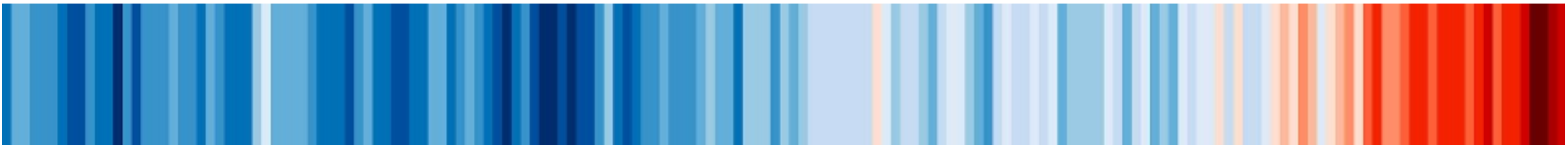


Wissenschaftliche Grundlagen des Klimawandels

Herausforderungen im Umgang mit Klimarisiken

P. Hoffmann

Klimaresilienz - Hydroklimatische Risiken



Potsdam Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK)

Mitglied der Leibnizgemeinschaft



gegründet 1992

Organisation

Potsdam, Telegrafenberg

Wissenschaftspark: Albert Einstein



Forschungsabteilungen



Erdsystemanalyse

Ozeane, Atmosphäre und Biosphäre in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

MEHR...



Klimaresilienz

Klimafolgen und Anpassung

MEHR...



Transformationspfade

Klimarisiken und Nachhaltige Entwicklung

MEHR...



Komplexitätsforschung

Maschinelles Lernen, Nichtlineare Methoden und Entscheidungsstrategien

MEHR...

Klimadiagnostik

Regionaler Klimawandel und seine Folgen für Wetter und Jahreszeiten

Dr. Peter Hoffmann, Meteorologe



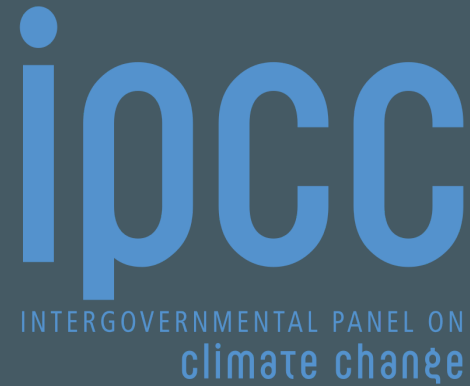
Forschungsprofil



Nationale und Internationale Organisationen



Weltorganisation f. Meteorologie



Weltklimarat



UN CLIMATE
CHANGE
CONFERENCE
UK 2021

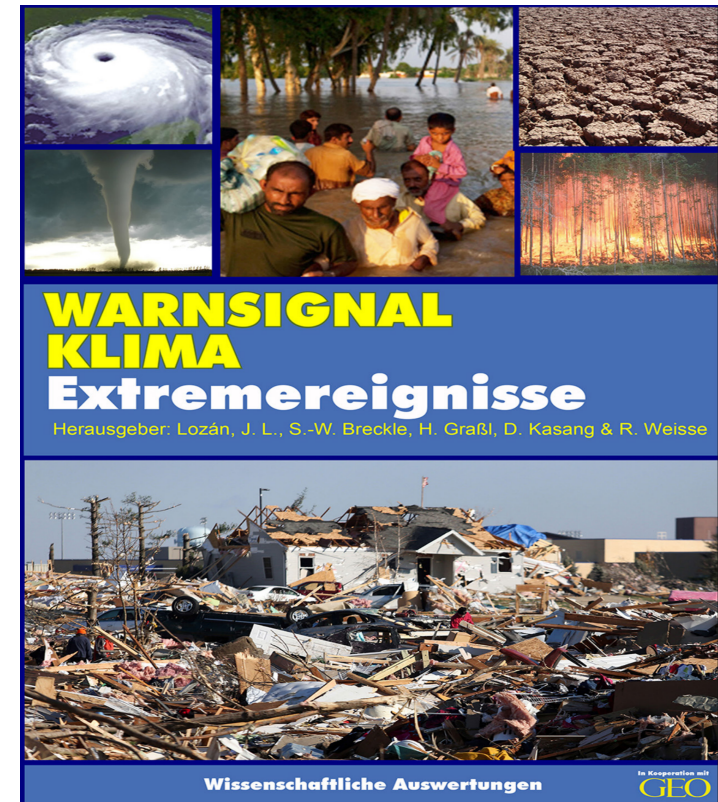
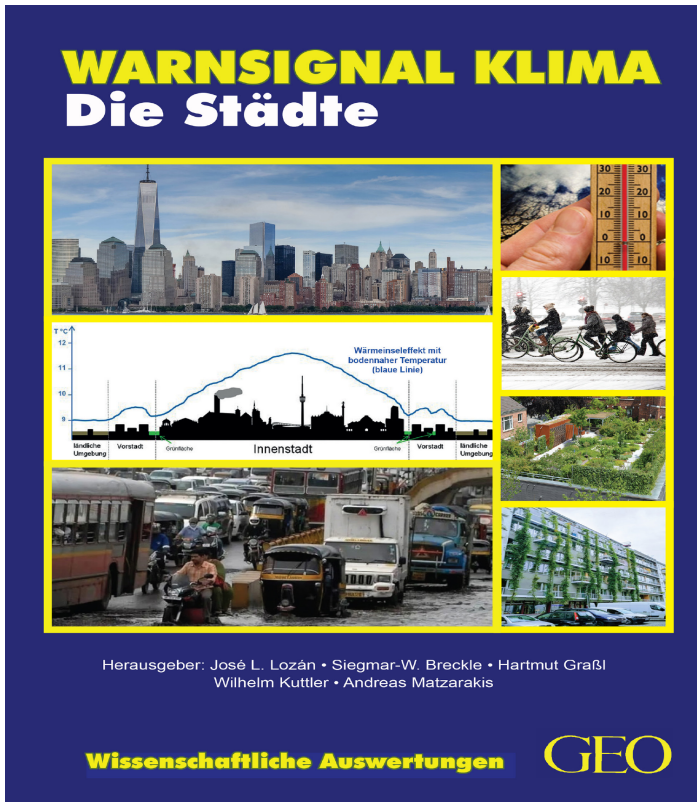
IN PARTNERSHIP WITH ITALY

UN Klimakonferenz



Warnsignal Klima

Buchreihe seit den 90er Jahren zu wissenschaftlichen Auswertungen



Die Welt von heute ist näher zusammengerückt

Klimate und Kulturen durch Handel und Tourismus (mittels fossilem Treibstoff)



1. Grundlagen Klimawandel

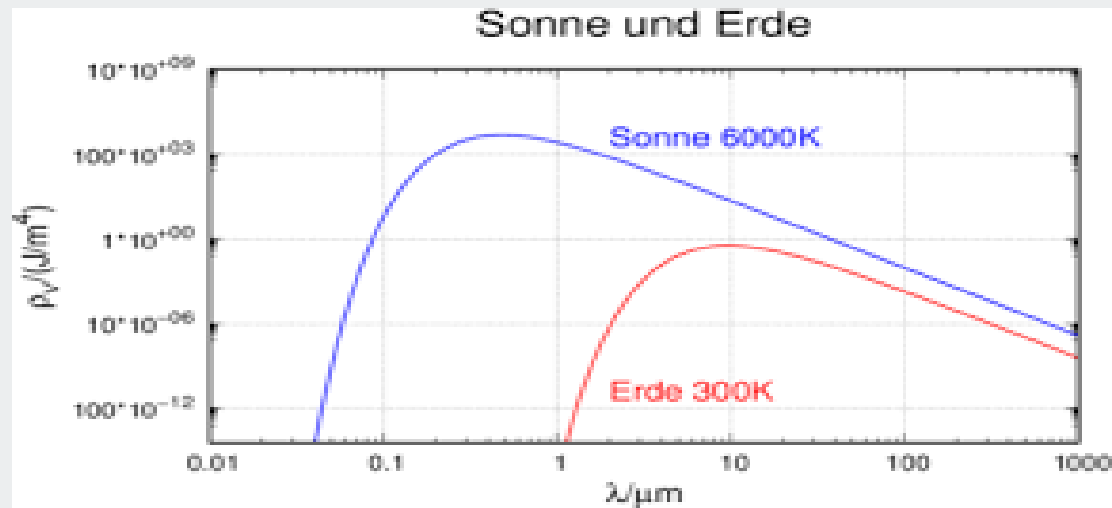
Eine Summe physikalischer Naturgesetze

Grundgesetze

- **Physikalische Grundgesetze der *Wärmelehre* und *Mechanik***
 - gelten überall auf der Erde
 - können *rasant* ablaufen: Minuten-Stunden-Tage
 - können in *Superzeitlupe* ablaufen: Jahrzehnte-Jahrhunderte
 - können durch andere Faktoren *überlagert* werden: Jahreszeiten, Zufall
 - können *wiederkehrend* sein: Tagesgang, Jahresgang, Jährlichkeit
- **Klimatische Einflussfaktoren:**
 - Strahlungsenergie der Sonne
 - Erdbahnparameter (Milankovic)
 - Zusammensetzung der Atmosphäre (Absorption)
 - Reflexionseigenschaften der Oberfläche (Albedo)

Grundgesetze

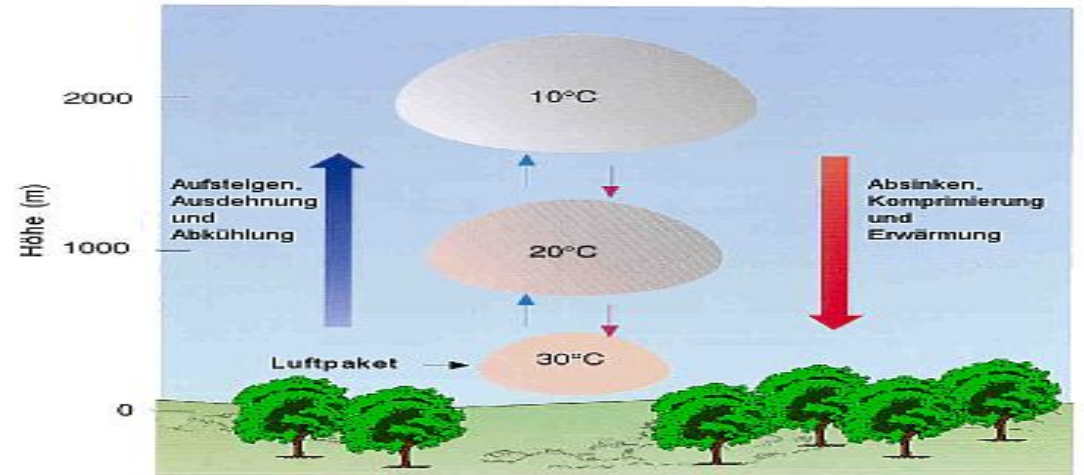
Stefan-Boltzman Gesetz



$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Die thermisch abgestrahlte Leistung P eines idealen schwarzen Körpers hängt von seiner Temperatur T ab.

1. Hauptsatz der Thermodynamik

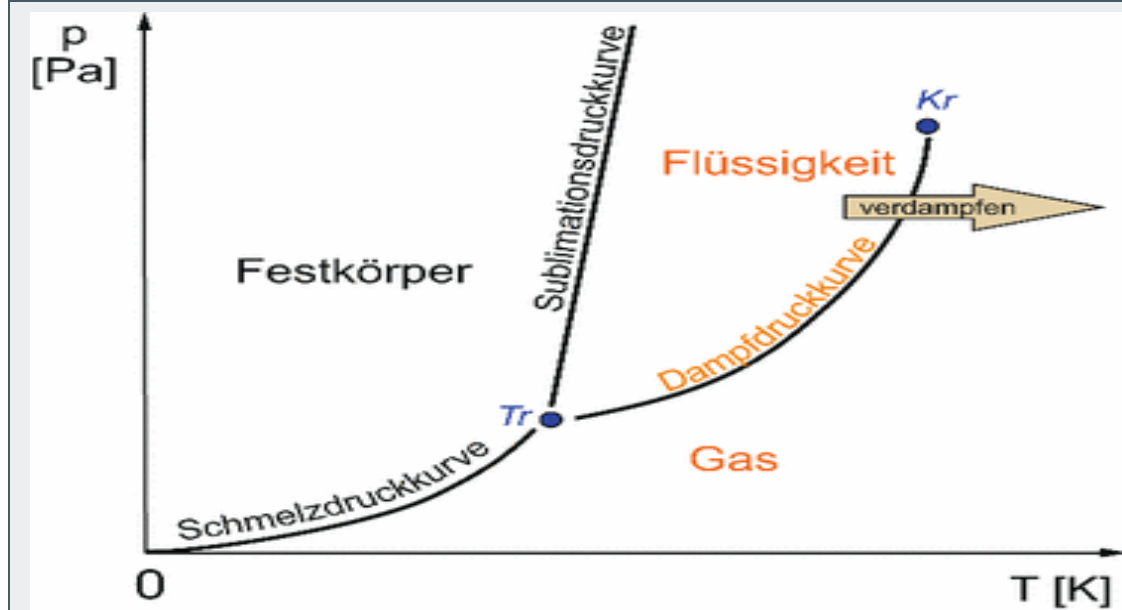


$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

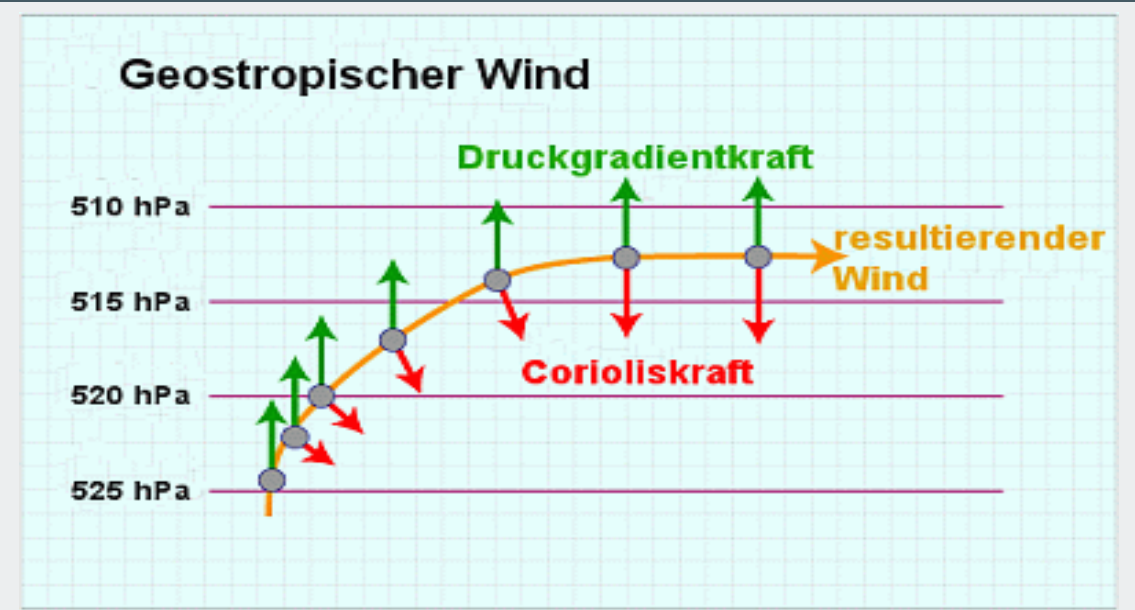
Die Änderung der inneren Energie U eines geschlossenen Systems ist gleich der Summe der Änderung der Wärme Q und der Änderung der Arbeit W .

Grundgesetze

Clausius-Clapeyron



2. Newtonsche Axiom



$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{1}{T \cdot \Delta\alpha}$$

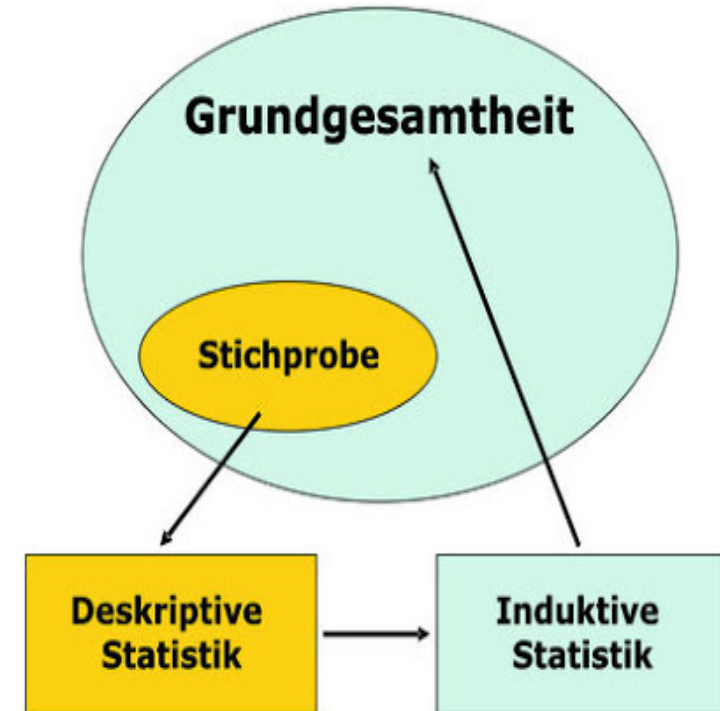
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Die Sättigungsdampfdruck p_s hängt exponentiell von der Temperatur T ab. Warme Luft kann mehr Wasserdampf halten.

Kraft F ist proportional zur Beschleunigung a . Wind als Folge von Druckunterschieden.

Statistik

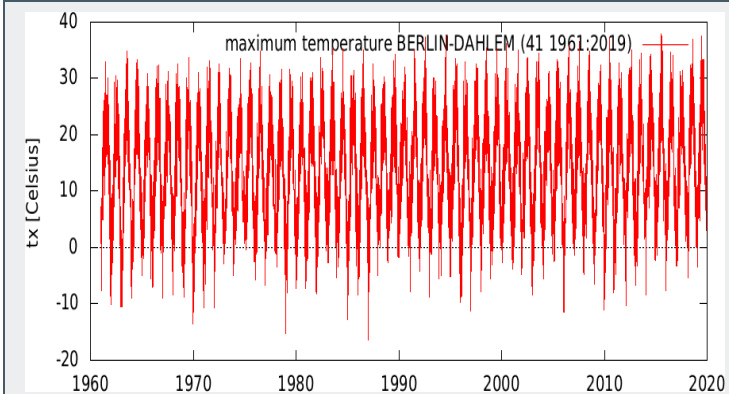
Klimawandel: Die sich ändernde Statistik es Wetters



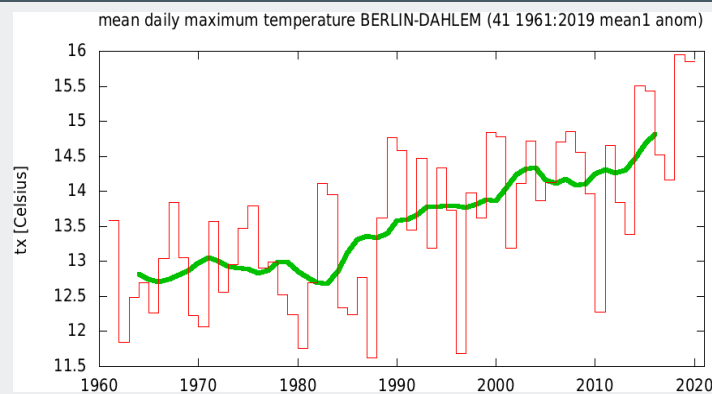
<https://www.youtube.com/watch?v=5rCk3iGgmks>

