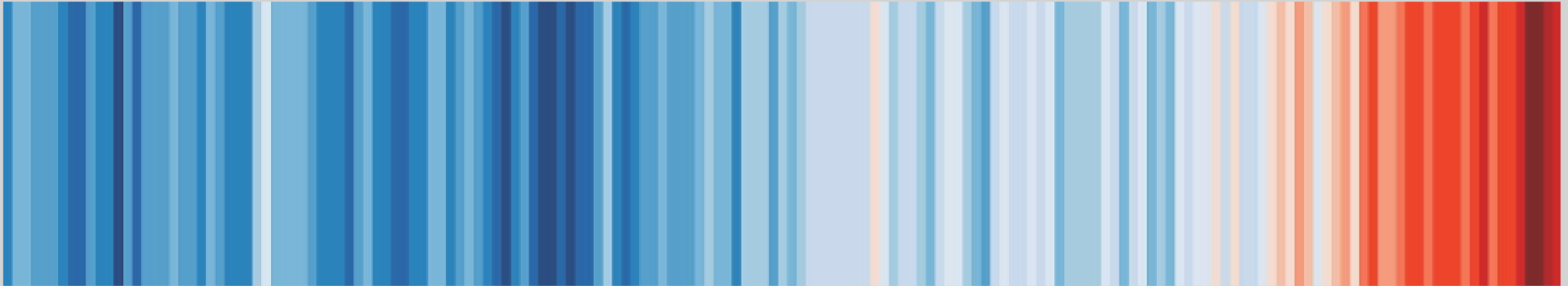


Regionale Klimaveränderungen

Physikalische Grundlagen und Folgen

P. Hoffmann (AG: Hydroklimatische Risiken)



<https://www.pik-potsdam.de/members/peterh>

Klimawandel: Eine Summe physikalischer Naturgesetze

Forschungsabteilungen und Arbeitsgruppen



Earth System Analysis

Oceans, Atmosphere and Biosphere in Past, Present and Future

[READ MORE](#)



Climate Resilience

Climate Impacts and Adaptation

[READ MORE](#)



Transformation Pathways

Climate Risks and Sustainable Development

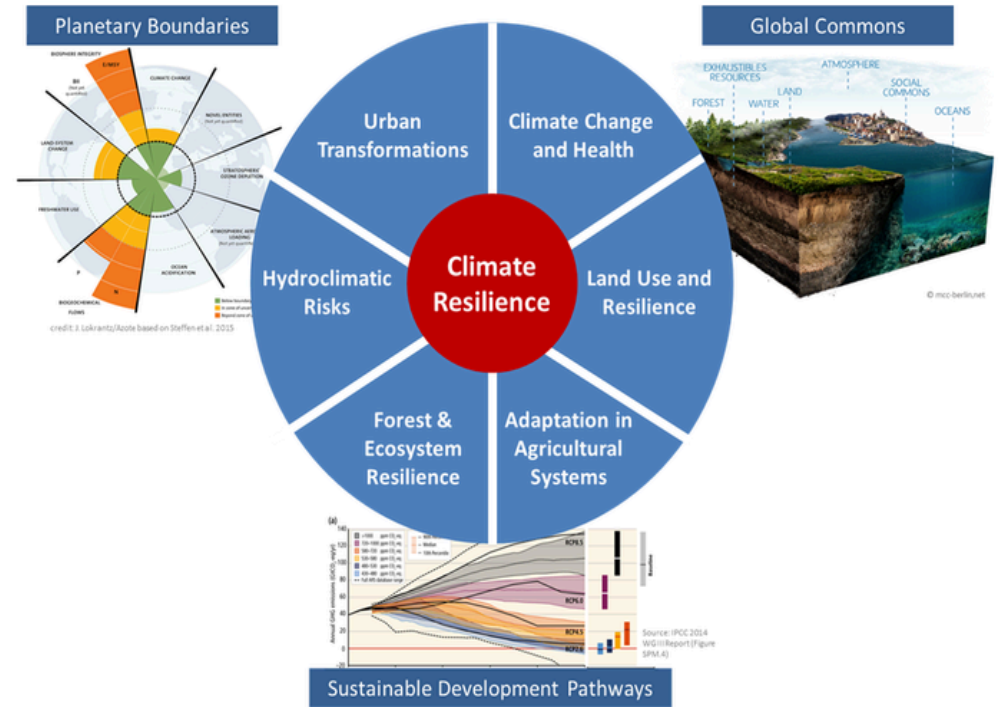
[READ MORE](#)



Complexity Science

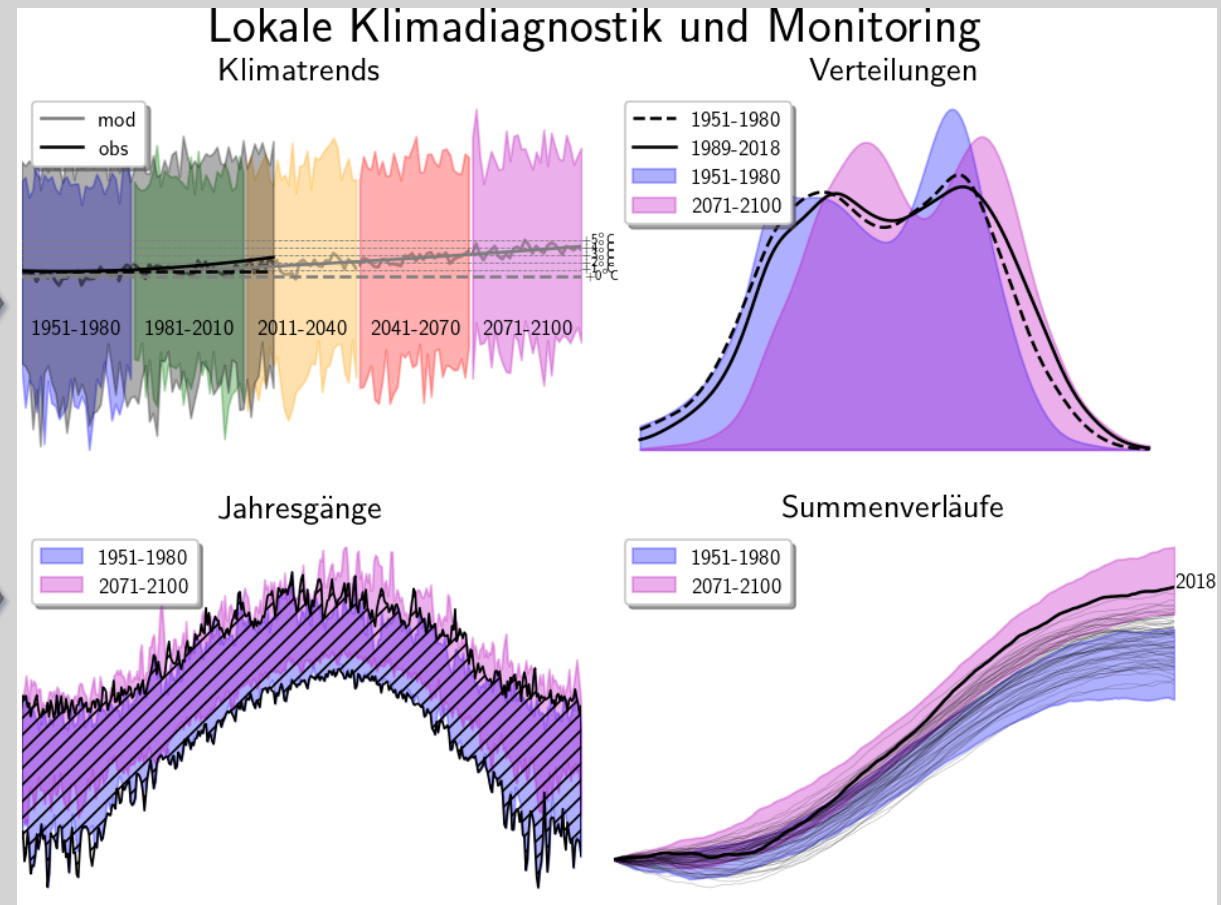
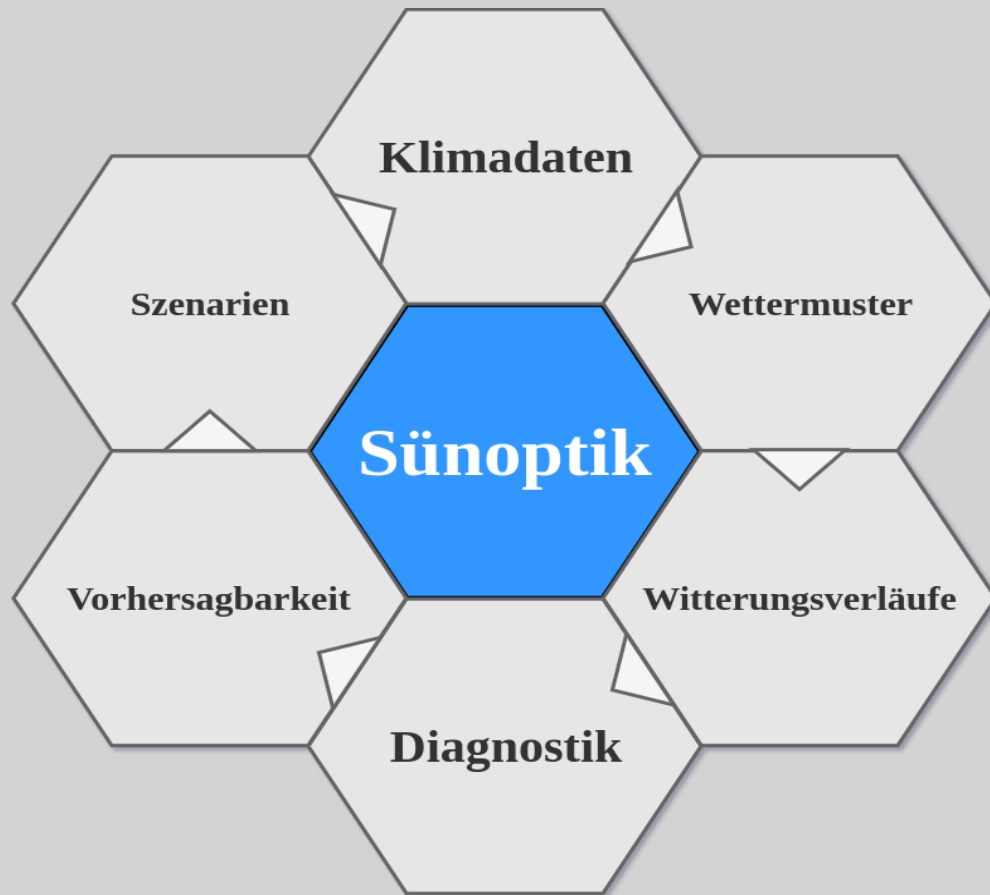
Machine Learning, Nonlinear Methods and Decision Strategies

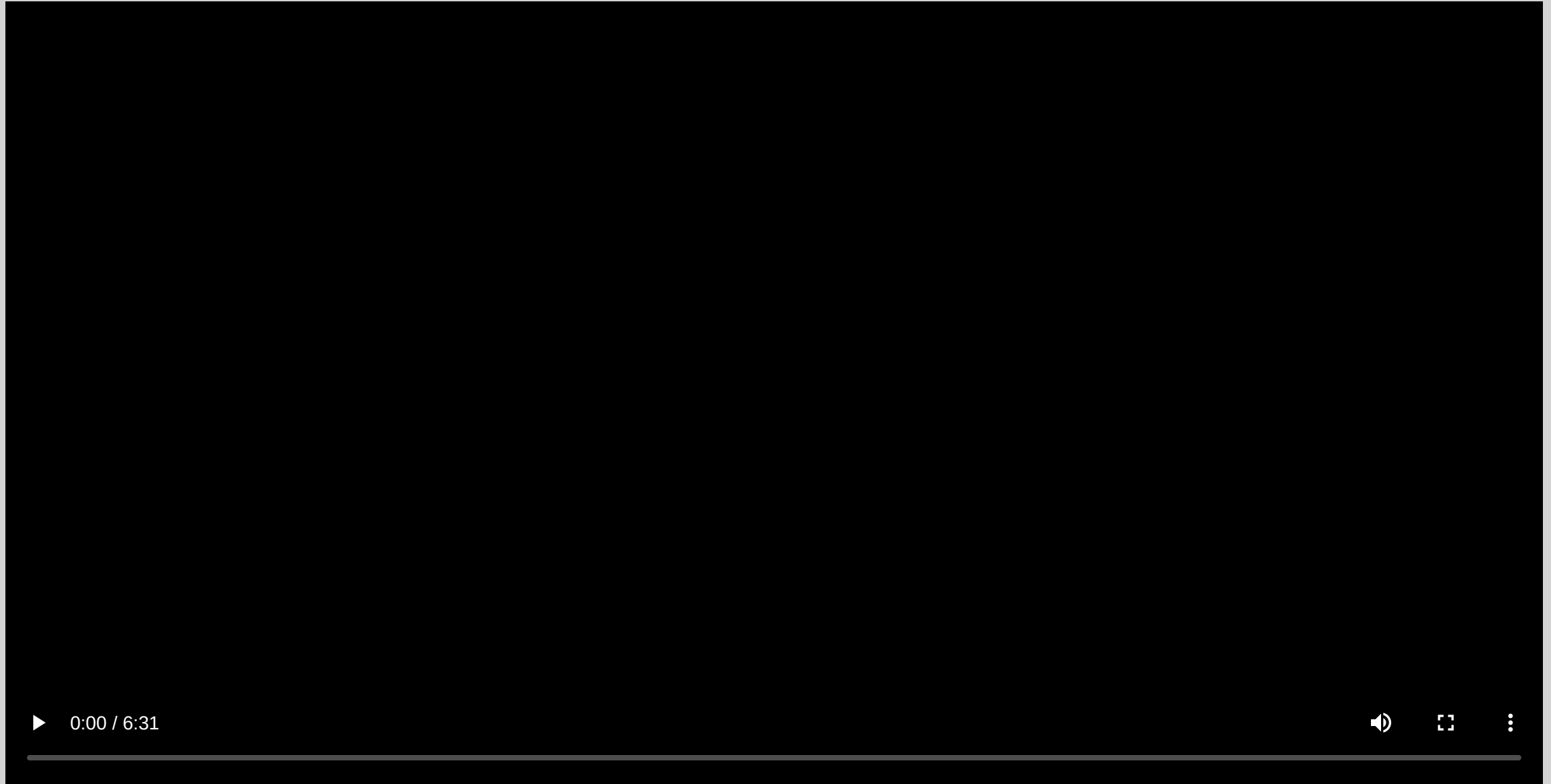
[READ MORE](#)



Profil: Die Meteorologie des Klimawandels

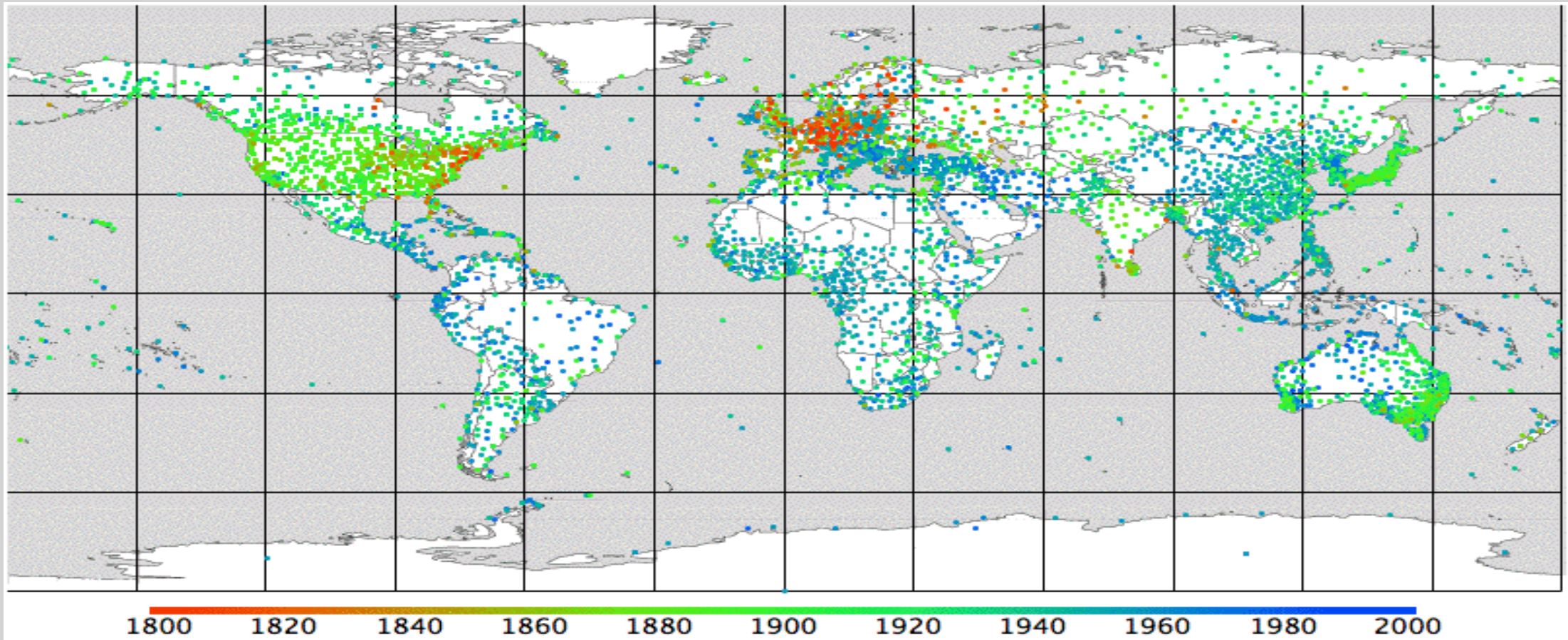
Wie verändert der Klimawandel unser gewohntes Wetter und Jahreszeiten?





1. Wetterdatenerfassung

Wetterdatenerfassung

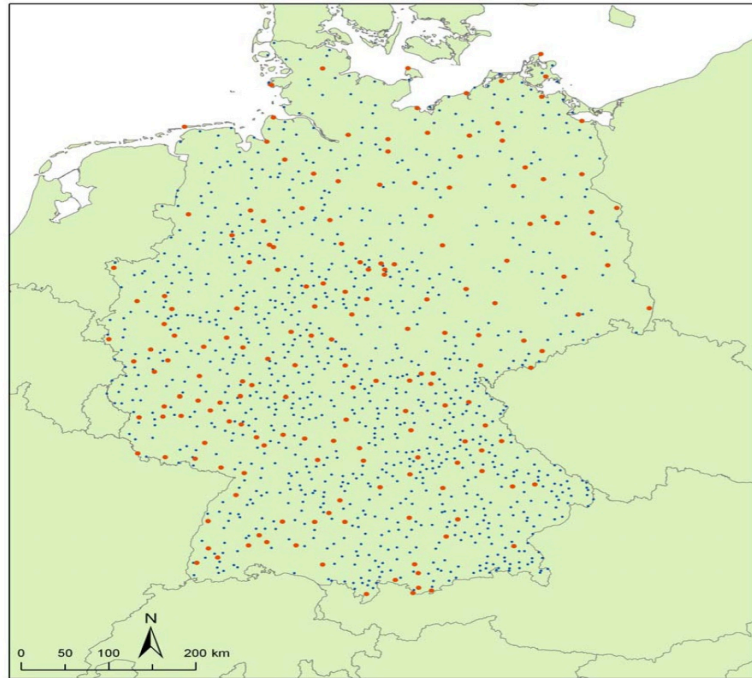


mehr als 10000 Bodenwetterstationen weltweit, die längsten in Mitteleuropa seit ca. 1800

Messnetz des DWD

Synoptische – /Niederschlagsstationen

Meteorologische Station : Potsdam seit 1893

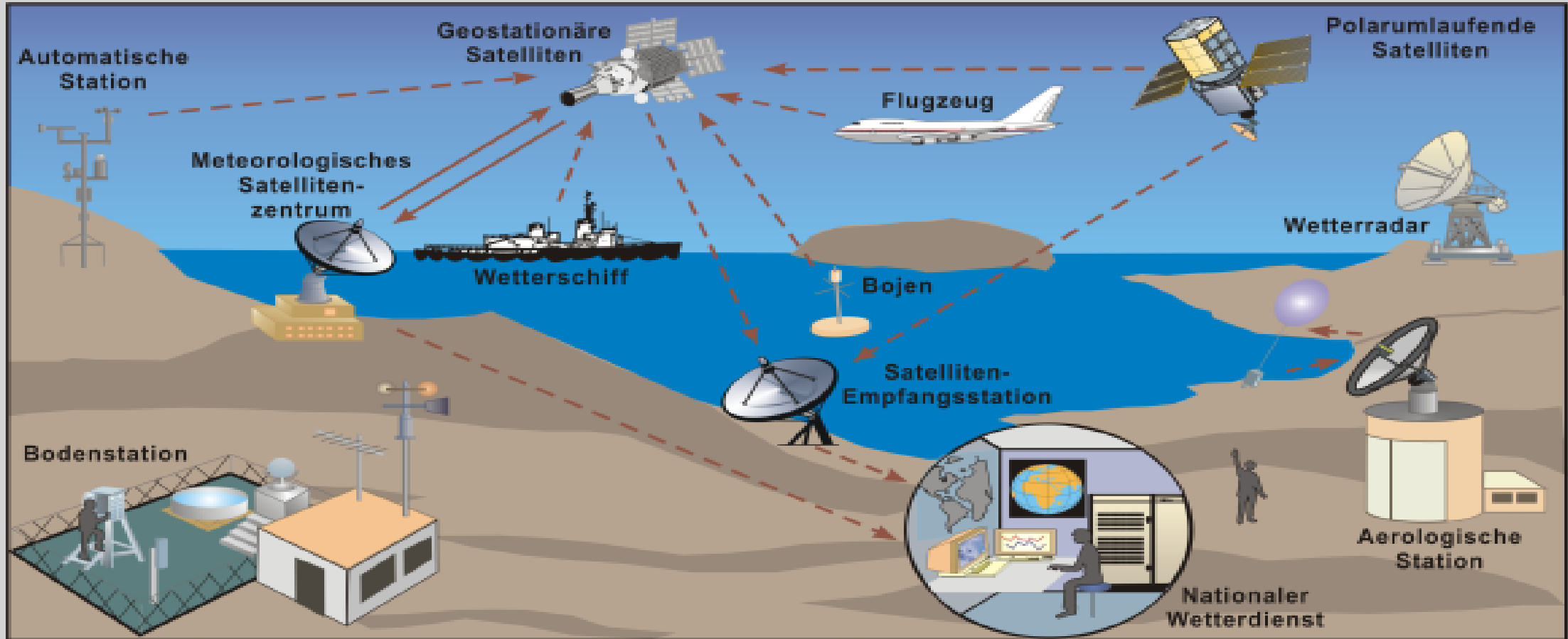


Seit 1961 werden von ca. 220 Klima- und ca. 1000 Niederschlagsstationen tägliche Messdaten erfasst: Potsdam umfasst auch Tiefentemperaturmessungen bis 12 m

