etwa 2% pro 1°C Erwärmung zu erwarten.
- Aktuell beträgt der globale Meeresspiegelanstieg etwa 3 mm pro Jahr. Ein Abschmelzen Grönlands würde etwa 7 m Anstieg verursachen, das der Antarktis etwa 40 m. Wie schnell dieses passieren kann ist unsicher.
- Diverse Wetterextreme werden wahrscheinlich zunehmen.
- Die globale Thermodynamik des Klimawandels ist recht gut verstanden, was Erwärmung für Zirkulation bedeutet viel weniger gut.
- Regionale Prognosen (z.B. für die Tropen oder Mitteleuropa) sind deutlich unsicherer als für globale Mittel.



Vielen Dank !

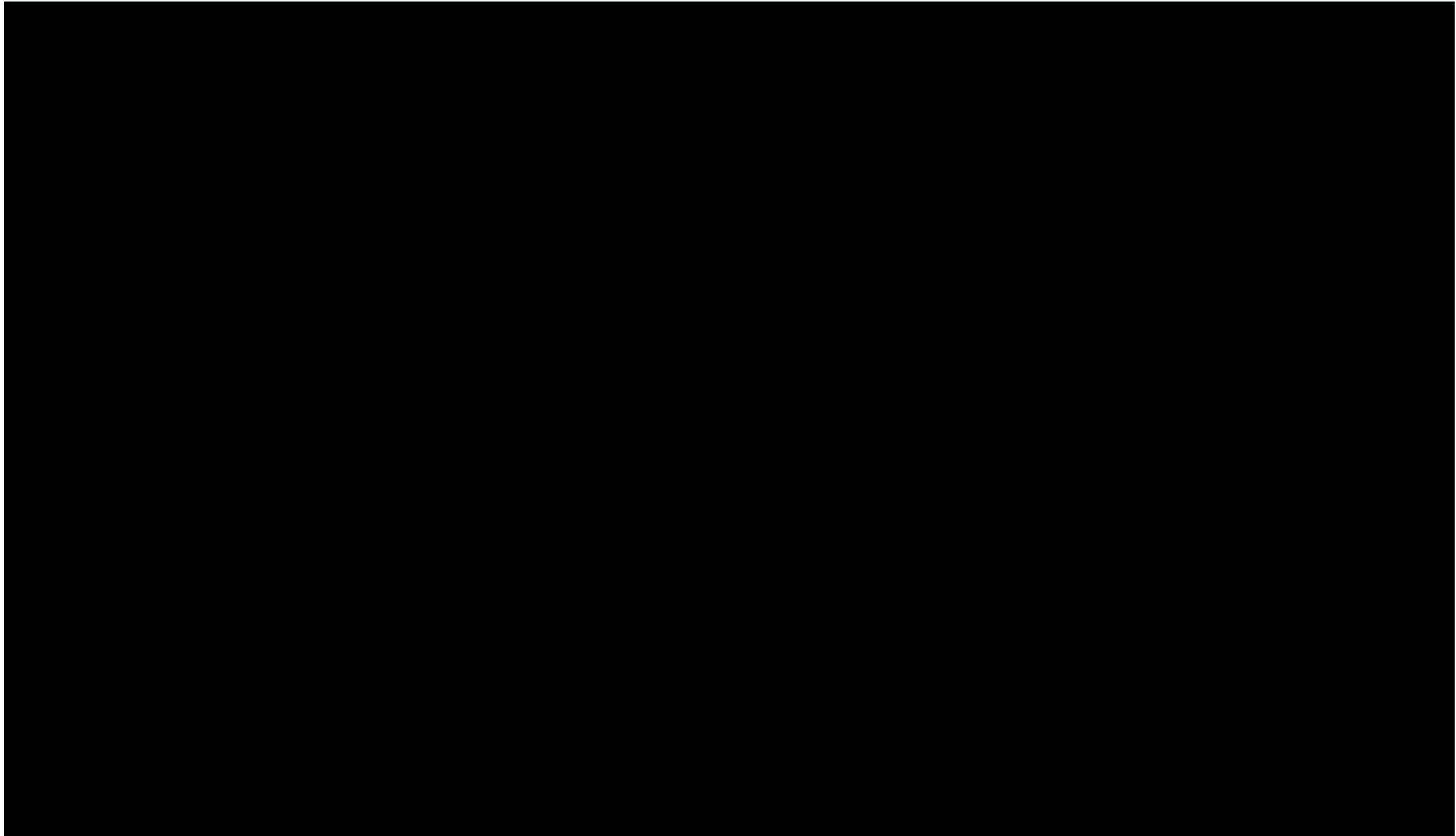
source: NASA



Towards convection resolving resolutions



Max-Planck-Institut
für Meteorologie





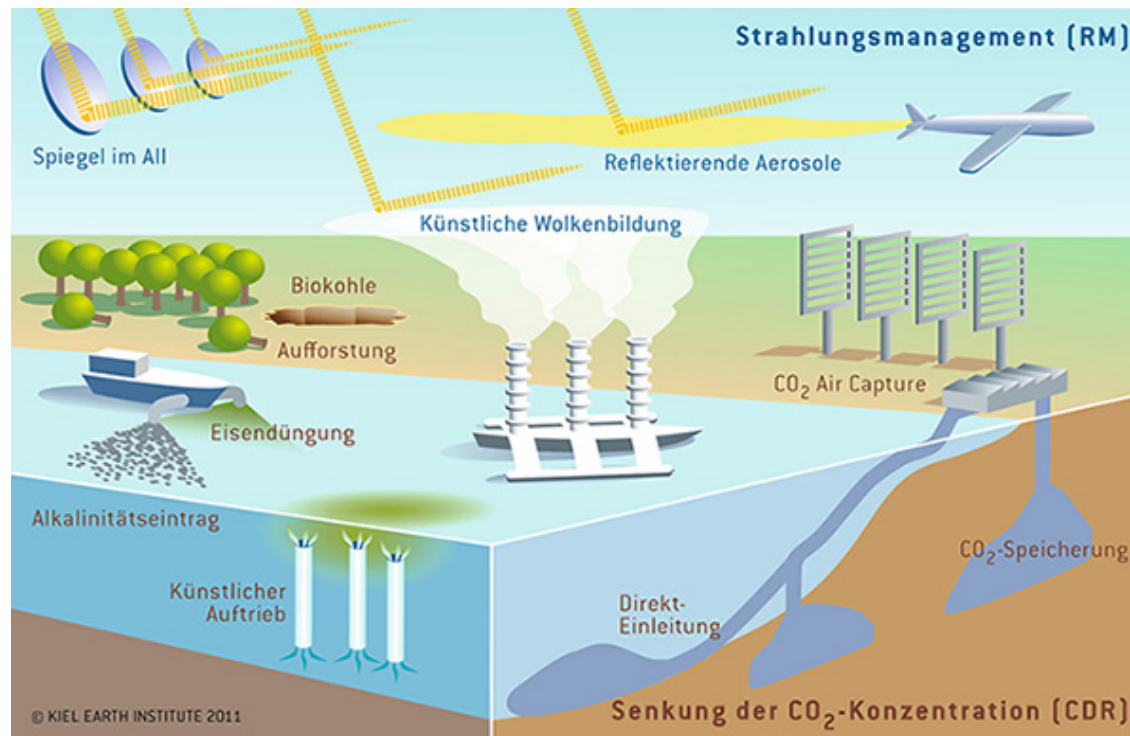
Climate Engineering — eine Antwort auf den Klimawandel?