Statistik: Empirische Methoden

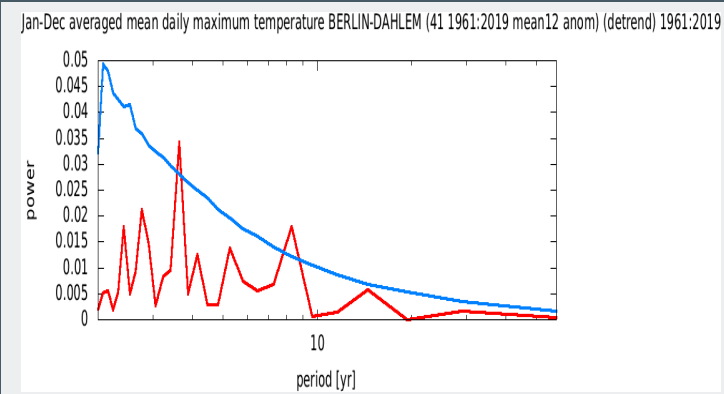
Zeitreihen



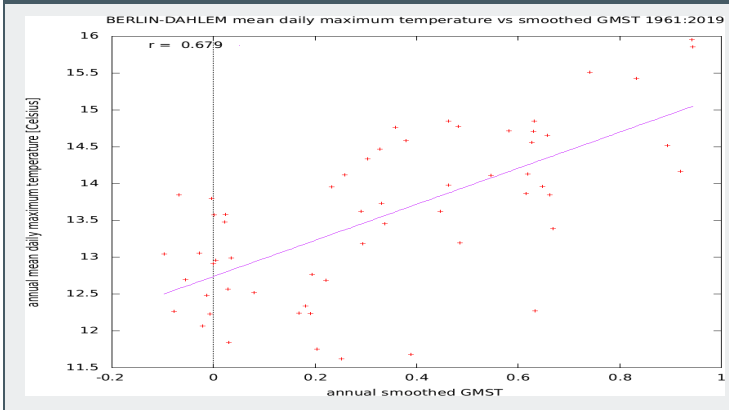
Filterung



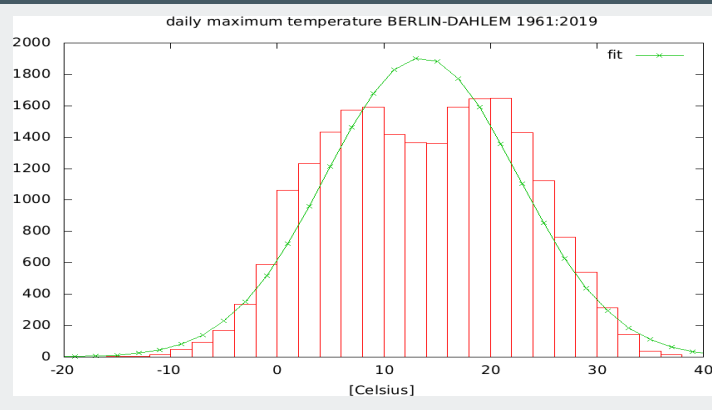
Spektrum



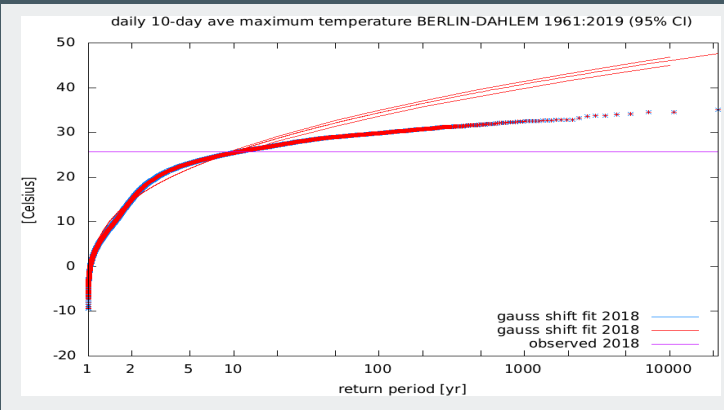
Regression/Korrelation



Häufigkeitsverteilungen

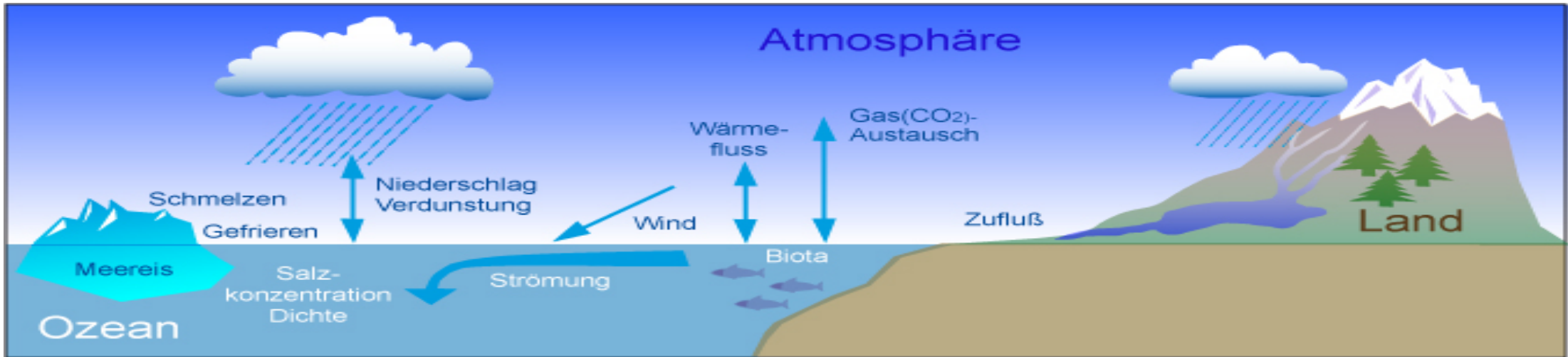


Extremwertstatistik



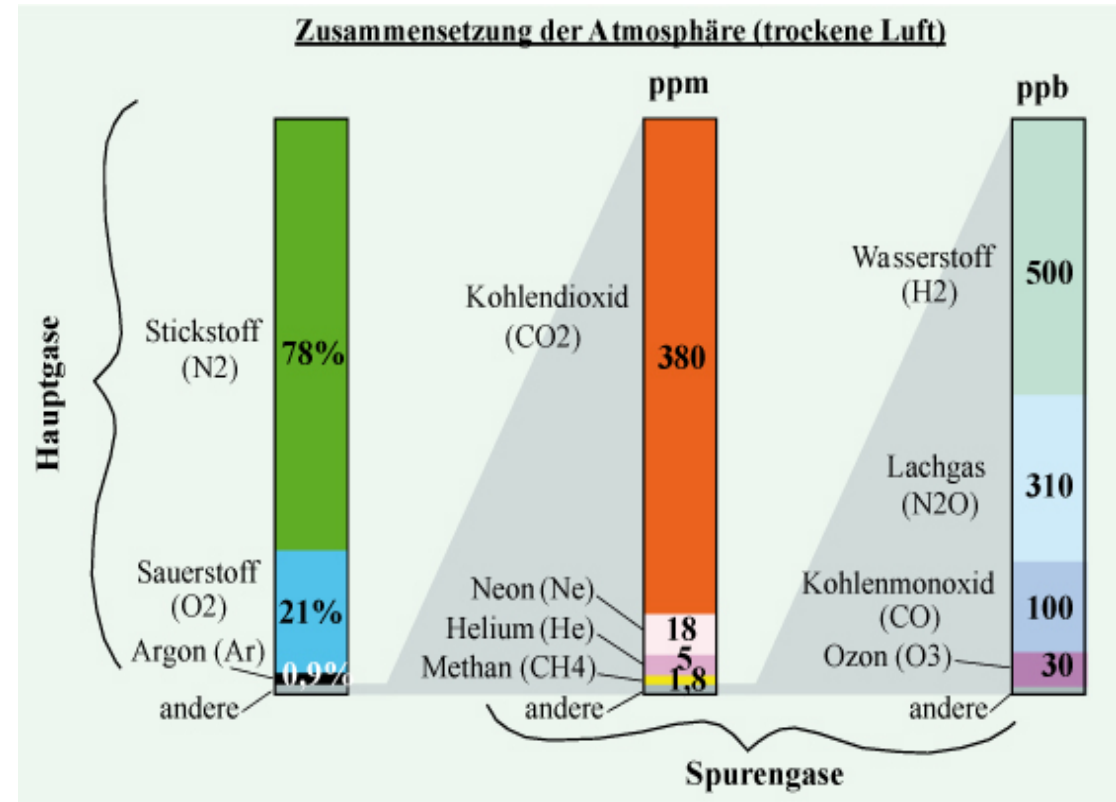
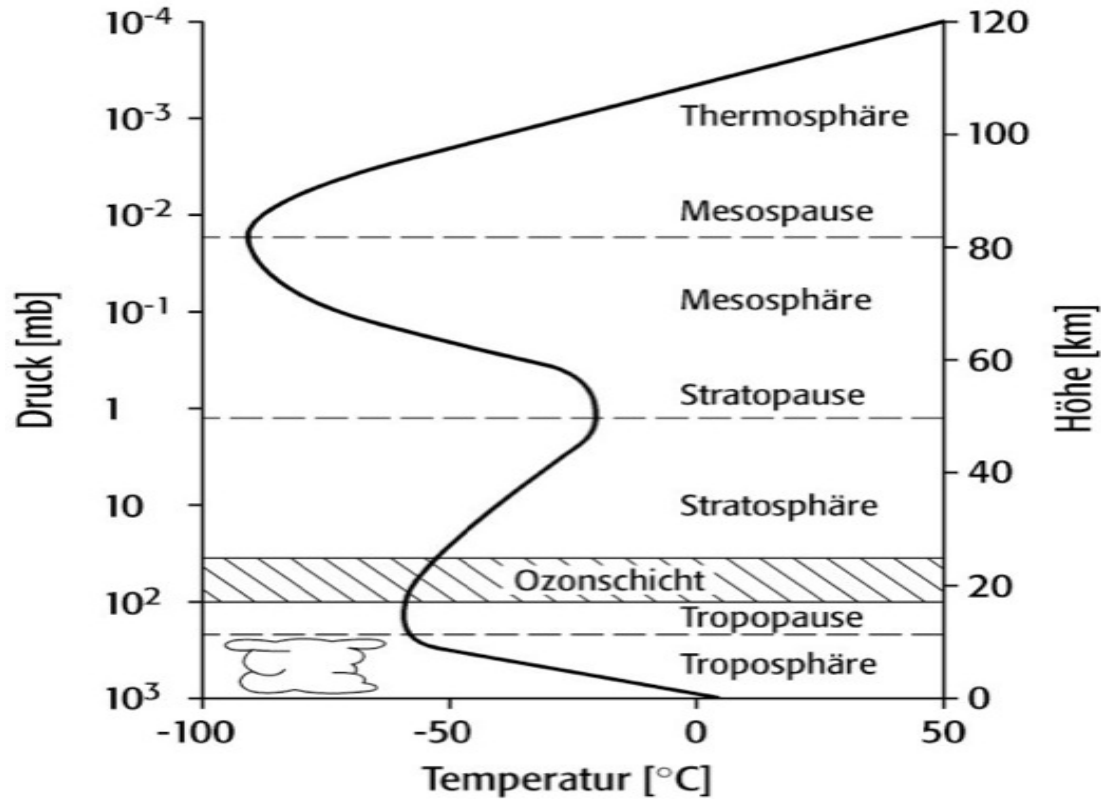
Klimatologie

Prozesse und Zeitskalen



Klimatologie

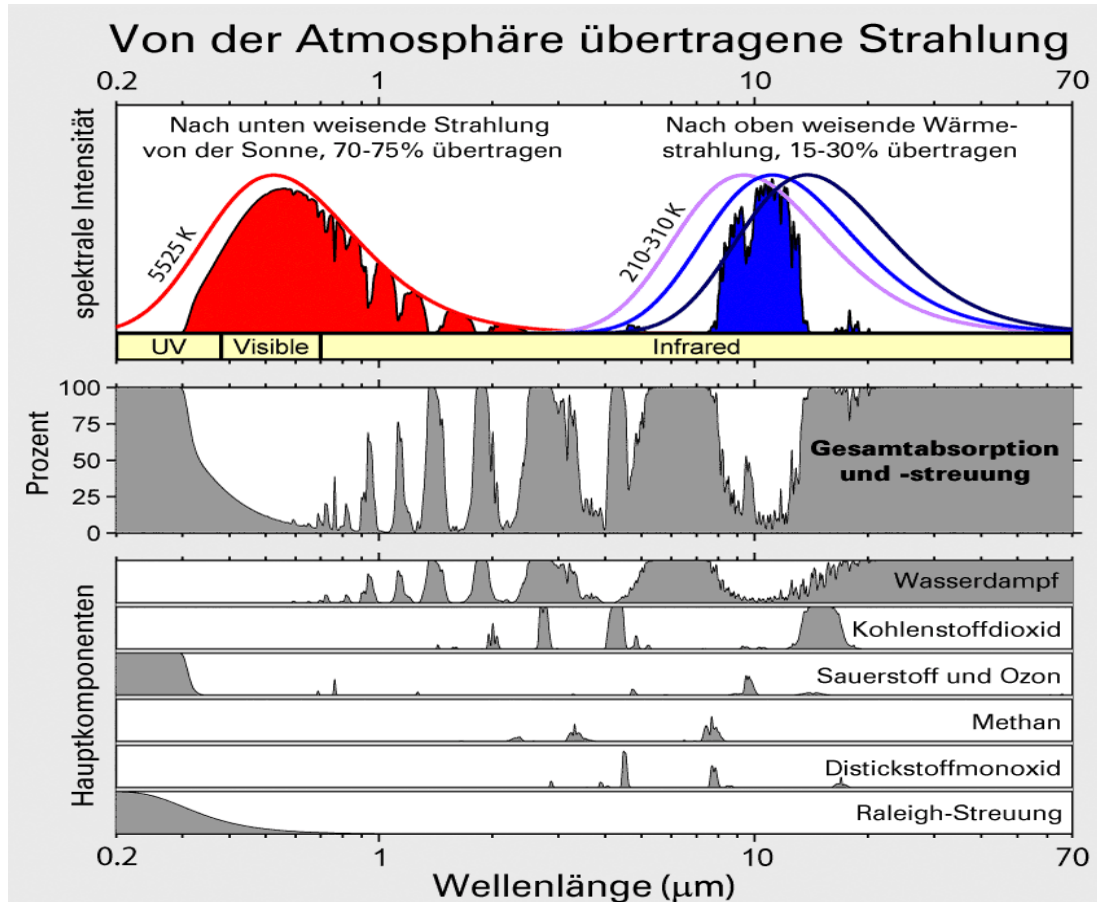
Schichtung und Zusammensetzung der Atmosphäre



Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre beträgt ca. 0.04% (Tendenz steigend).

Klimatologie

Transmissionseigenschaften der Atmosphäre

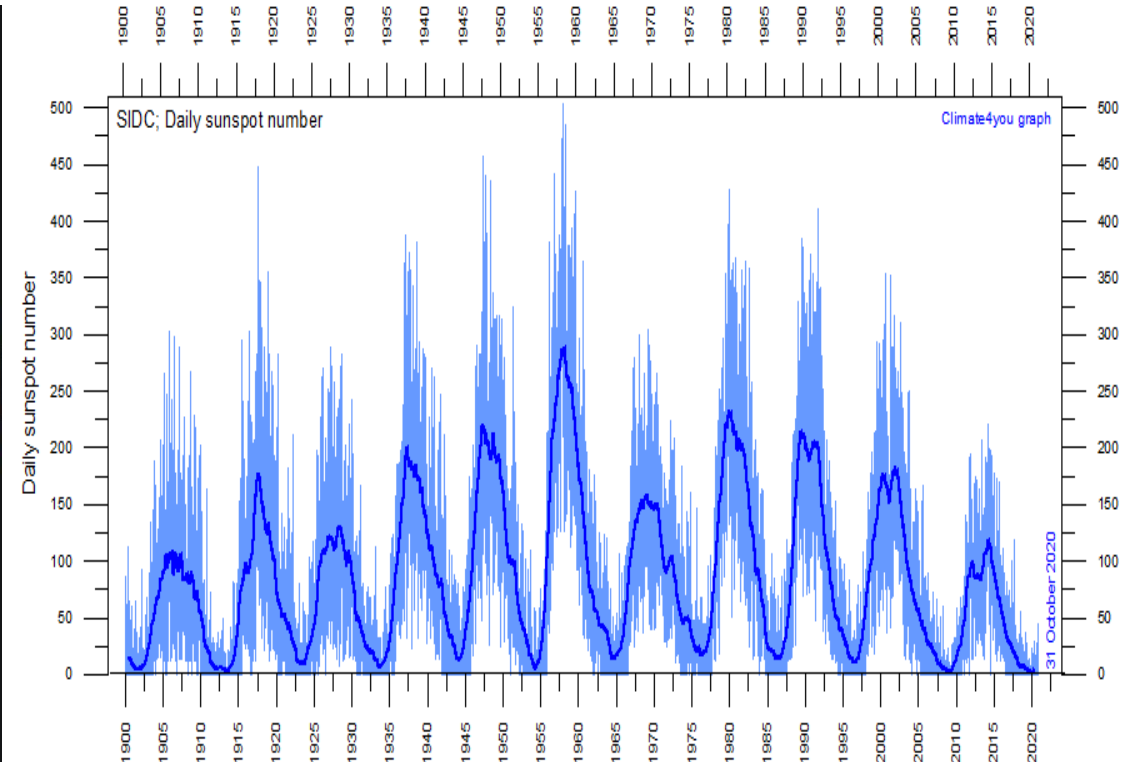
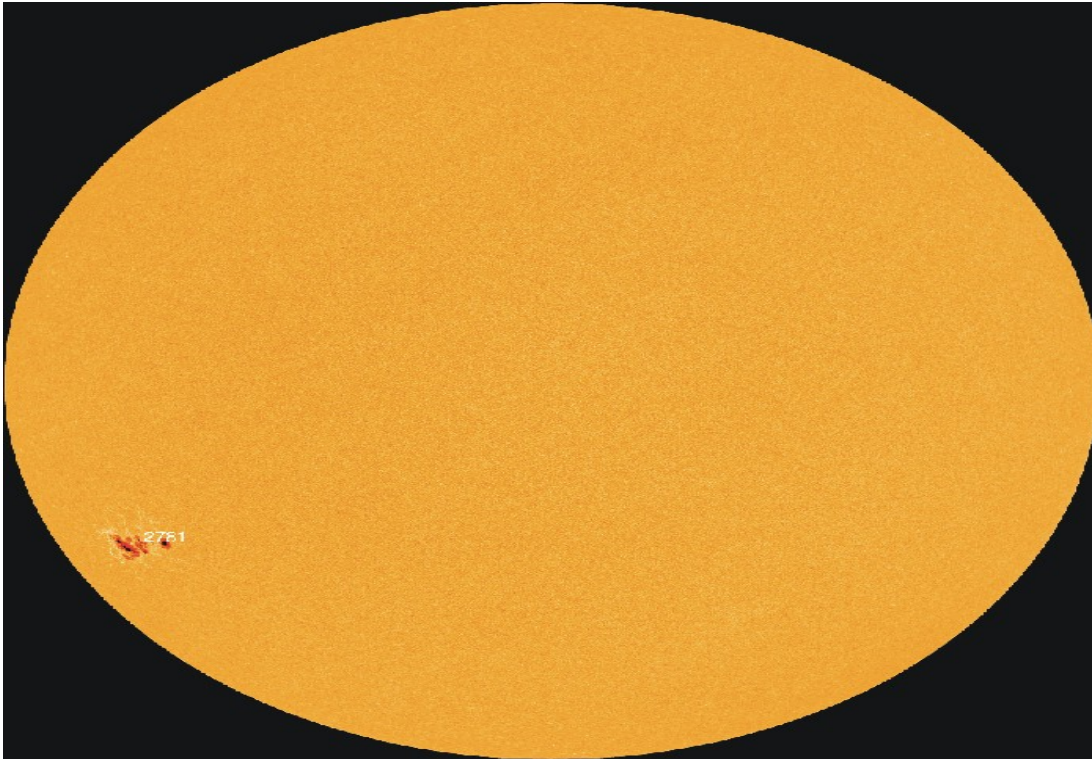


© Spektrum

- kurzwellig: Atmosphäre weitgehend transparent
- langwellig: Absorptionsbanden durch Kohlendioxid & Wasserdampf (Treibhausgase)
- Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst die Wärmeabstrahlung

Klimatologie

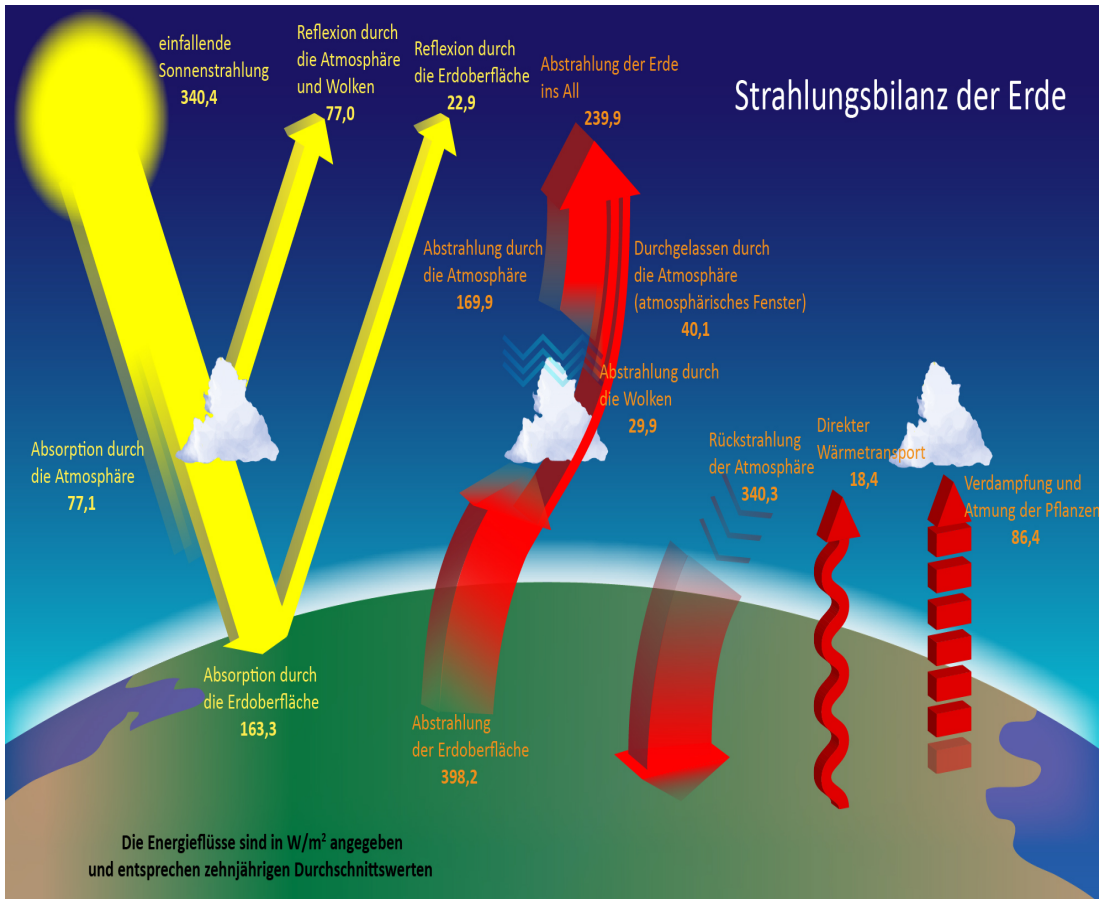
Sonnenzyklus (ca. 11 Jahre)



Sie Sonne strahlt im sichtbaren Spektralbereich mit einer nahezu konstanten Leistung von 1367 W/m^2 . Langfristige Schwankungen betragen ca. 0.1%. © Climate4You

Klimatologie

Strahlungsbilanz der Erde

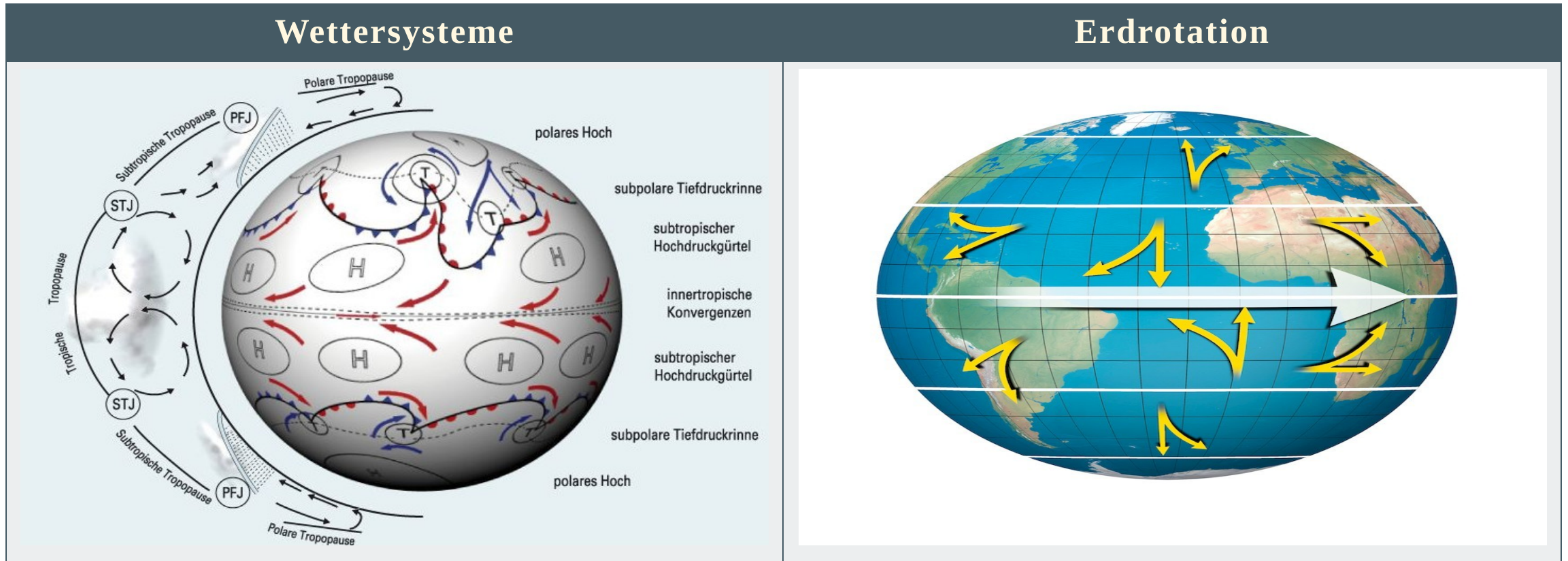


© ETH Zürich

- einfallend: kurzwellig
- ausfallend: langwellig
 - fühlbar: Wärme
 - latent: Verdunstung
- **Atmosphärische Gegenstrahlung:** Treibhauseffekt
- **Atmosphärisches Fenster:** Wärmestrahlung entweicht ins Weltall
- Durchlässigkeit des atmosphärischen Fensters wird durch die Menge an Treibhausgasen geregelt

Klimatologie

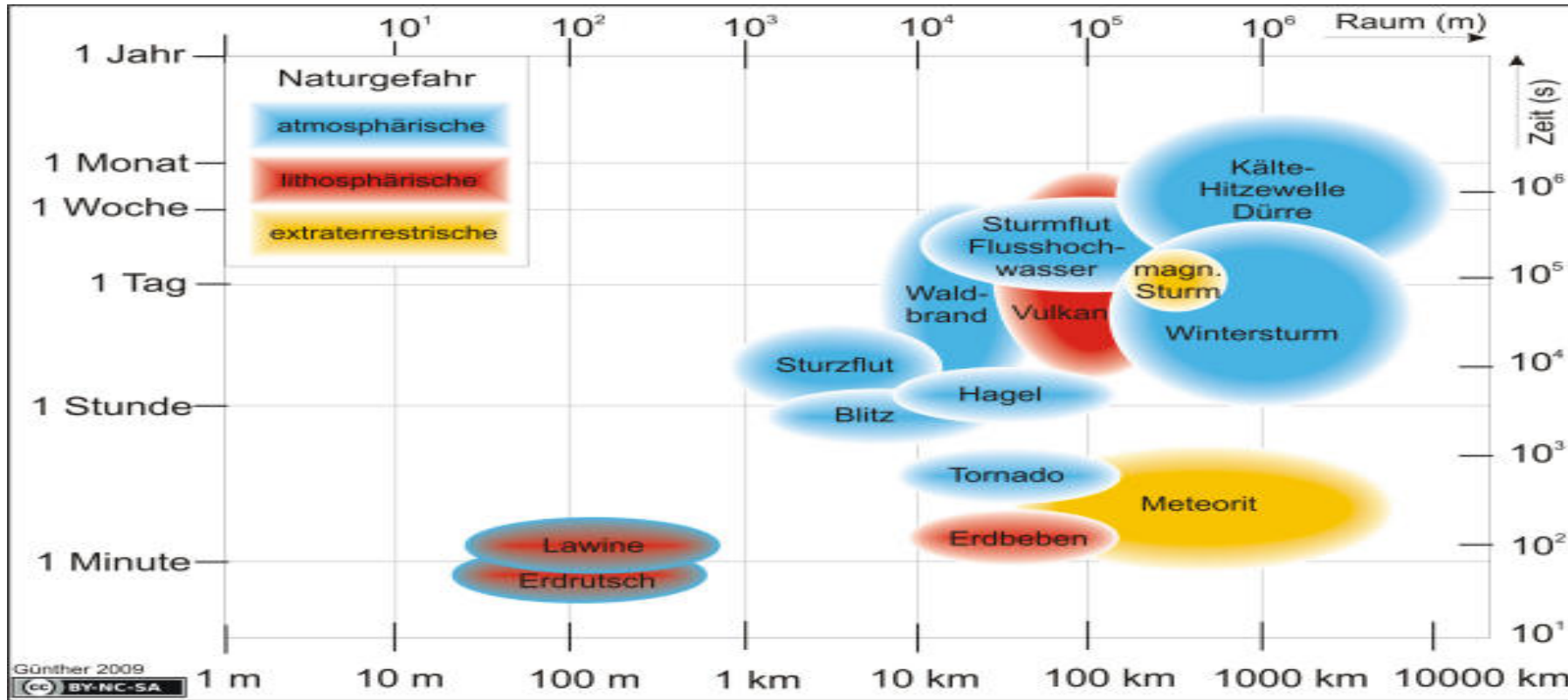
Atmosphärische Zirkulation



Westwinde in mittleren Breiten der Nordhemisphäre durch Ablenkung infolge der Erdrotation