Zustandsgrößen in Bodennähe

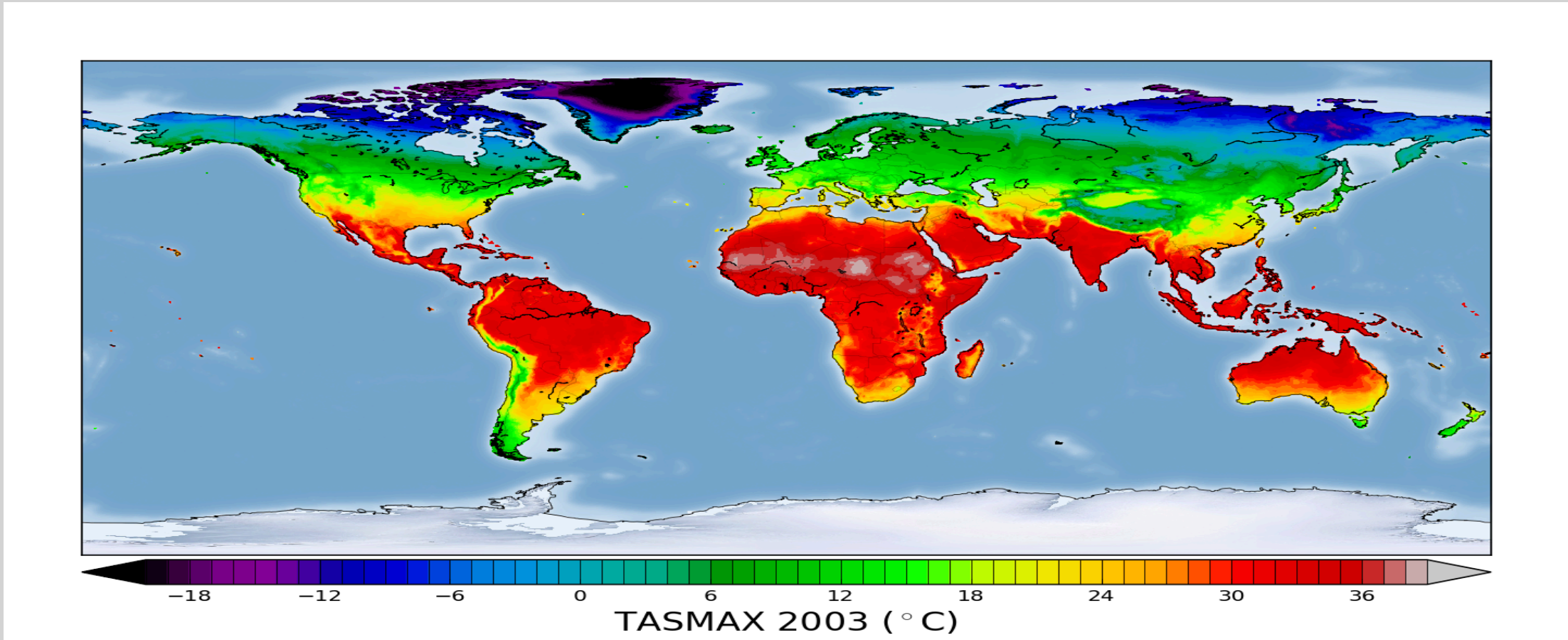
nahe Boden	Einheit	Messgeber
Temperatur (Max./Min.)	°C	Thermometer (Quecksilber, PT100)
Niederschlag	mm	Hellmann (Ø 16 cm, max. 200 mm), Radar
Luftdruck	hPa	Barometer
Relative Luftfeuchte	%	Psychrometer (Trocken- u. Feuchttemp.)
Spezifische Luftfeuchte	kg/kg	abgeleitet
Dampfdruck	hPa	abgeleitet
Taupunkt	°C	abgelietet
Windgeschwindigkeit	m/s	Anemometer (mechanisch o. Ultraschall)
Globalstrahlung	J/cm^2	Pyranometer
Sonnenscheindauer	h	Campbell-Stoke Glaskugel, Photodiode
Bedeckungsgrad	/8	visuell, Kamera

Daten-Assimilation



Prinzip der Echtzeiterfassung von Daten zur Atmosphärenbeobachtung seit 1979

Rasterdaten/Interpolation



Datenprodukte für die Klima- und Klimafolgenforschung auf Gitterpunkten (0.5°x0.5°)

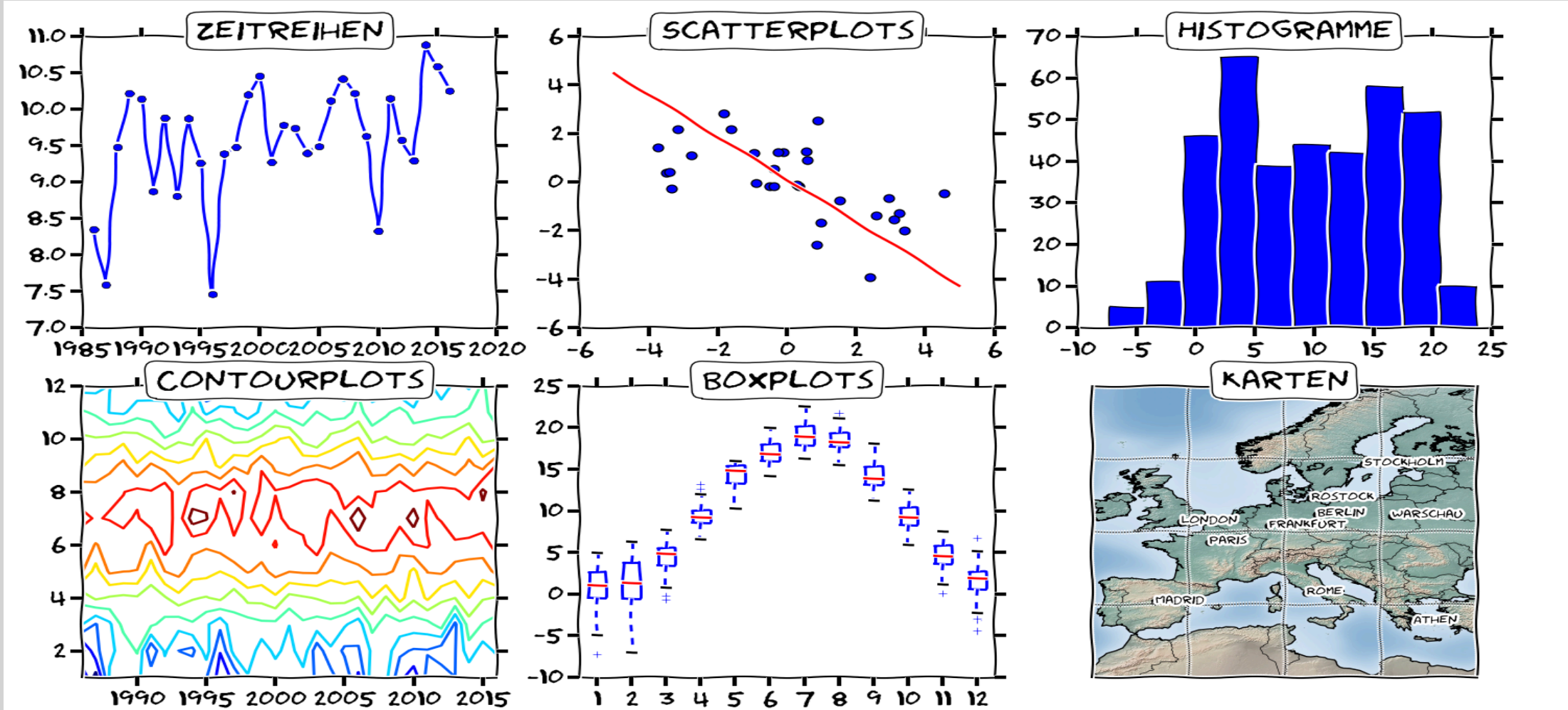
Statistische Kennzahlen

Kennzahlen	Formel	Erläuterung
Zeitreihen	$X(t) \rightarrow X(j, m, d, h)$	Tages- u. Jahresgang, Flukt., Trends
Mittelwert	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_n^i X_i$	auch Erwartungswert
Standardabweichung	$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_n^i (X_i - \bar{X})^2}$	Mittlere Streuung um Mittelwert
Trend	$X(t) = a + b \cdot t + \epsilon$	Least-Square-Regression
Residuen	$\tilde{X}(t) = X(t) - (a + b \cdot t)$	Abweichung vom Trend
Histogramm	$b = [b_1, b_2, \dots, b_n] \rightarrow N_b$	Anzahl von Werten je Klasse b
Perzentile/Extremwerte	$rank(X) = P[X_{min}, \dots, X_{max}]$	$P_0 = X_{min}; P_{50} = Med; P_{100} = X_{max}$
Korrelation	$S_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$	Zusammenhangsanalyse
Gradient	$\nabla_x = \frac{dT}{dx}$	räumliche Änderungen
Spektrum	Fouriertransformation	Amplitude je Schwingung

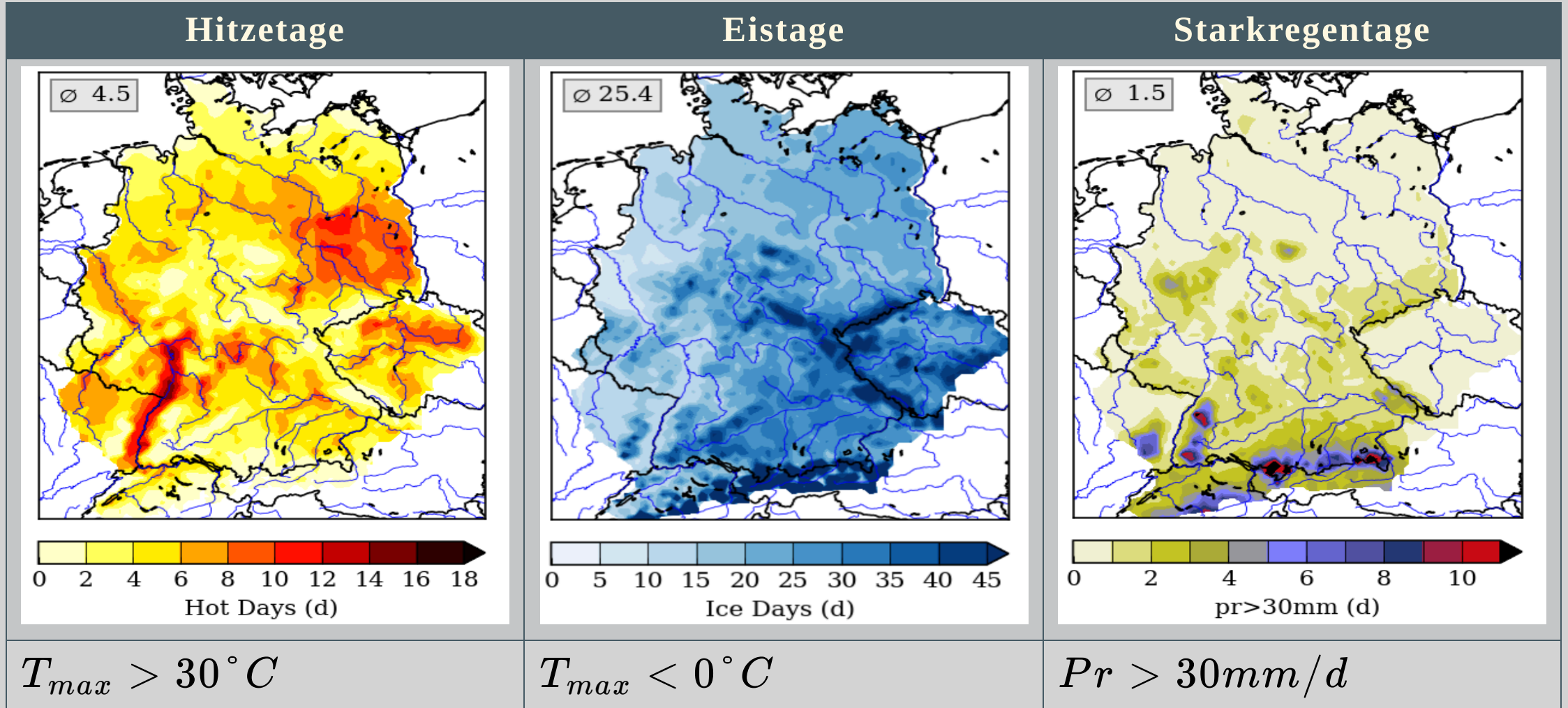
Klimakennzahlen

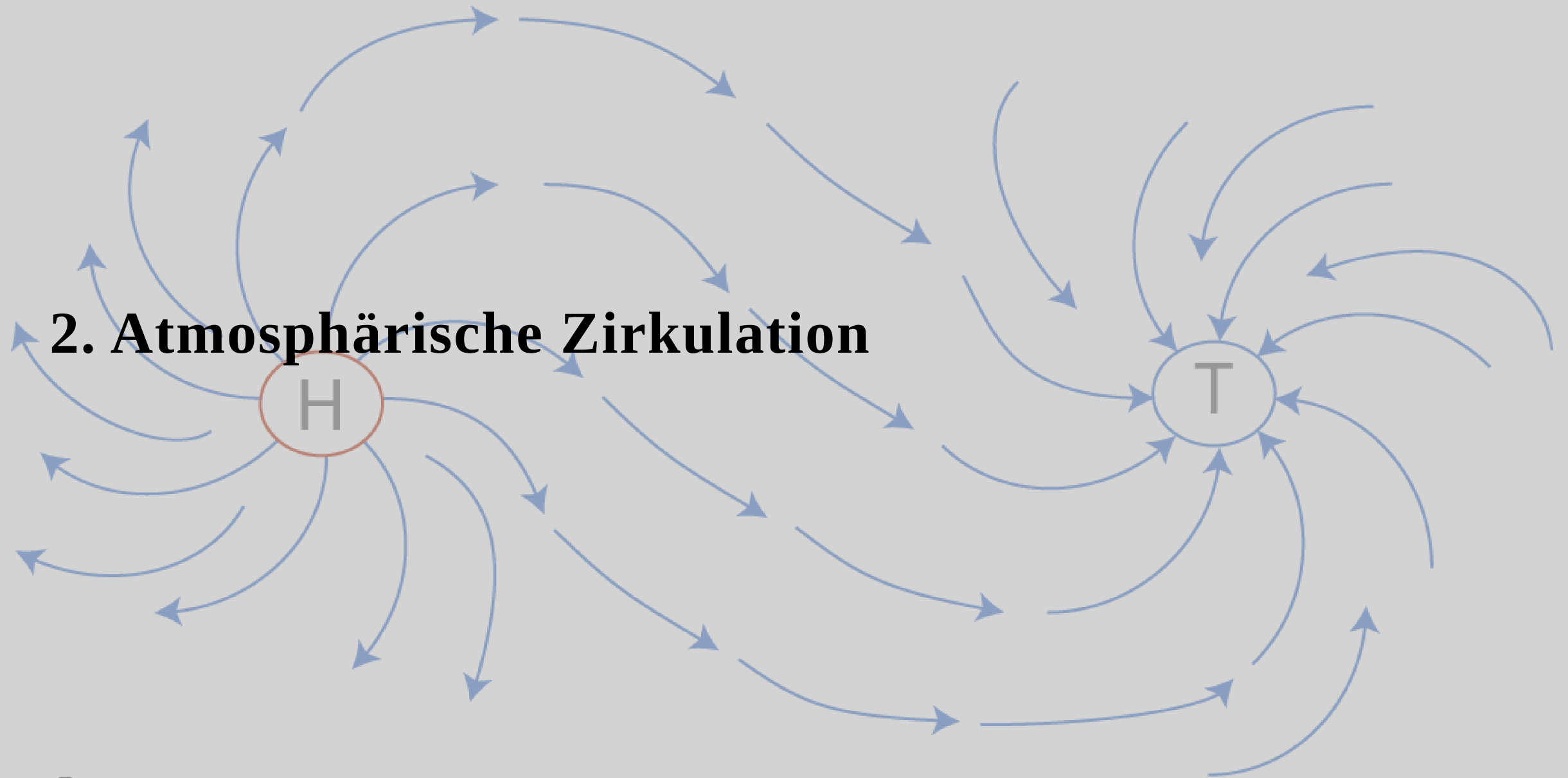
Kennzahlen	Parameter	Erläuterung
Jahres-, Jahreszeit.-, Monatsmittel	Temperatur	mittlerer Zustand
Jahres-, Jahreszeit.-, Monatssumme	Niederschlag	kumulierter Niederschlag
Sommertag	$T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$	Tage mit angenehmer Wärme
heißer Tag	$T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$	Tage mit starker Hitze
Tropennacht	$T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$	Nächte ohne spürbare Abkühlung
Eistag	$T_{max} < 0^{\circ}\text{C}$	Tage mit Frost am Tage
Frosttag	$T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$	Tage mit Nachtfrost
schwüler Tag	$e > 18.8hPa$	Tage mit hohem Dampfdruck
heftiger Starkregentag	$pr > 20mm/d$	Berlin-Tegel: 108,3 mm/d (25.08.2006)
Trockentag	$pr < 1mm/d$	Tag ohne nennenswerten Niederschlag
Großwetterlagen	Zirkulationstypen	subjektive Klassifikation

Darstellungsformen



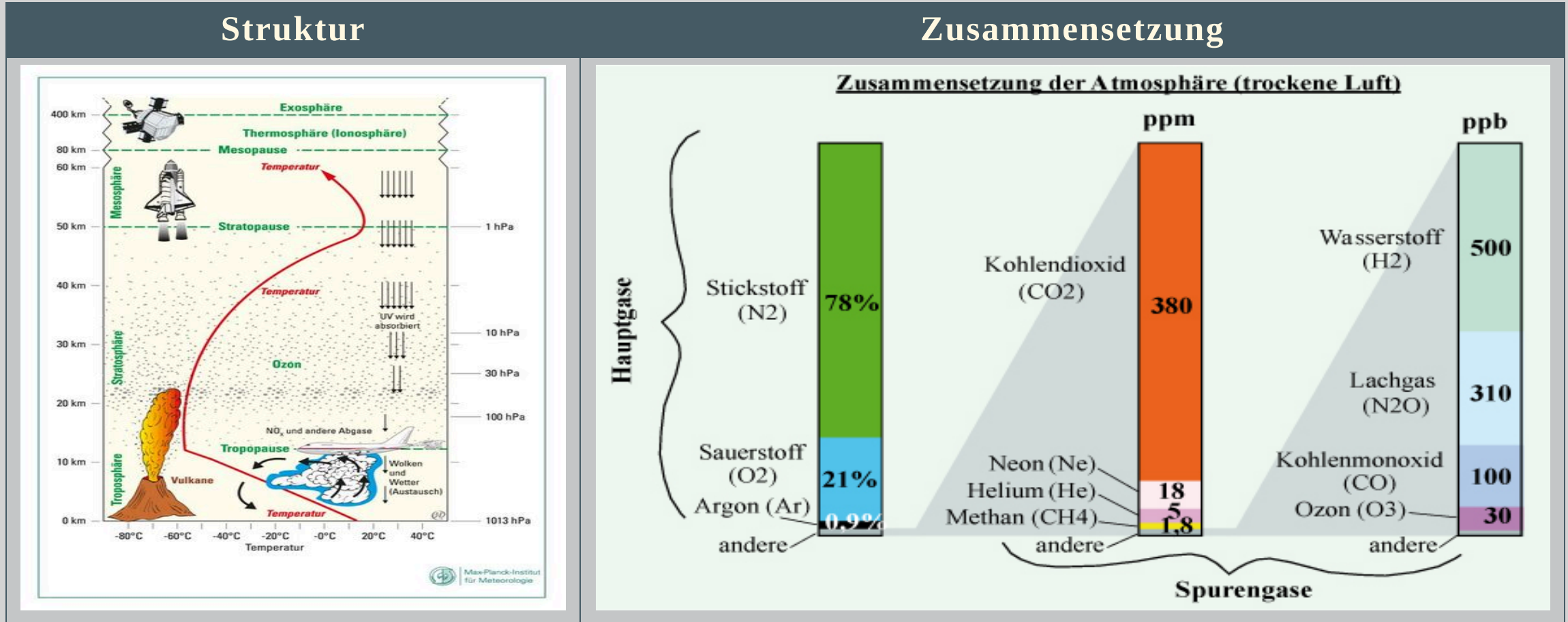
Klimatologien für Deutschland (1971-2000)





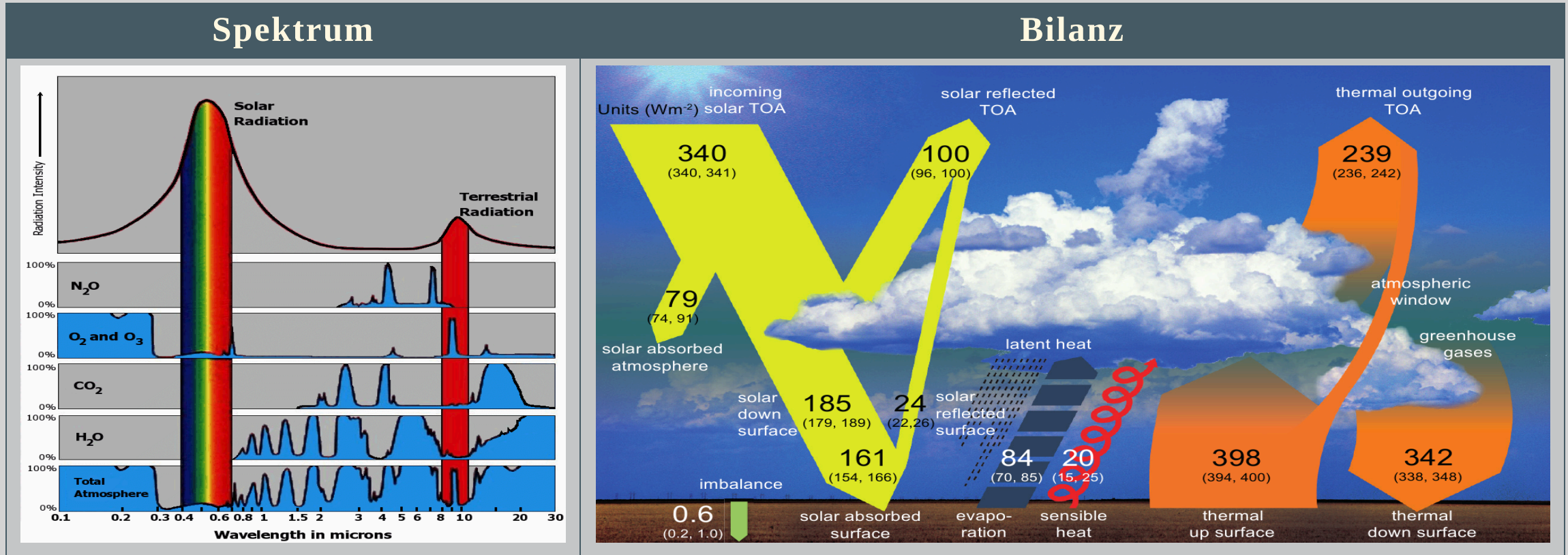
2. Atmosphärische Zirkulation

Struktur der Atmosphäre und Zusammensetzung



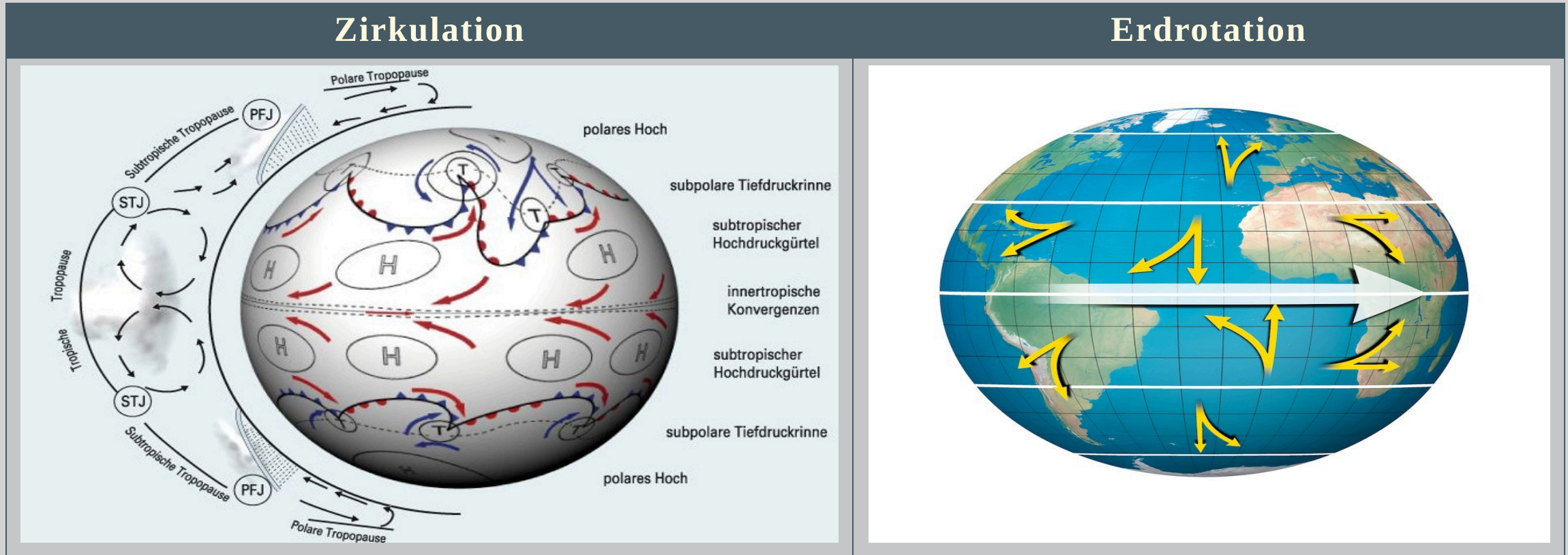
Abnahme der Temperatur in der Troposphäre bis zur Tropopause (ca. 10km). Der Anteil der Spurengase wie CO₂ liegt bei weniger als 1% (400 ppm)