Climate Engineering - Definition

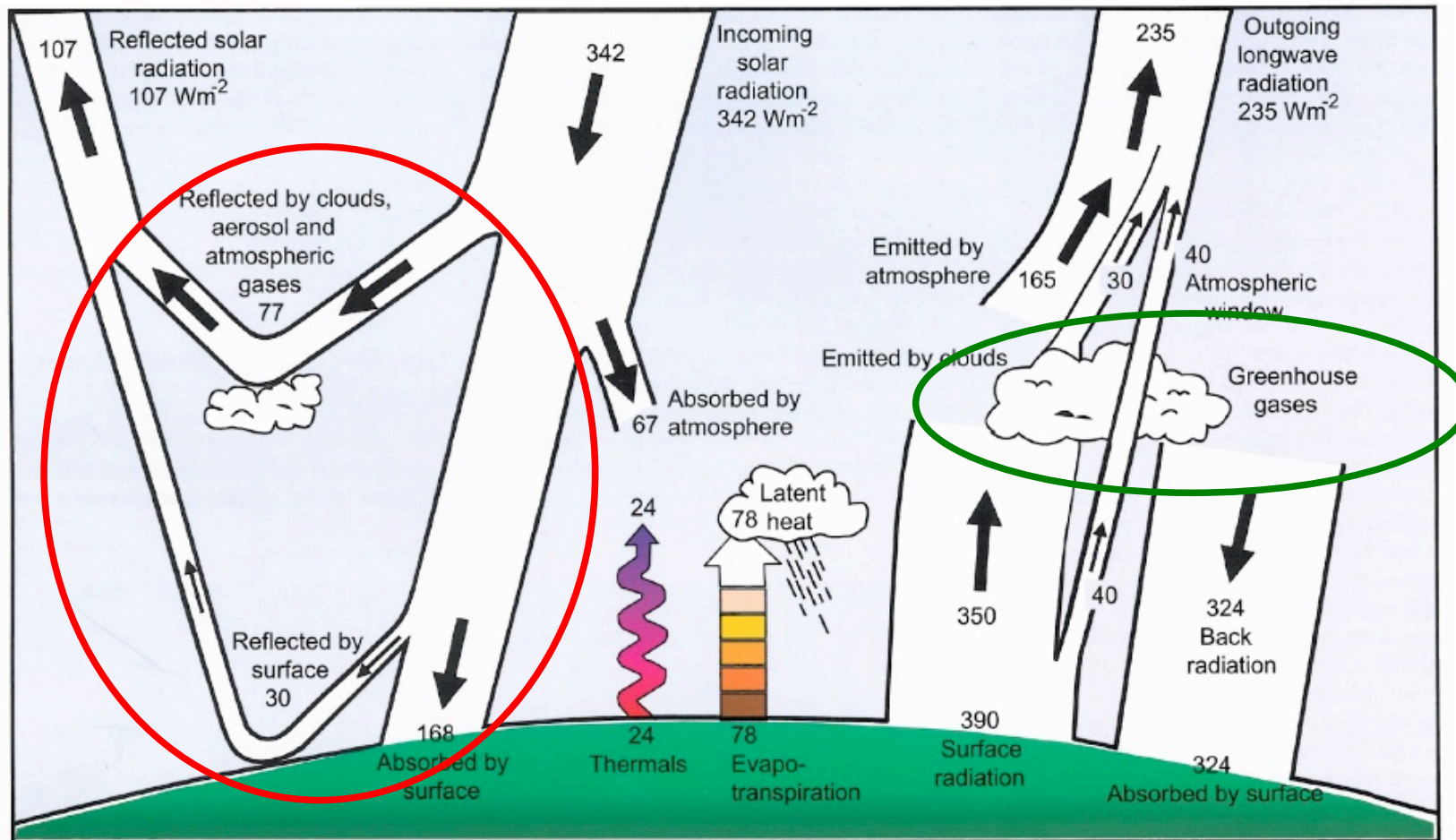


Max-Planck-Institut
für Meteorologie



„Unter dem Begriff **Climate Engineering** (oder **Geoengineering**) werden technologische Maßnahmen zusammengefasst, die gezielt dazu eingesetzt werden könnten, die atmosphärische CO₂-Konzentration zu senken oder die Strahlungsbilanz der Erde direkt zu beeinflussen, um so den anthropogen verursachten Klimawandel abzuschwächen bzw. zu kompensieren.“

(<http://www.spp-climate-engineering.de>)

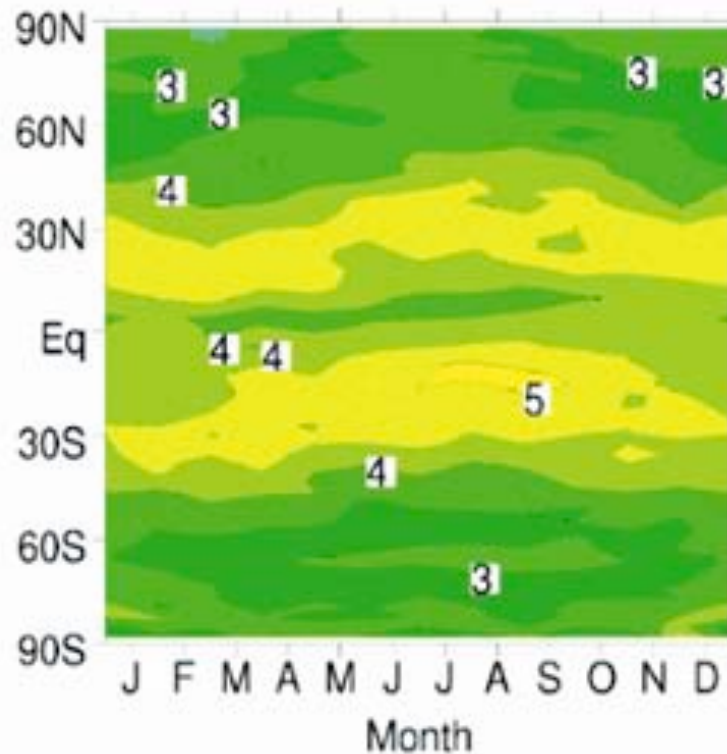


SRM: “Solar Radiation Management” – Beeinflusst den kurzwelligen (solaren) Teil der Energiebilanz

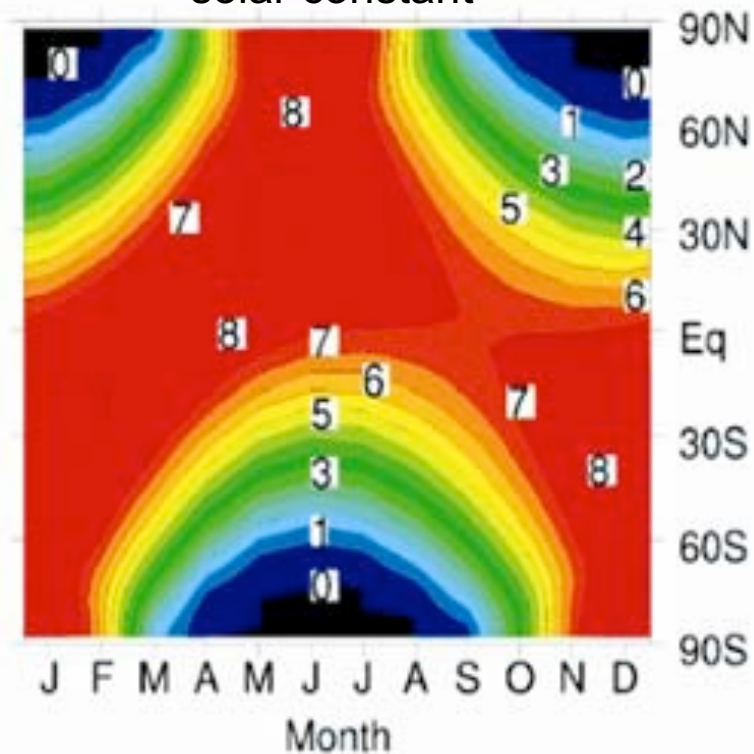
CDR: “Carbon Dioxide Removal” – Beeinflusst den infraroten (terrestrischen) Teil der Energiebilanz