Klimatologie

Skalen meteorologischer Phänomene



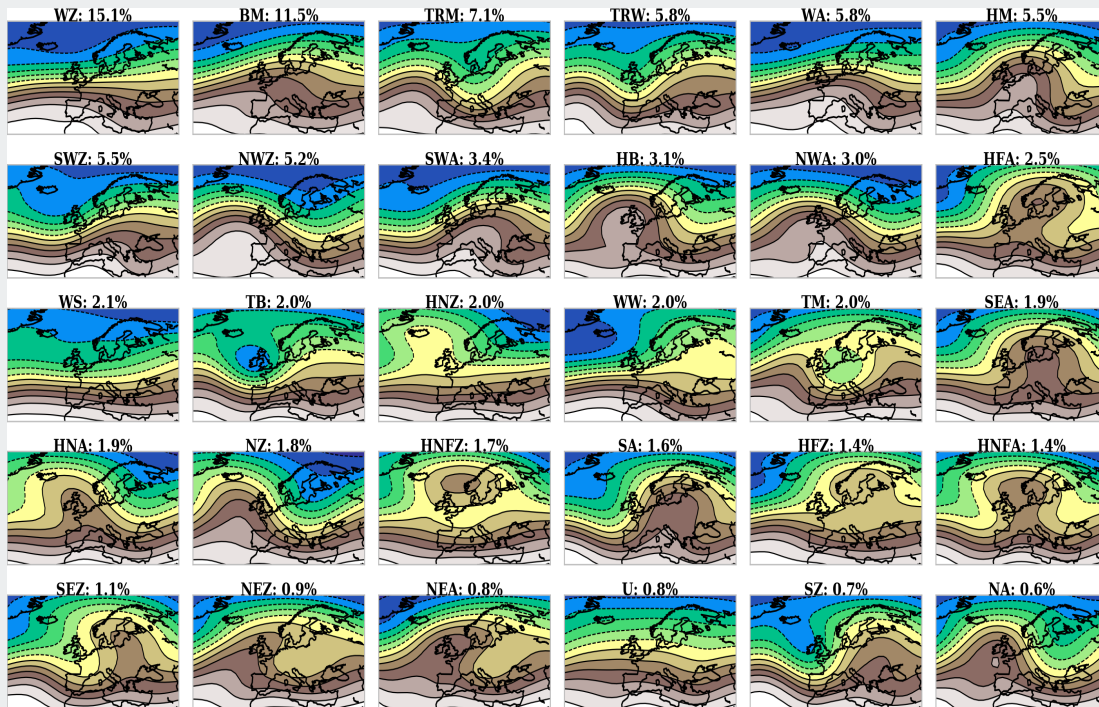
© Klimanavigator

Bsp. Hitzewellen: Dauer **Tage-Wochen** Ausdehnung **ca. 1000km**

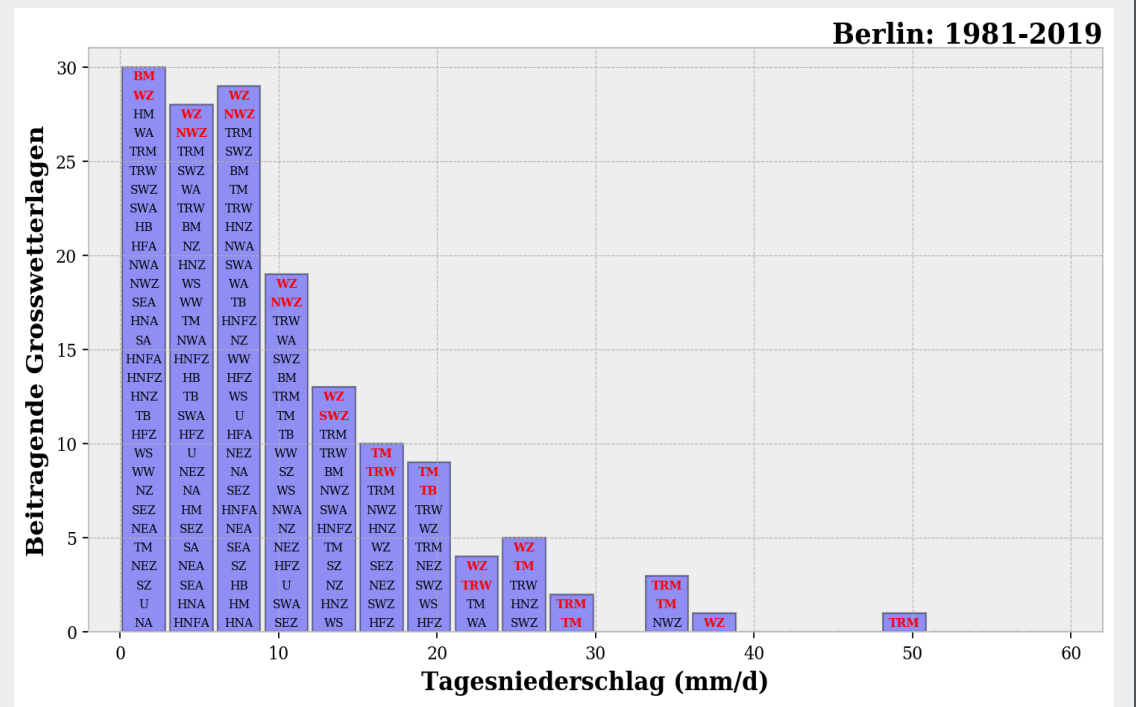
Klimatologie

Großwetterlagen, Wettervariabilität und Kritikalität

Ursache: Strömungsmuster



Wirkung: Starkregen



Trog Mitteleuropa (TRM) neigt zu Starkregen im Großraum Berlin!

Klimatologie

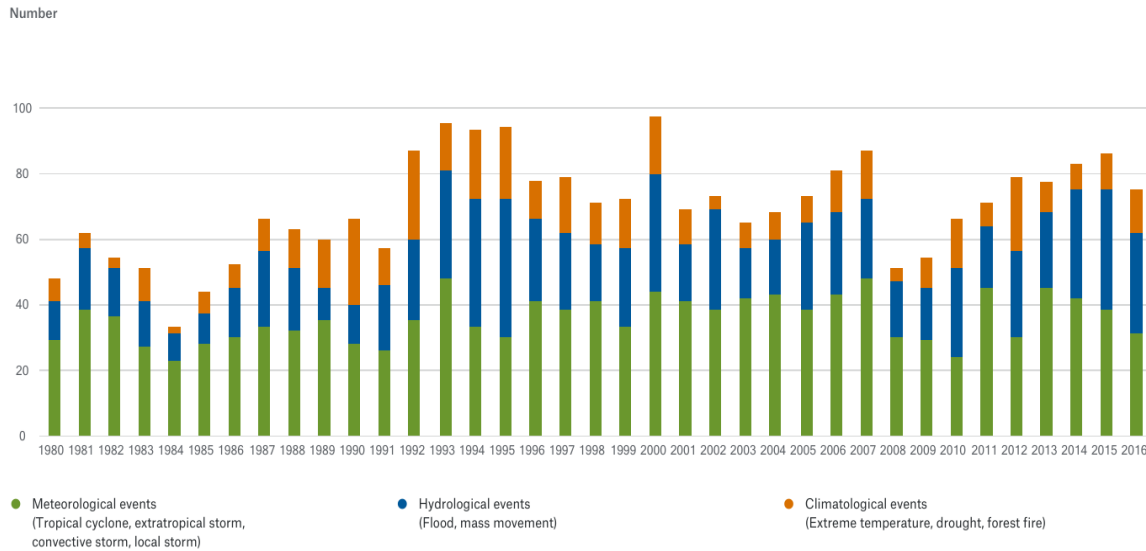
Meteorologische Extremereignisse

NatCatSERVICE

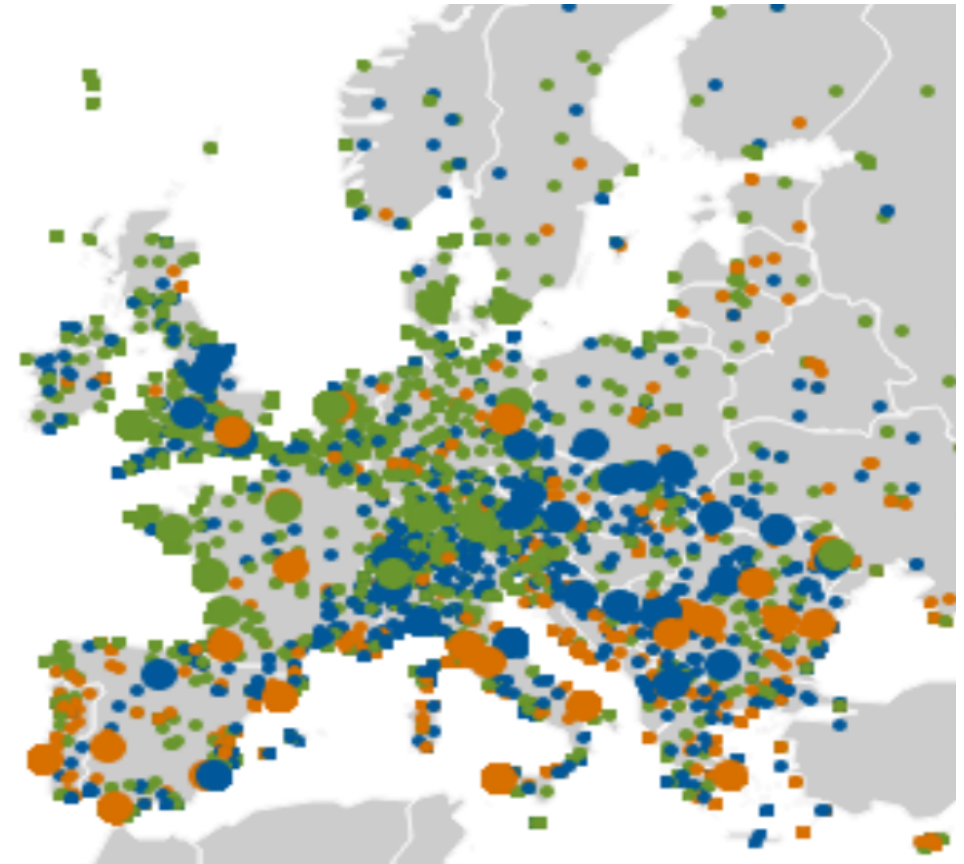
Munich RE 

Number of events

Relevant weather-related loss events in Europe 1980 - 2016



Accounted events have caused at least one fatality and/or produced normalised losses \geq US\$ 100k, 300k, 1m, or 3m (depending on the assigned World Bank income group of the affected country).



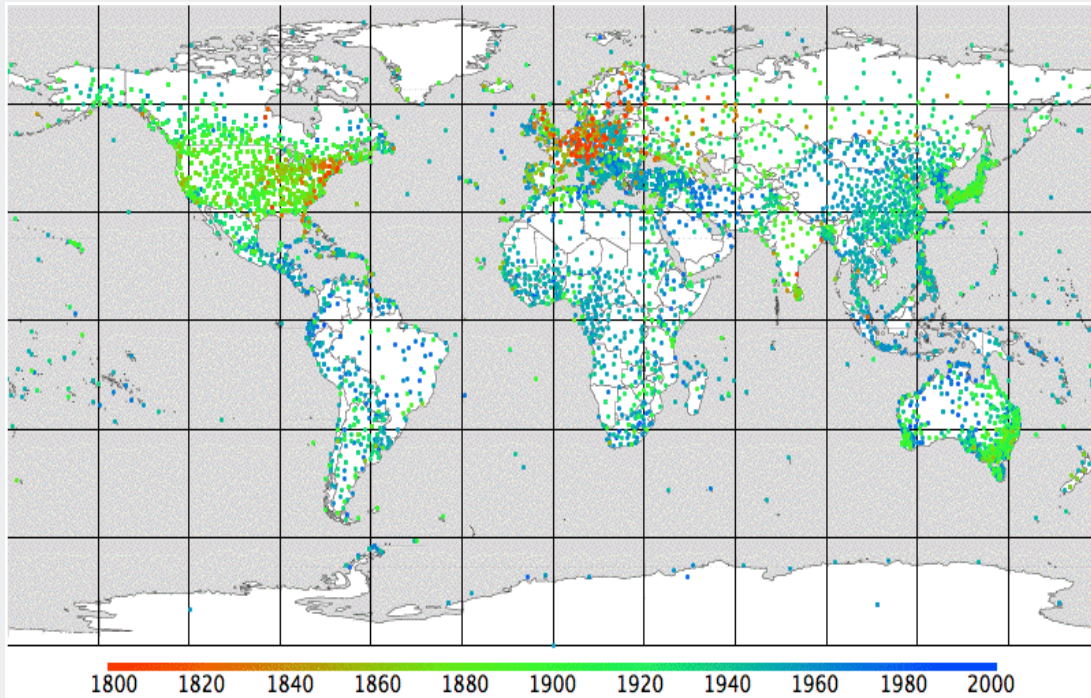
2. Diagnose

Messdaten und Analysen

Beobachtungsnetz

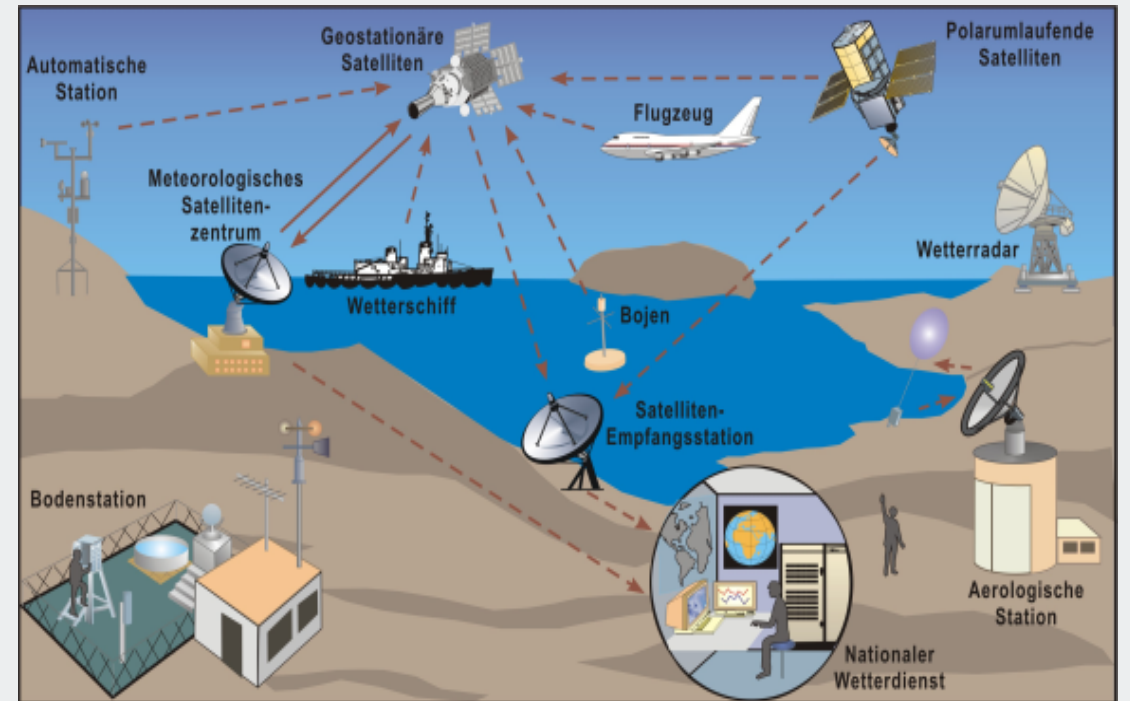
Datenerfassung und Verarbeitung

Wetterstationen



seit 1880

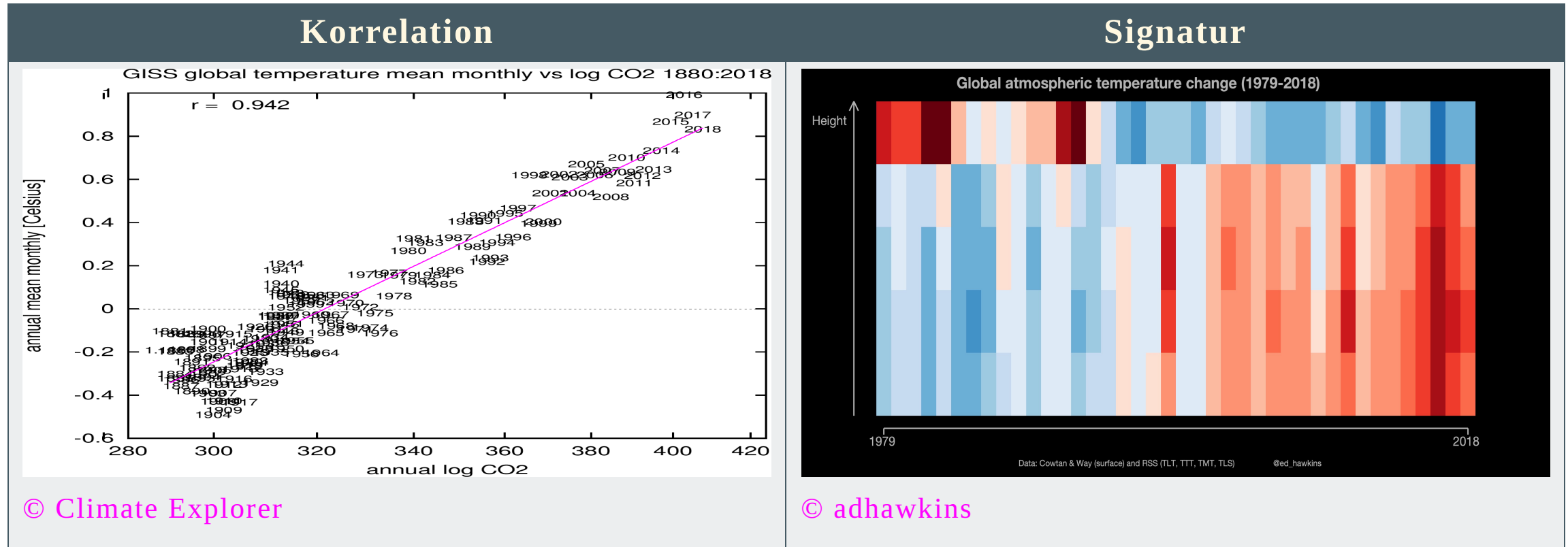
Fernerkundung



seit 1979

Signatur des verstärkten Treibhauseffekts

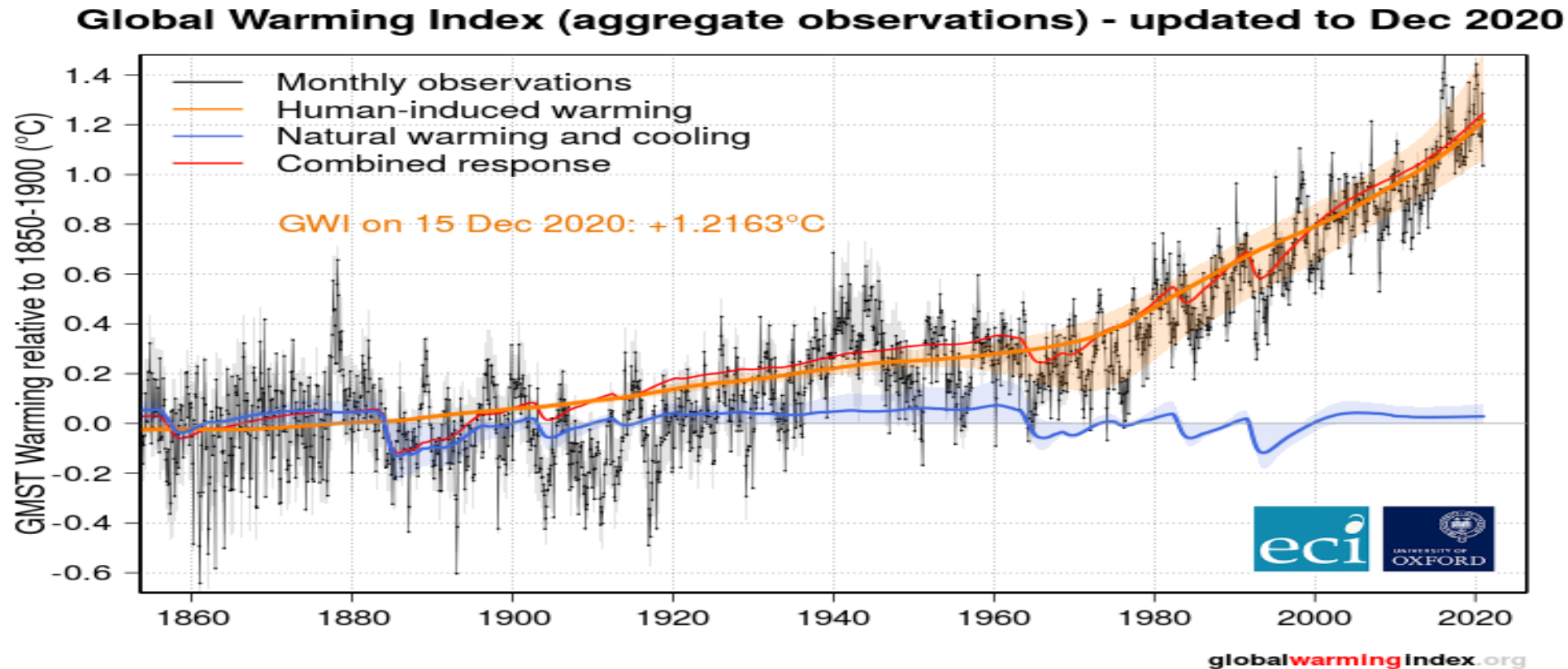
Troposphärische Erwärmung & Stratosphärische Abkühlung



Die globale Mitteltemperatur korreliert zu 0.942 mit der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Die Folge, die unteren Atmosphärenschichten erwärmen sich und die darüber kühlen sich ab!

Global Warming Index

Anteil des Menschen am globalen Temperaturanstieg



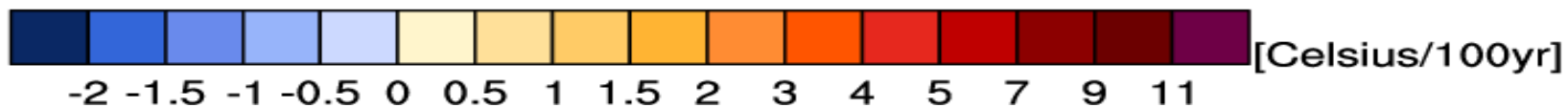
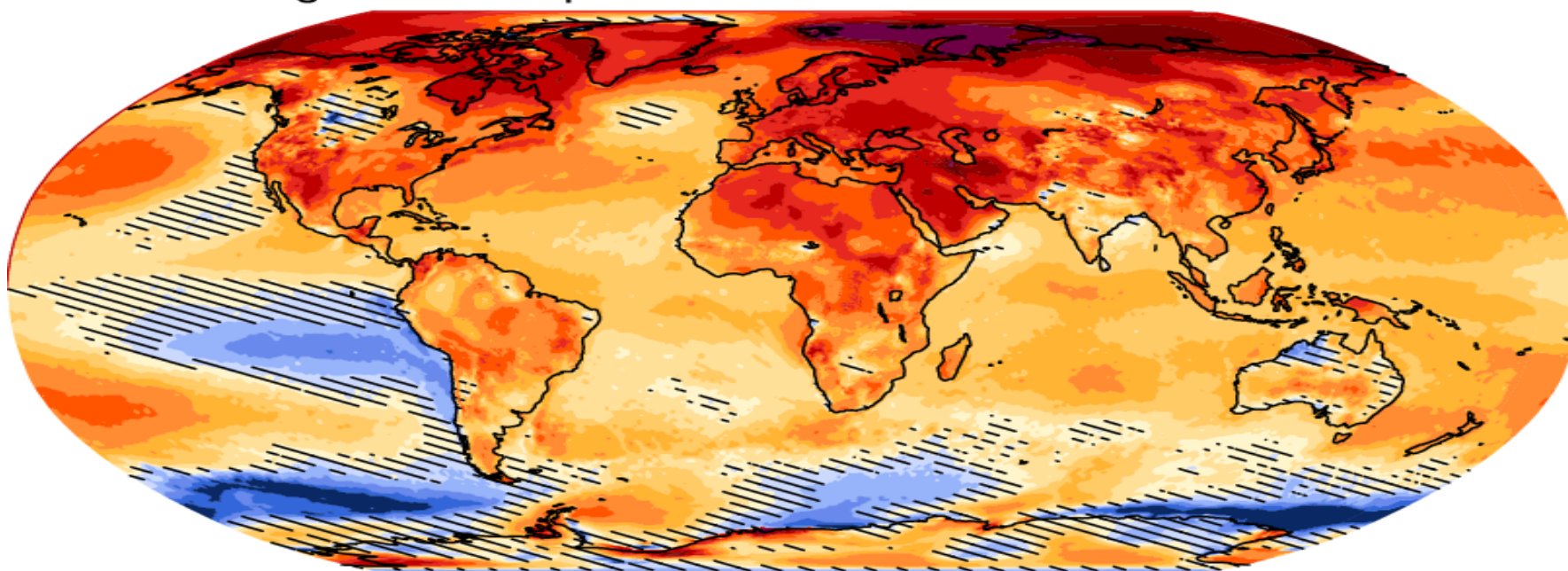
© Oxford

Aktuell beträgt die menschengemachte globale Erwärmung +1.28°C gegenüber 1850-1900.