Strahlungshaushalt



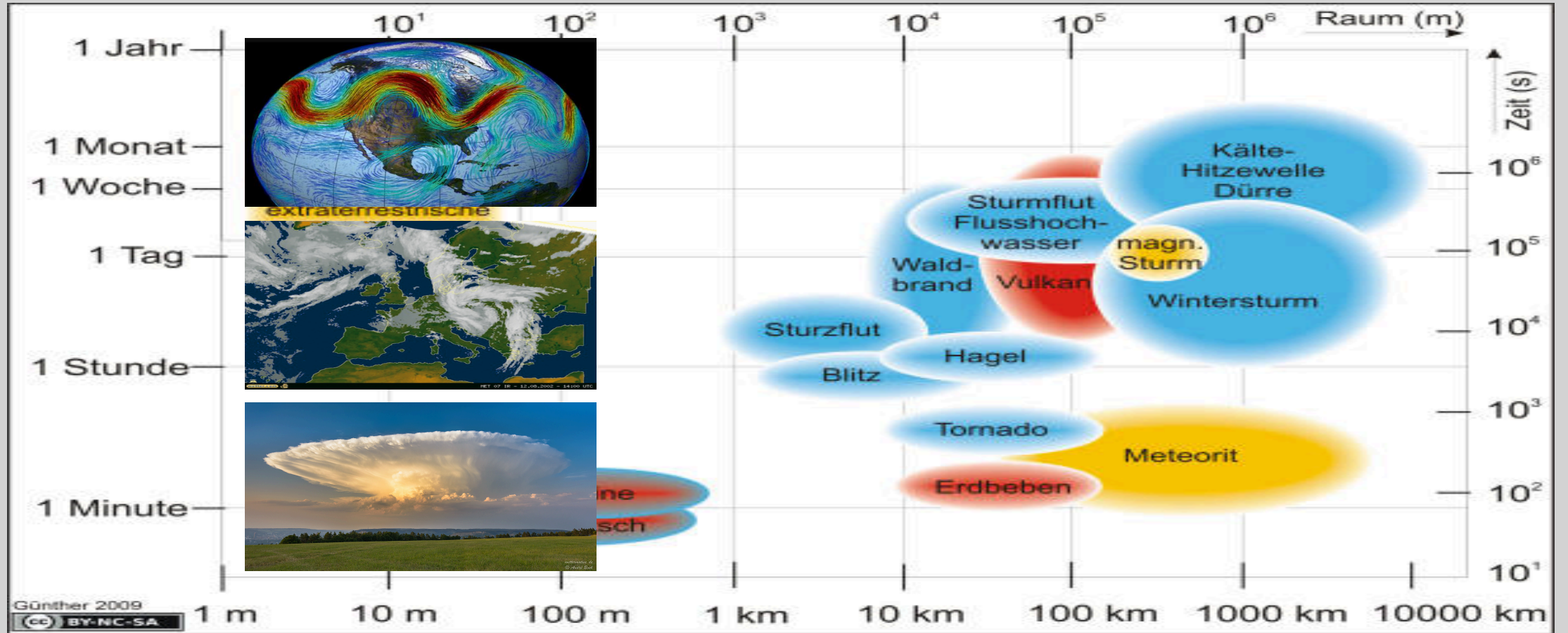
CO₂, H₂O und N₂O besitzen hohe Strahlungswirkung im thermischen Spektralbereich: Treibhauseffekt durch atmosphärische Gegenstrahlung. Ohne diesen, hätte die Erde eine Effektivtemperatur $T_E = -18^\circ\text{C}$.

Allgemeine Zirkulation & Corioliseffekt



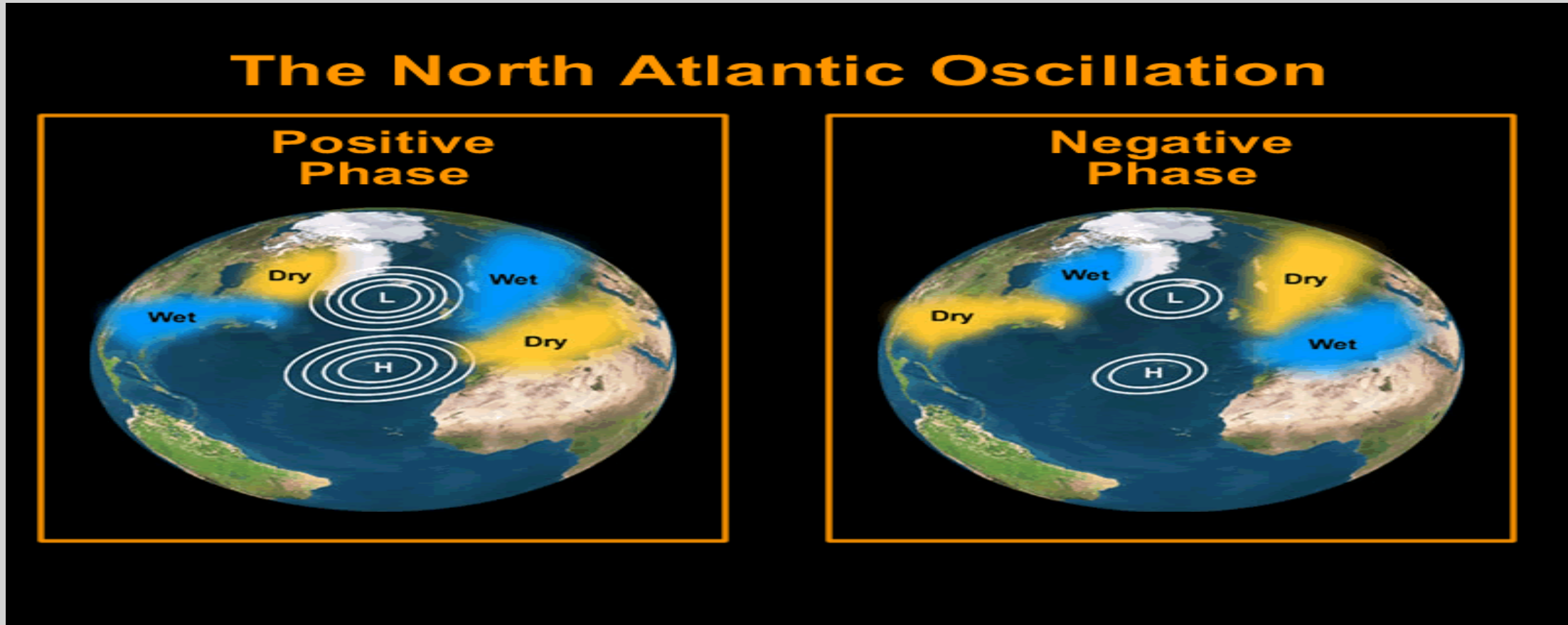
Differentielle Erwärmung der Atmosphäre führt zu Ausgleichsbewegungen: Aufsteigen in den Tropen und Absinken an den Polen. Die Wirkung der Erdrotation bewirkt die Bildung mehrerer Zellen, Starkwindbändern in der Höhe und dem Passatwind am Boden

Räumliche- und zeitliche Skalen



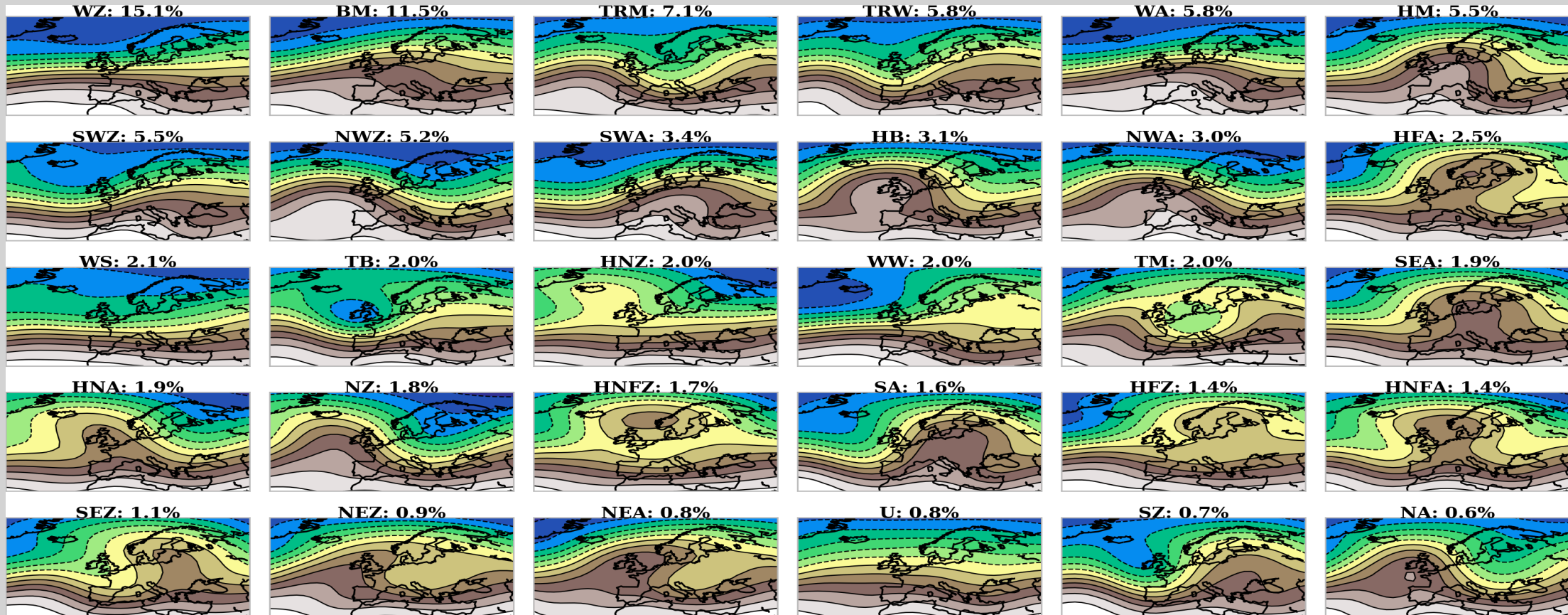
Hitzewellen (~1000km, ~Wochen), Hochwasser (~100km, ~Tage), Gewitter (<10km, Stunden)

Nordatlantische Oszillation (NAO)



*charakterisiert die großräumigen Druckverhältnisse über dem Nordatlantik:
Wetterbestimmend für Mitteleuropa (NAO+ unbeständige Witterung in Mitteleuropa)*

Großwetterlagen über Europa



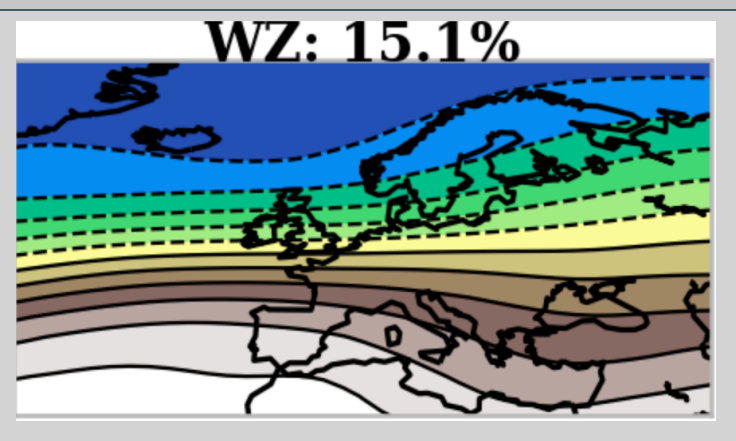
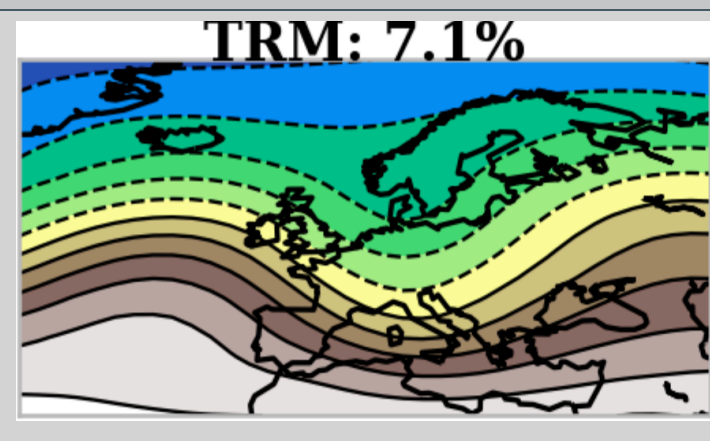
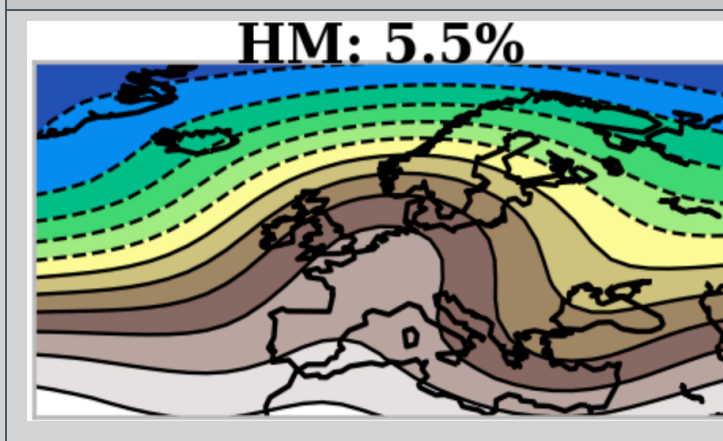
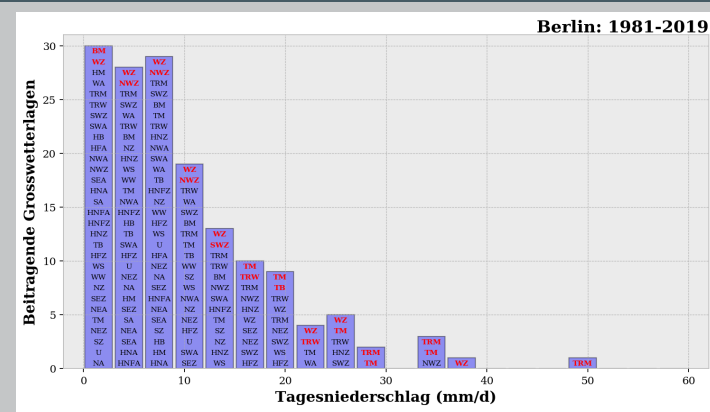
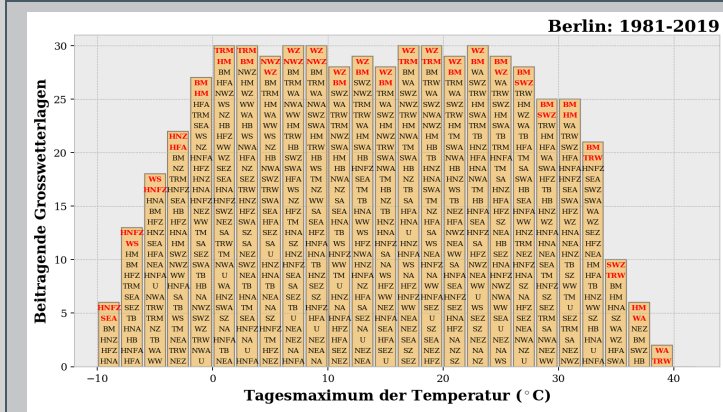
Sie beschreiben mögliche **Formen der Luftströmung**, Zugbahnen und Druckkonstellationen über Europa. Jede Großwetterlage für jeden Ort und zu jeder Jahreszeit mit charakteristischen Witterungsmerkmalen verknüpft.

Kritikalität von Störungsmustern

Temperatur

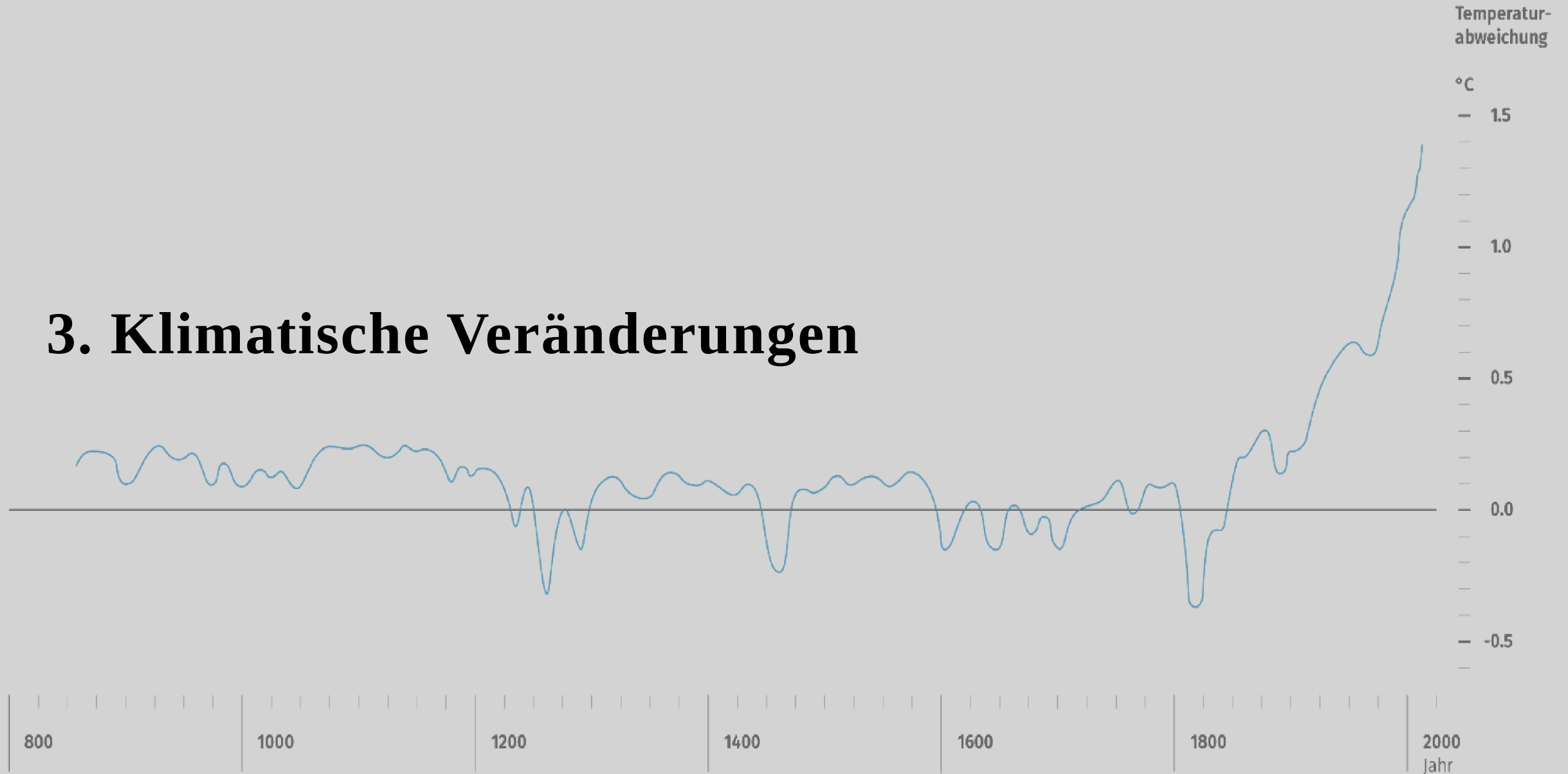
Niederschlag

Windgeschwindigkeit

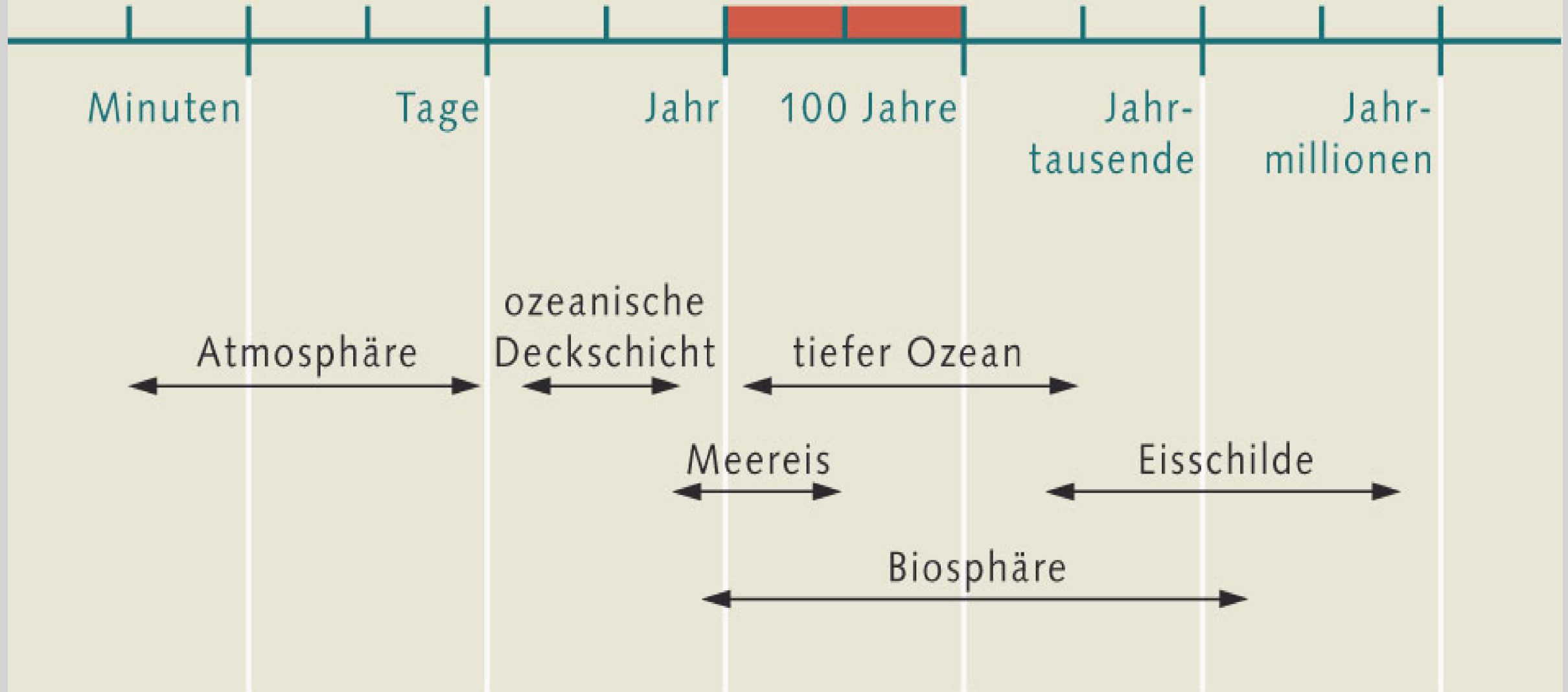


Alle Strömungsmuster können *normales* Wetter aber nur wenige neigen auch zu *Extremwetter*