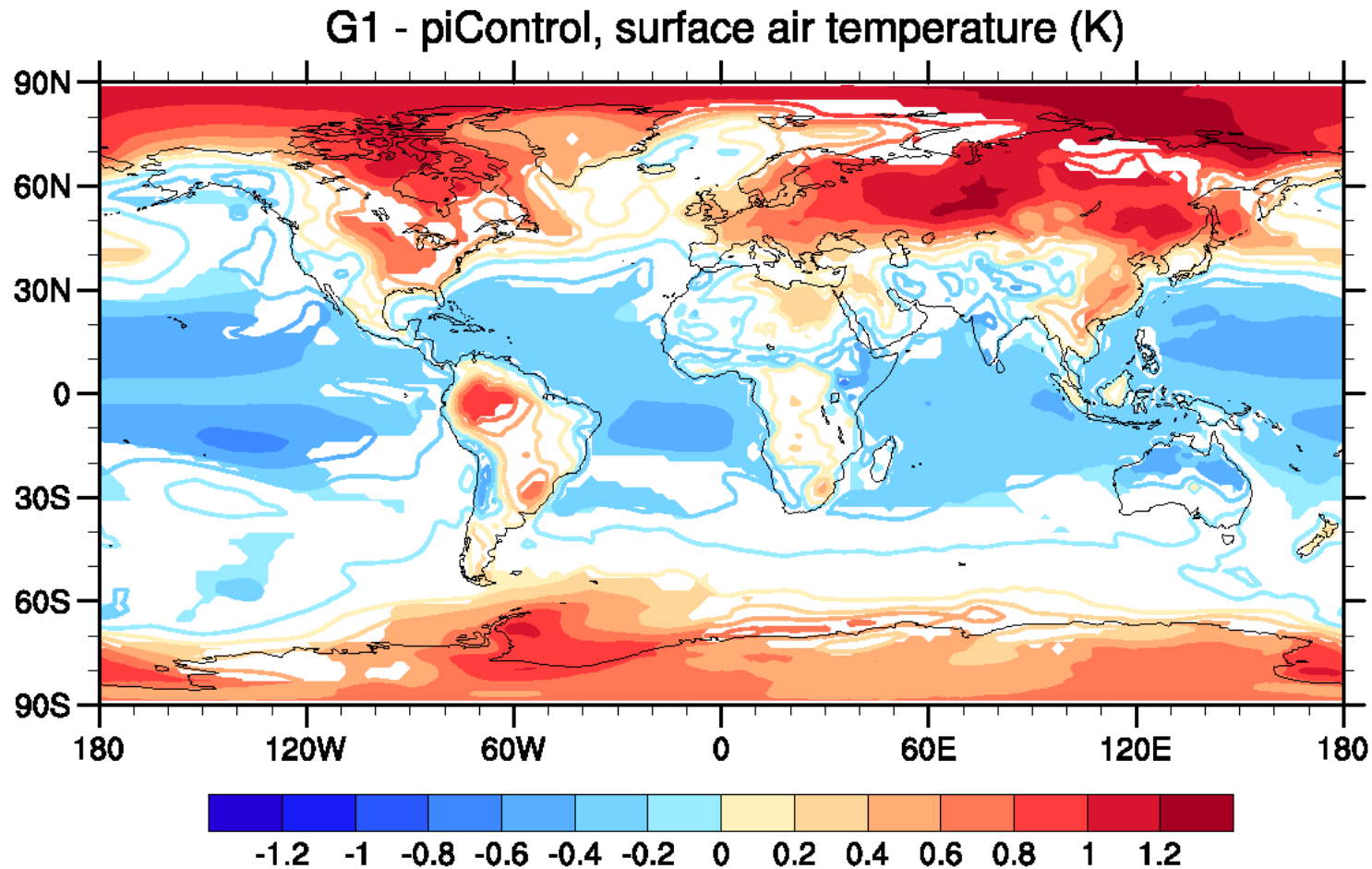
Net IR tropopause radiative forcing from CO2 doubling



Net solar tropopause radiative forcing from modifying the solar constant



(Bala et al., Current Science, 2009)

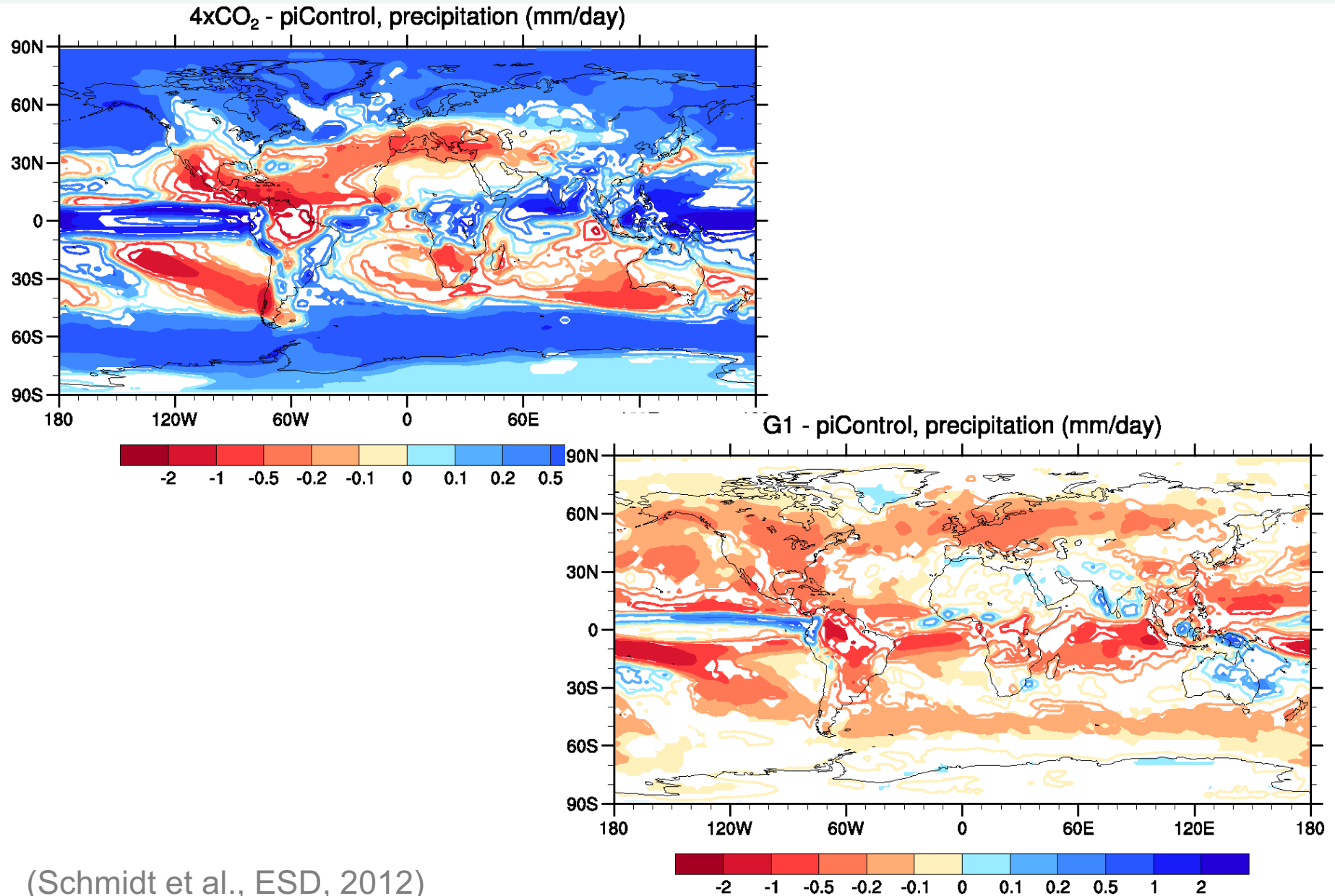


Color shading indicates regions where signals from all four models are of the same sign.