Globale Temperaturtrends

Differentielle Erwärmung: von 1979 bis 2022

mean regression temperature on time 1979-2022 Jan-Dec ERA5



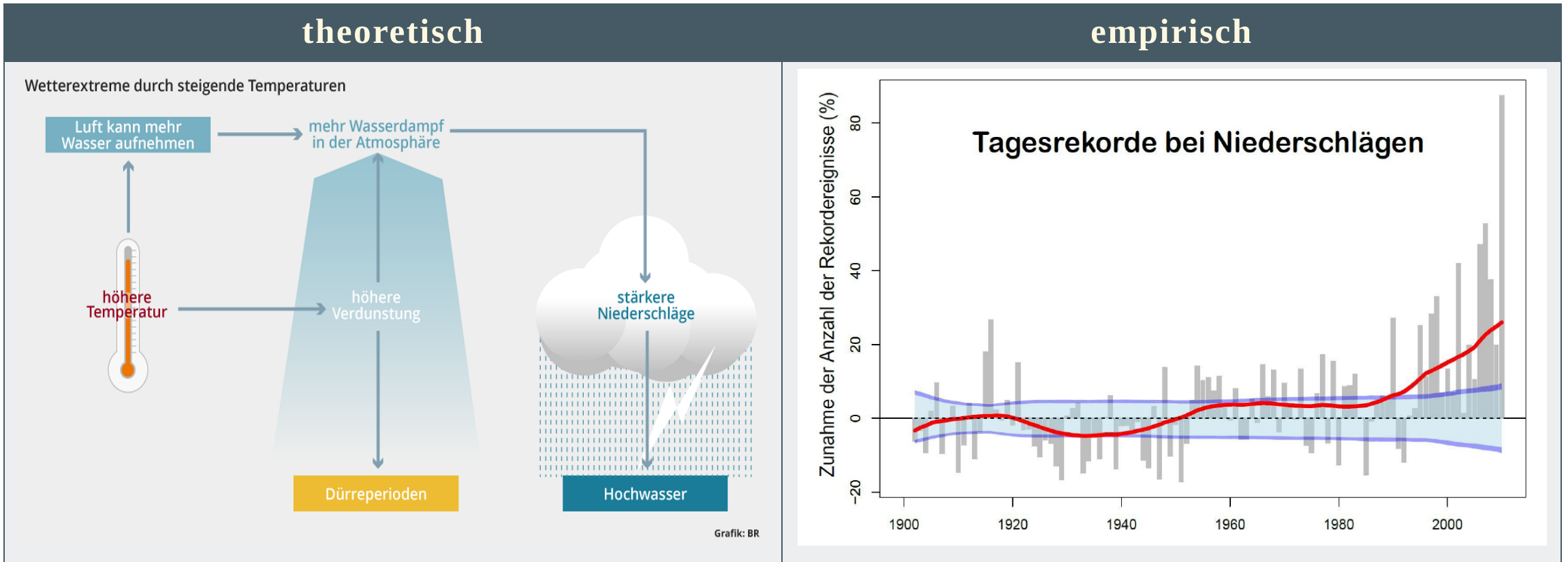
© Climate Explorer

Kontinente der NH und die Arktis erwärmen sich stärker als im globalen Durchschnitt.

Thermodynamischer Effekt



mehr Wasserdampf bedeutet ein höheres Potential für Sturzregen

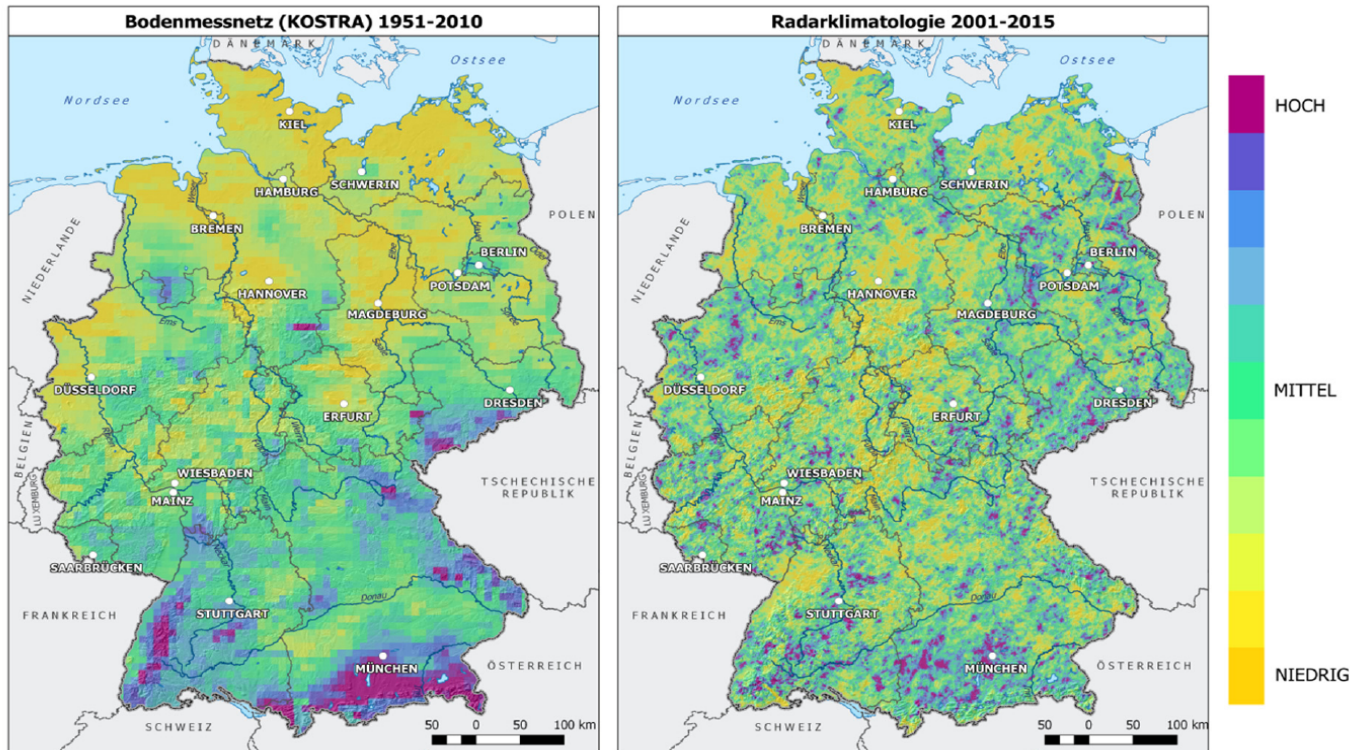


Thermodynamischer Effekt

Lokaler Starkregen in Deutschland kann überall auftreten

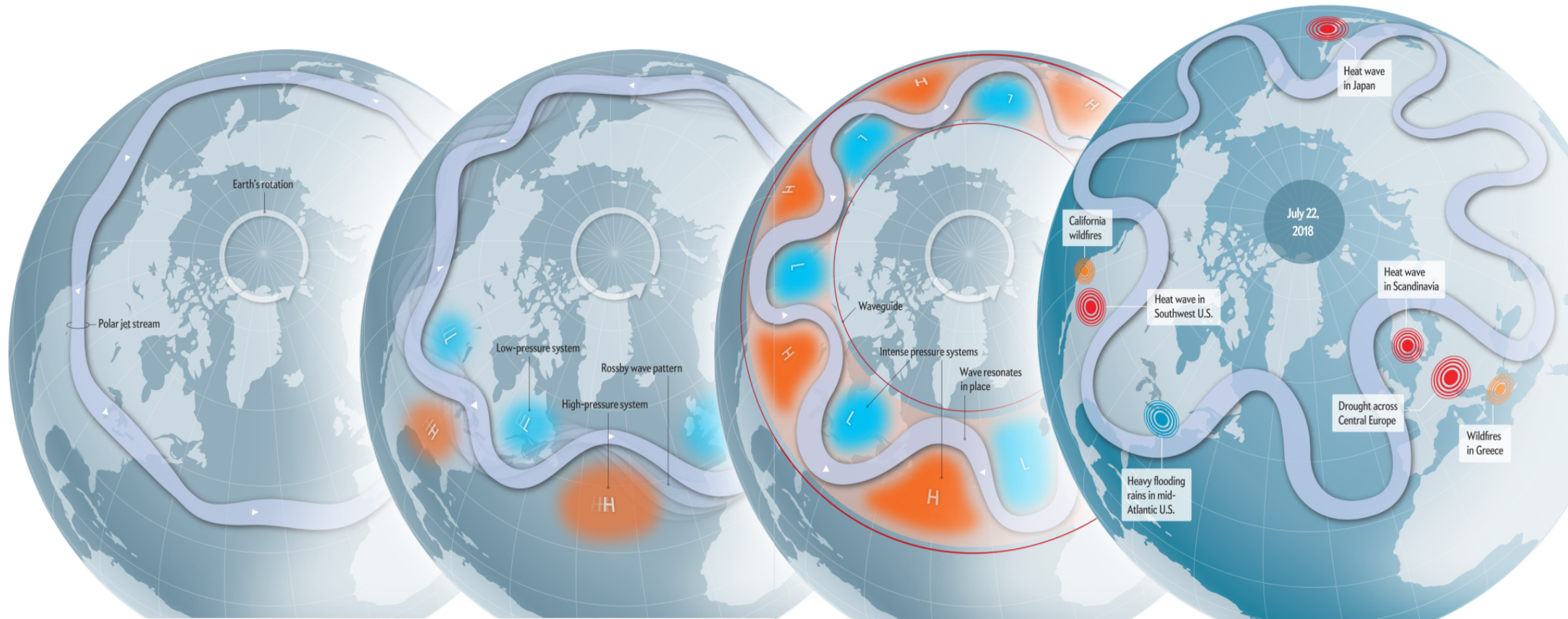
Vergleich Extremwert-Auswertung Statistischer Niederschlag in Deutschland
D=1h T=20a

DWD
Geobasisdaten: © Geobasis-DE/BKG 2014
Klimadaten und Darstellung: © DWD 2016



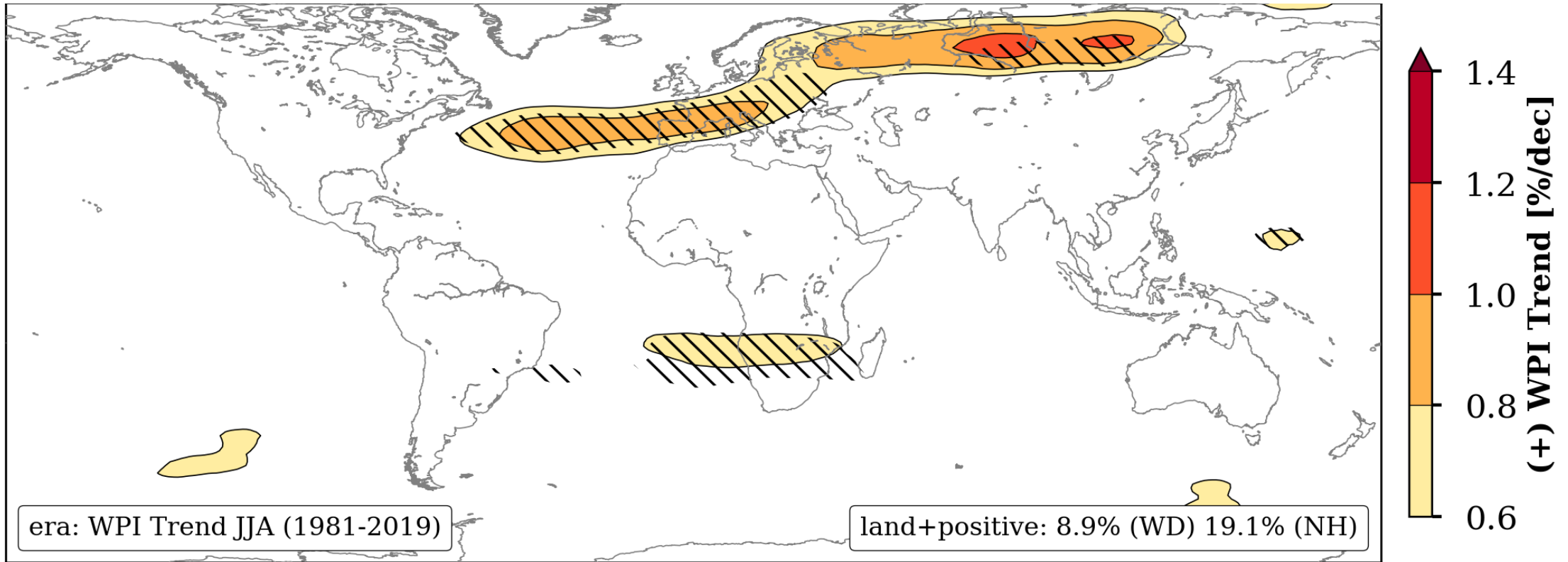
Dynamischer Effekt

Verlangsamung des Jetstream: begünstigt zeitgleiche Wetterextreme



Dynamischer Effekt

Ähnlichkeit von aufeinanderfolgenden Strömungsmustern nimmt zu



Zunahme der Wetterbeständigkeit über Europa: Längere Hitzewellen

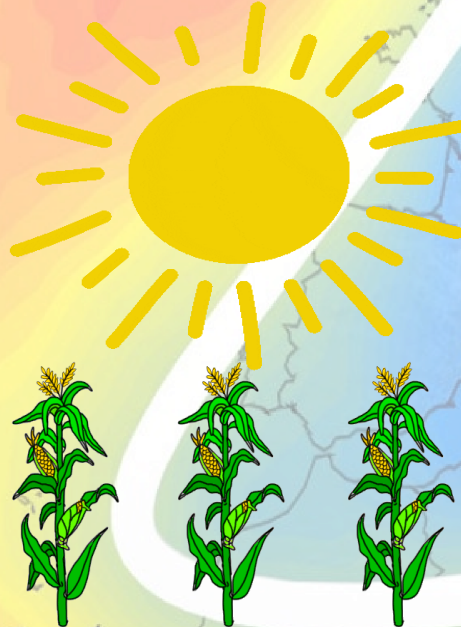
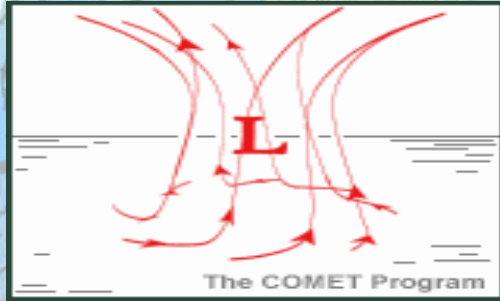
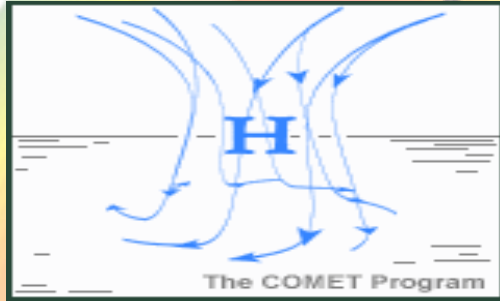
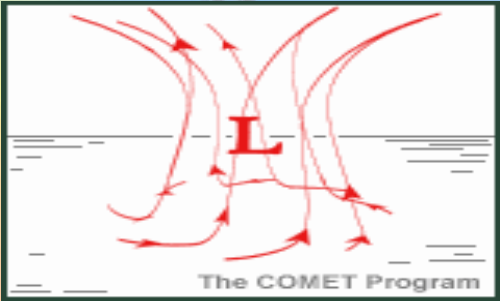
Dynamischer + Thermodynamischer Effekt

Gleichzeitigkeit von Rekorden und Katastrophen



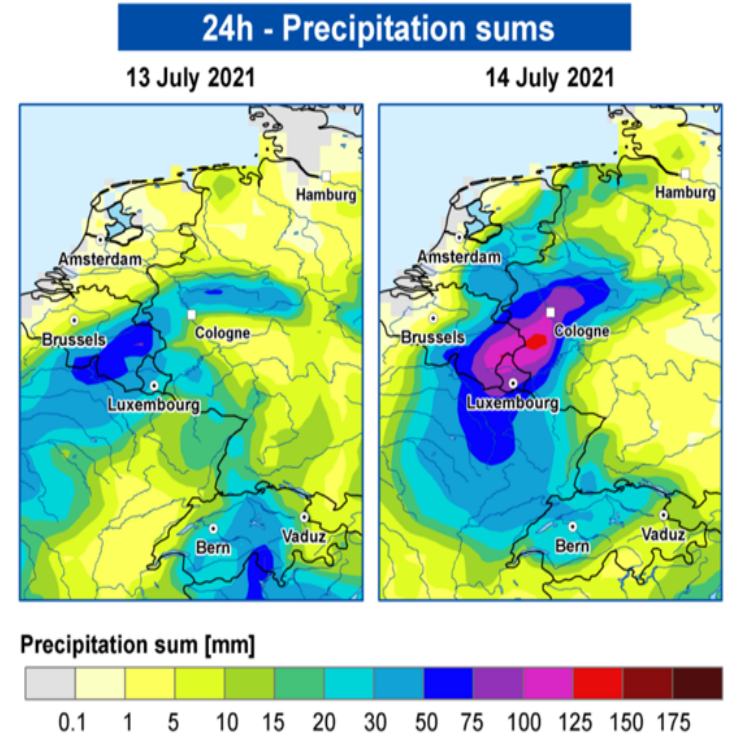
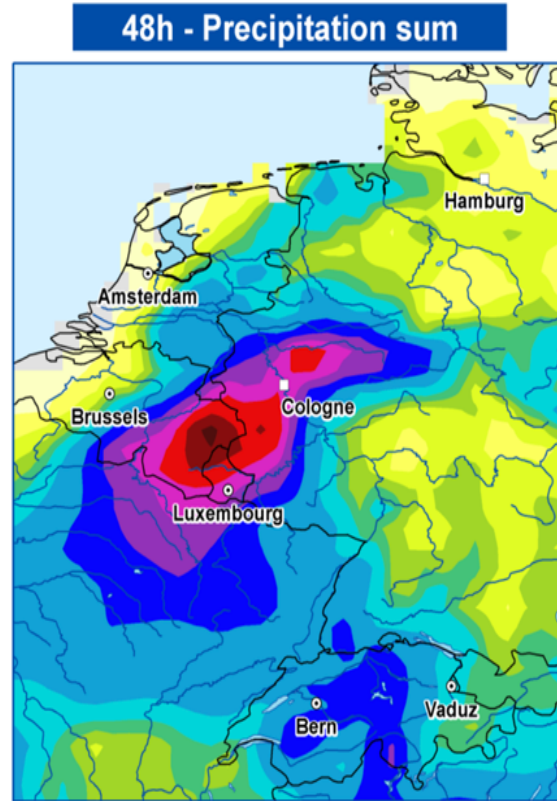
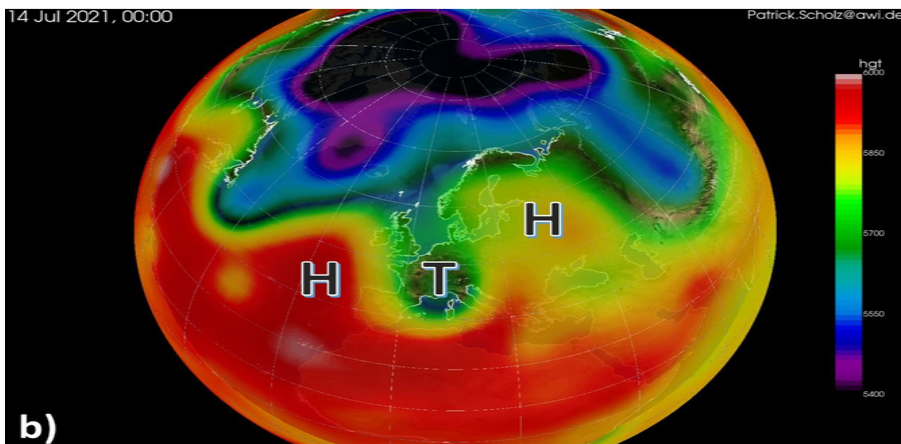
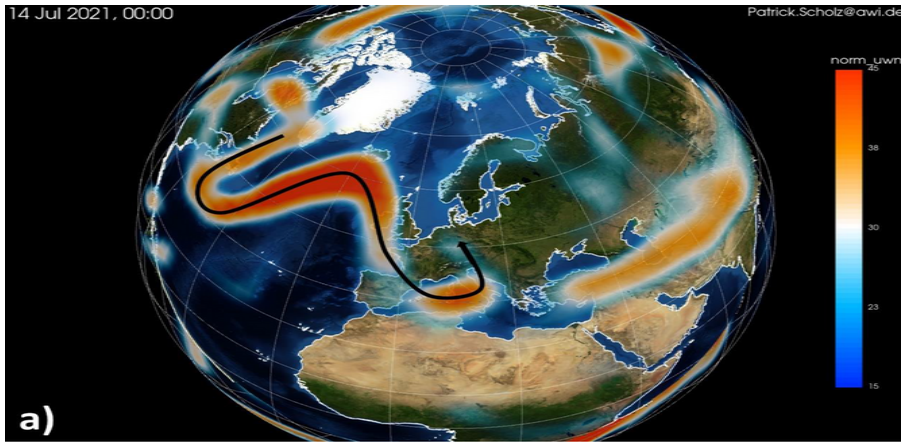
Omega-Wetterlage

Kritisches Strömungsmuster für Europa



Flutkatastrophe im Juli 2021

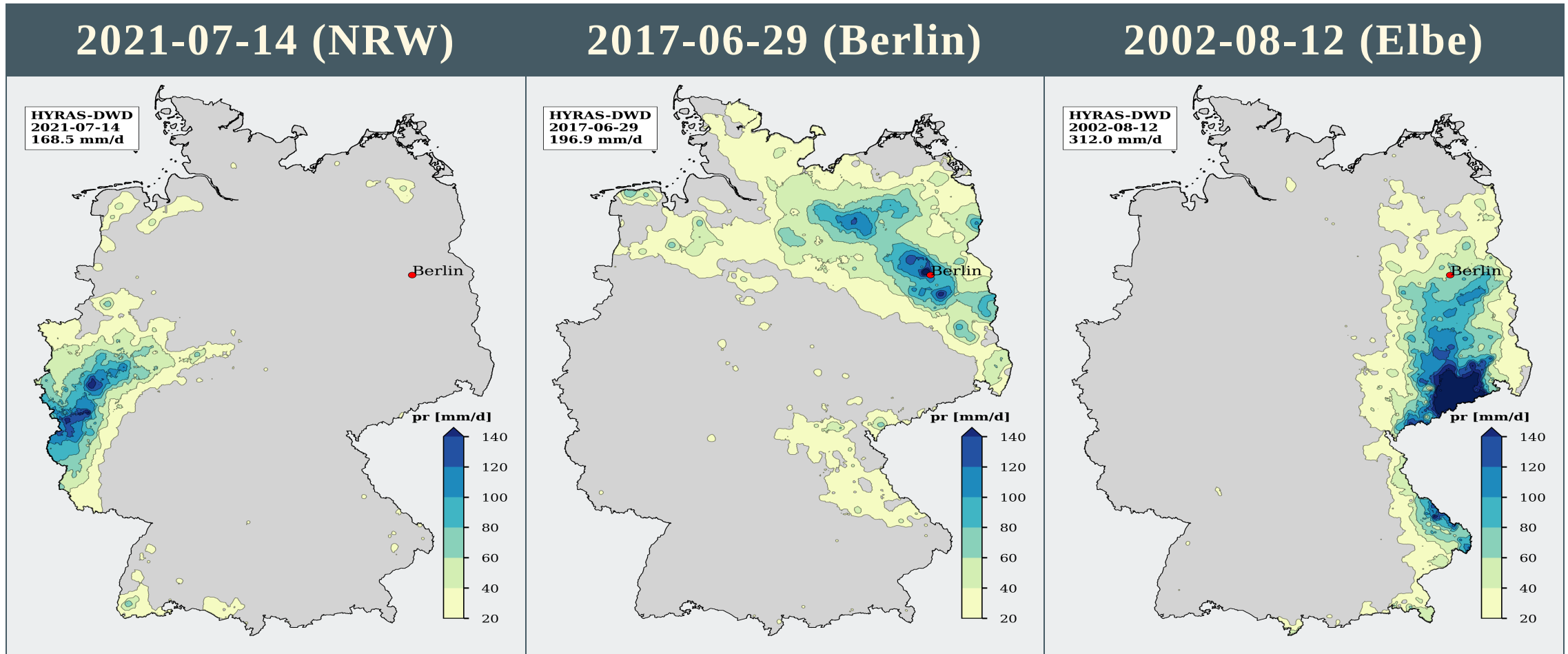
Zu viel Regen über kritischem Gelände



Precipitation data: Extended version of E-OBS. Graphic credits: © Deutscher Wetterdienst 2021 (Last update: 19.08.2021).
 Geodata: © GeoBasis-DE/BKG 2020 (Last update: 01.01.2020).