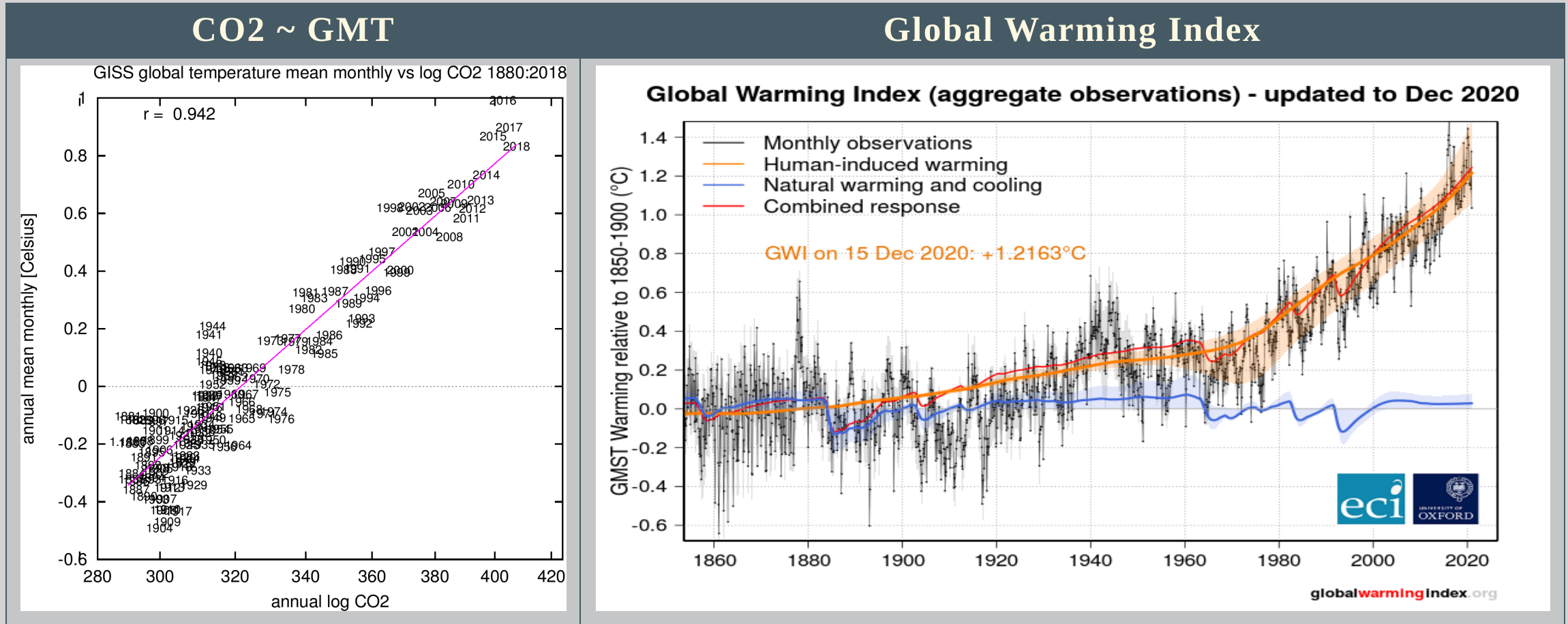
3. Klimatische Veränderungen



Komponenten im Klimasystem

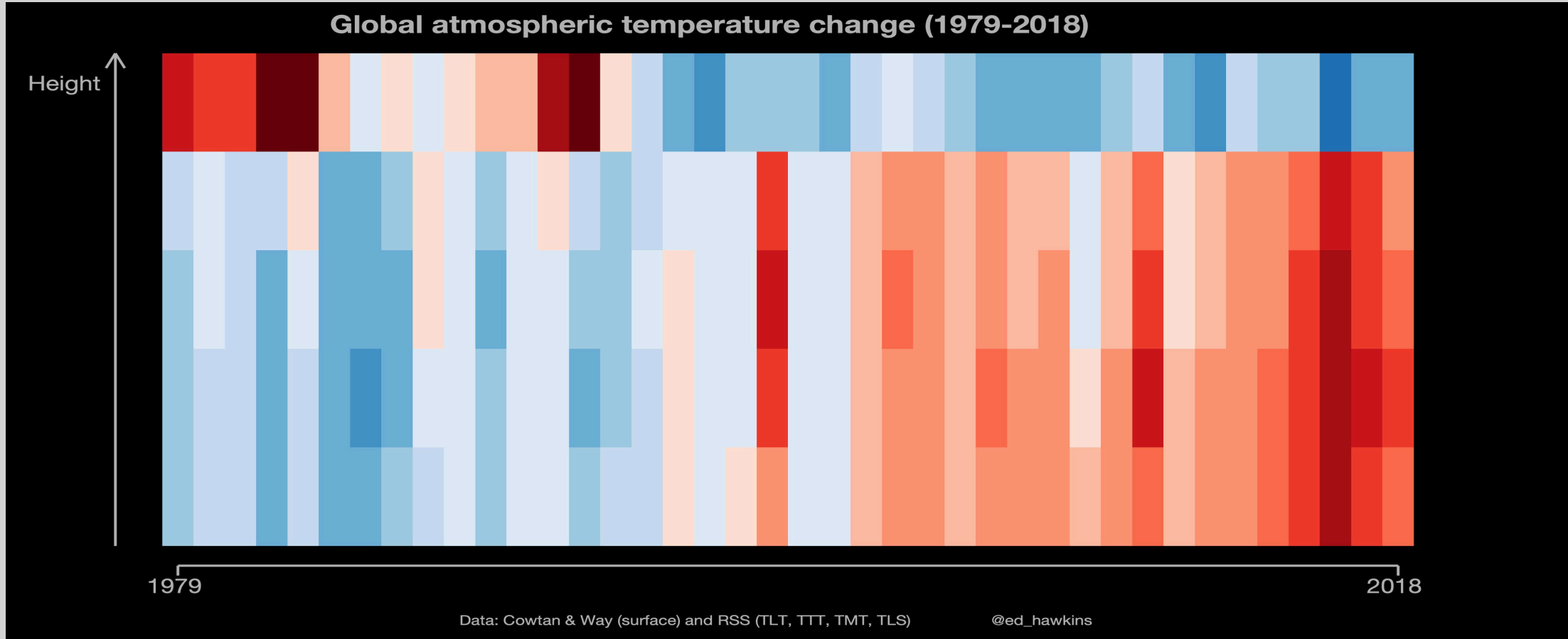


Global Warming Index



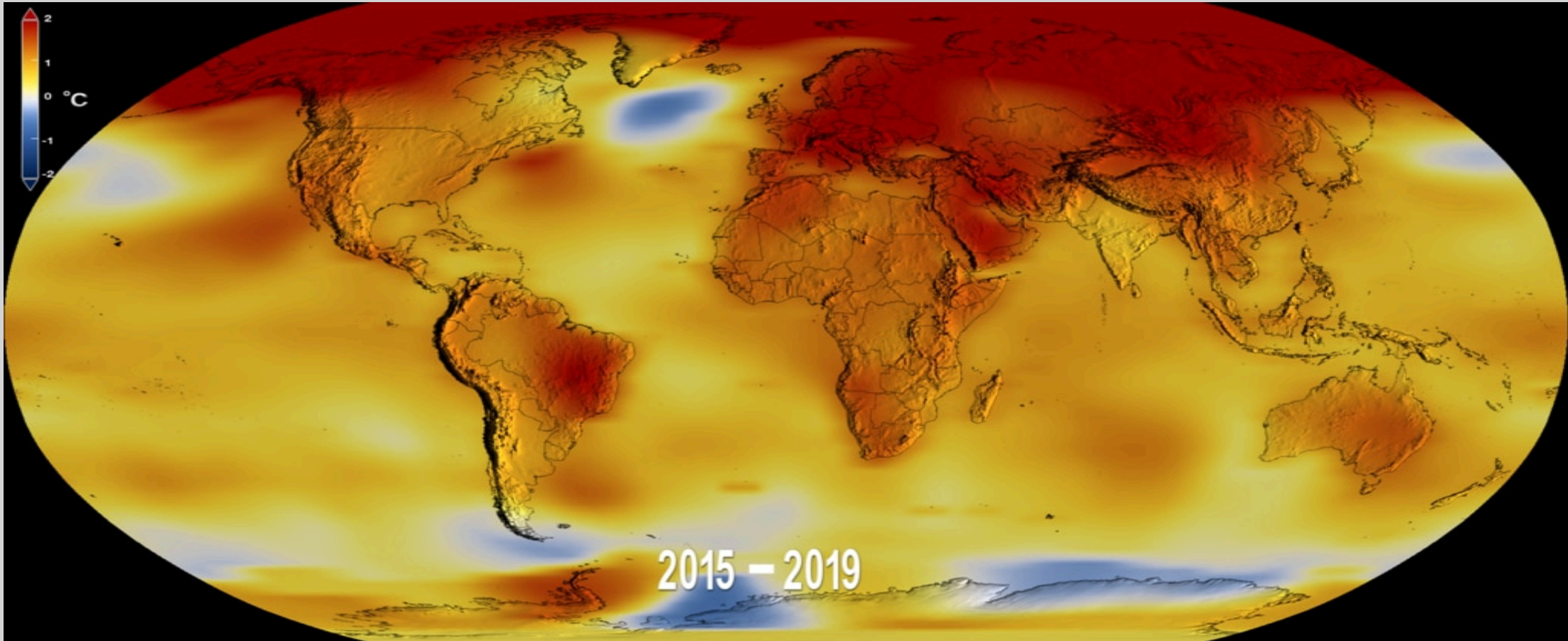
Hoher Zusammenhang zwischen beobachteter Entwicklungen der globalen Mitteltemperatur und der CO2 Konzentration: Aktuell beträgt die globale Erwärmung +1.25°C gegenüber 1850-1900

Signatur des Treibhauseffekts



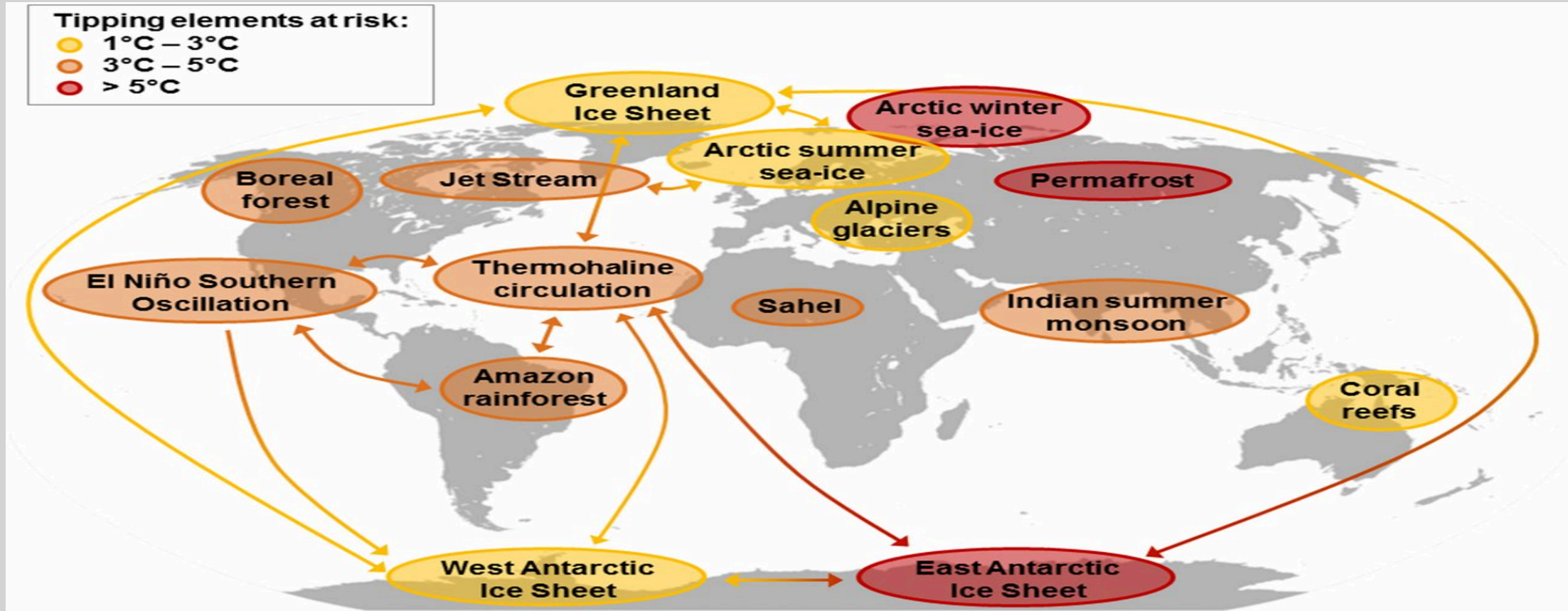
Troposphärische Erwärmung - Stratosphärische Abkühlung - weniger Wärmestrahlung verlässt die Troposphäre

Temperaturanomalie: 2015-2019 vs. 1951-1980



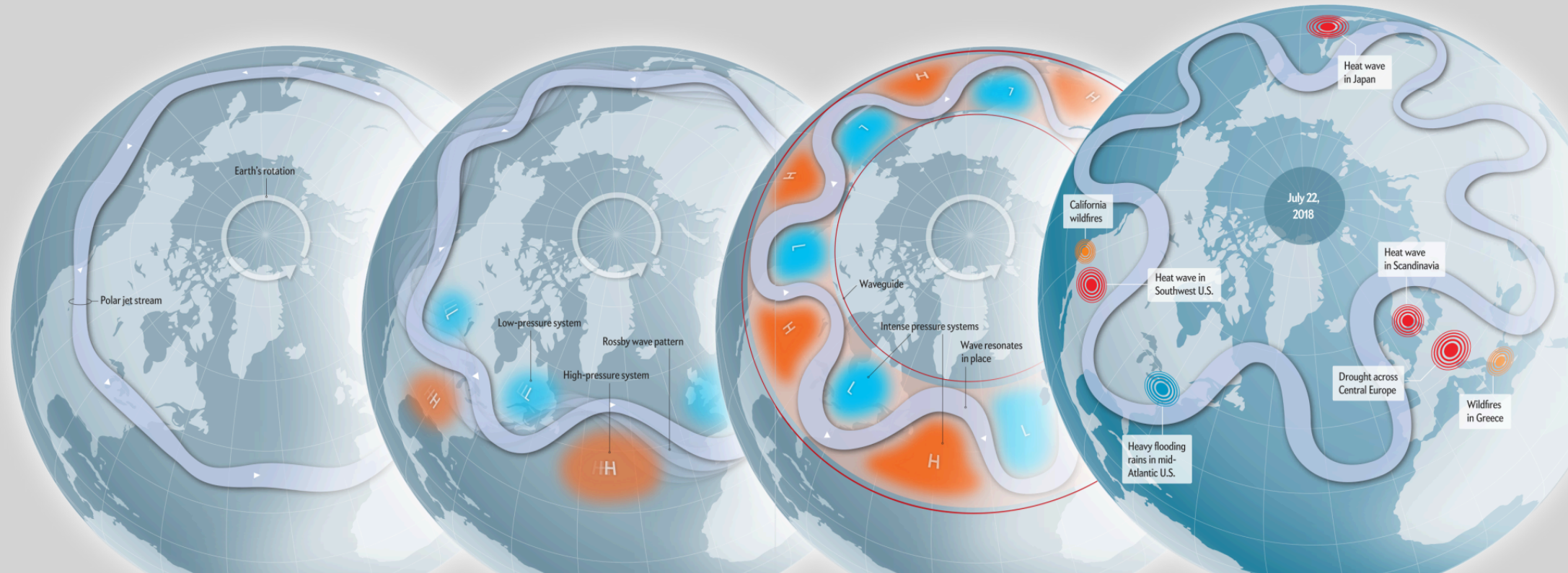
*Kontinente der NH und die Arktis erwärmen sich stärker als im globalen Durchschnitt:
Kälteanomalie im Nordatlantik - Signatur des sich Abschwächenden Golfstroms.*

Kippelemente im Klimasystem



Kippelemente im Klimasystem sind gegenüber einer globalen Erwärmung um mehr als 2 Grad sehr anfällig. Verändern sich diese, hat das massive Folgen auf das Gesamtsystem und dessen Stabilität.

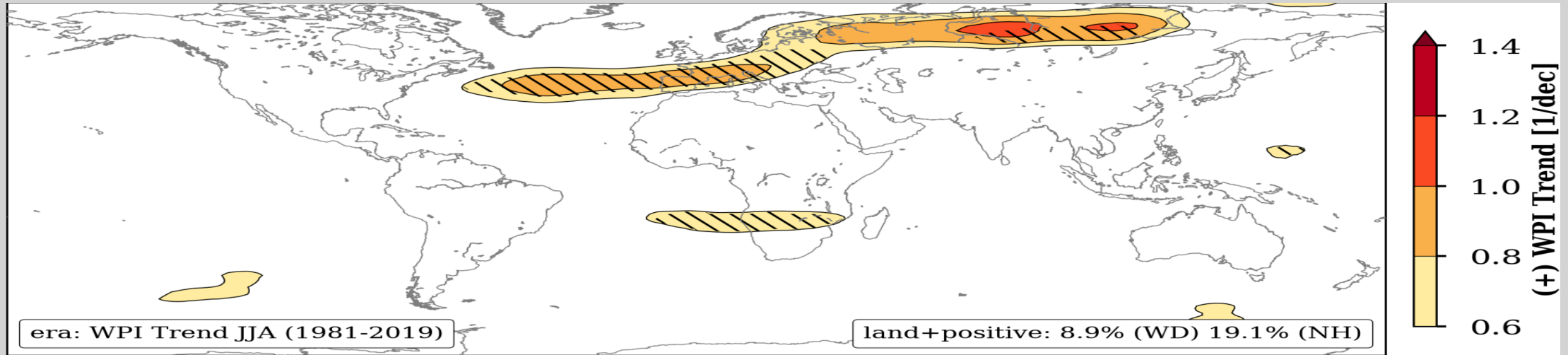
Jetstream



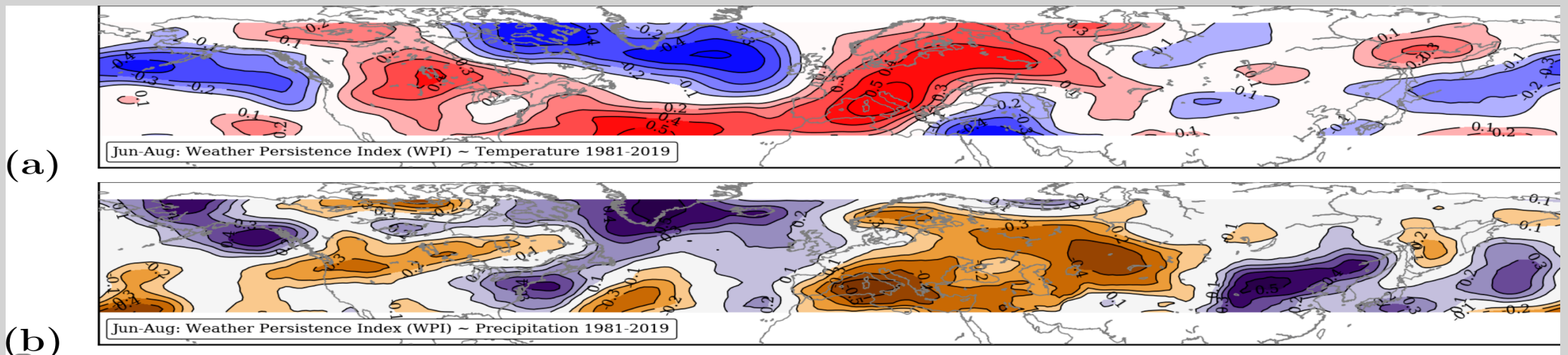
© Scientific American

Im Sommerhalbjahr können derartige Wellenstrukturen an Ort und Stelle verharren. Aus ein paar sonnige Tagen können sich dann Hitzewellen und aus dem erhofften Regen Überschwemmungen entwickeln. (und das zeitgleich an mehreren Orten)