(Schmidt et al., ESD, 2012)



Precip (mm/day), G1 vs. 4xCO₂, four ESMs



(Schmidt et al., ESD, 2012)



- 2 Kategorien (SRM und CDR) mit sehr unterschiedlichen Ansätzen, Eigenschaften und potentiellen Folgen.
- Die Effektivität von CDR ist fraglich.
- SRM könnte die globale Erwärmung relativ kurzfristig stoppen.
- SRM würde kein historisches Klima reproduzieren, sondern ein bisher unbekanntes Klima erzeugen.
- Es gibt umfangreiche politische, ethische, juristische, ökonomische und natur-wissenschaftliche Bedenken.
- Weiterlesen z.B. hier:
 - „Gezielte Eingriffe“, H. Schmidt und R. Wolfrum, in: „Die Zukunft des Klimas“ (Hrsg: J. Marotzke und M. Stratmann), C.H. Beck, 2015
 - „Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering“, BMBF Scoping Study, Kiel Earth Institute, <http://www.kiel-earth-institute.de>, 2011“
 - “The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE)”, Schäfer et al. (Hrsg.), <http://www.eutrace.org/>, 2015.
 - „Climate Intervention Reports“, National Academy of Sciences, <https://nas-sites.org>, 2015.
 - ...



• Informieren

- www.ipcc.ch
- www.mpimet.mpg.de; www.deutsches-klima-konsortium.de;
www.climate-service-center.de
- www.realclimate.org
- „Die Zukunft des Klimas“, C.H. Beck Verlag
- ...

• Treibhausgasemissionen reduzieren

- www.bmu.de
- www.uba.de
- www.dena.de
- ...

• Auf den Klimawandel vorbereiten

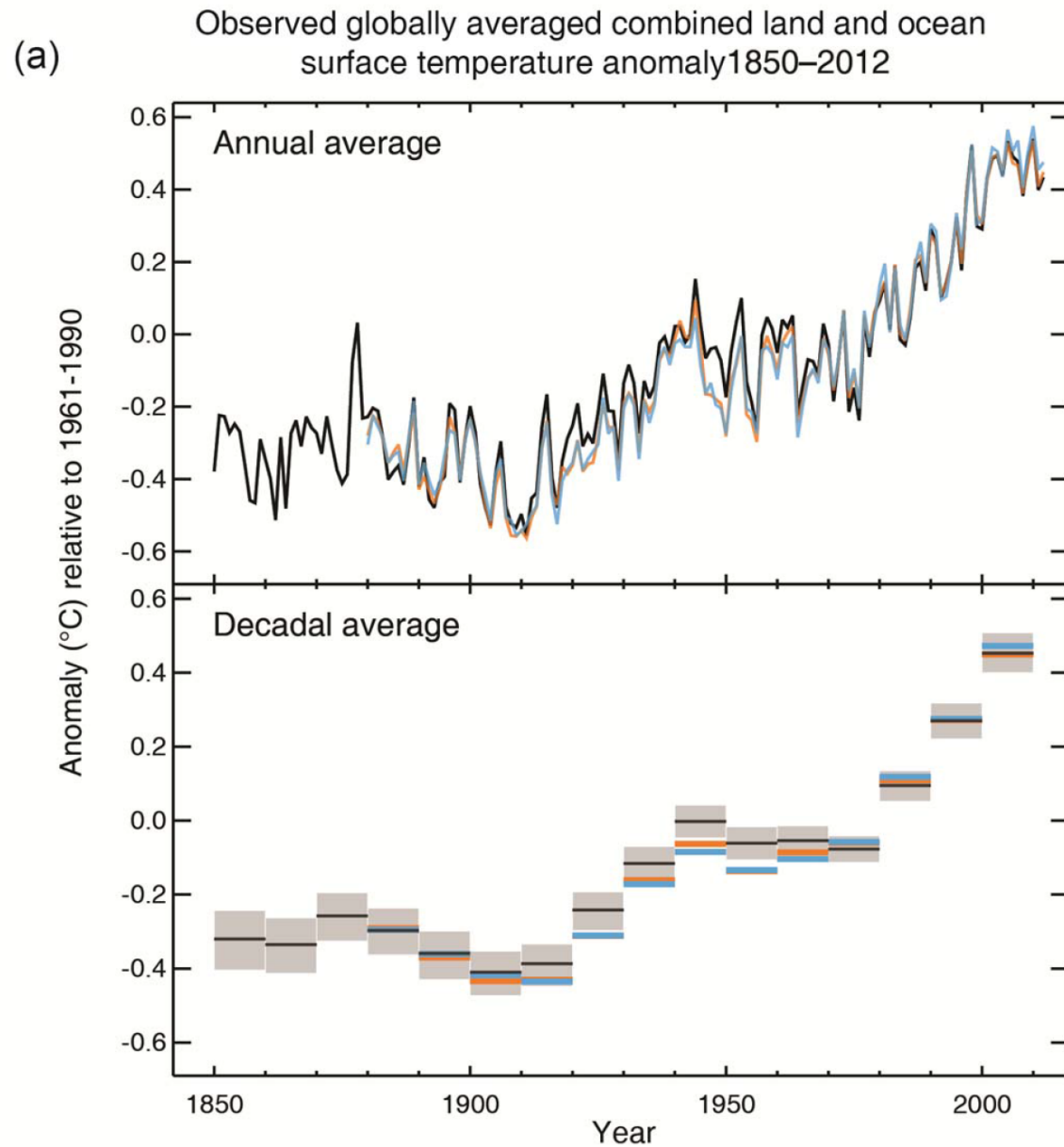
• Das Klima manipulieren (Geoengineering)?



Spare



Observed global mean surface temperature change



(IPCC AR5, SPM, 2013)



Climate Engineering — eine Antwort auf den Klimawandel?