Extreme Tagesregenmengen

Gefährdung hängt vom Relief und Versiegelung ab





POTSDAM-INSITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG



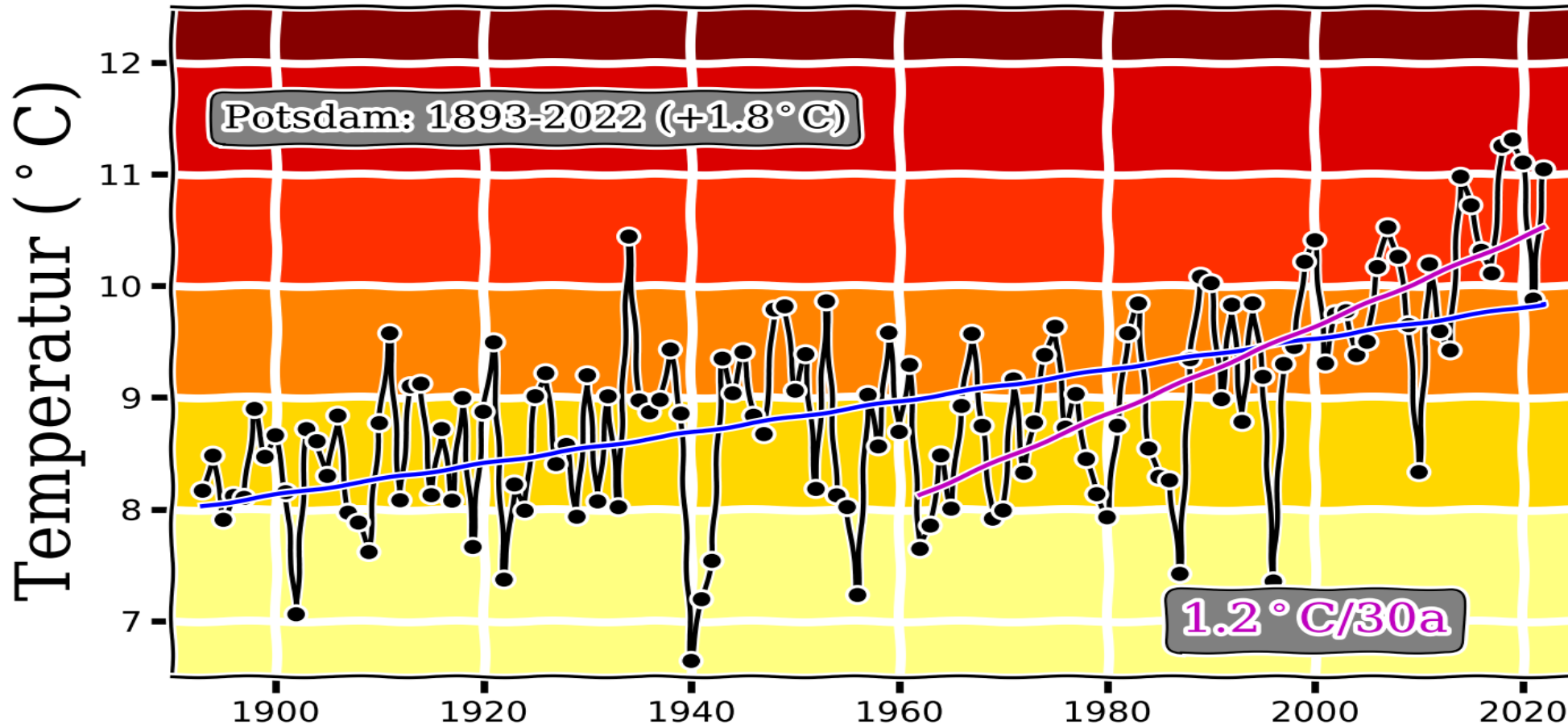
Talindex

Image Landsat / Copernicus

Google Earth 36

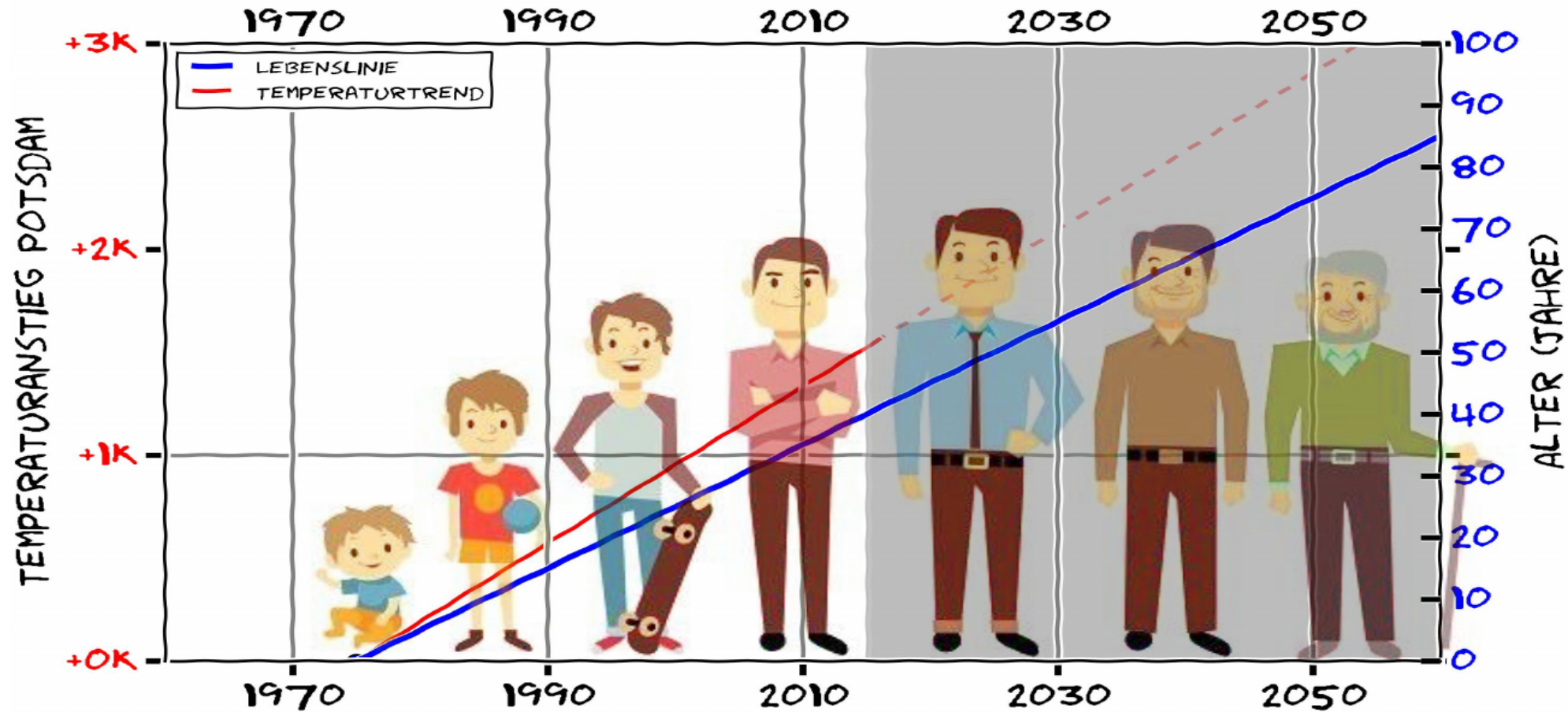
Klimawandel vor Ort

Jahresmitteltemperatur, Potsdam



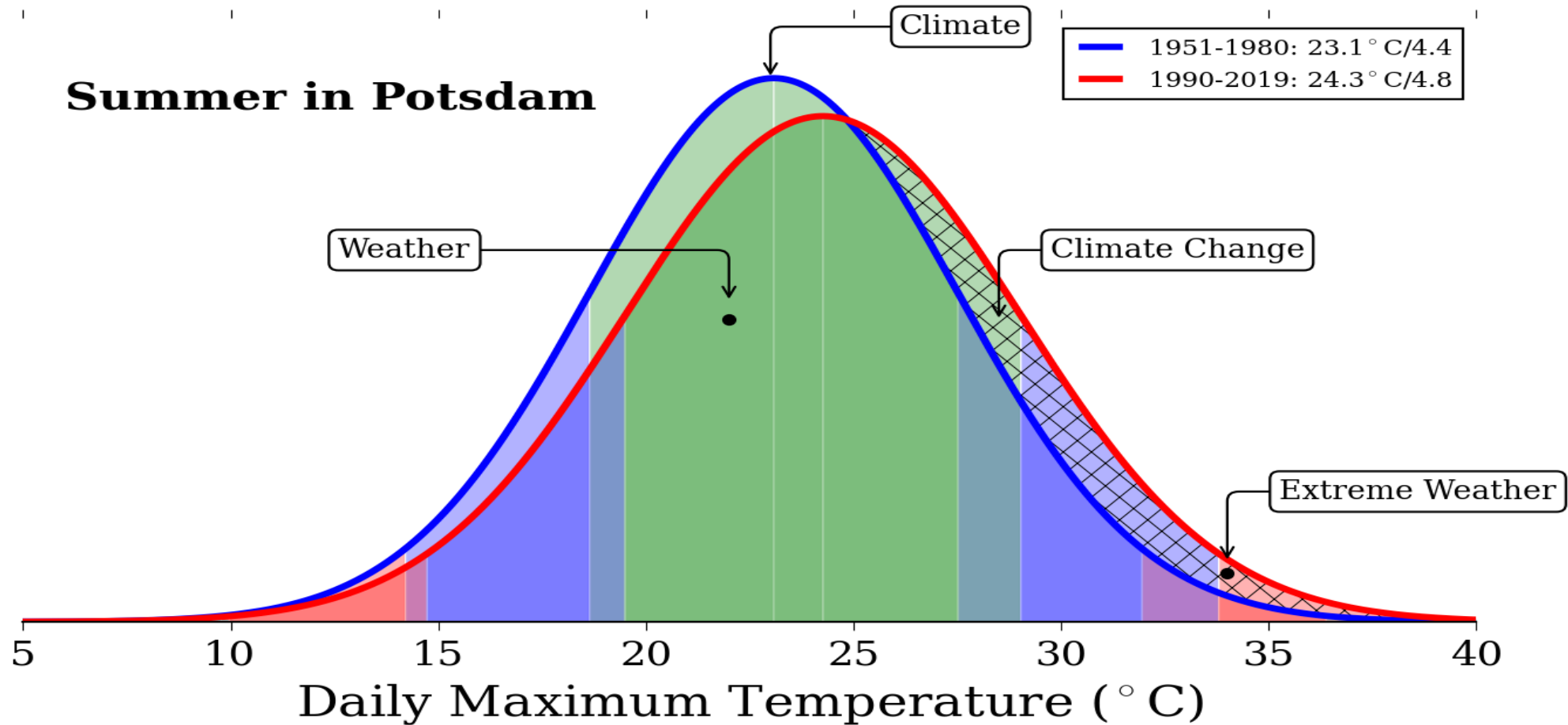
Klimawandel vor Ort

3 Grad mehr von der Geburt bis ins hohe Alter



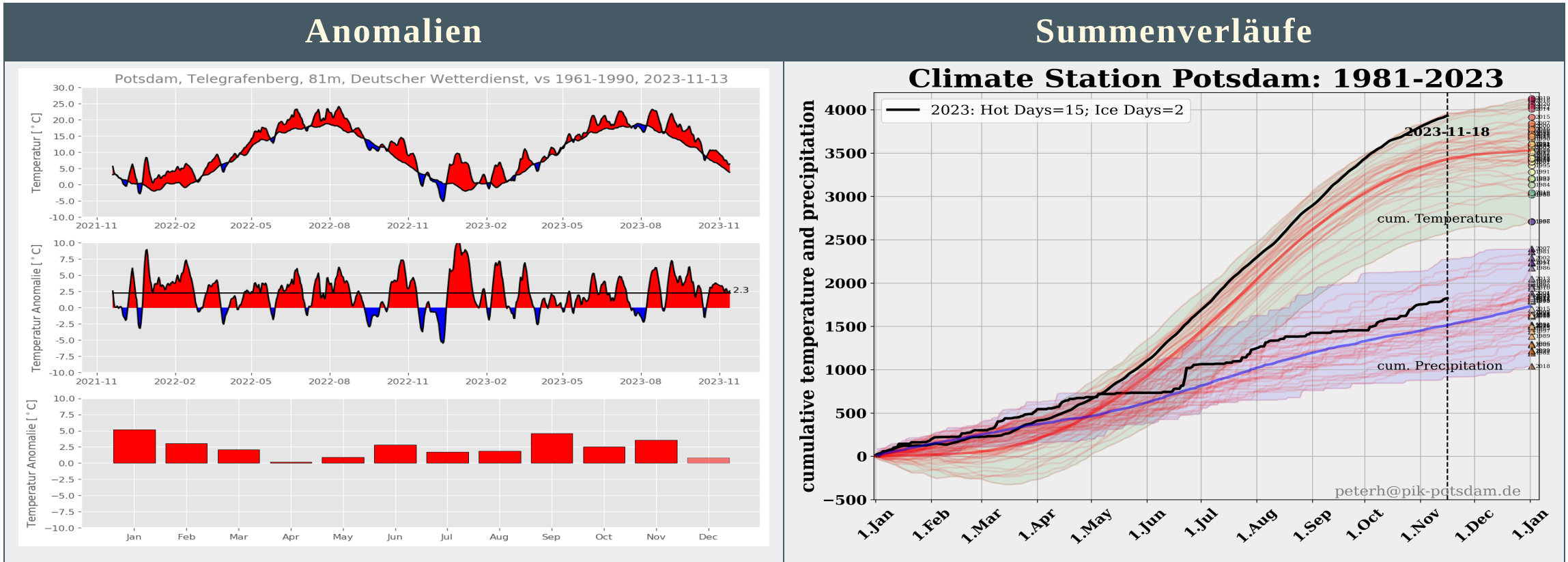
Klimawandel vor Ort

Temperaturverteilung, Potsdam



Klimawandel vor Ort

Aktuelle Witterungsverläufe im klimatischem Kontext, Potsdam



Aktuelle Witterungsverläufe und Anomalien erlauben die Einordnung mit vergangenen Jahren.

Klimaindikatoren

Charakterisierung meteorologischer Ereignisse

Häufigkeit

Anzahl der Tage über einem vorgegebenen Schwellwert

Andauer

Anzahl aufeinanderfolgender Tage über einem vorgegebenen Schwellwert

Intensität

Wert für die Seltenheit eines Ereignisses

Variabilität

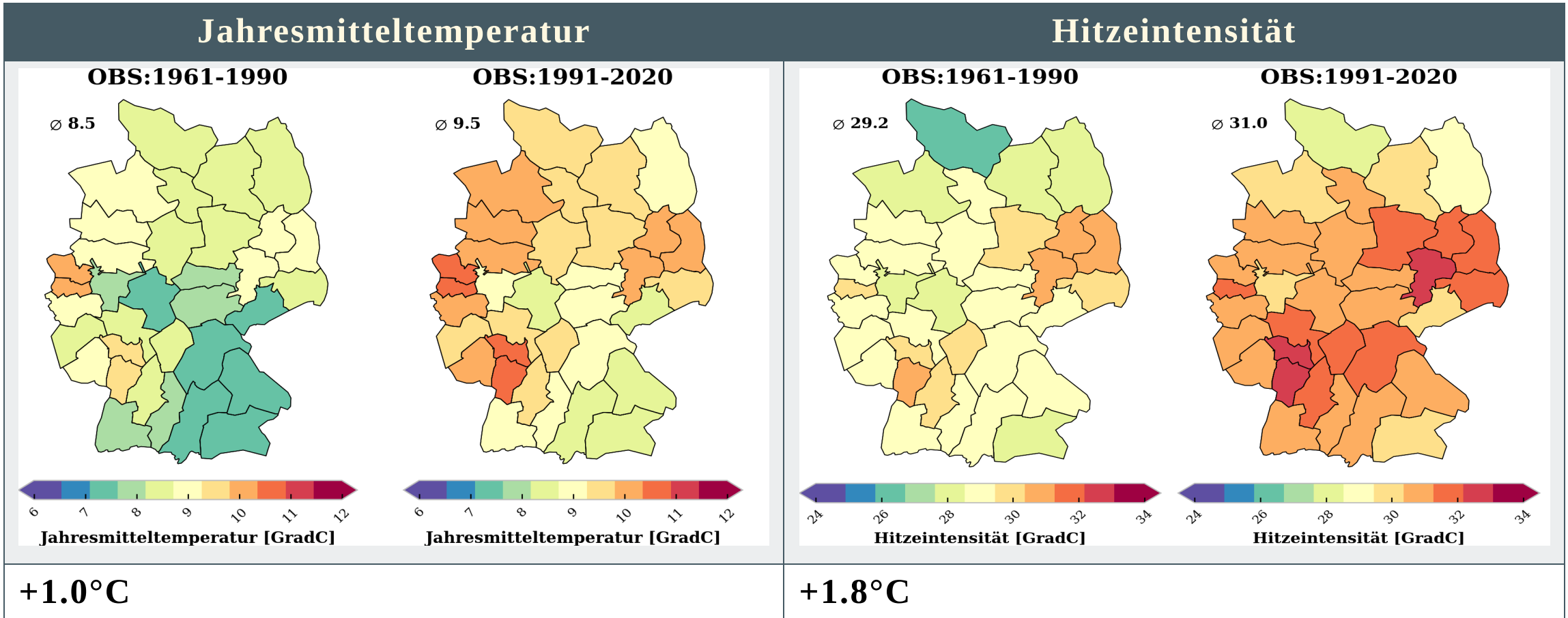
Jahr-zu-Jahr bzw. dekadische Variabilität