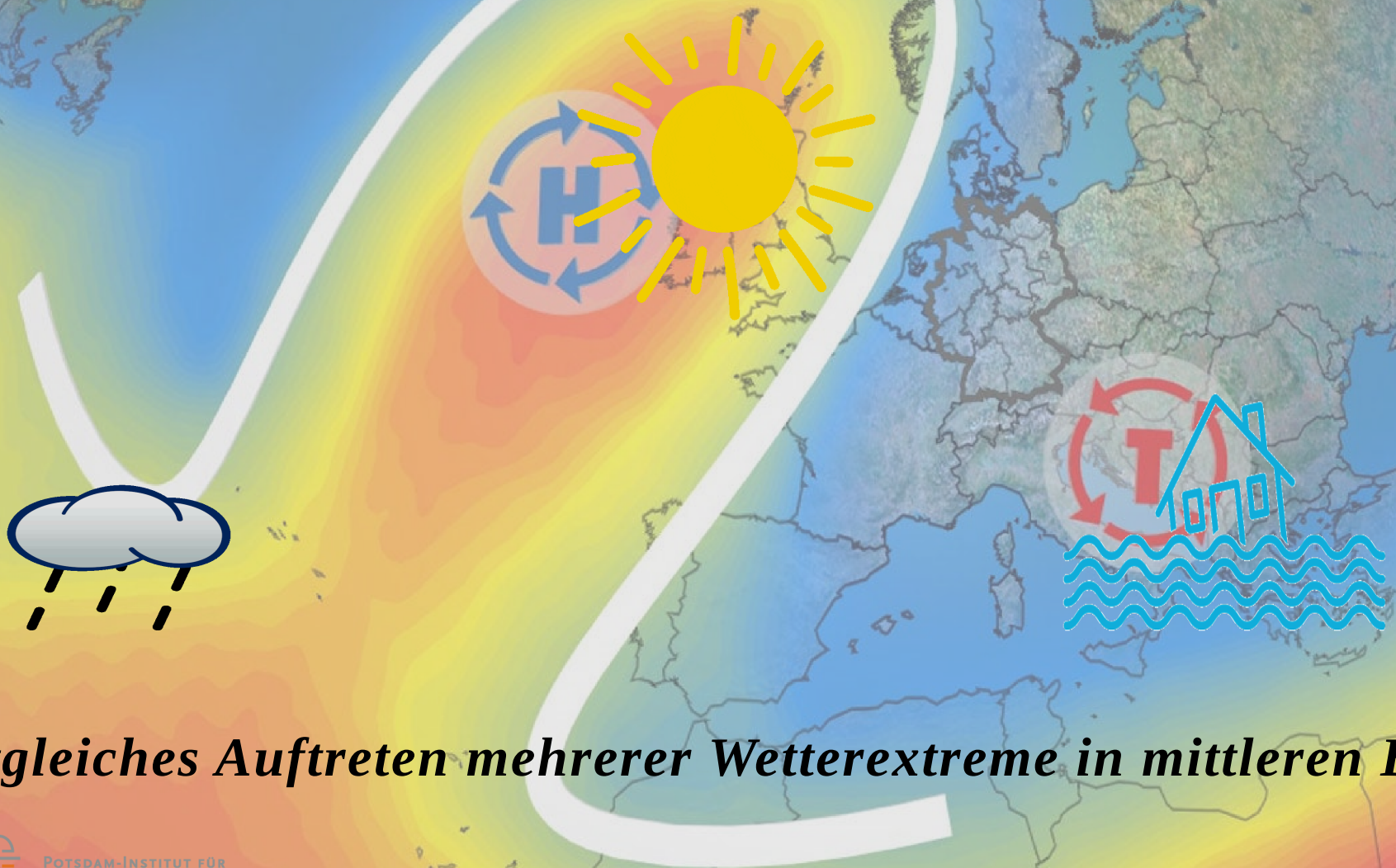
Persistenz von Wetter-/Strömungsmustern



© Hoffmann et al. 2021

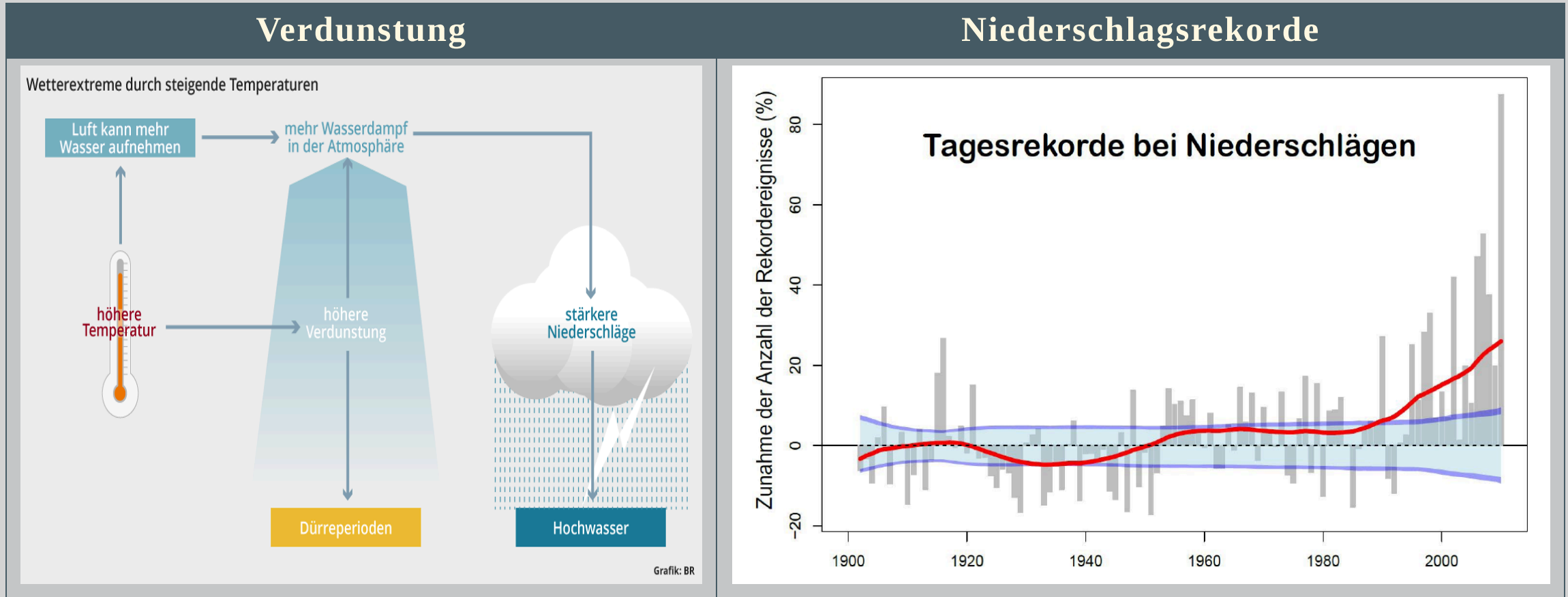


Folge dynamischer Veränderungen



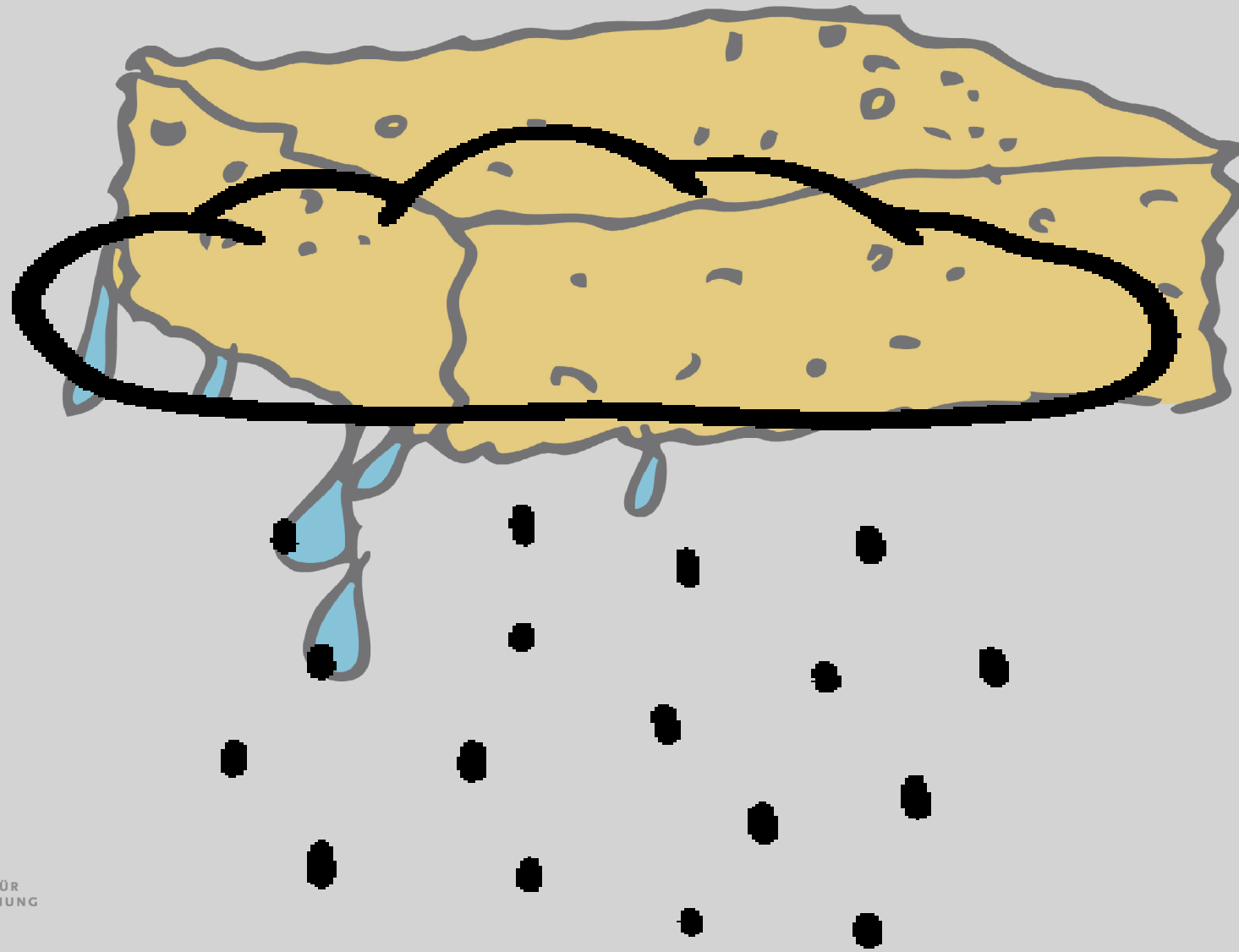
Zeitgleiches Auftreten mehrerer Wetterextreme in mittleren Breiten

Folge thermodynamischer Veränderungen



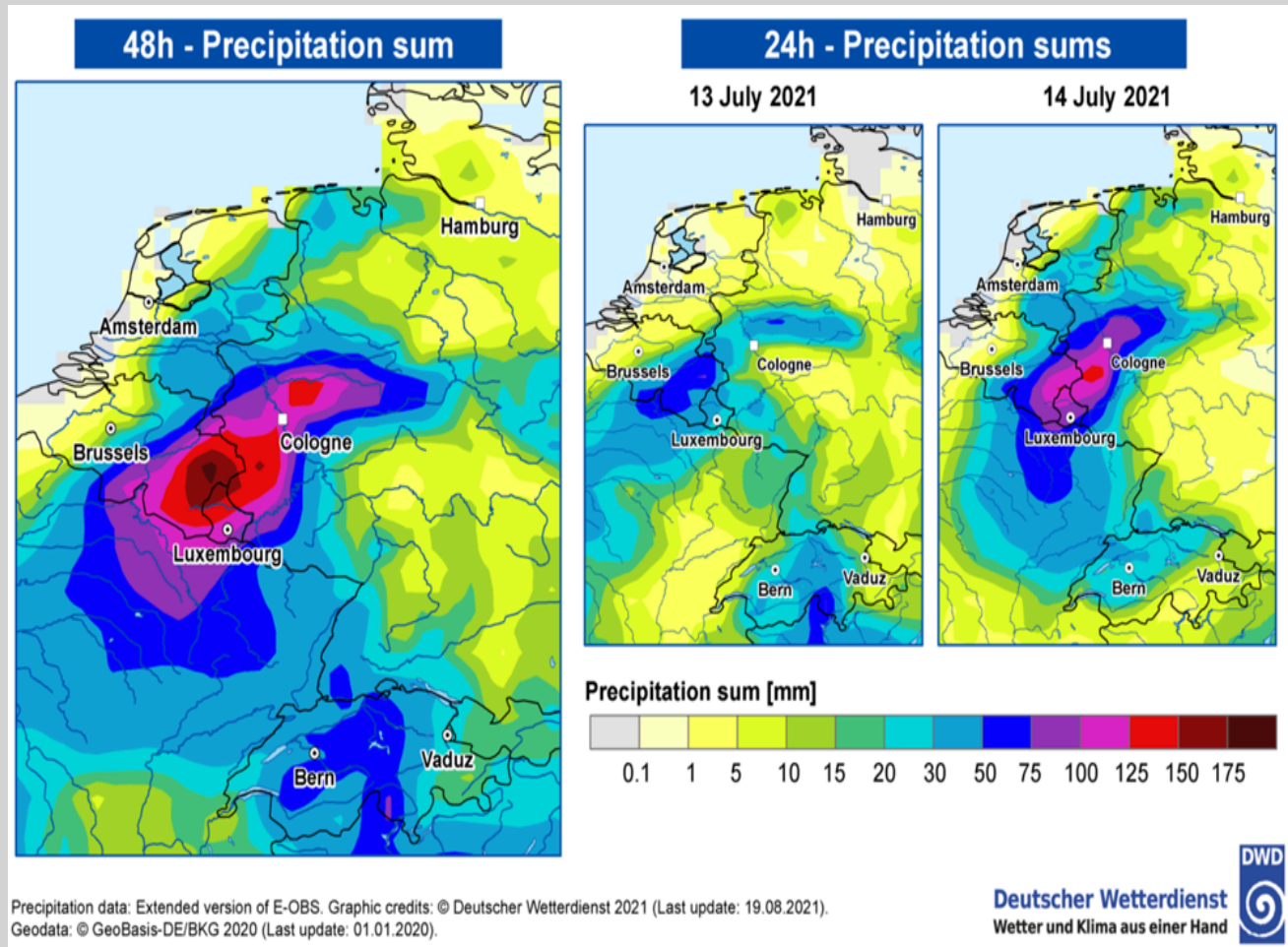
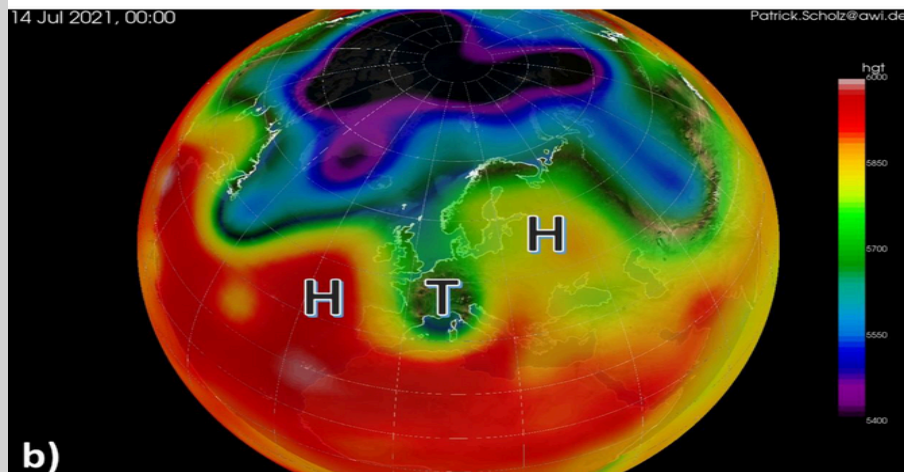
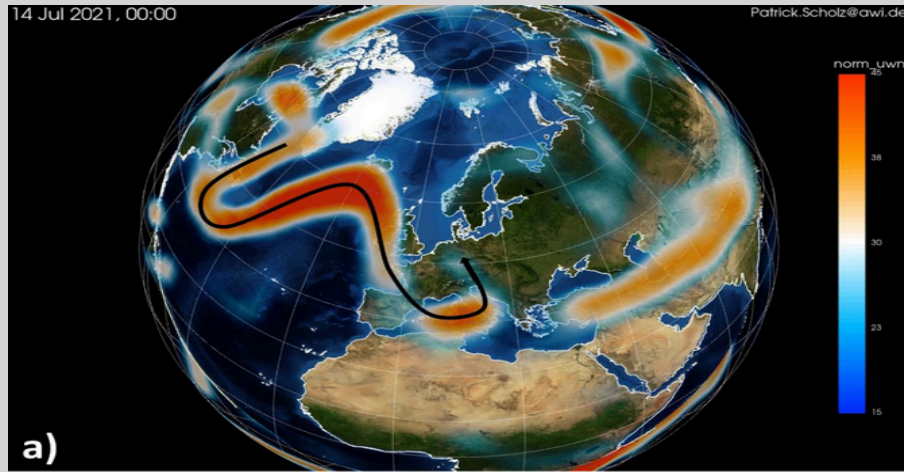
Mit steigenden Temperaturen steigt die Hemmschwelle für flächendeckenden Landregen: Weltweit nehmen Rekordniederschläge zu

Atmosphäre als Schwamm

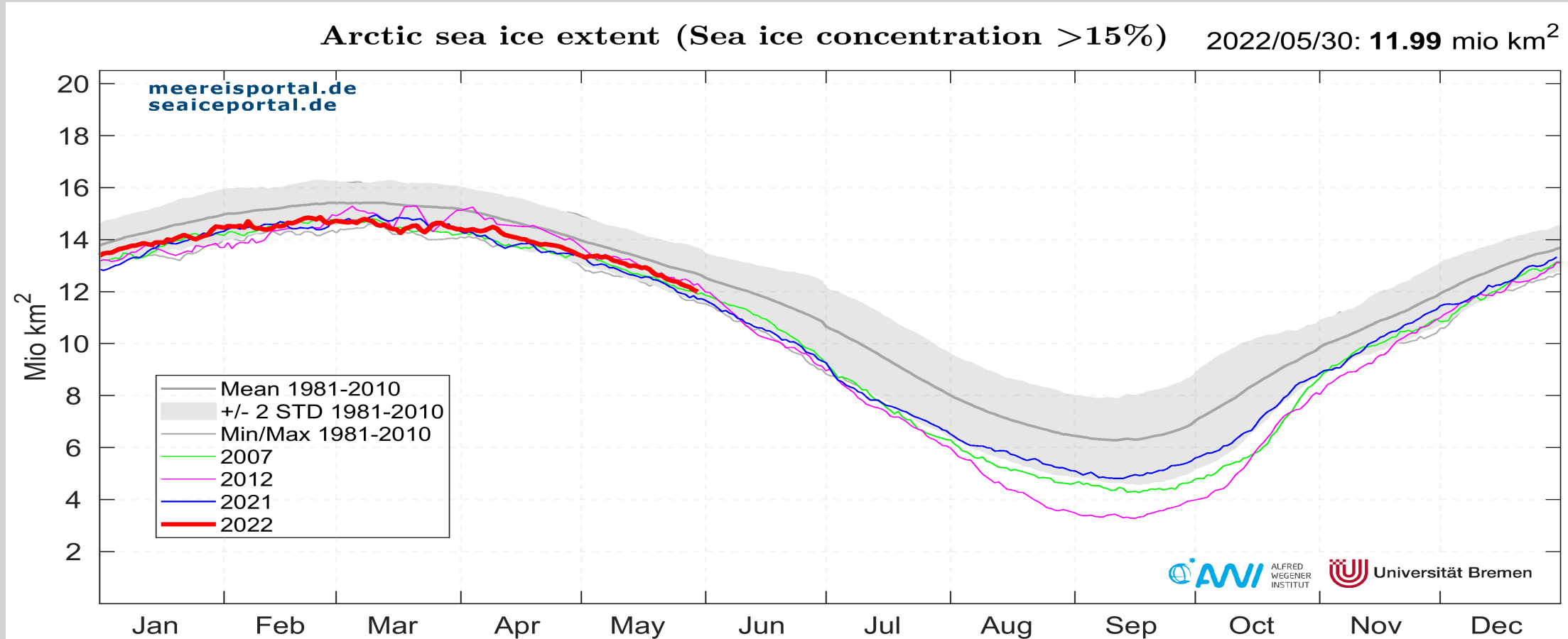


Flutkatastrophe im Juli 2021

Zu viel Regen über kritischem Gelände



Arktisches Meereis



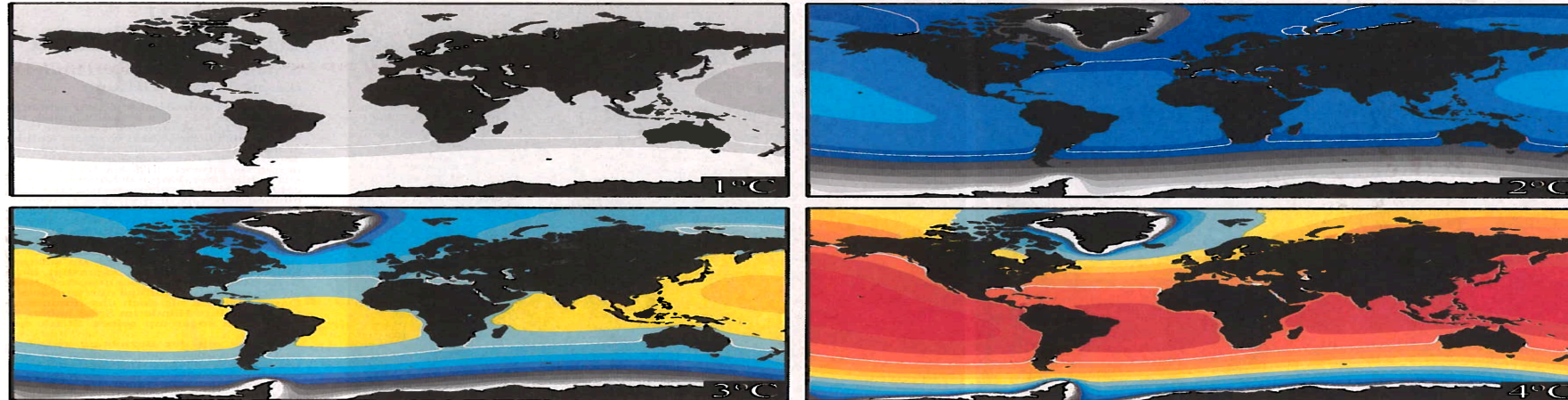
Immer häufiger liegen Jahresverläufe am Unterrand der natürlichen Schwankungsbreite. In wenigen Jahrzehnten könnte es im August-Oktober kein arktisches Meereis mehr geben.

Meeresspiegelanstieg

Natur und Wissenschaft

FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG

NR. 277 · SEITE N1
MITTWOCH, 29. NOVEMBER 2017



Eine Simulation des Autors, in der die langfristigen Folgen der Erwärmung auf den Meeresspiegel studiert wurden. Foto: NK

Der Meeresspiegel steigt, langsam, aber unerbittlich. Und immer schneller. Der vom Menschen mit seinem Ausstoß an Treibhausgasen verursachte Klimawandel heizt auch die Ozeane auf – die Wassermassen dehnen sich dadurch aus, und die Eismassen an den Polen drohen zu schmelzen. Ohne Emissionsreduktionen stiege der Meeresspiegel letztlich um mehr als fünfzig Meter. Aber selbst wenn die Staaten der Welt das Pariser Klimaabkommen einhalten und die globale Erwärmung wie von allen beschlossen auf „deutlich unter zwei Grad“ begrenzen, würde dies über die Jahrhunderte die Ozeane um mehr als fünf Meter steigen lassen. Mehr als 300 Millionen Menschen leben derzeit in Gebieten, die weniger als fünf Meter über dem Meeresspiegel liegen. Müssen wir

Warum nicht das Meer wegpumpen?

Geht der Klimawandel weiter wie bisher, sind alle Küstenmetropolen bedroht – unumkehrbar. Ein Pegelanstieg um fünf Meter könnte dann vielleicht nur mit Rieserpumpen auf der Antarktis verhindert werden.

Von Anders Levermann

ten bewegende Teil im gesamten Klimasystem der Erde. Der Wasserkreislauf in der Atmosphäre ist hier viel langsamer als etwa in der Sahara, wo Hitze zu starker Verdampfung und einem immensen Wasserkreislauf führen würde. Und: Die Antarktis ist die windigste Region der Erde. Auch wenn es enorme technologische Anstrengungen brauchte, um tatsächlich Windkraftanlagen für die Antarktis zu bauen, so könnte man den für das Weggumpen des Meeresspiegels nötigen Strom wahrscheinlich mit erneuerbaren Energien lokal bereitstellen.