Mitigation:

Reductions of greenhouse gas emissions and enhancement of sinks



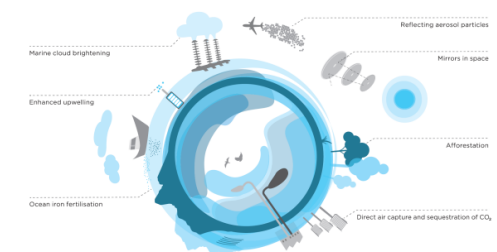
Adaptation:

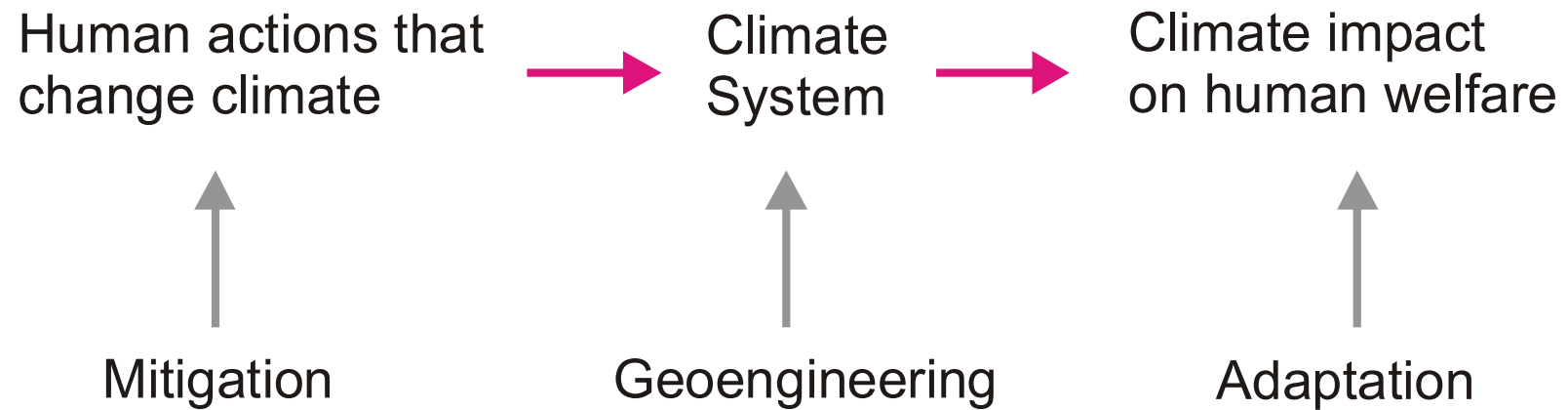
Measures to reduce vulnerability of human and natural systems to climate change effects



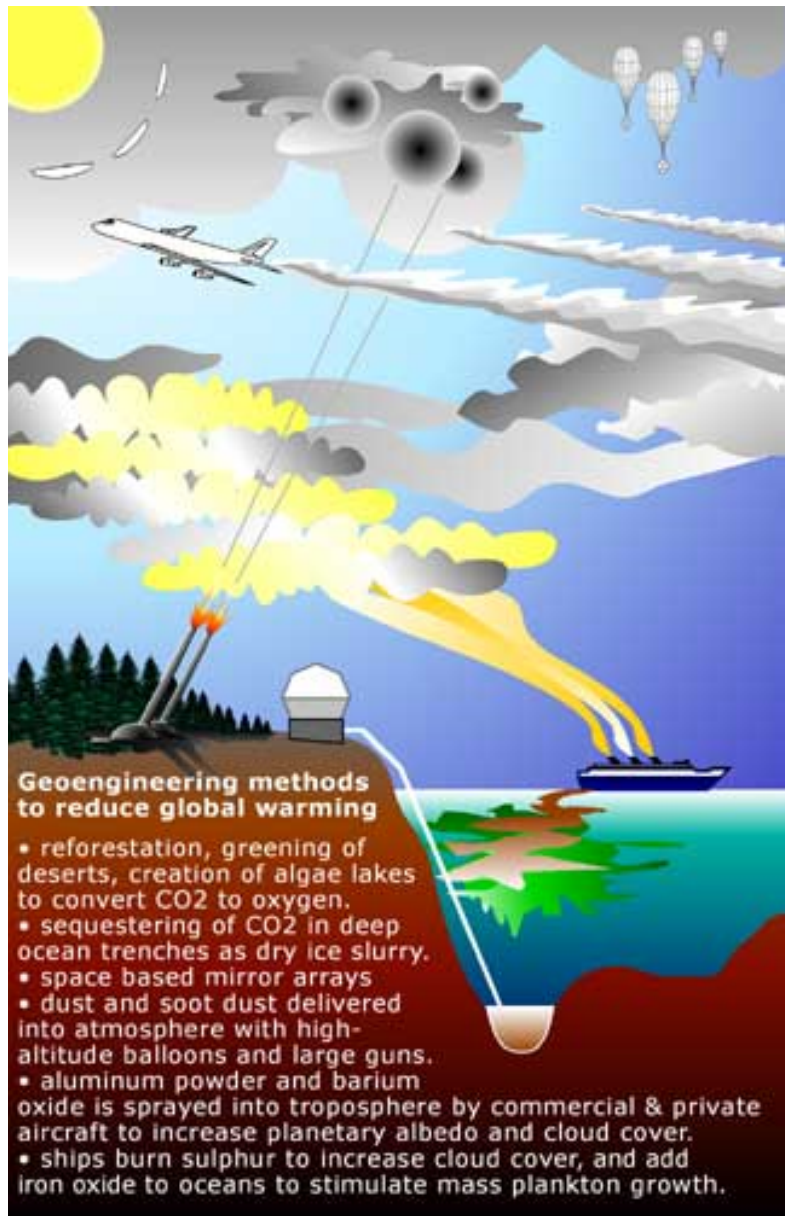
Climate engineering:

Intentional alteration of the climate system in order to reduce climate change





(Figure courtesy from D. Keith, U. Calgary)



„The modern concept of geoengineering (or climate engineering) describes deliberately manipulating the Earth's climate to counteract the effects of global warming from greenhouse gas emissions.“

(Wikipedia)

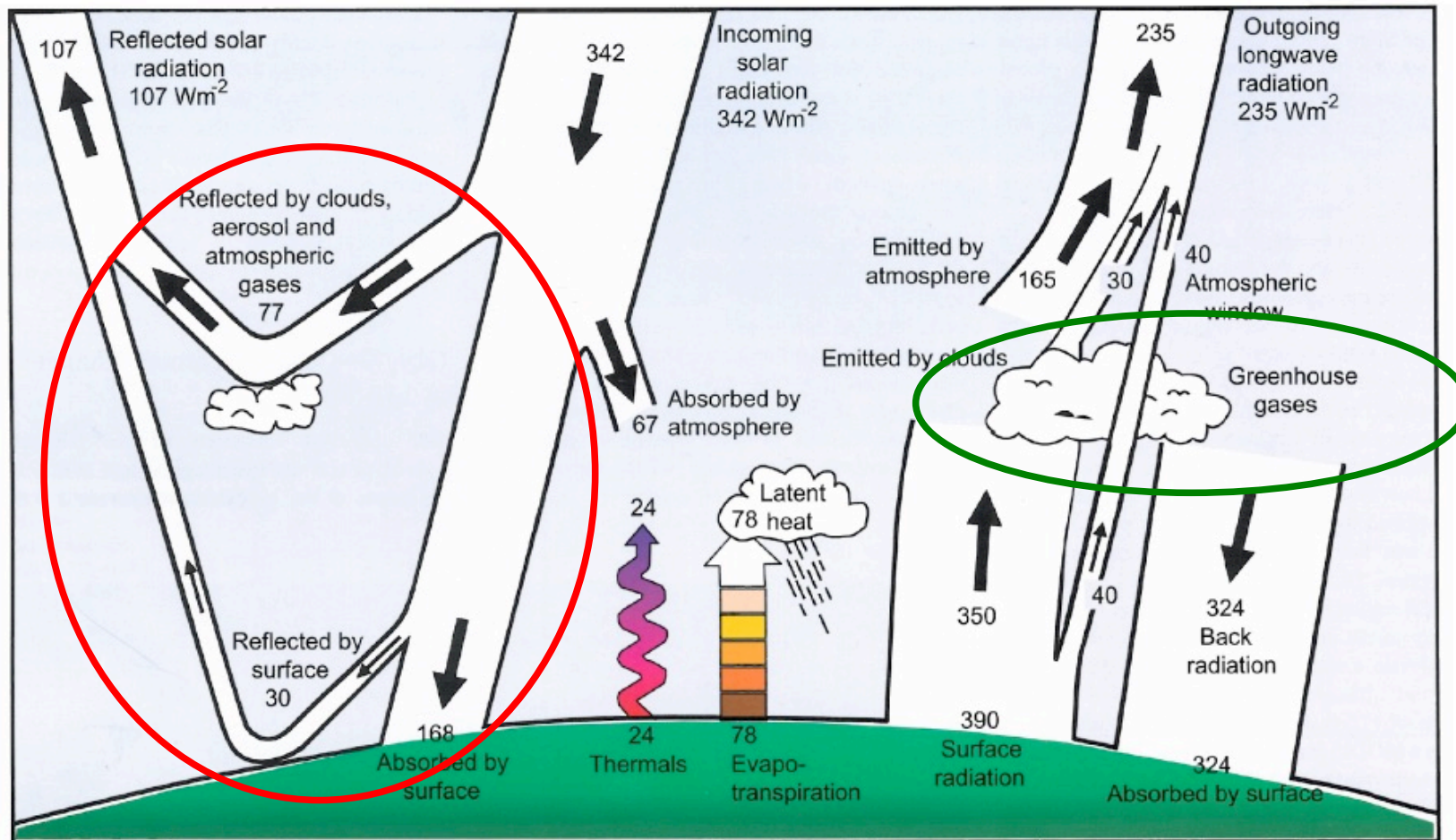
(Image credit: B. Conway, Lightwatcher Publishing)