Jährlichkeit

Wiederkehrperioden von Extremereignissen z.B. Hochwasser

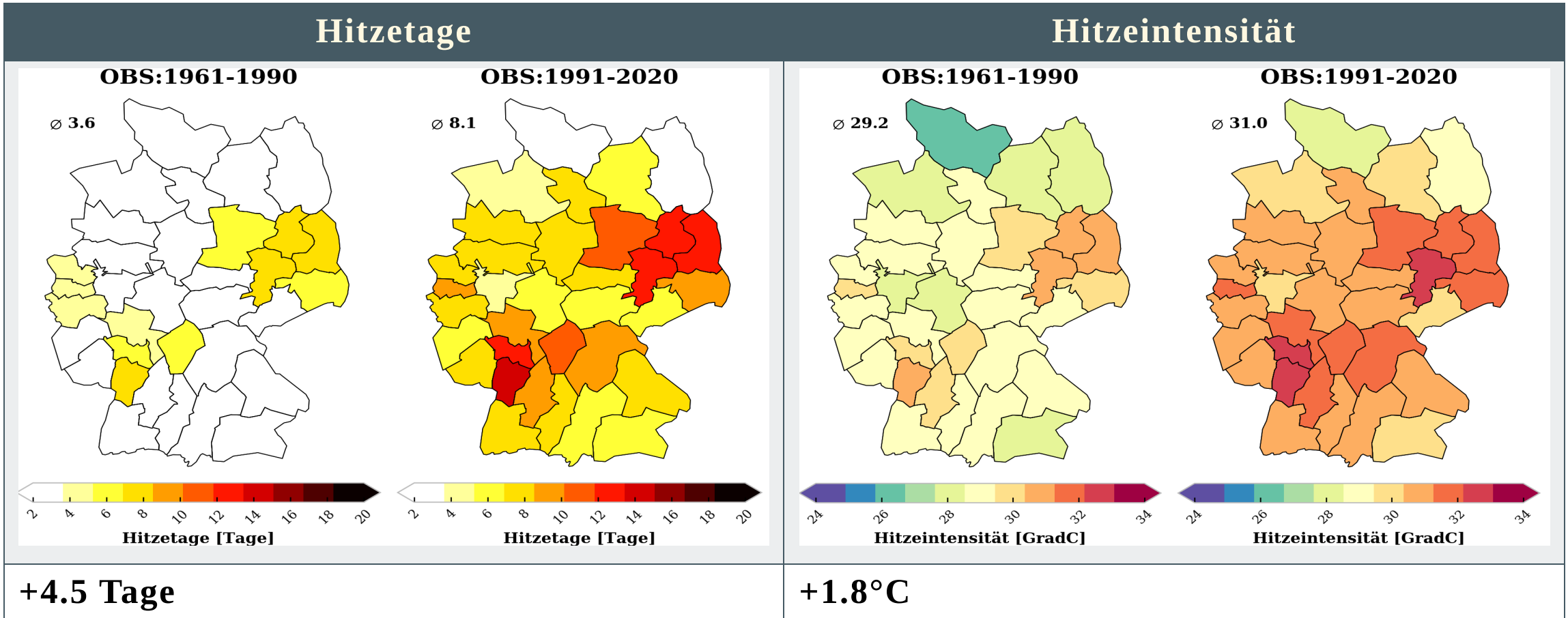
Klimaindikatoren

Mittelwerte vs Extremwerte



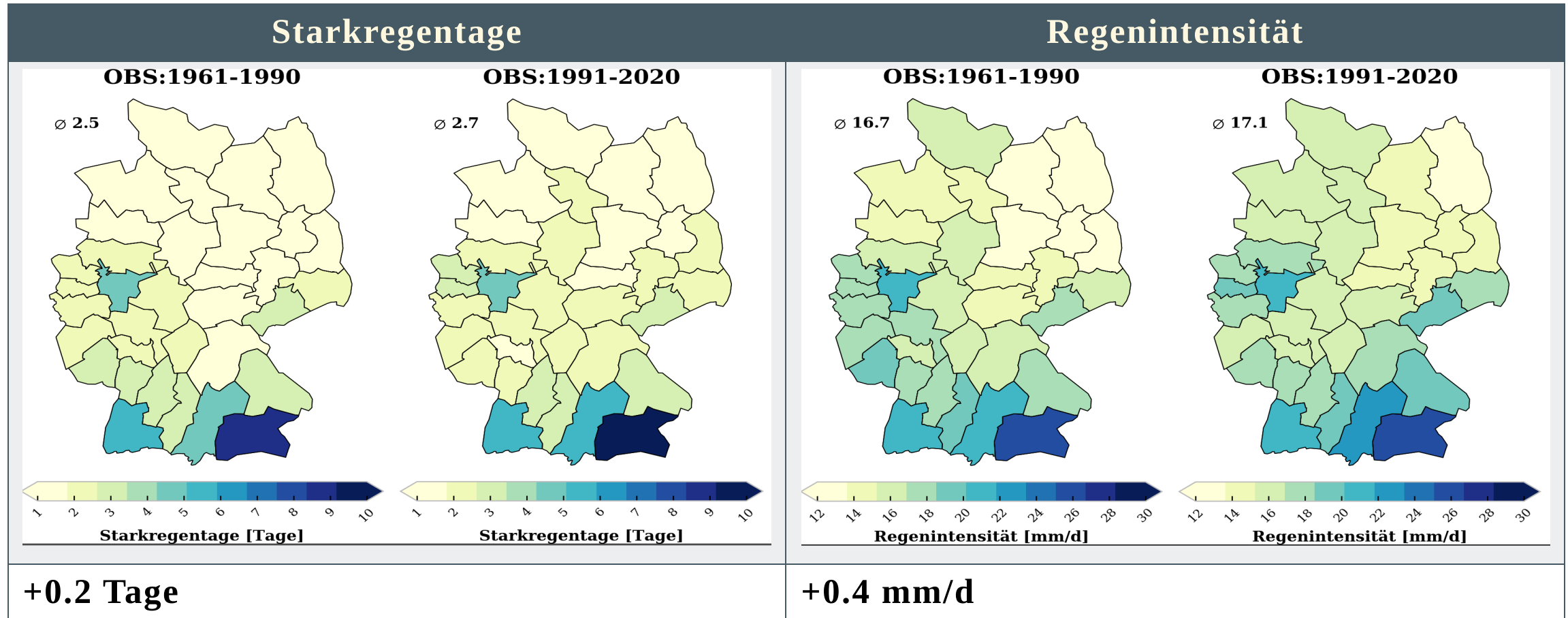
Klimaindikatoren

Schwellwerte vs Seltenheit



Klimaindikatoren

Schwellwerte vs Seltenheit

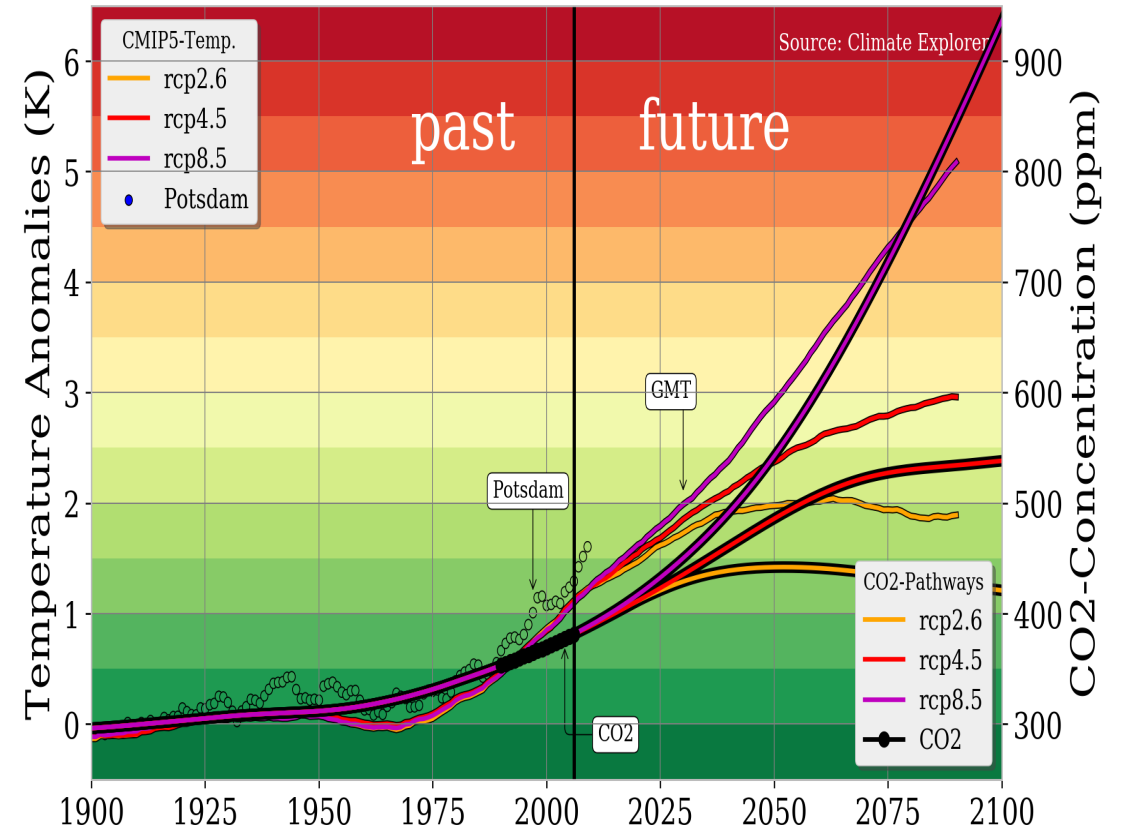
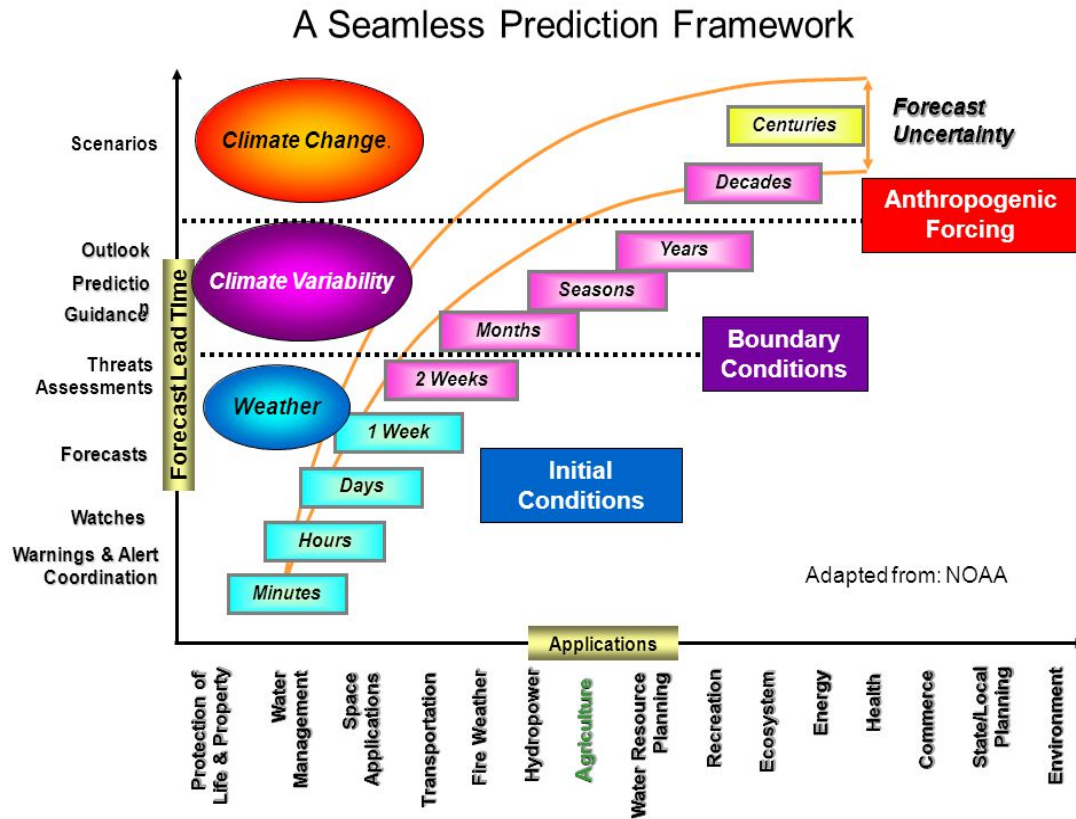


3. Prognose

Klimatische Zukunftsszenarien

Projektionen und Szenarien

Emissionspfade als Basis für Klimaszenarien

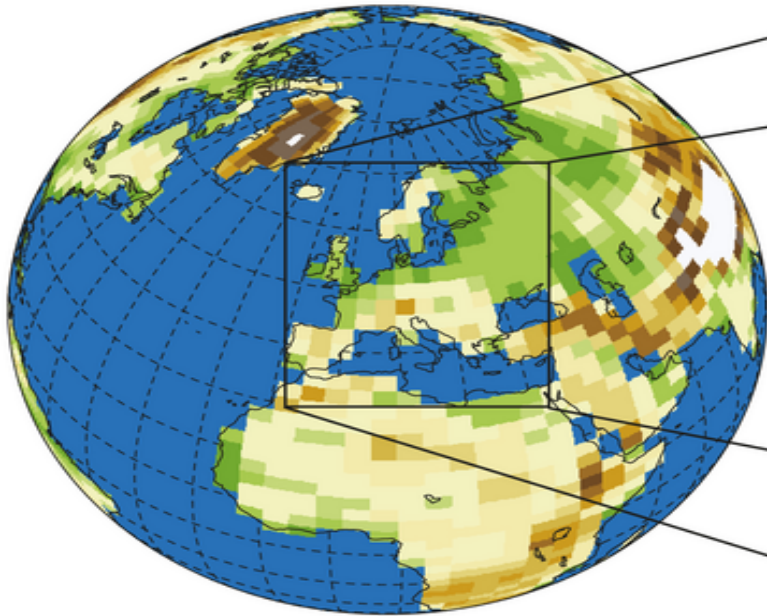


RCP8.5: 4 Grad wärmere Welt - RCP2.6: 2 Grad wärmere Welt

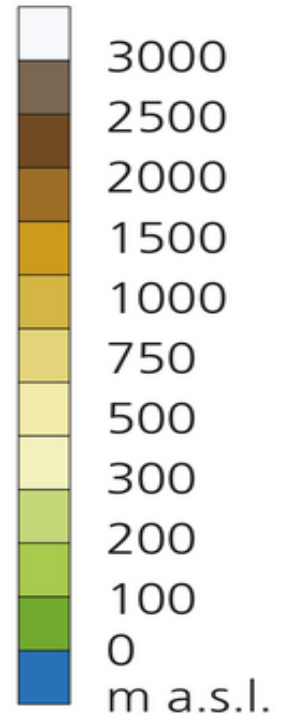
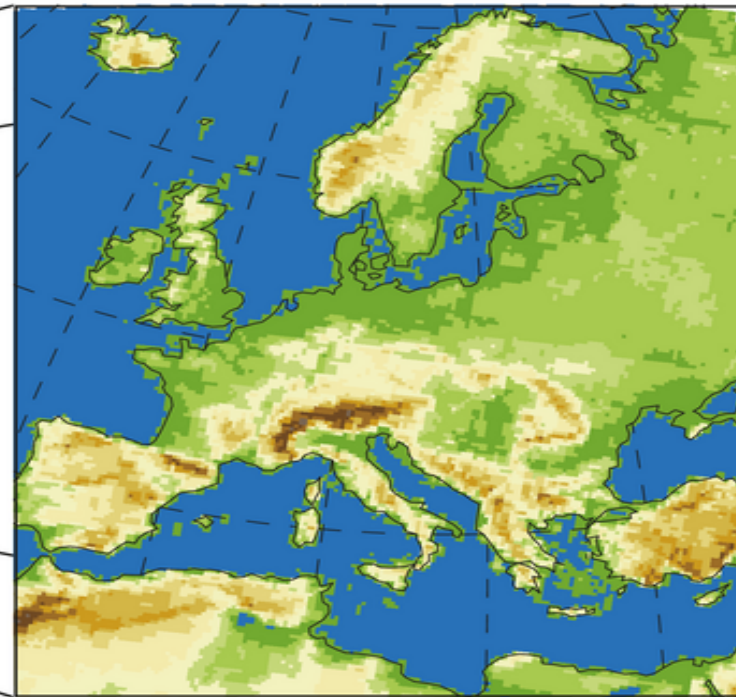
Projektionen und Szenarien

Regionalisierungen von global (100x100km) auf regional (12x12km)

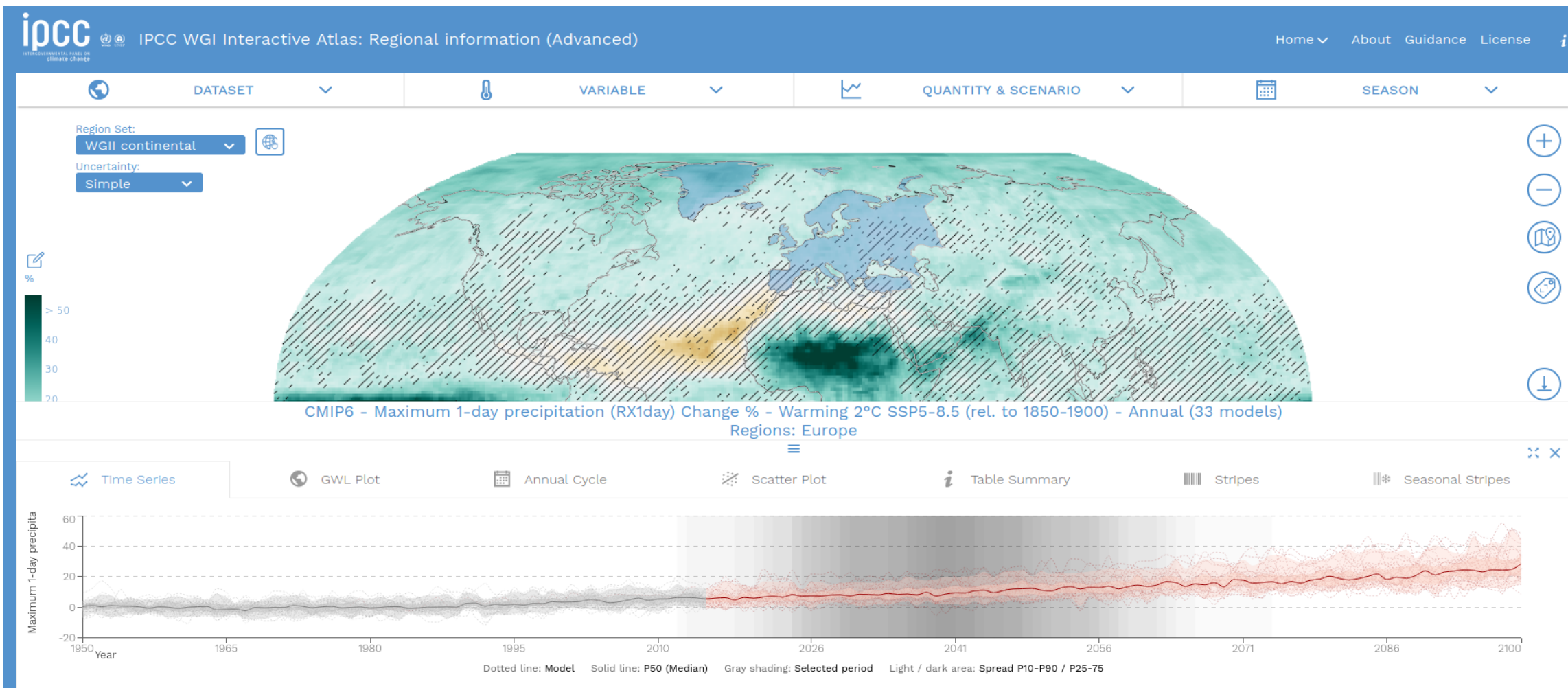
Global Climate Model



Regional Climate Model
(EURO-CORDEX)



IPCC Interaktiver Atlas



Deutschland in Zahlen

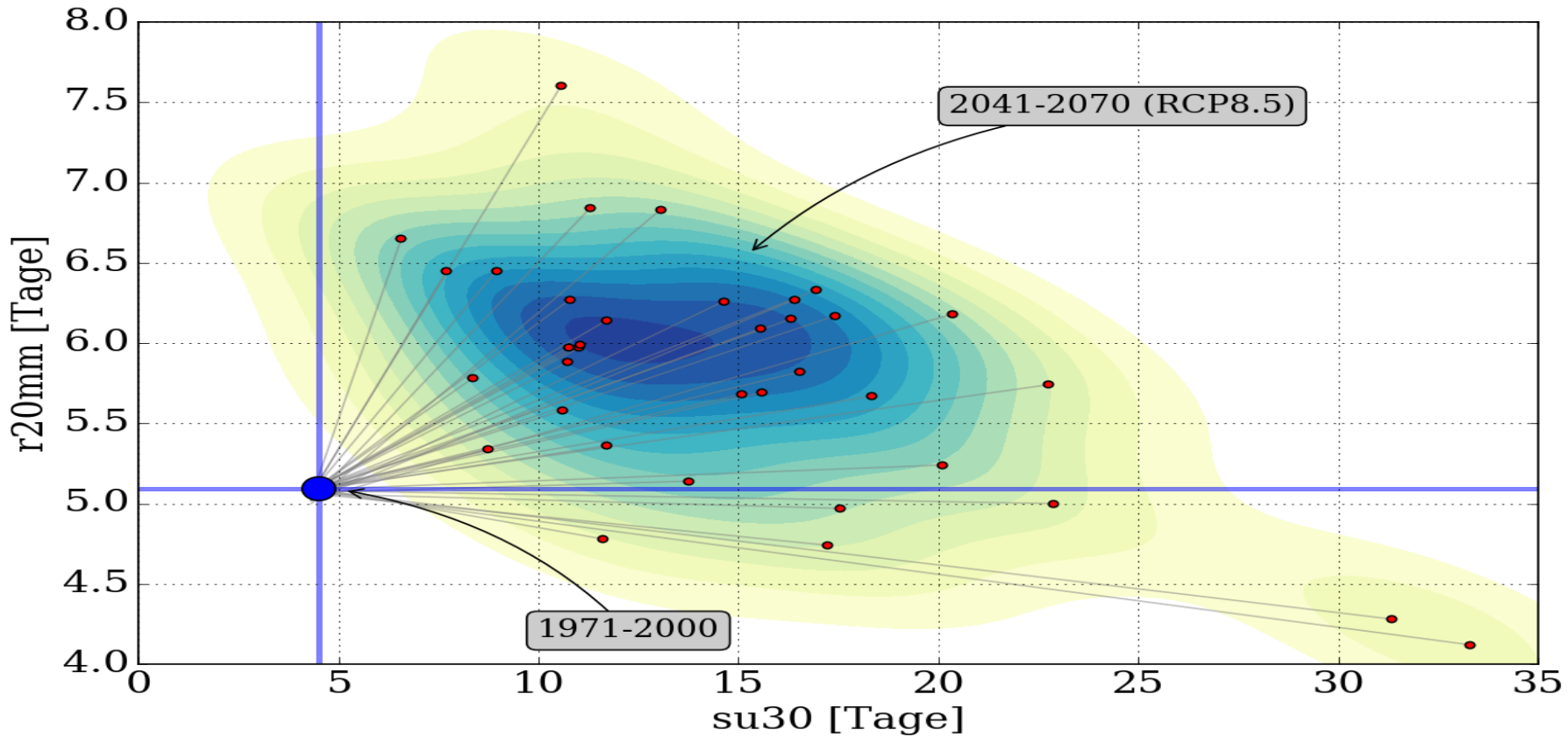
2071-2100 vs 1971-2000 (Ensemblemittel)

Klimaparameter	“Ist”	“Klimaschutz”	“Weiter-wie-bisher”
Jahresmitteltemperatur	8.0°C	+1.0°C	+3.8°C
Hitzetage	4.3 Tage	+3.7 Tage	+19.4 Tage
Eistage	24.8 Tage	-7.2 Tage	-18.9 Tage
Starkregentage	4.9 Tage	+0.3 Tage	+1.1 Tage
Länge d. Wachstumsperiode	247 Tage	+21 Tage	+67 Tage
Trockentage	236 Tage	+1.7 Tage	+9.1 Tage
Sommerniederschlag	2.9 mm/d	-3.8 %	-12.6 %
Extremniederschlag	55.5 mm/d	+ 5.4 mm/d	+33.6 mm/d