Ist das nicht alles viel zu teuer? Mit den wirtschaftlichen Kosten ist es immer so eine Sache. Irgendjemand bezahlt das Geld, und irgendjemand anderer bekommt es. Ein Projekt dieser Größenordnung müsste von den Industriestaaten bezahlt werden, die den Klimawandel verur-

Exopessimismus

Es ist ein Wechselbad der Gefühle, dem diejenigen momentan ausgesetzt sind, die von der baldigen Entdeckung außerirdischen Lebens träumen. Unbestreitbar. Das Jahr 2017 war eines der Superlative für die Suche nach erdähnlichen Lebensräumen. Eine vermeintliche Sensation jagte die nächste. Trappist-1: der Zwergstern mit den sieben Planeten, LHS 1140 b: der „vielversprechendste“ Kandidat für Leben im All, Proxima Centauri: Planetensystem unseres nächsten Nachbarn und schließlich Ross 128 b: neue Hoffnung für erdnahe Lebensfreundlichkeit. Doch dann wird man in der aktuellen Ausgabe des Journals „Nature“ mit der Einschätzung eines professionellen Planetenjähgers konfrontiert (doi: 10.1038/nature.2017.23023): „Steve Desch kann die Zukunft der Exoplanetenforschung sehen, und sie ist nicht schön.“ Wir hatten das Gegenteil erwartet, doch der Grund für diese niederschmetternde Analyse ist simpel: Vielleicht jagen wir mit unserer aktuellen Fixierung auf die Suche nach flüssigem Wasser im All einer völlig falschen Idee hinterher. Denn Wasser allein mag für die Entstehung von Leben zu wenig sein. Leben – wie wir es kennen – braucht Nährstoffe, die wiederum aus Gestein ins Meer ausgewaschen werden. Die Kombination von Wasser und Land ist also vonnöten oder ganz allgemein gesagt: die richtige Chemie. Die allerdings wird sich kaum erschöpfend anhand der Studien planetarer Atmosphären bestimmen lassen, wie sie von 2019 an mit dem James-Webb-Weltraumteleskop möglich sein werden. Und was nun? Wir müssen uns wohl gedulden, wenn wir den Astronomen Glauben schenken. Die meisten Teilnehmer der jüngsten Exoplanetenkonferenz haben sich für „Nature“, dass wir fremdes Leben vor 2050 finden werden. Aber – so will man einwenden – vielleicht gibt es ja doch schon viel früher fremdes Leben in unserem eigenen Sonnensystem zu entdecken. Primitives zumindest. Der Mars zum Beispiel. Da gibt es ja Gerölle zur Genüge. Und über flüssiges Wasser wurde in den vergangenen Jahren angesichts dunkel erscheinender Rillen und Linien im Marsand auch spekuliert. Doch hier kommt gleich die nächste Enttäuschung: Die Spuren weisen wohl doch nicht auf Wasser, sondern auf fließenden Sand hin, wie Forscher um Colin M. Dundas in „Nature Geoscience“ berichten. Die Steigungen der Dünen, bei denen die Flussspuren en-

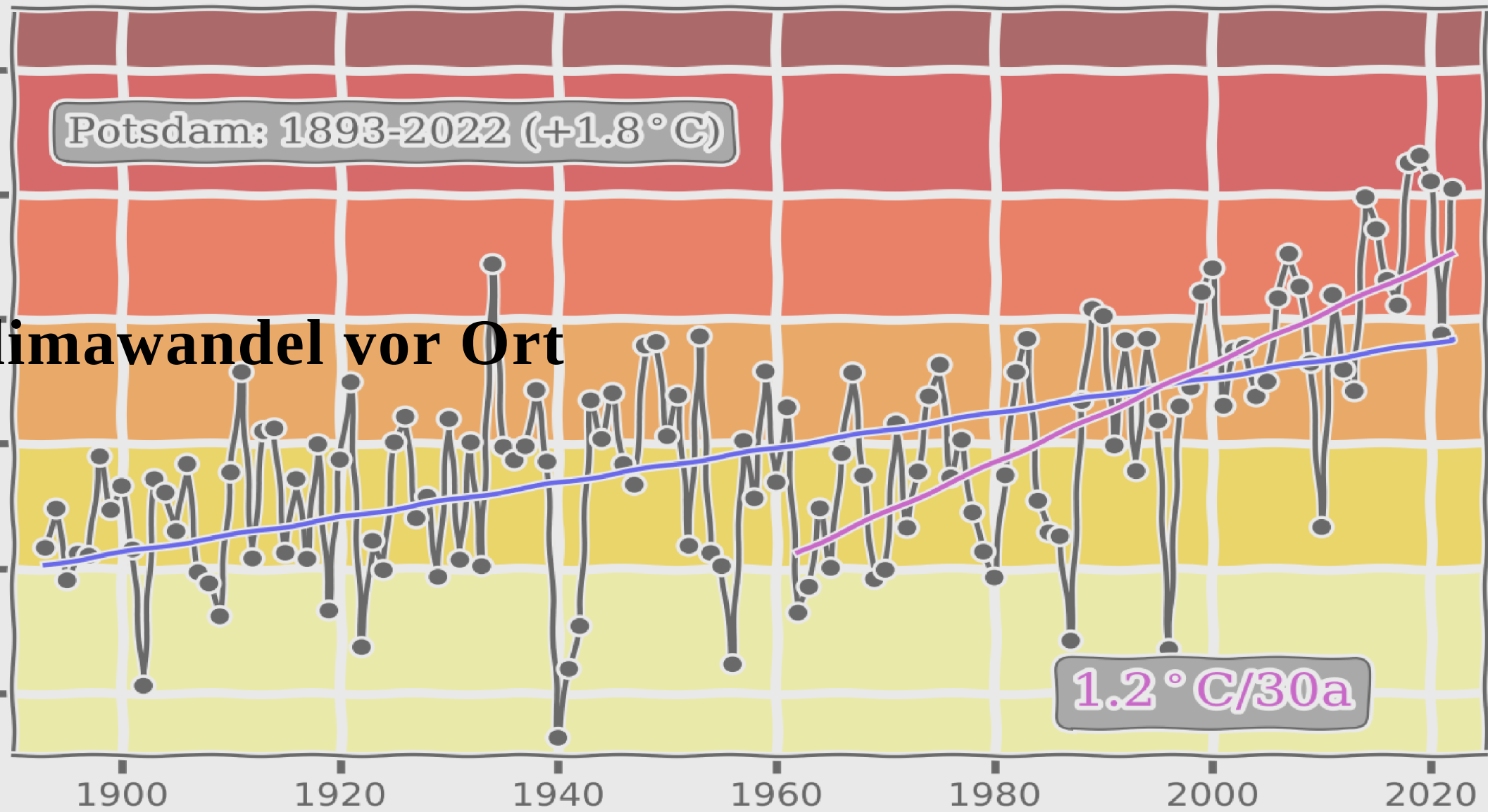
Langfristige Stabilisierung des Klima mit Folgen für den Meeresspiegelanstieg: +1°C (ca. +2m), +2°C (ca. +5m), +4°C (ca. 10m)

Temperatur (°C)

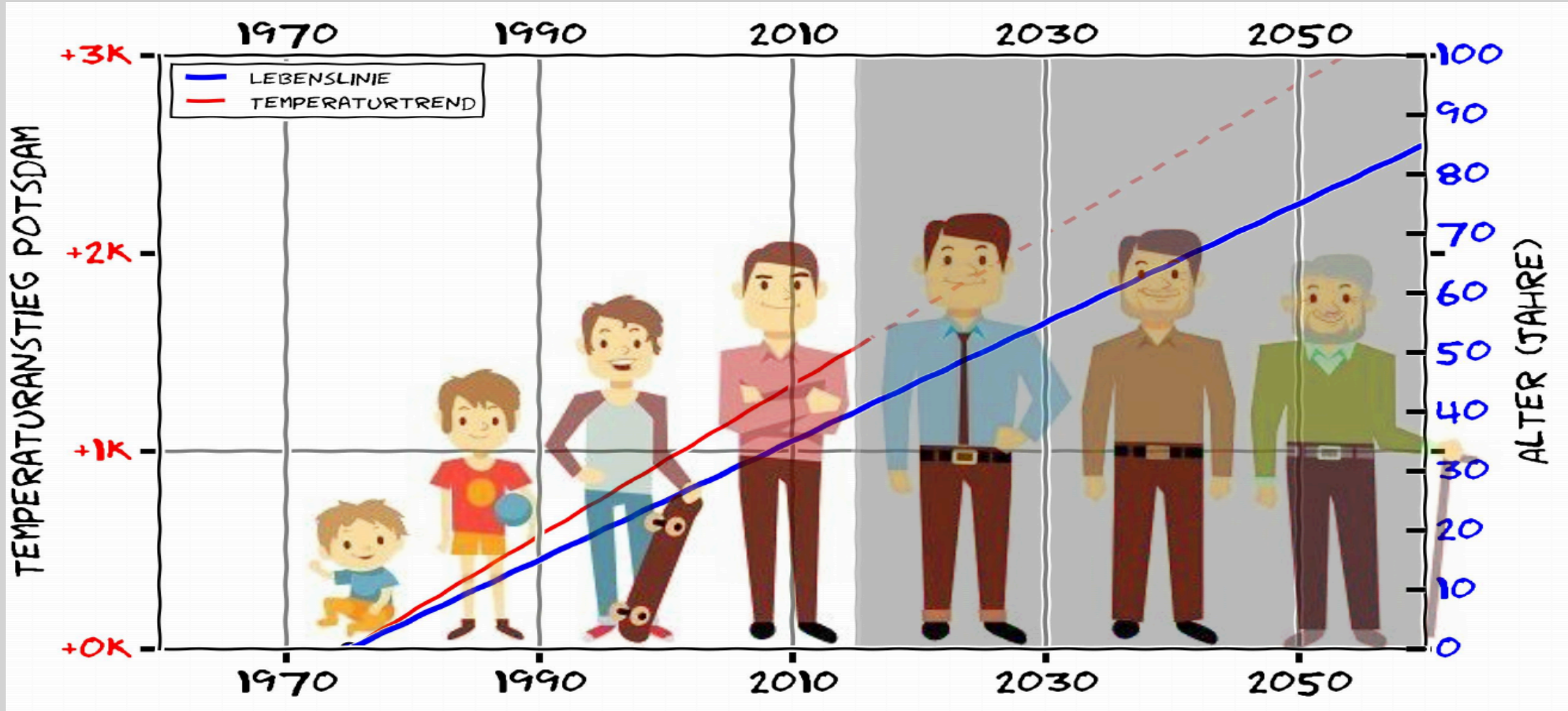
4. Klimawandel vor Ort

Potsdam: 1893-2022 (+1.8°C)