Climate engineering options – 2 classes

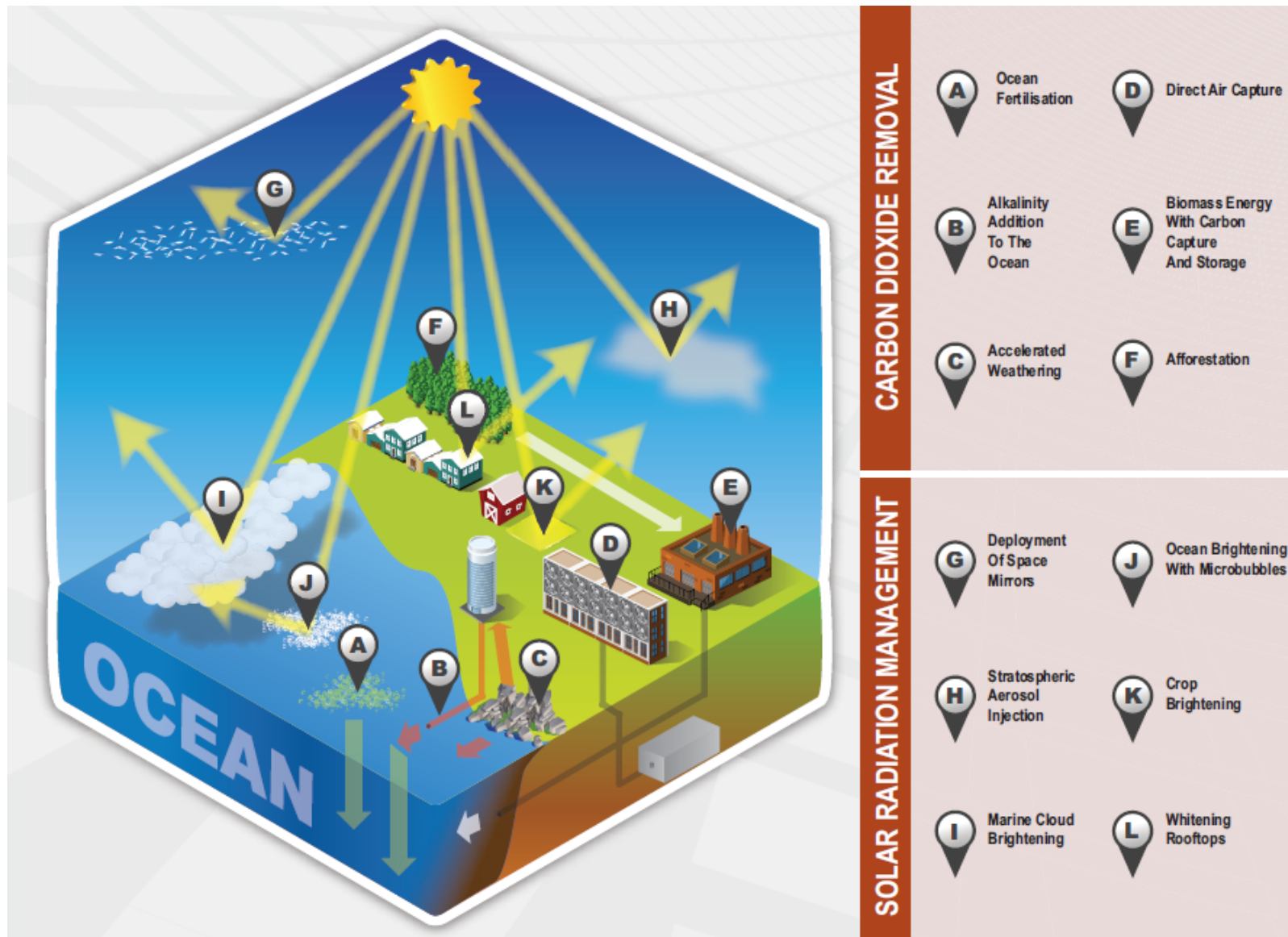


Max-Planck-Institut
für Meteorologie



SRM: solar radiation management – acts on the short wave (solar) contribution to the energy balance

CDR: carbon dioxide removal – acts on the infrared (terrestrial) contribution to the energy balance



(IPCC AR5, WG1, ch. 7, FAQ 7.3, Fig. 1, 2013)



RESTORING THE QUALITY OF OUR ENVIRONMENT



The climatic changes that may be produced by the increased CO₂ content could be deleterious from the point of view of human beings. The possibilities of deliberately bringing about countervailing climatic changes therefore need to be thoroughly explored. A change in the radiation balance in the opposite direction to that which might result from the increase of atmospheric CO₂ could be produced by raising the albedo, or reflectivity, of the earth. Such a change in albedo could be

THE WHITE HOUSE
NOVEMBER 1965



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

OTHER POSSIBLE EFFECTS OF AN INCREASE IN ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE

Melting of the Antarctic ice cap.—It has sometimes been suggested that atmospheric warming due to an increase in the CO₂ content of the atmosphere may result in a catastrophically rapid melting of the Antarctic ice cap, with an accompanying rise in sea level. From our knowledge of events at the end of the Wisconsin period, 10 to 11 thousand years ago, we know that melting of continental ice caps can occur very rapidly on a geologic time scale. But such melting must occur relatively slowly on a human scale.