ohne ambitionierten Klimaschutz: Extremjahre von heute zukünftig Normaljahre

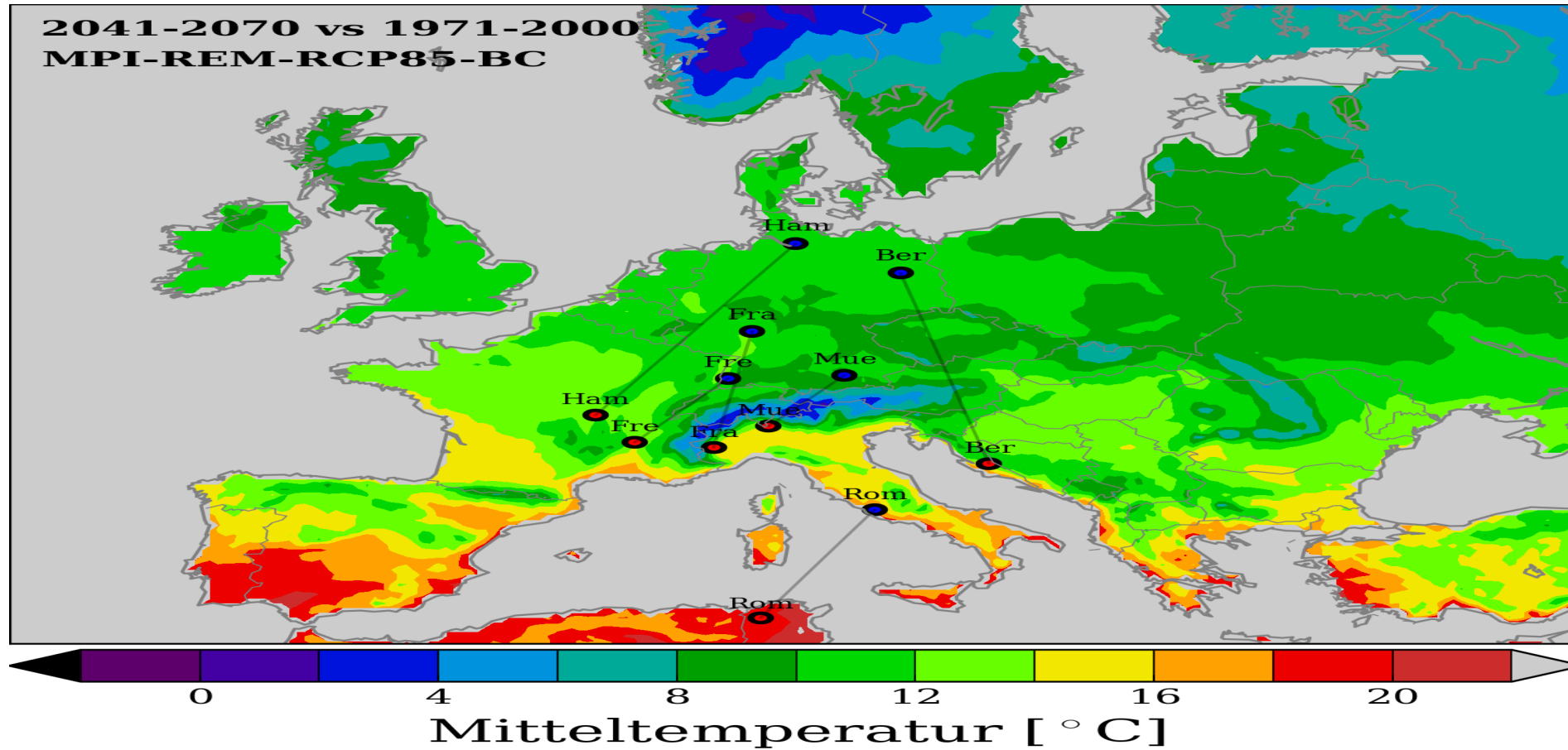
Extreme

Entwicklung von Hitzetagen vs Starkregentagen



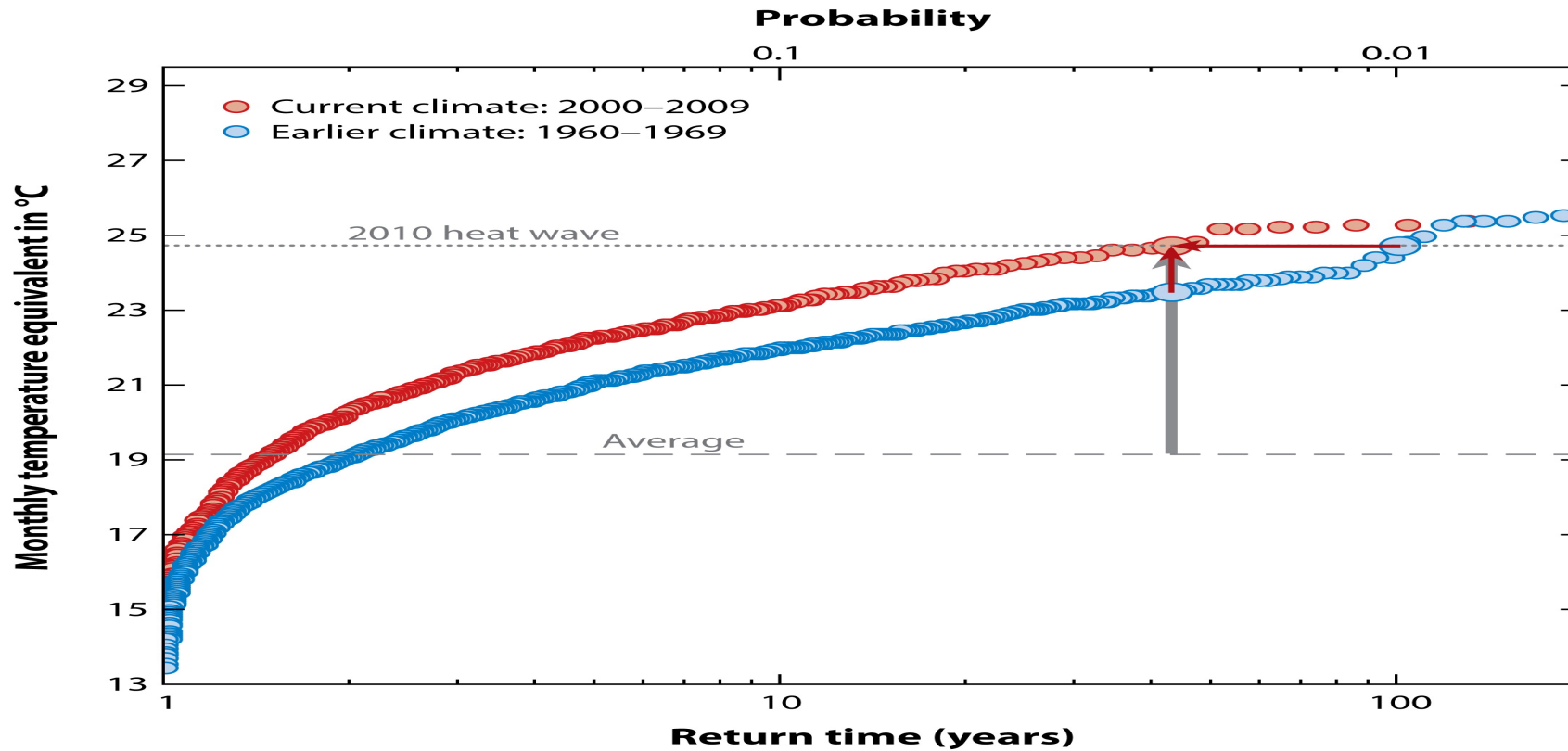
Klimatische Verschiebungen

Das zukünftige Klima von Berlin entspricht dem gegenwärtigen in Kroatien



Attribution

Zuordnung von Klimaextremen dem Klimawandel



4. Klimafolgen

Mittel- und Langfristig

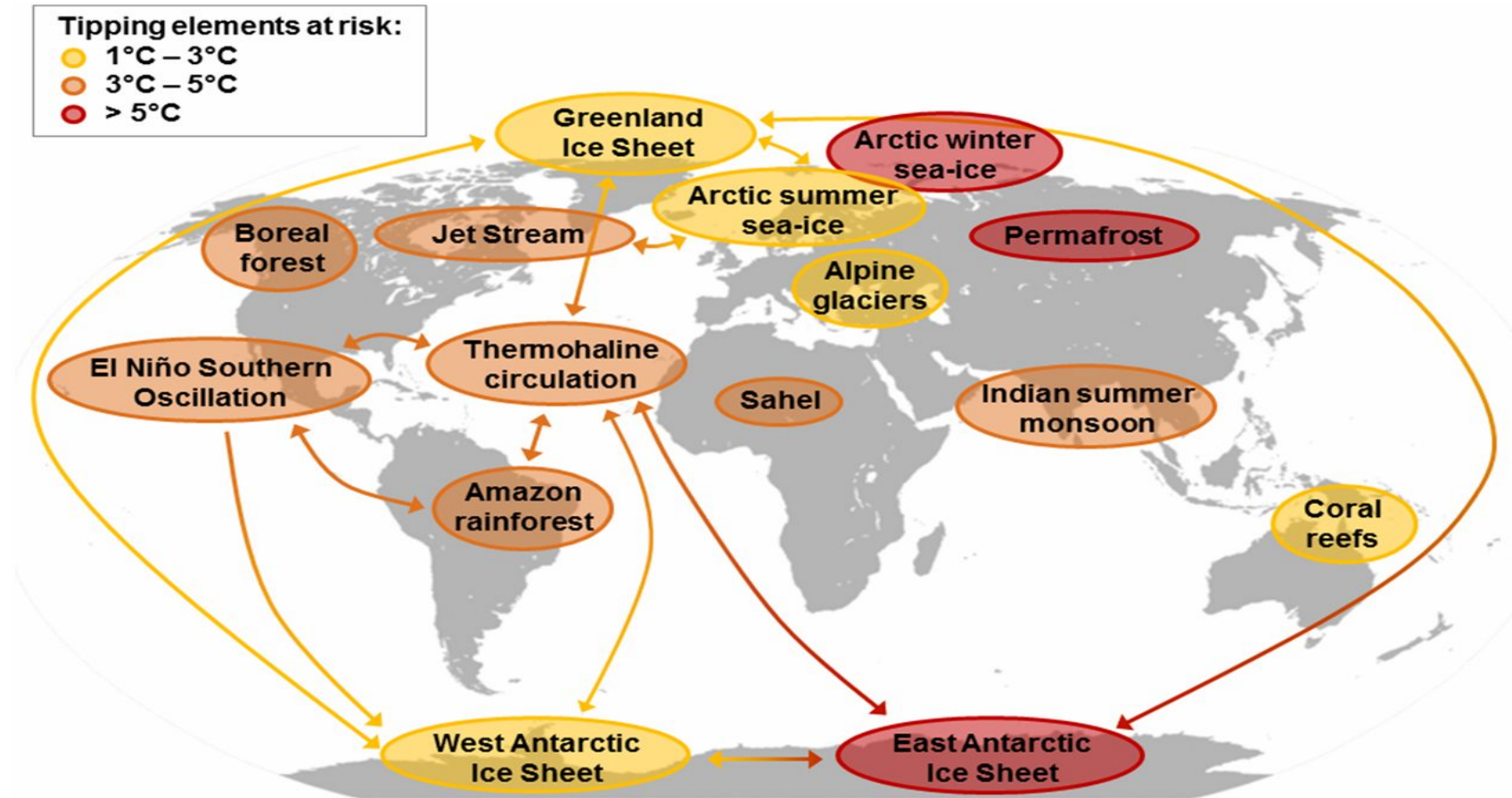
Meeresspiegelanstieg

bis zu 10 Meter über die kommenden Jahrhunderte

+ 4°C

Kippelemente im Klimasystem

Schwund des arktischen Sommermeereis beeinflusst den Jetstream in mittl. Breiten



© Steffen et al. (2018)

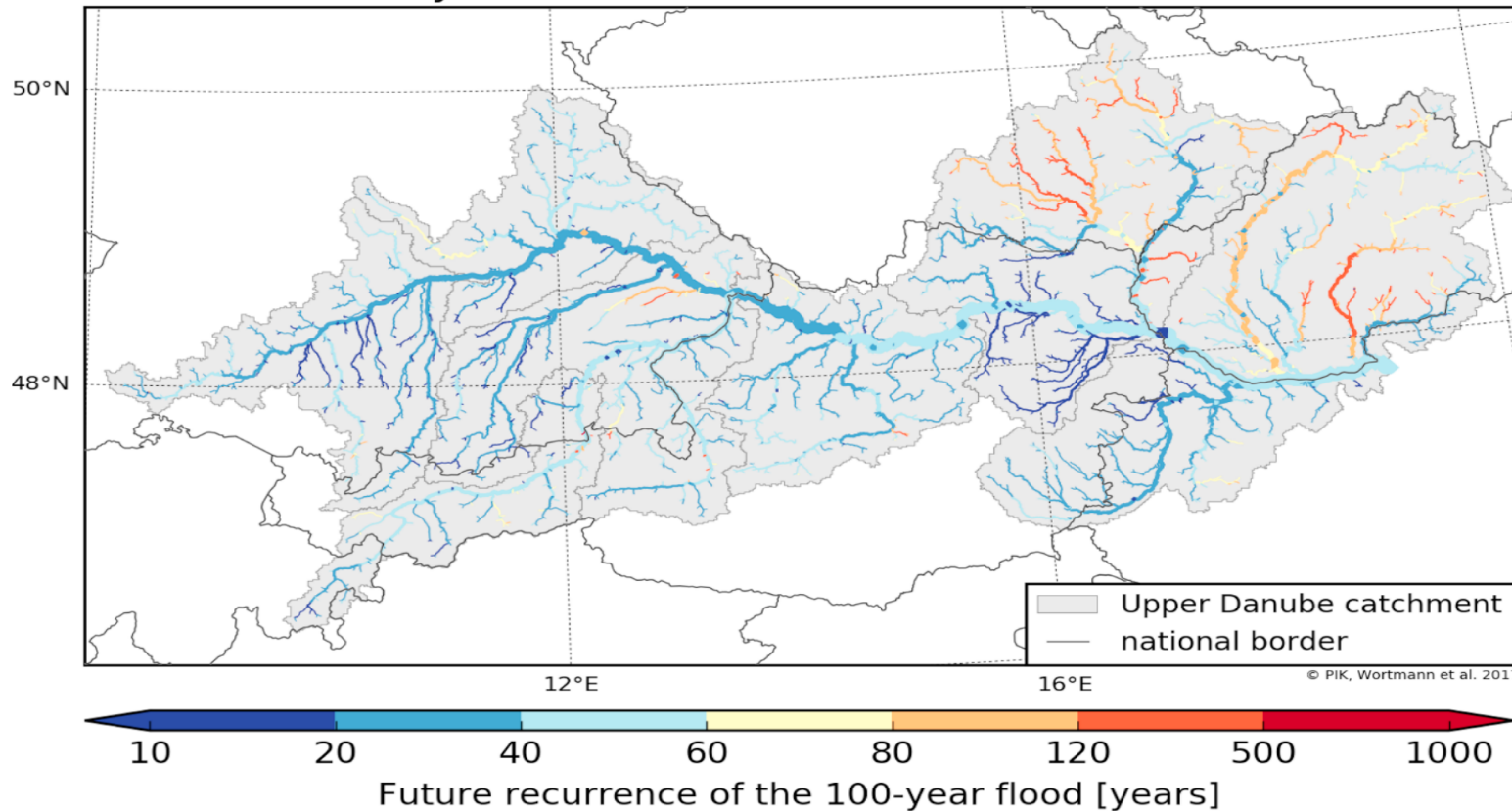
Betroffene Sektoren

- **Gesundheit:** z.B. Hitzestress, Allergien, Infektionskrankheiten, Sterblichkeit
- **Biodiversität:** z.B. Lebensrhythmus von Tieren und Pflanzen
- **Wasserhaushalt:** z.B. Grundwasserneubildung
- **Landwirtschaft:** z.B. Schadorganismen, Spätfrost, Trockenstress
- **Forstwirtschaft:** z.B. Vegetationsperioden, Biomasseproduktion
- **Böden:** z.B. Bodenwasserhaushalt, Funktionalität
- **Verkehr:** z.B. Schifffahrt, Emissionsminderung, Extremereignisse
- **Städte:** z.B. thermische Belastung, Starkniederschläge, Luftqualität
- **Tourismus:** z.B. Schneemangel, Blaualgen, overtourism
- **Infrastrukturen:** z.B. Thermisch Kraftwerke m. Kühlung, Wasserversorgung

Hochwasser

Verkürzung von bisher 100-jährigen Ereignissen im Donaueinzugsgebiet

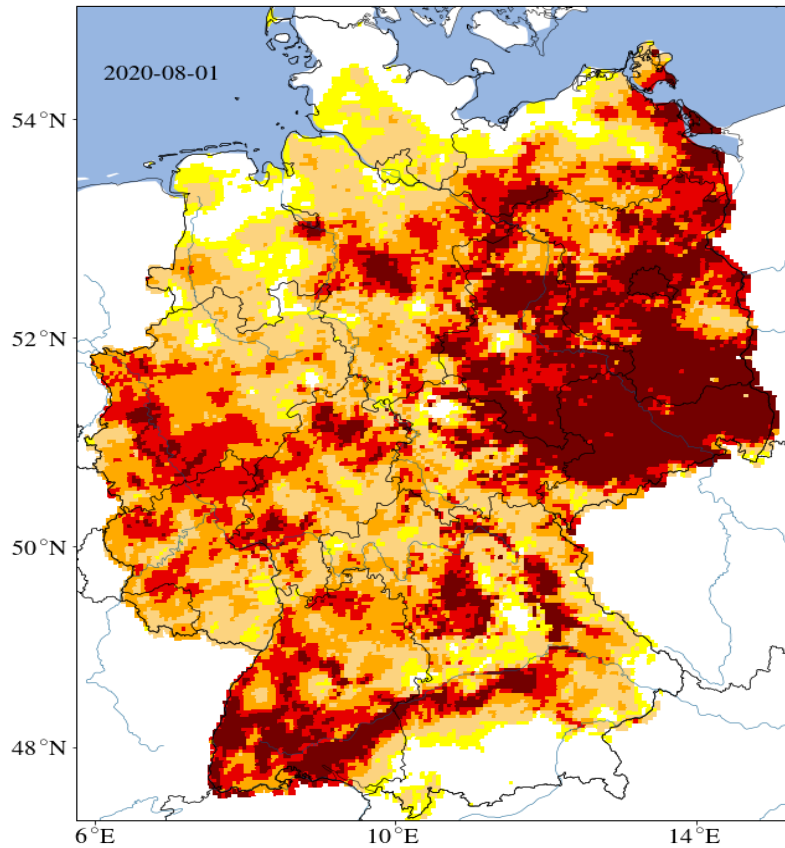
100-year flood in 2020-2049 under RCP-8.5



© Hattermann (2018)

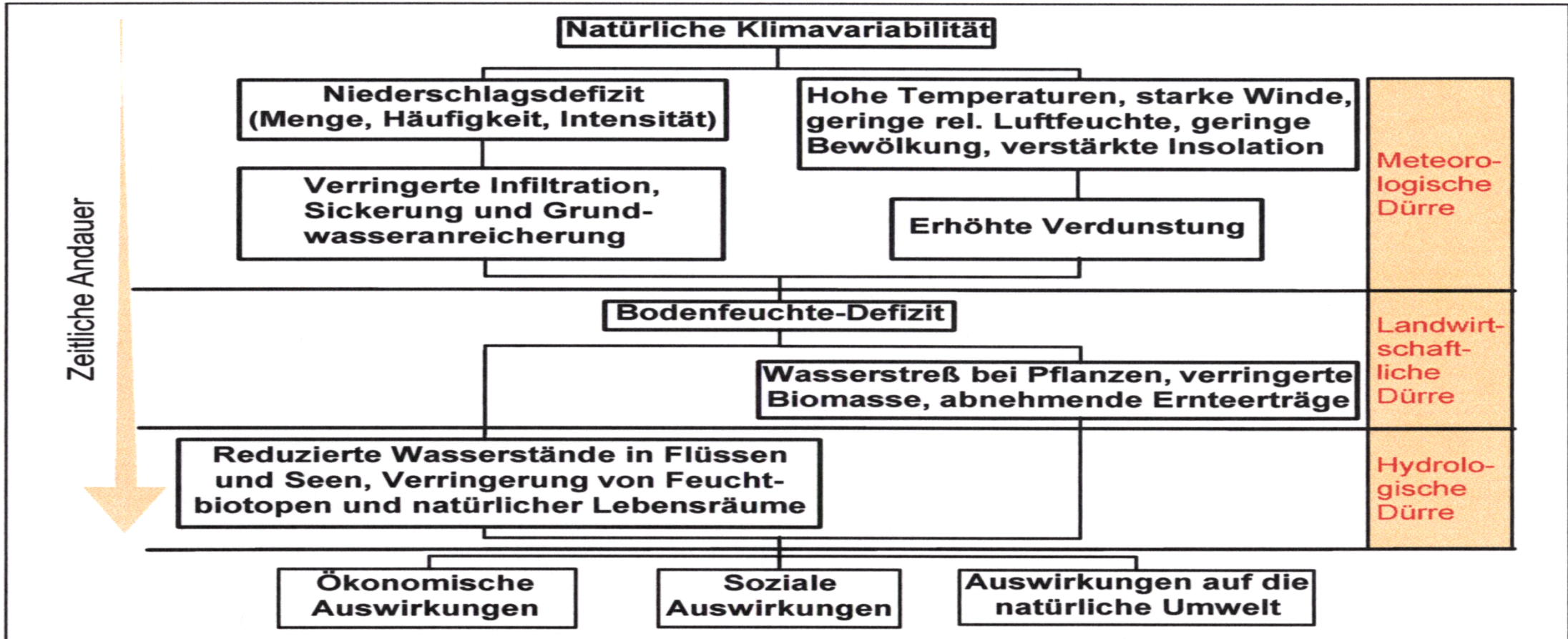
Dürre und Trockenstress

Jahresniederschlag kann höhere Verdunstung nicht ausgleichen



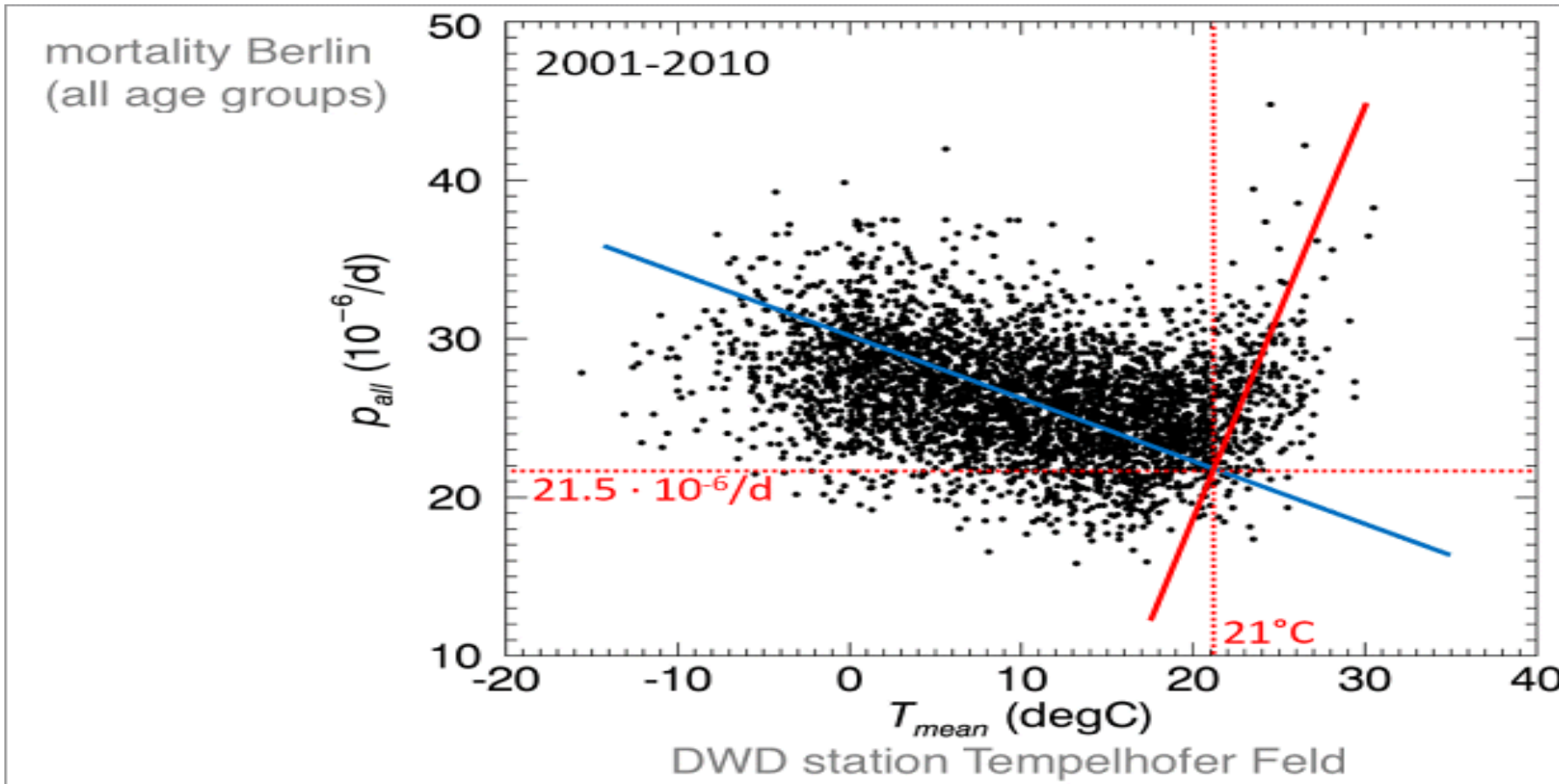
Dürre und Trockenstress

Dürrearten und Auswirkungen auf die Gesellschaft



Gesundheit

Kälte- und Hitzebedingte Übersterblichkeit: Bsp. Berlin

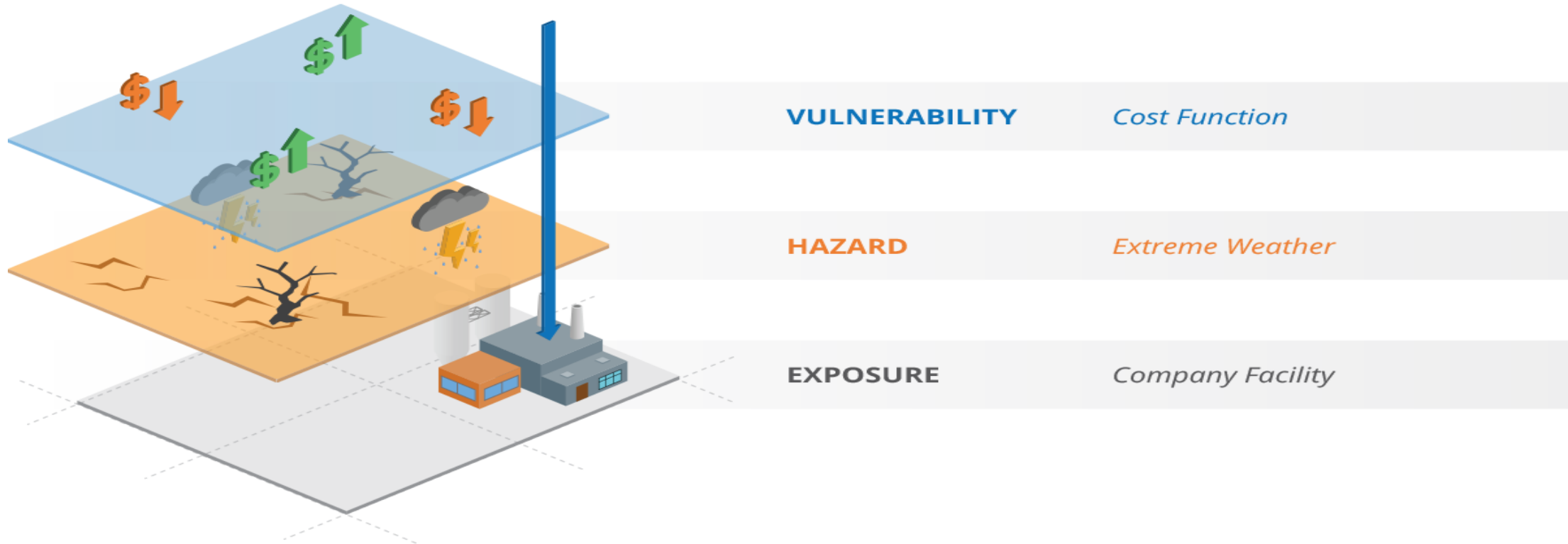


© Scherer (2015)

Geschäftsmodelle

Anfälligkeit von Produktionabläufen gegenüber Extremwetter

$$\text{EXPECTED COST} = \text{VULNERABILITY} \times \text{HAZARD} \times \text{EXPOSURE}$$

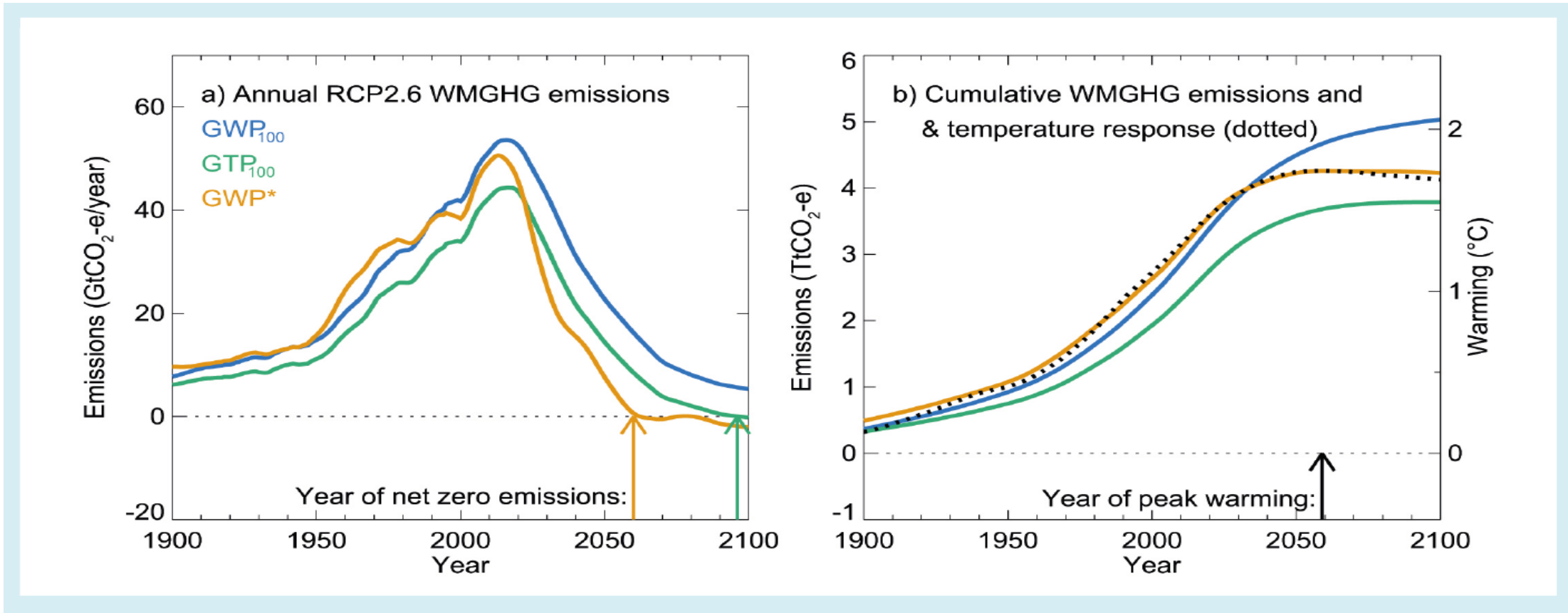


5. Therapie

Klimaschutz und Klimaanpassung

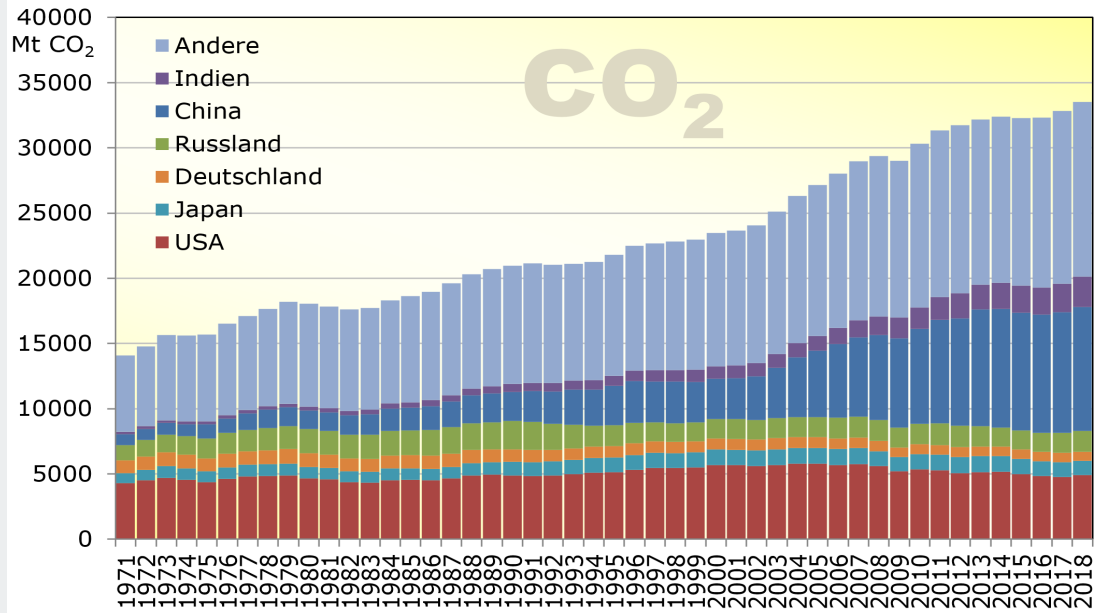
Emissionsminderung

Klimaneutralität bis 2050 zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens



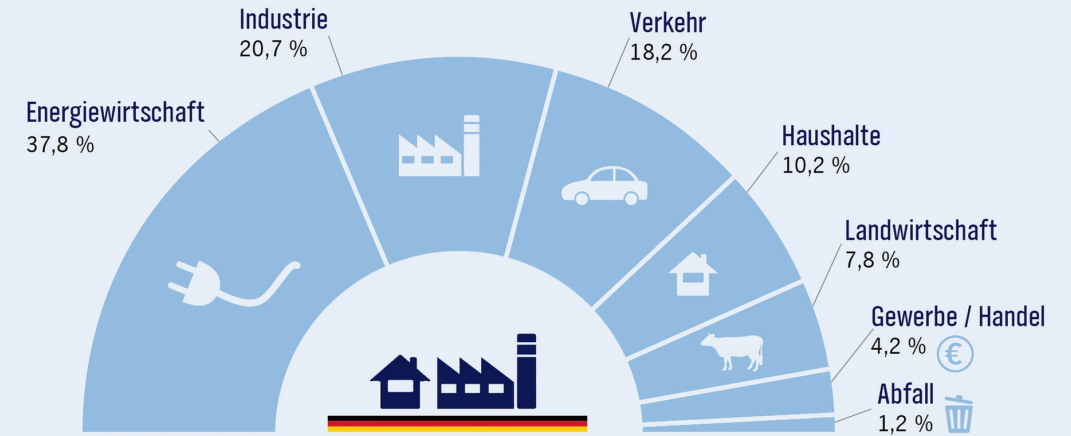
Emissionsverteilung

Länder



Sektoren

CO₂-Ausstoß in Deutschland nach Sektoren



Grafik: NDR / Quelle: Bundesumweltministerium (2016)

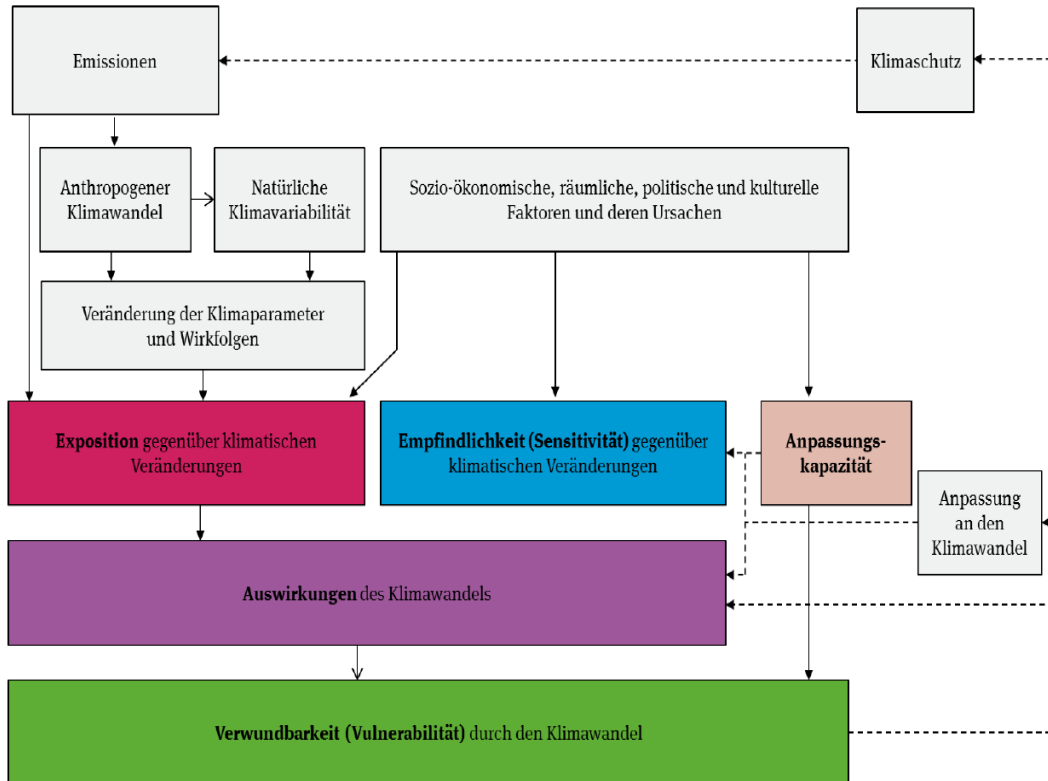
historisch hat Deutschland größeren Anteil

Wo gibt es Einsparpotentiale?

Vulnerabilitätskonzept

Klimaschutz (abmildern der Veränderung) und Anpassung an den Klimawandel

Exposition + Empfindlichkeit = Auswirkung



© UBA (2015)

Klimaschutz

- Emissionsminderung
- Klimatische Änderung stabilisieren
- Exposition begrenzen

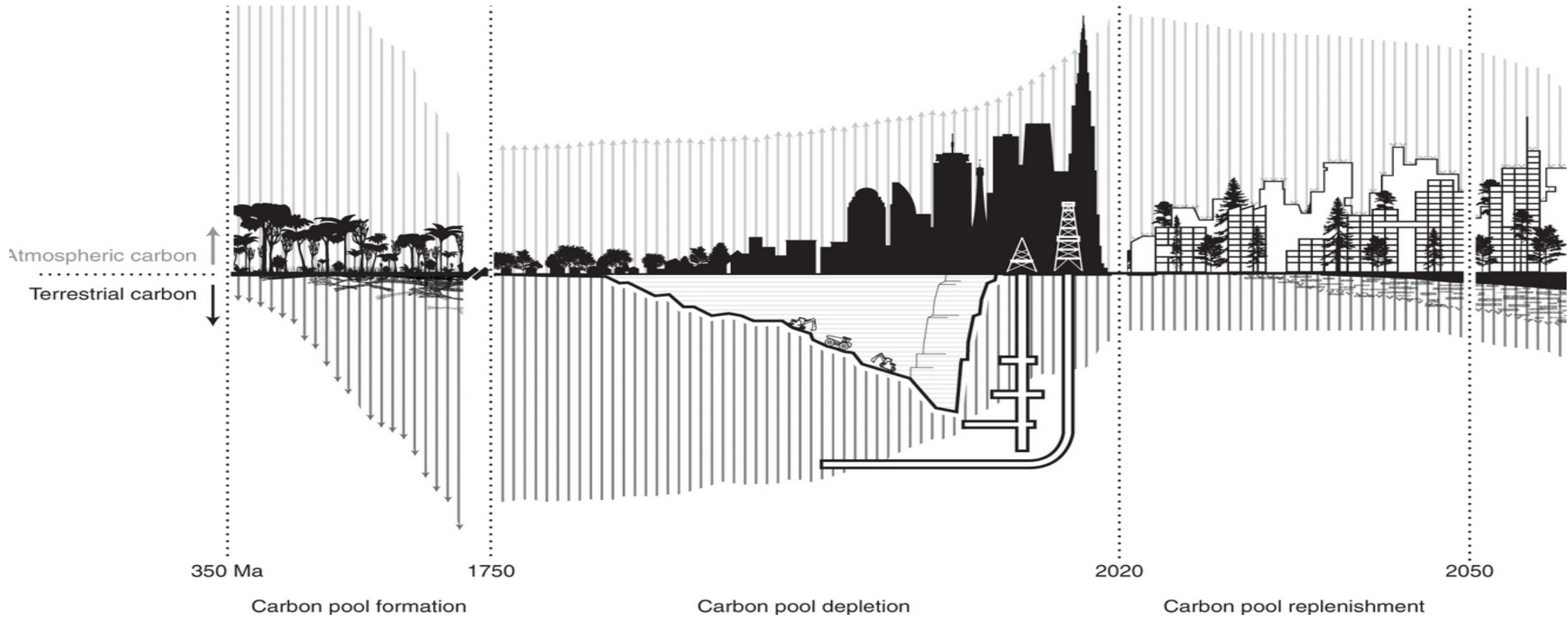
Anpassung

- politische und gesellschaftliche Maßnahmen

Verwundbarkeit reduzieren

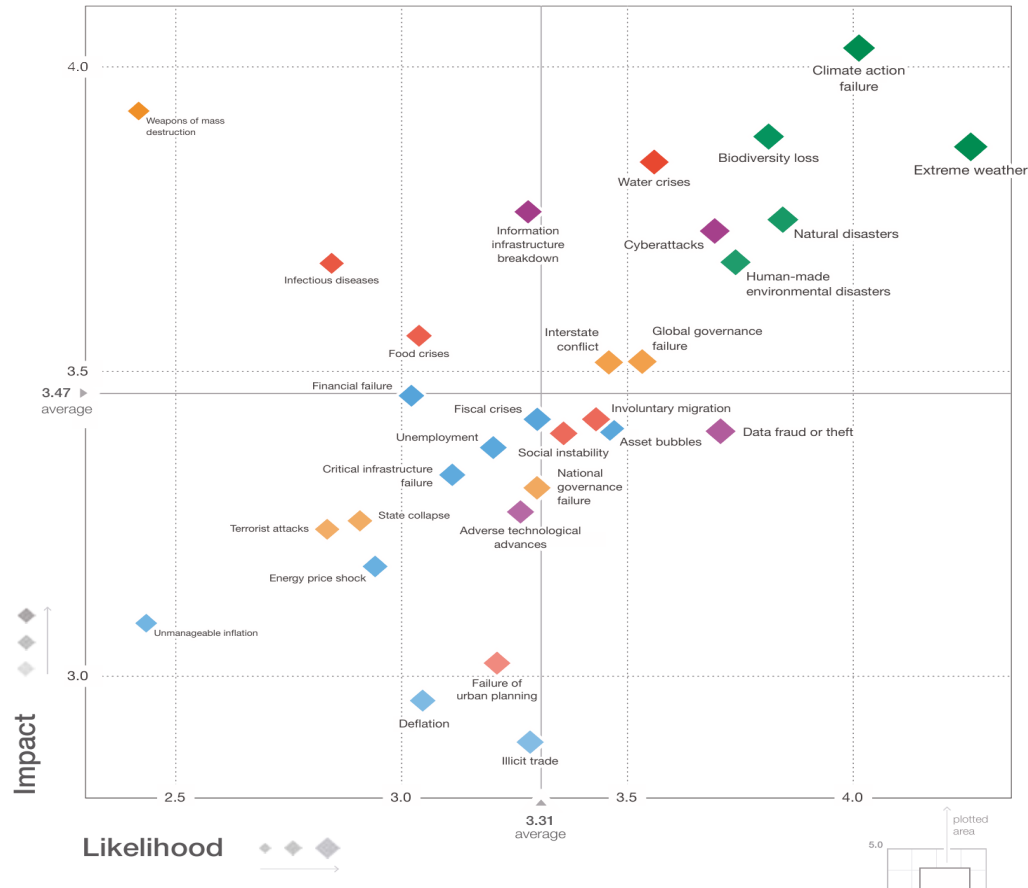
Transformation

Gebäude aus Holz als langfristige Kohlenstoffsенке



Bewertung globaler Risiken

Umweltfaktoren haben den stärksten Impact auf die Ökonomie (z.B. Extremwetter)



© Global Risk Report (2020)

Globale Risiken für die Wirtschaft:

Ursache	Folgen	Wahrscheinlichkeit
Extremwetter	hoch	hoch
Pandemien	hoch	niedrig
zw. staatliche Klonflikte	mittel	mittel

Klimaanpassungsmatrix

Beispiel Landwirtschaft

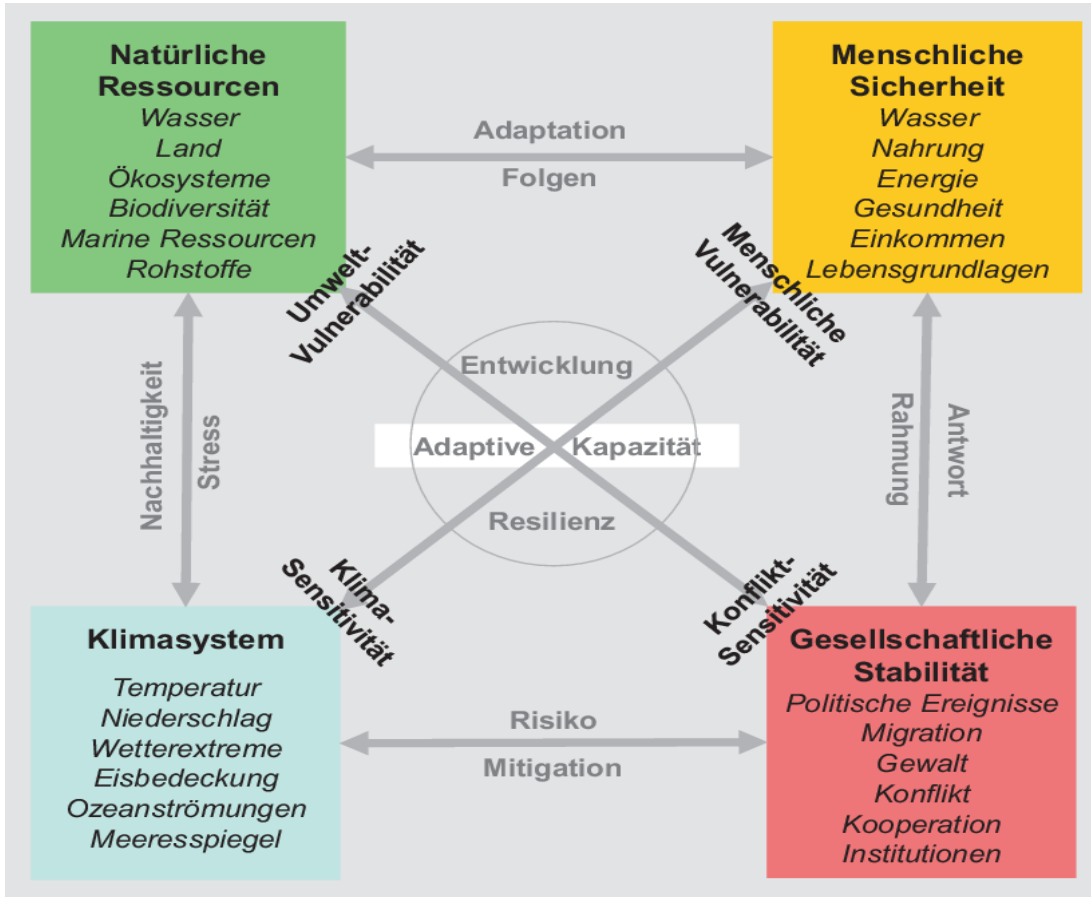


© Umweltamt Schweiz

- Qualit. Einschätzung zu Handlungsbedarf
- Einfluss und Wichtigkeit der Veränderungen
- **Bsp. Trockenheit:**
 - Einfluss des Klimawandels: mittel/groß
 - Wichtigkeit der Veränderung: mittel/groß
 - Handlungsbedarf: groß

Wirkungskette: Klima und Gesellschaft

Natürliche Ressourcen und Gesellschaftliche Stabilität



© Scheffran (2015)

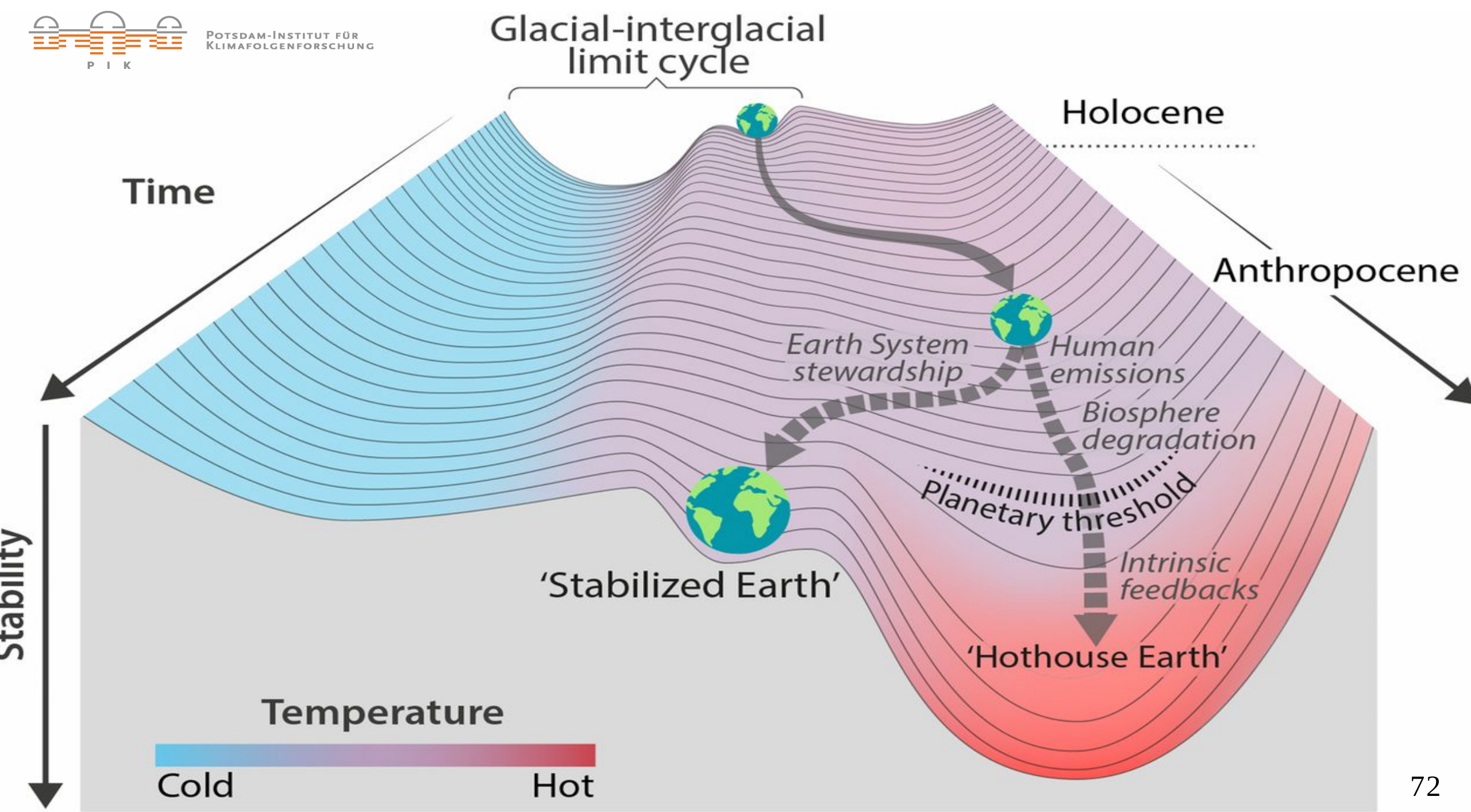
- Veränderungen im Klimasystem haben Änderungen von natürlichen Ressourcen zur Folge.
- die Verfügbarkeit von natürlichen Ressourcen sichert menschlichen Wohlstand
- Störungen kann die gesellschaftliche Stabilität gefährden
- mehr Nachhaltigkeit im Umgang mit natürlichen Ressourcen wirkt stabilisierend

6. Zusammenfassung

Transformation als Chance

Zusammenfassung

- die 1.5 Grad Marke kann bereits in diesem Jahrzehnt angerissen werden
- langfristige Stabilisierung des Klimas auf unter 2 Grad notwendig/möglich
- weltweite Klimaneutralität bis 2050
- Klimaschutz bedeutet Sicherung unserer Lebensgrundlage
- Klimawandel ist mehr als eine zeitlich begrenzte Krise
- Physikalische Gesetze sind nicht politisch verhandelbar
- Begrenzung des Klimawandels erfordert gesellschaftliche Transformation
- Gestaltungsprozess eröffnet Chancen für mehr Nachhaltigkeit
- Regelwerk für mehr Generationengerechtigkeit und Solidarität



Wissenswertes

<https://www.ncdc.noaa.gov/cag/> State of Climate

<https://www.springer.com/de/book/9783662503966> Klimawandel Deutschland

<https://www.klimafolgenonline-bildung.de/> Klimafolgenonline

<https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/> Deutscher Klimaatlas

<https://climate.copernicus.eu/climate-bulletins> Copernicus

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung>

Klimafolgenanpassung

<https://www.ipcc.ch/sr15/> IPCC Report 1.5 Grad

<https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/> Warnsignal Klima

<https://www.klimafakten.de/> Klimafakten

<https://www.globalwarmingindex.org/> Global Warming Index

http://blogs.reading.ac.uk/climate-lab-book/files/2020/05/spiral_2020_large.gif Climate Spiral

<https://germanwatch.org/de/17307> Climate Risk Index

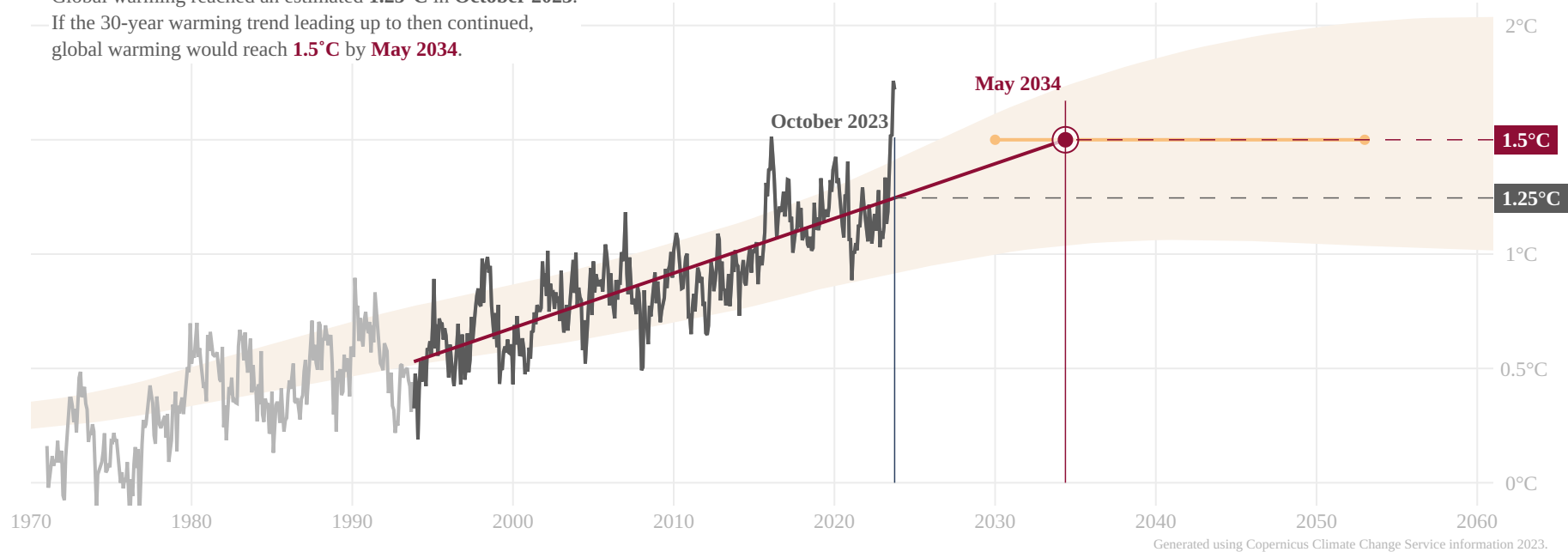
<https://interactive-atlas.ipcc.ch/> IPCC Climate Change Atlas

Climate Data Store - Global temperature trend monitor

How close are we to reaching a global warming of 1.5°C?

Reaching 1.5°C of global warming - a limit agreed under the Paris agreement - may feel like a very distant reality, but it might be closer than you think. Experts suggest it is likely to happen

Global warming reached an estimated 1.25°C in **October 2023**.
 If the 30-year warming trend leading up to then continued, global warming would reach **1.5°C** by **May 2034**.



Generated using Copernicus Climate Change Service information 2023.



— Temperature trend — Observed temperature change since pre-industrial times —●— IPCC "likely" estimate — IPCC projections