1.2°C/30a

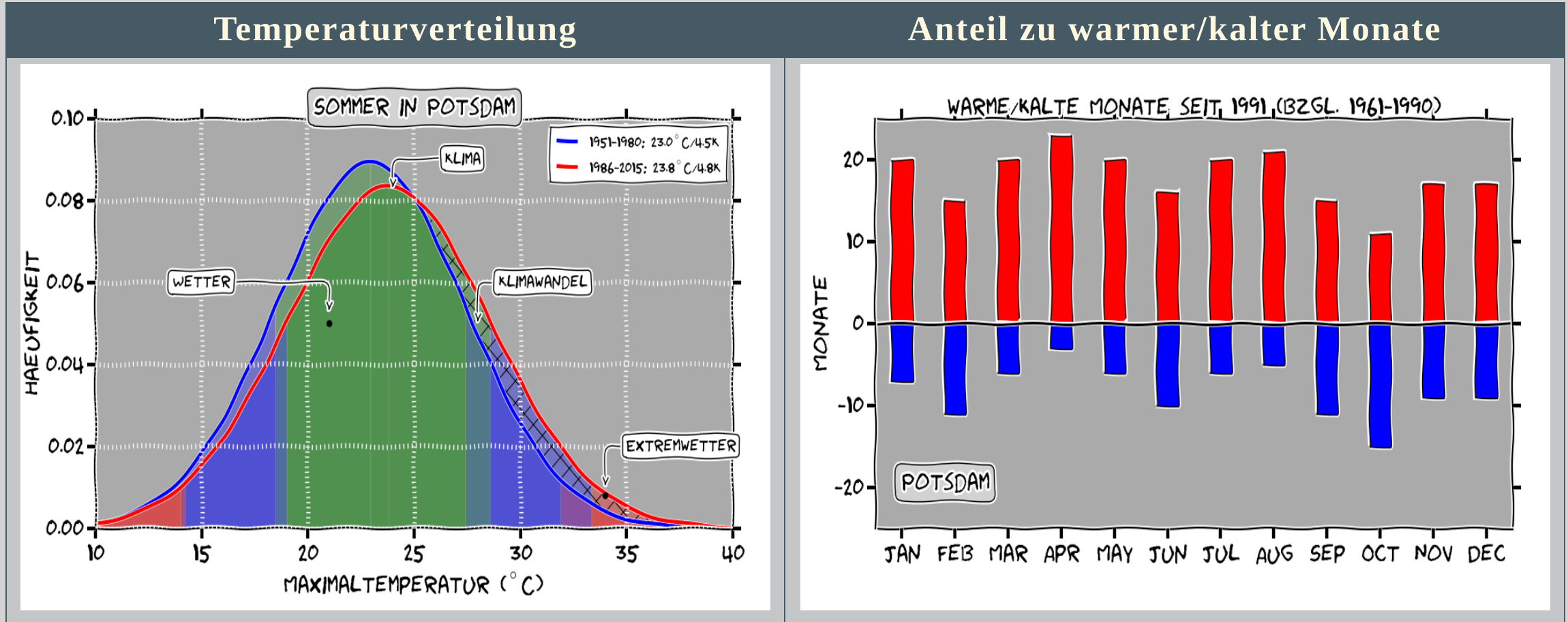


Temperaturtrend vs Lebenslinie



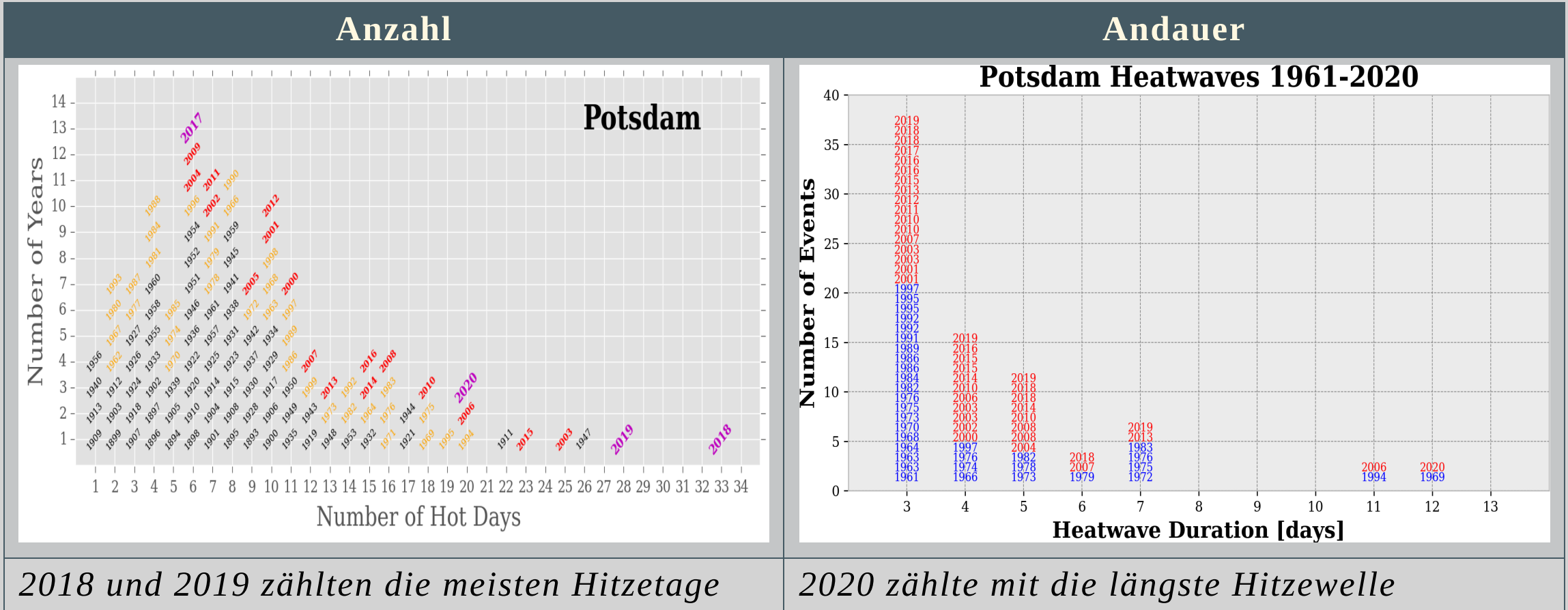
© Hoffmann, 2017

Verteilung und Anomalien

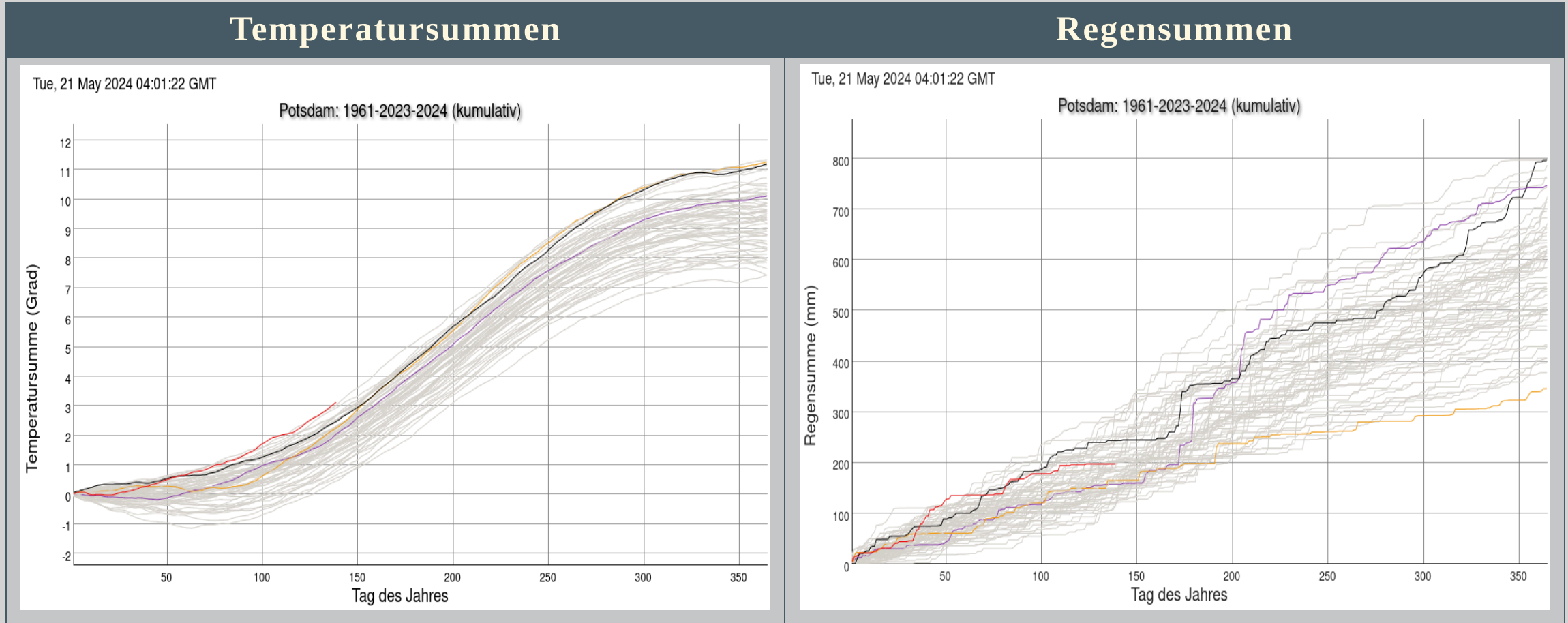


Monatsmittel fallen heute im Schnitt häufiger zu warm aus als zu kalt

Hitzetage und Andauern

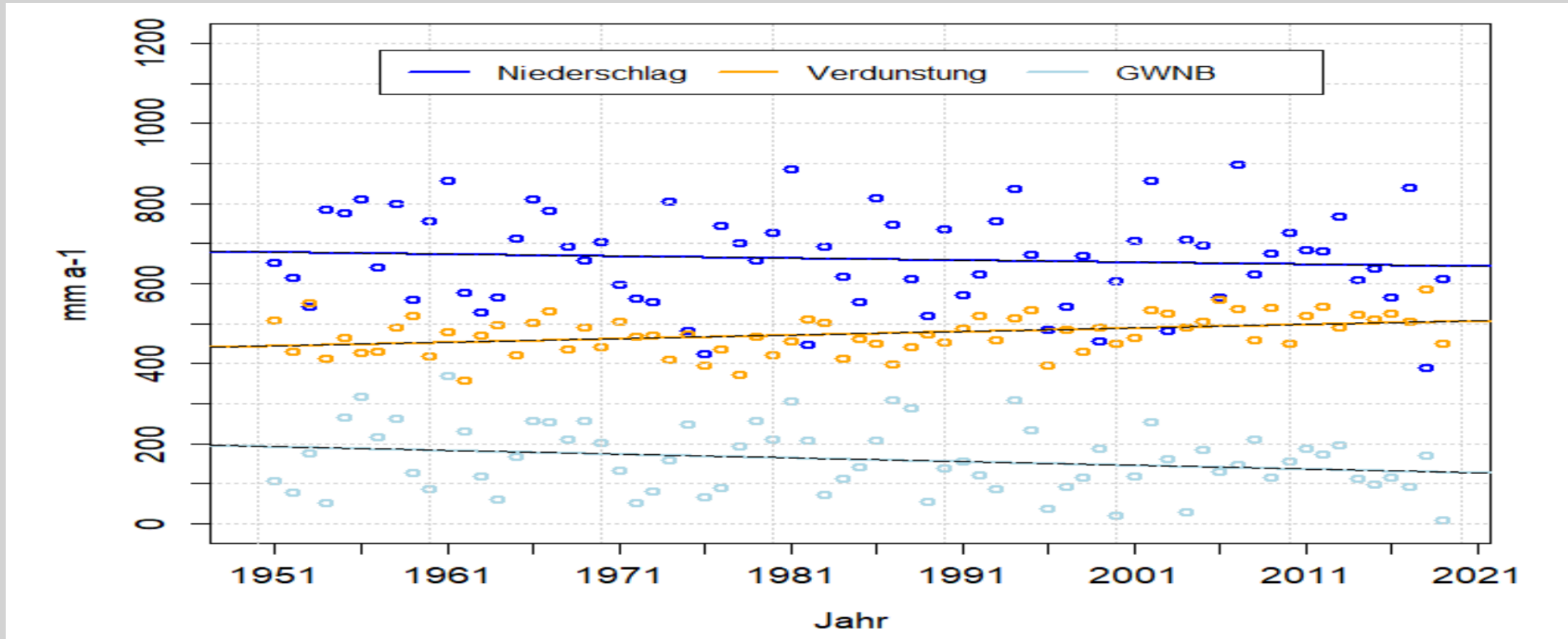


Summenverläufe

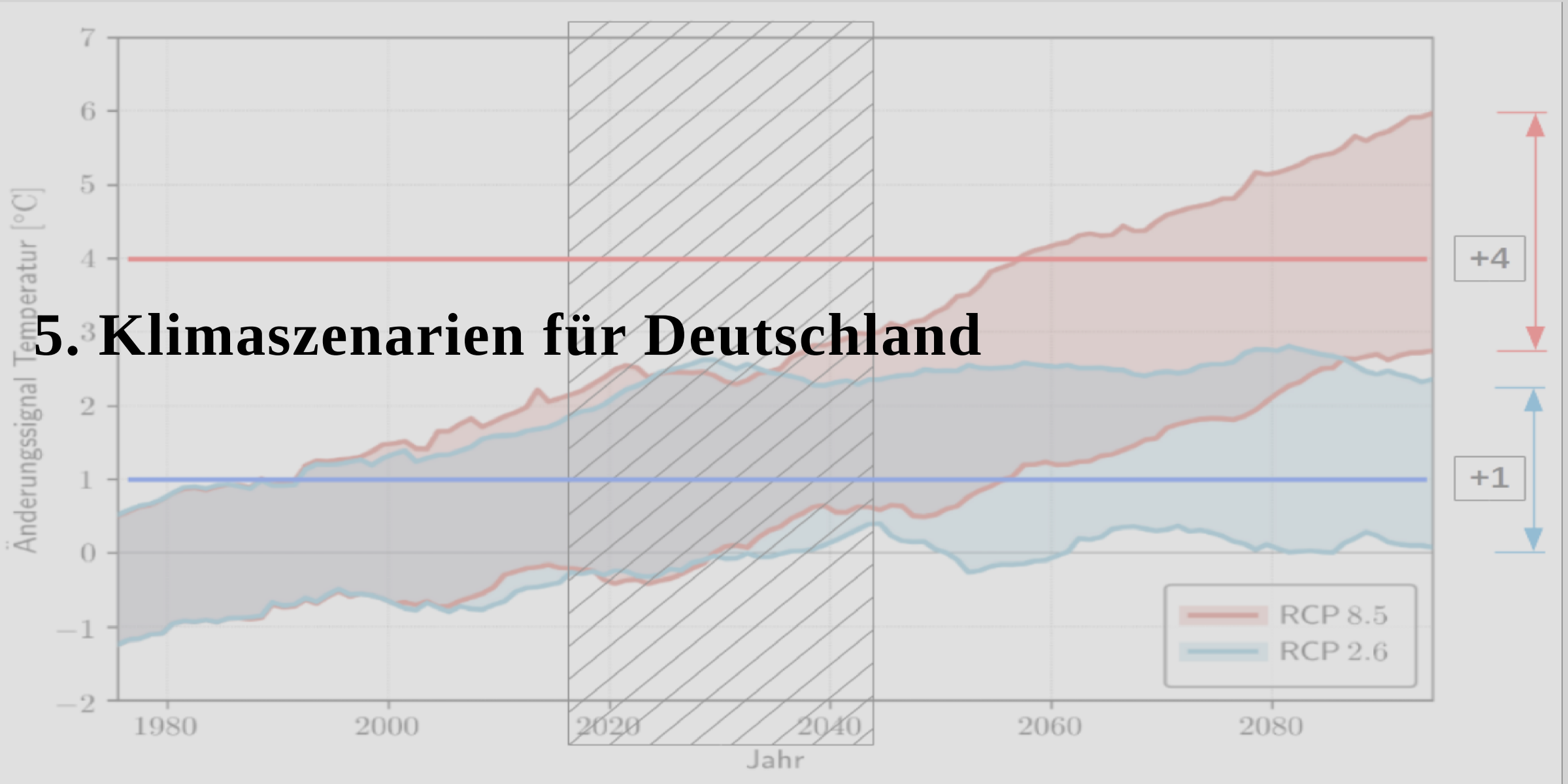


Gute Vergleichbarkeit der aktuellen Witterungsbedingungen mit vergangenen Jahren

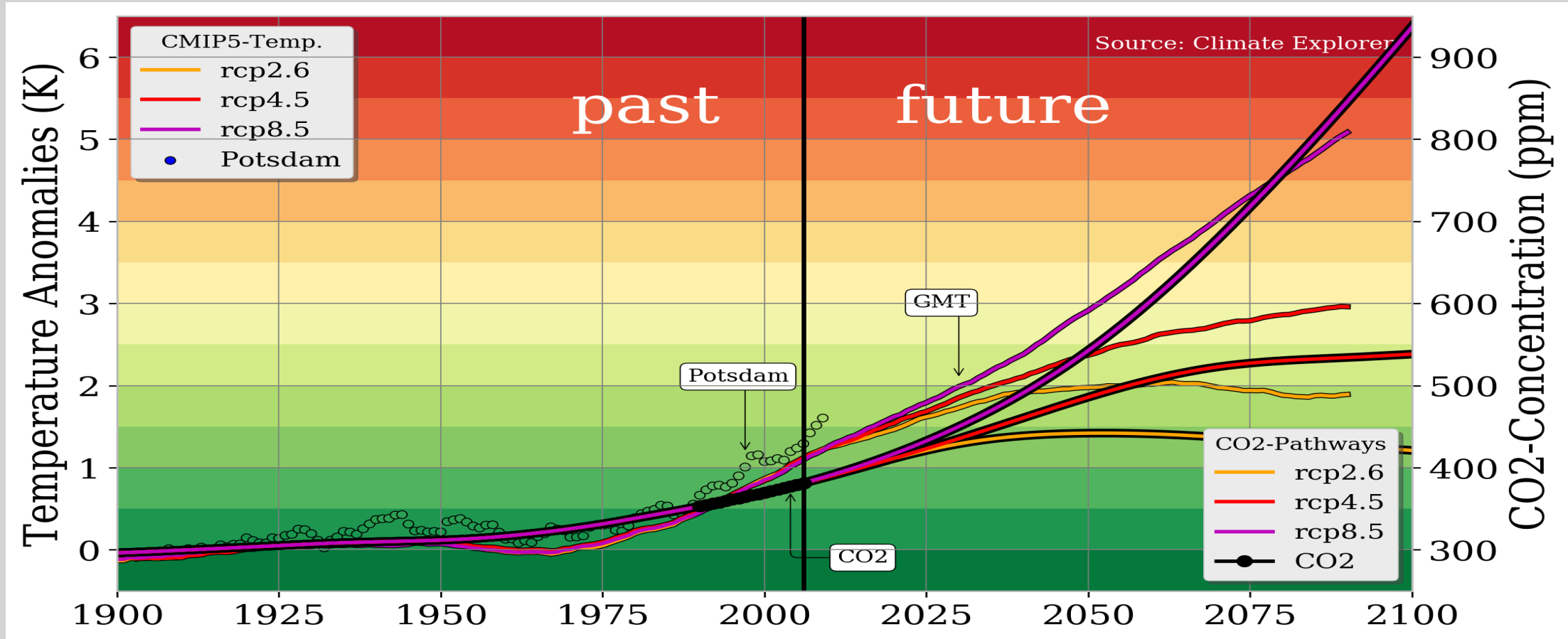
Grundwasserneubildung



Trotz gleichbleibender Jahresniederschläge sinkt die Grundwasserneubildung, weil die Verdunstung mit steigenden Temperaturen zunimmt.



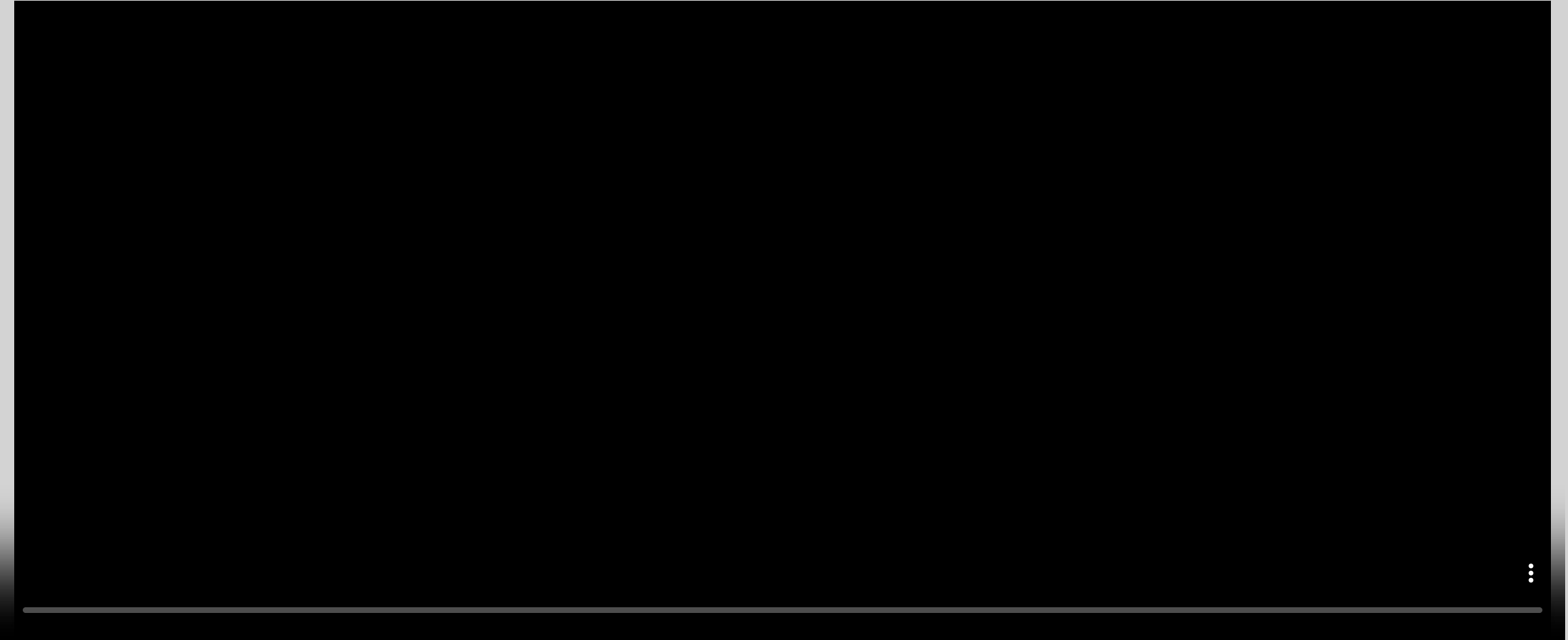
Emissionspfade



RCP2.6: Klimaschutz-Szenario (2°)

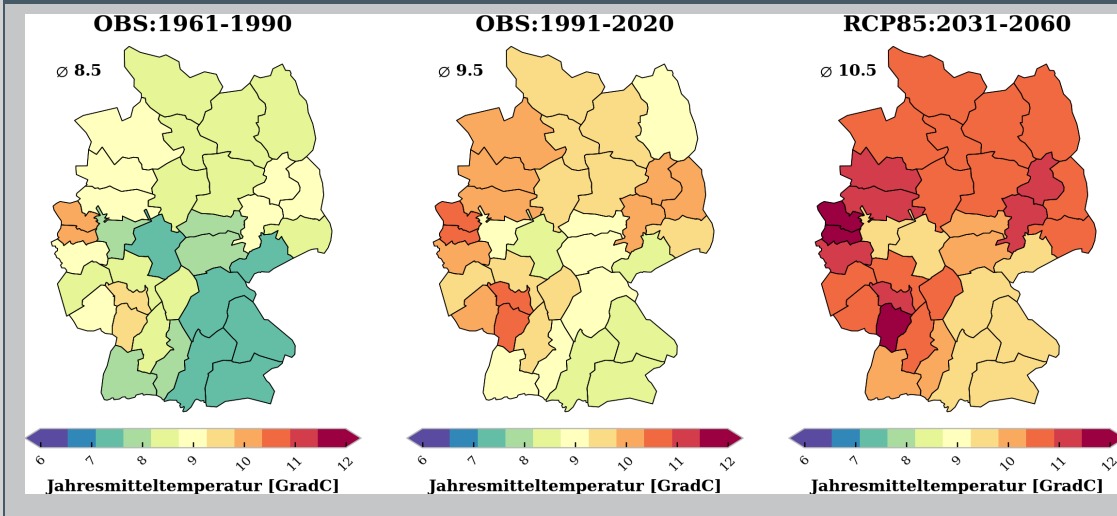
RCP8.5: Weiter-Wie-Bisher-Szenario (4°)

Regionalisierung

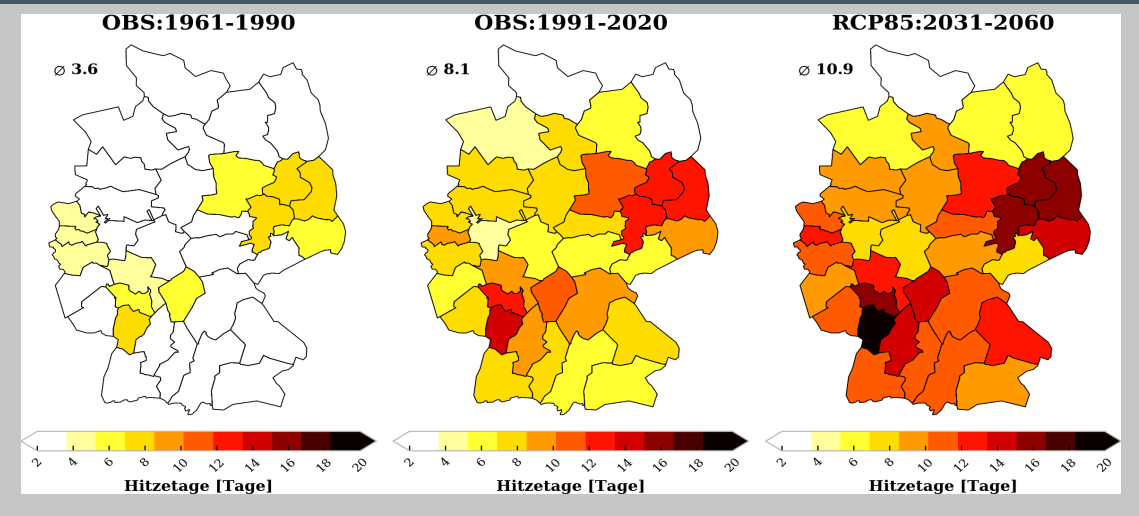


Regionalisierung globaler Klimamodellsimulationen (100x100km) durch regionale Klimamodelle für Europa (12x12km).