The Antarctic ice cap covers 14 million square kilometers and is about 3 kilometers thick. It contains roughly 4×10^{16} tons of ice, hence 4×10^{24} gram calories of heat energy would be required to melt it. At the present time, the poleward heat flow across 70° latitude is 10^{22} gram calories per year, and this heat is being radiated to space over Antarctica without much measurable effect on the ice cap. Suppose that the poleward heat flow were increased by 100% through an intensification of the

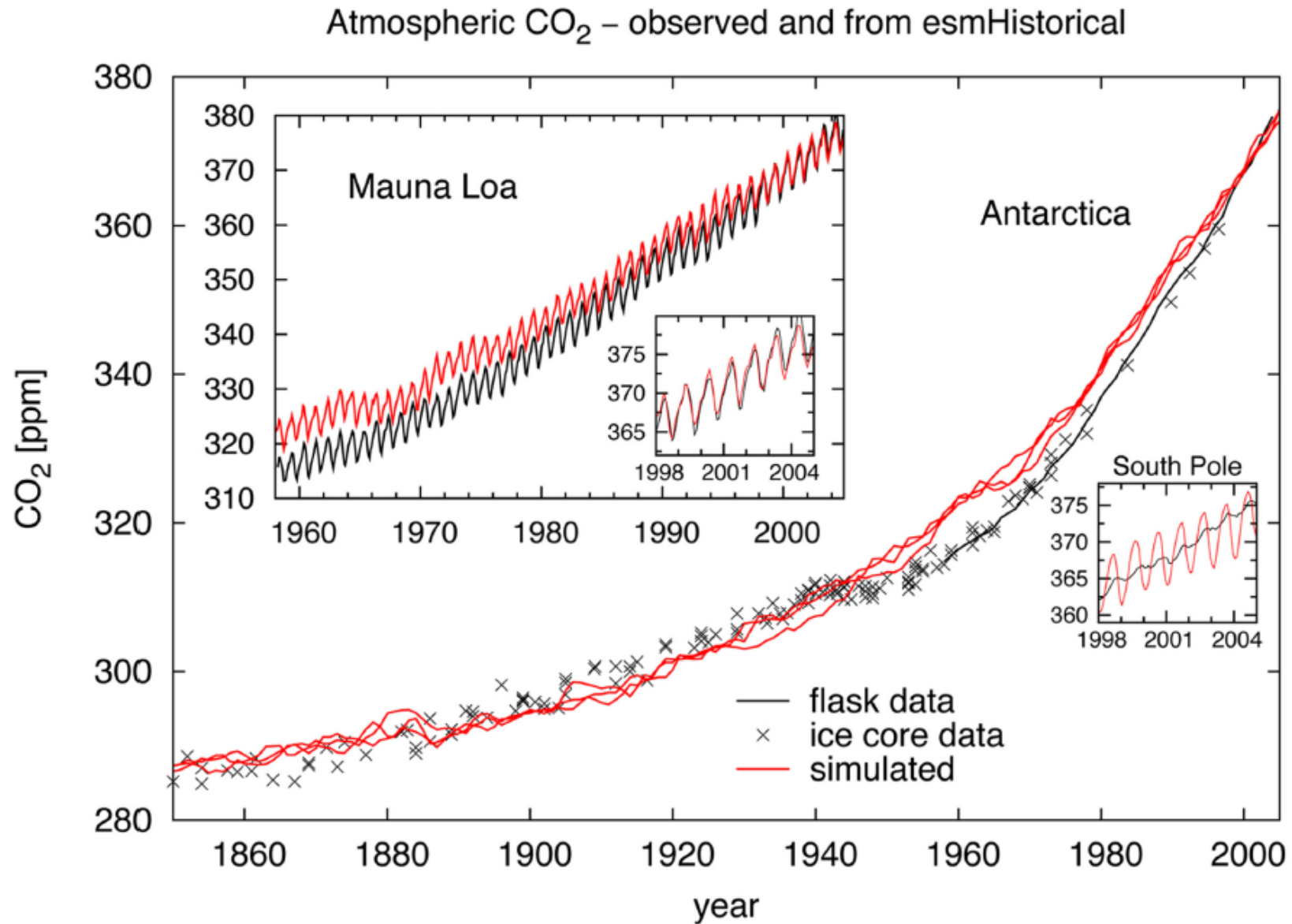
This is a hundred times greater than present worldwide rates of sea level change.

Warming of sea water.—If the average air temperature rises, the temperature of the surface ocean waters in temperate and tropical regions could be expected to rise by an equal amount. (Water temperatures in the polar regions are roughly stabilized by the melting and freezing of ice.) An oceanic warming of 1° to 2°C (about 2°F) oc-

(courtesy from D. Keith, U. Calgary)



Observed and simulated near surface air temperature



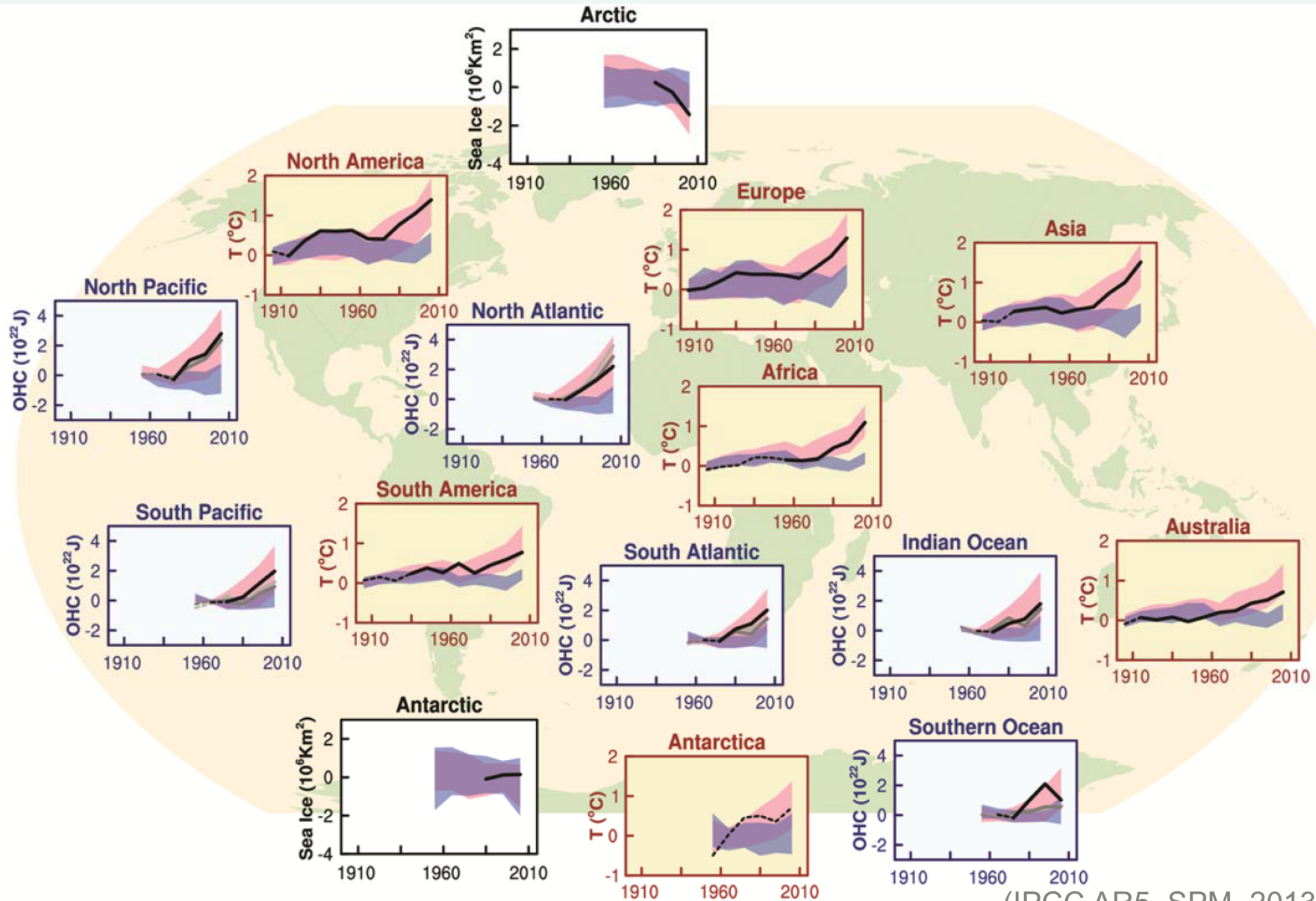
(Giorgetta et al., JAMES, 2013)



Attribution of observed change



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



(IPCC AR5, SPM, 2013)

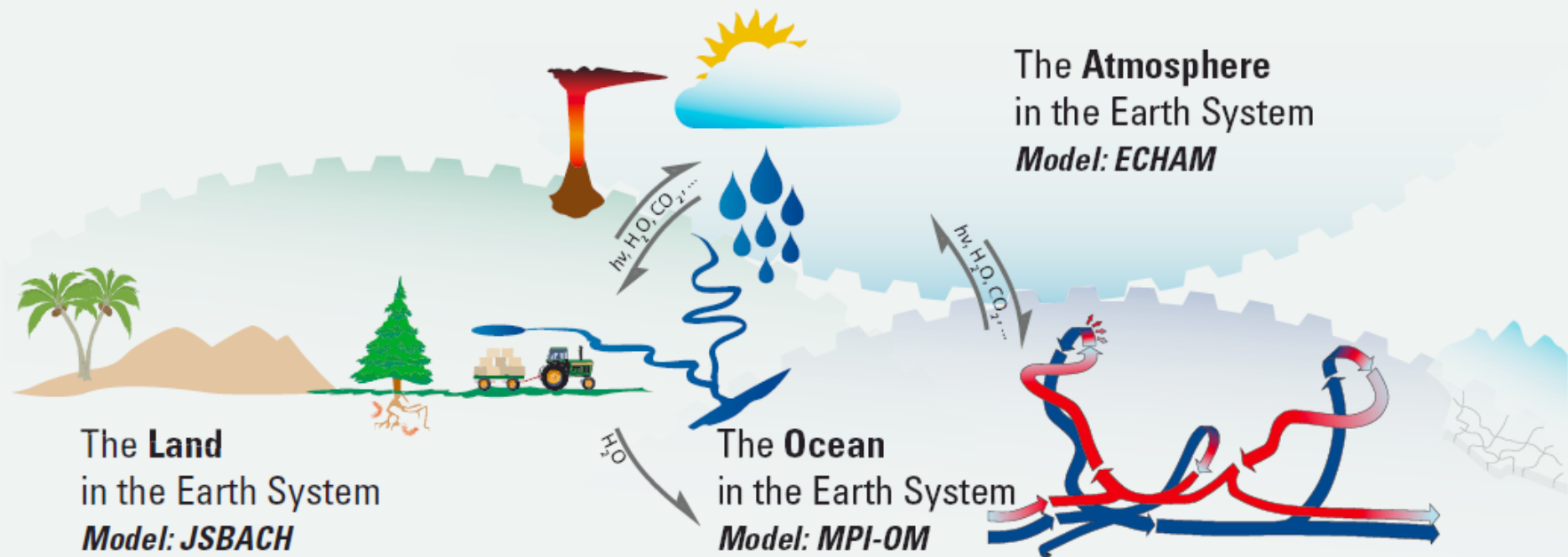


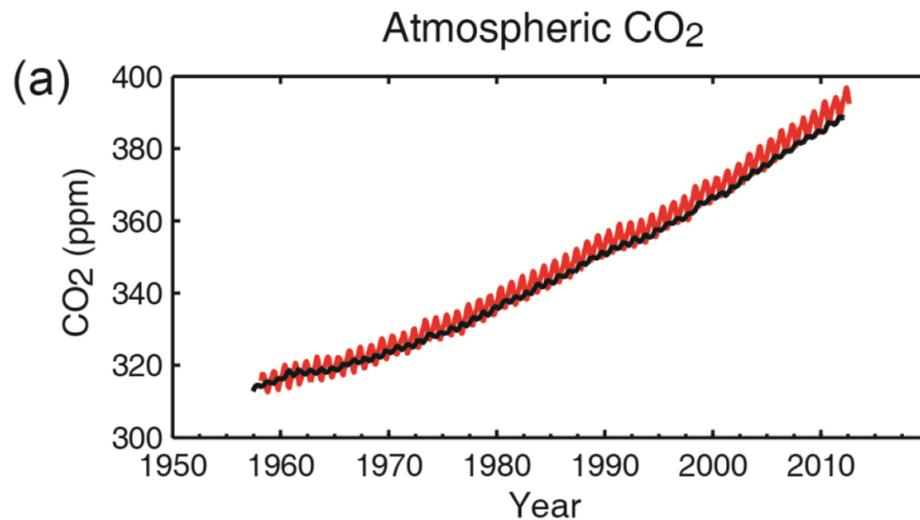
Das Erdsystem – erforscht am MPI-M



Max-Planck-Institut
für Meteorologie

Earth System Science at the Max Planck Institute for Meteorology in Hamburg





Daily CO₂

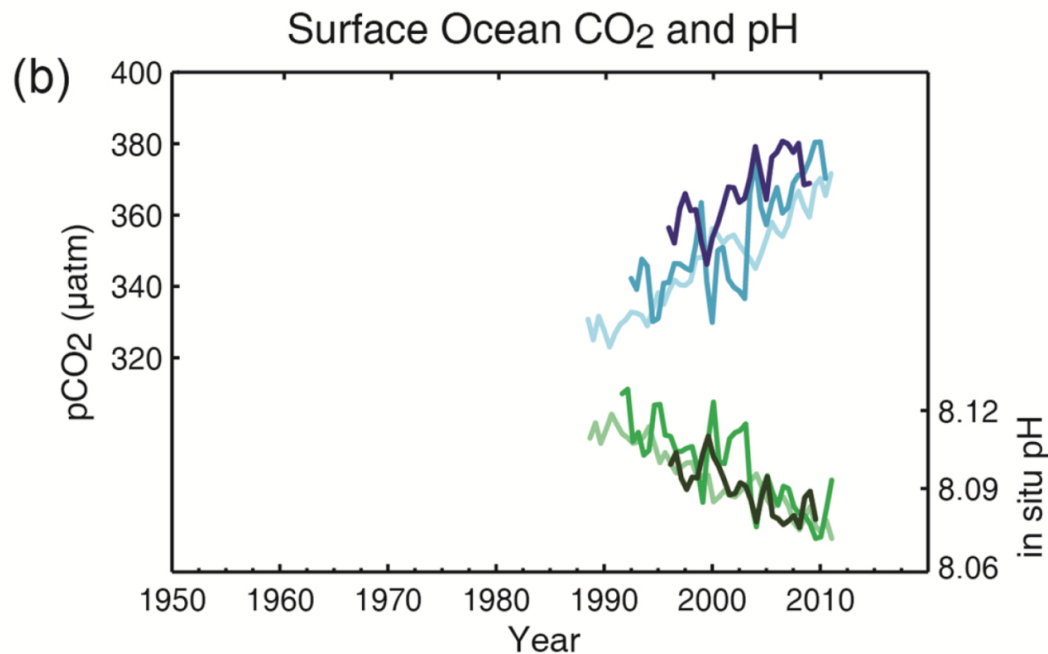
Mauna Loa Observatory | Atmospheric CO₂ Concentrations

November 28, 2016 **404.38 ppm** NOAA-ESRL

November 28, 2015 **400.63 ppm** NOAA-ESRL

daily mean concentrations | ppm = parts per million

(www.co2.earth)



(IPCC AR5, SPM, 2013)



Gleichungen für Luft (oder Wasser)