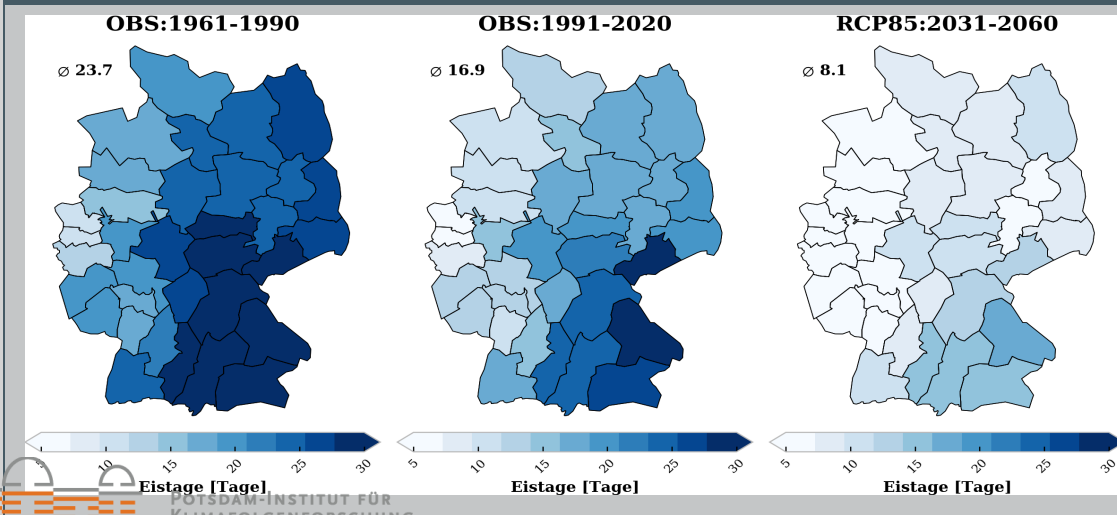
Jahresmitteltemperatur



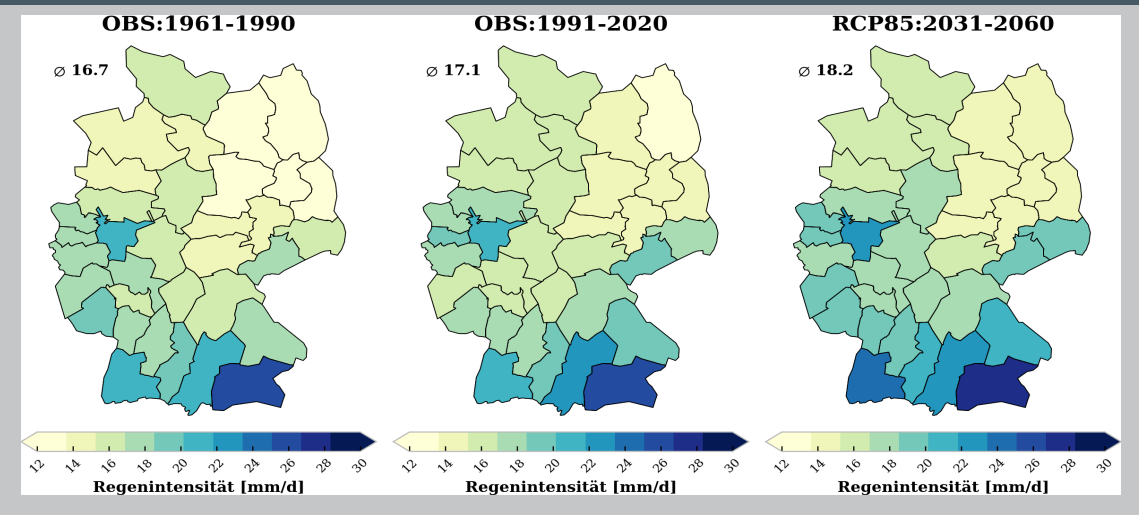
Hitzetage



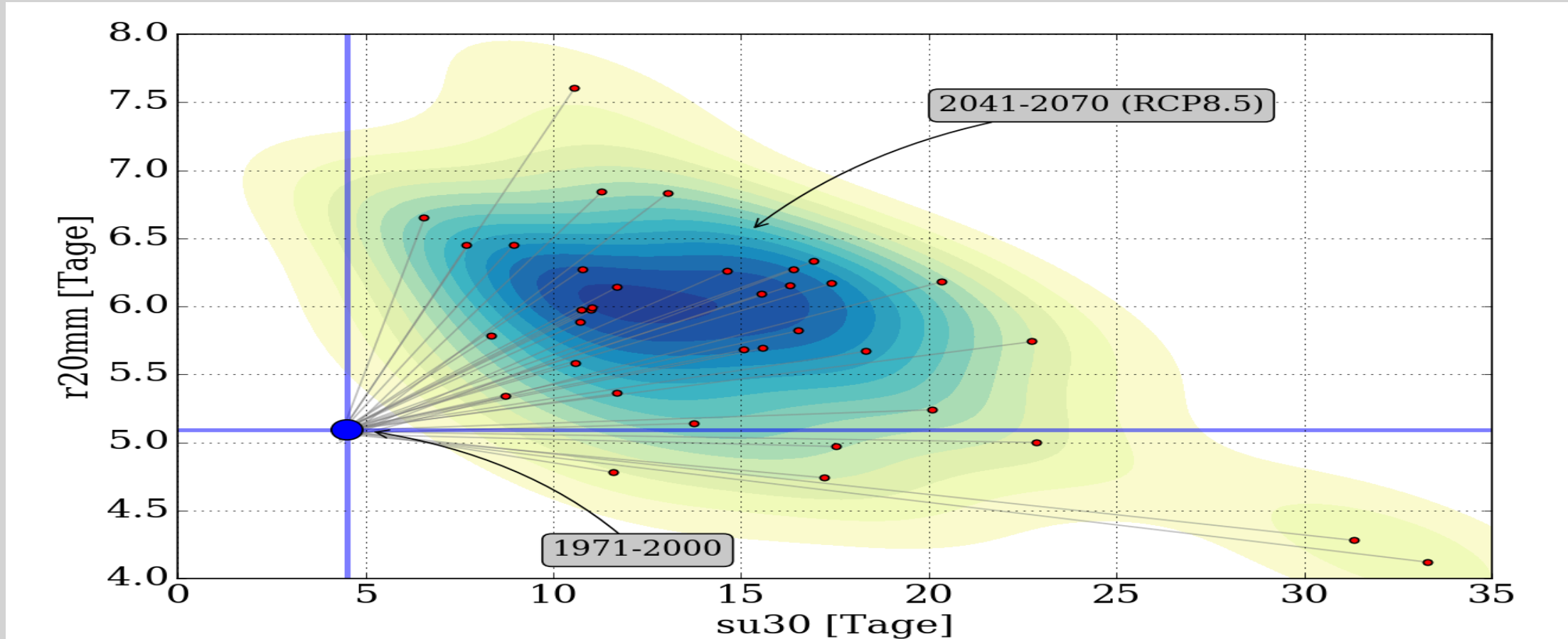
Eistage



Regenintensität



Hitze, Starkregen & Modellunsicherheiten

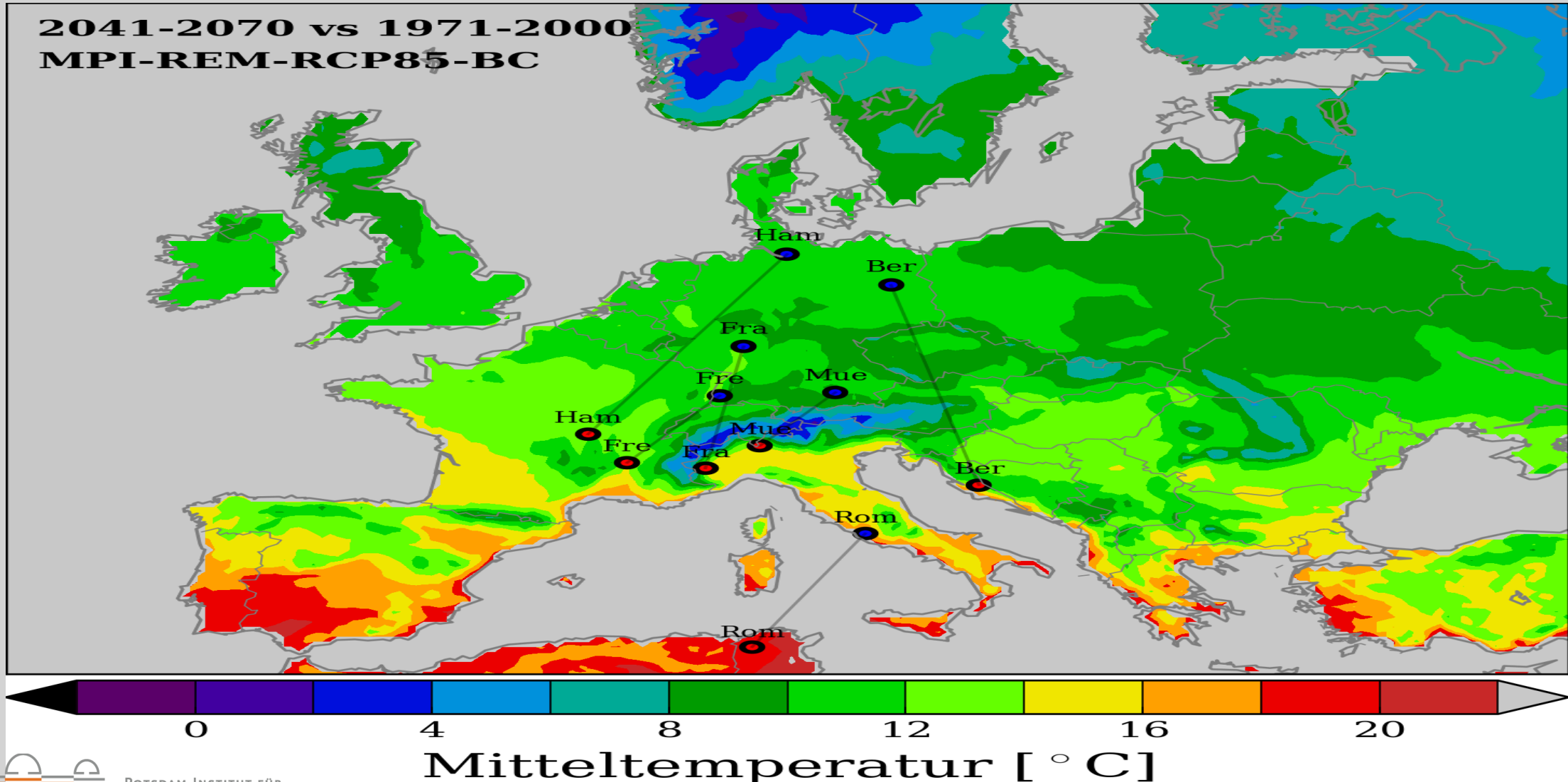


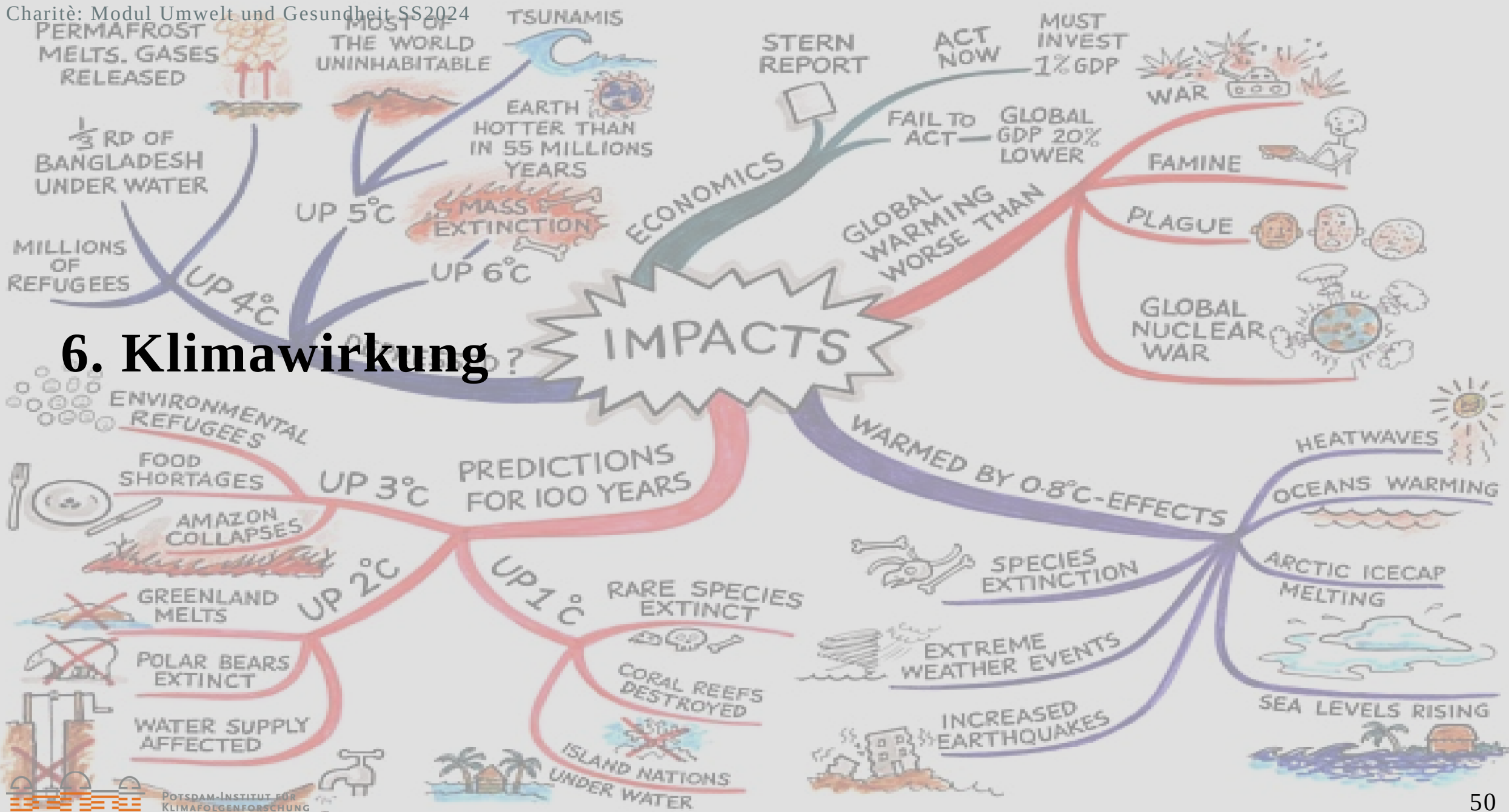
Entwicklung Anzahl der Starkregentage über der Anzahl der Hitzetage in Deutschland: hohe Richtungseinigkeit bei gleichzeitig großer Bandbreite

Deutschland in Zahlen: 2071-2100 vs 1971-2000

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

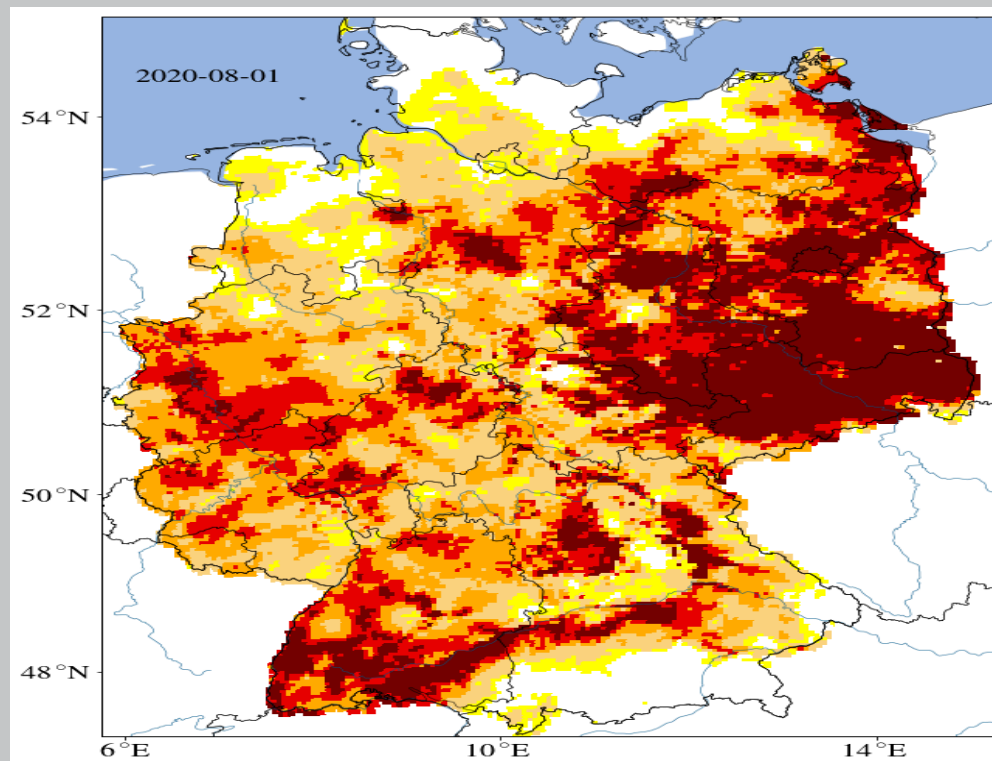
Klimatische Verschiebungen





Dürre & Waldsterben

Dürremonitor

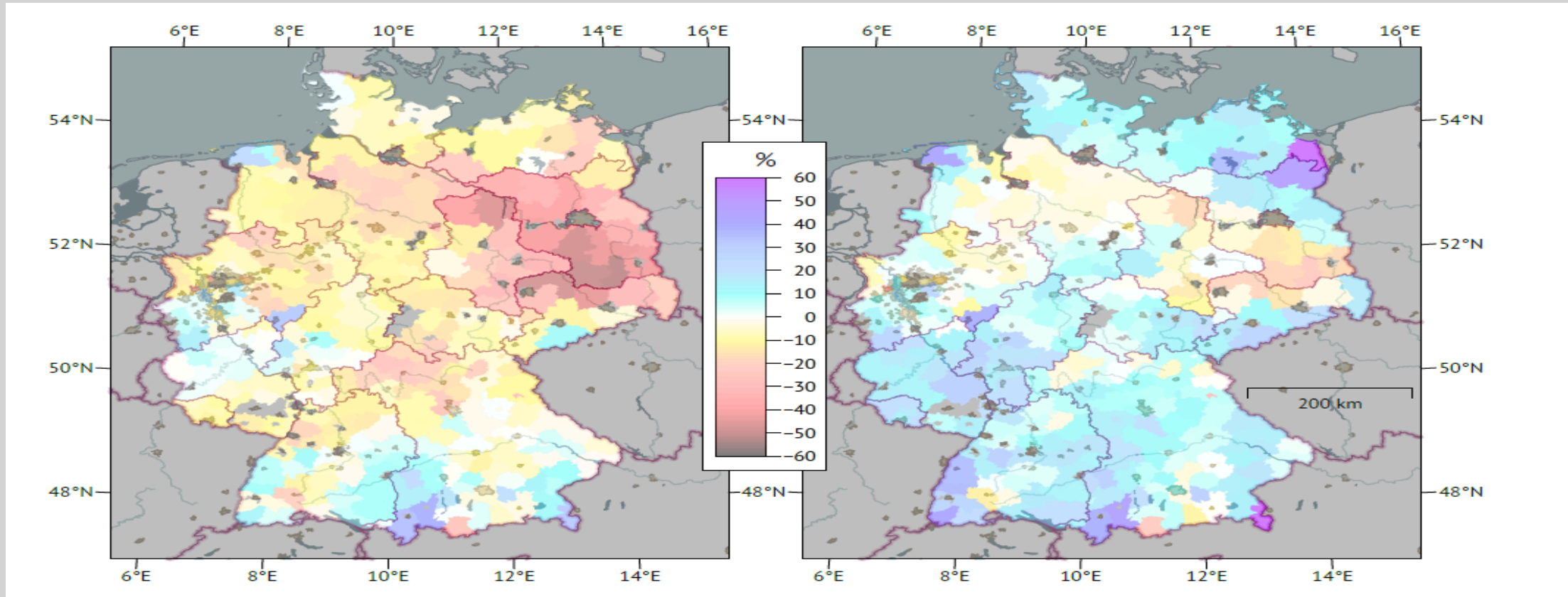


Trockenstress



Langanhaltende und häufig wiederkehrende Hochdruckwetterlagen führen zu einem Bodenfeuchte-defizit und Trockenstress bis in tiefe Bodenschichten.

Landwirtschaft: Bsp. Winterweizen

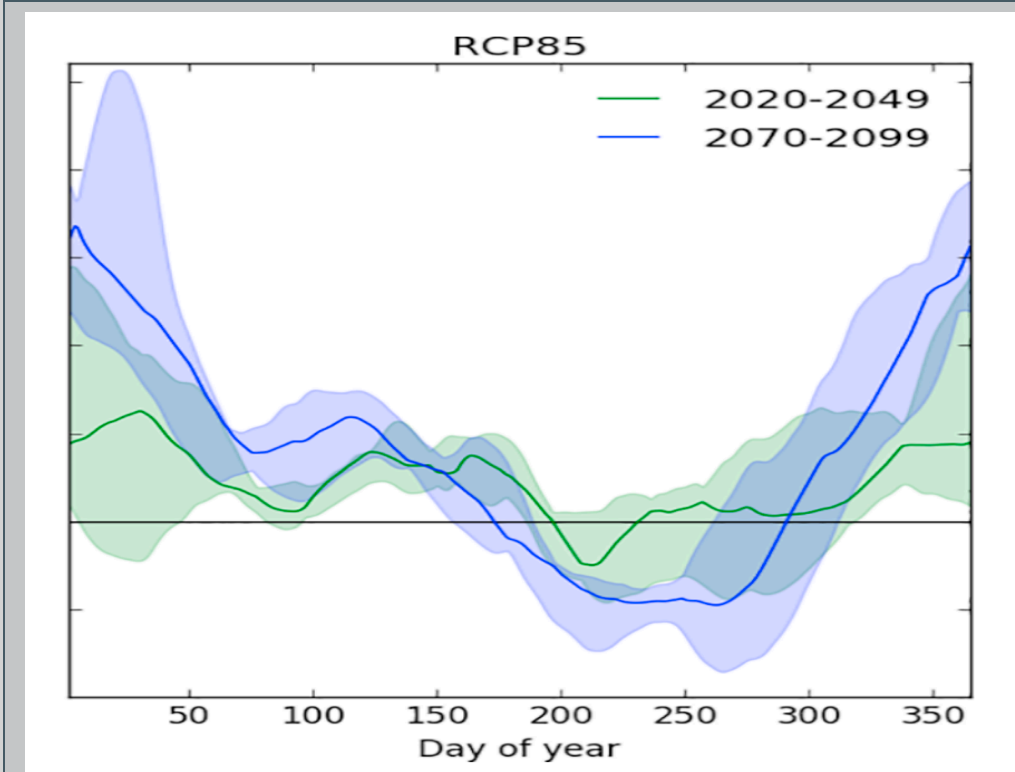


Der Ertrag von Winterweizen lag 2018 bis zu 50% niedriger als im langjährigen Mittel (links) und lokal noch unter dem Ertrag von 2003 (rechts)

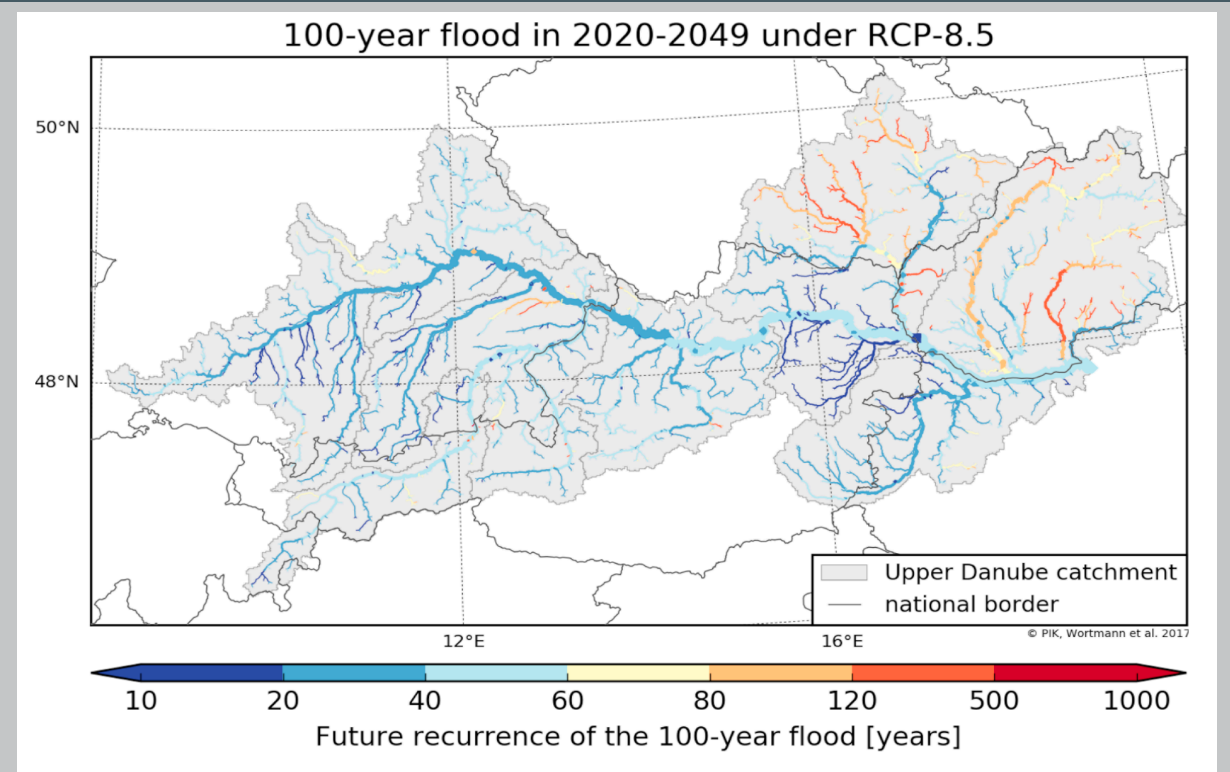
© Conrath et al., 2019

Hydrologie: Bsp. Donau

Gesamtabfluss



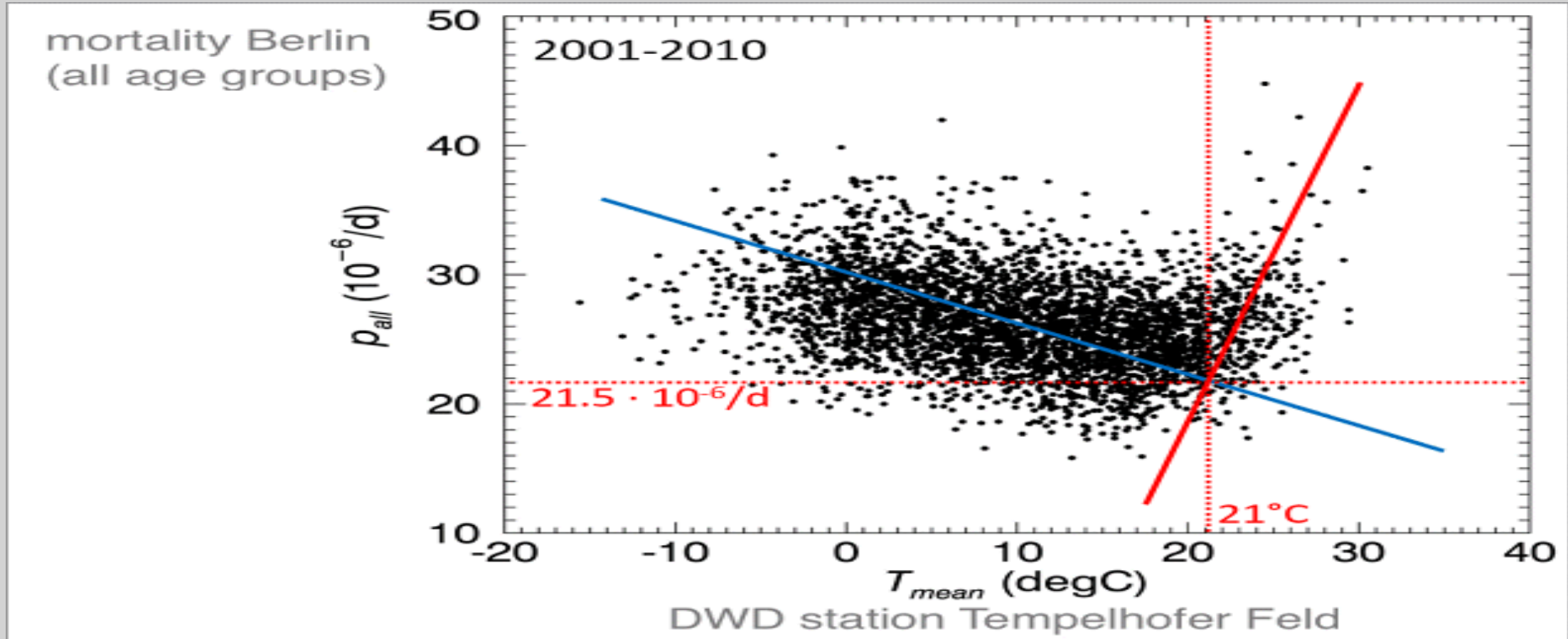
Hochwasser



Sowohl Hoch- und Niedrigwasserphasen im deutschen Teil der Donau nehmen zu: kürzere Wiederkehrzeiten von bislang 100-jährigen Hochwasserereignissen.

© Hattermann et al., 2018

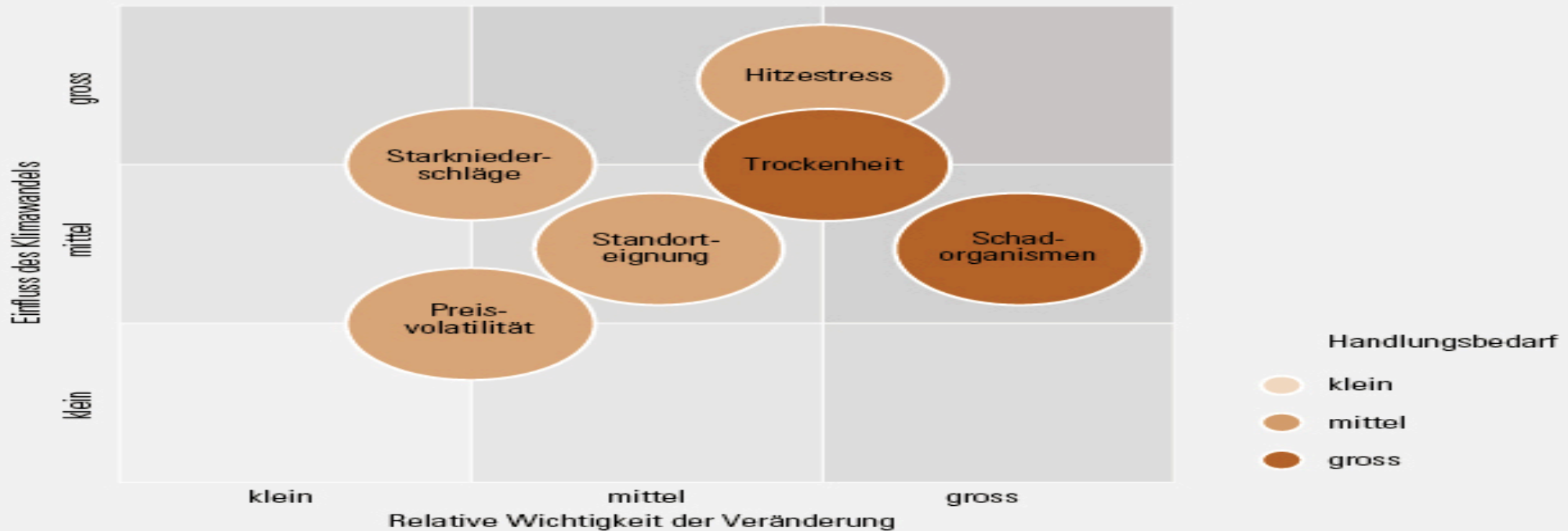
Gesundheit: Bsp. Mortalität



Mortalität über der Temperatur in Berlin: steilerer Anstieg der Mortalität bei heißen Temp.

Anpassungsmatrix: Bsp. Landwirtschaft

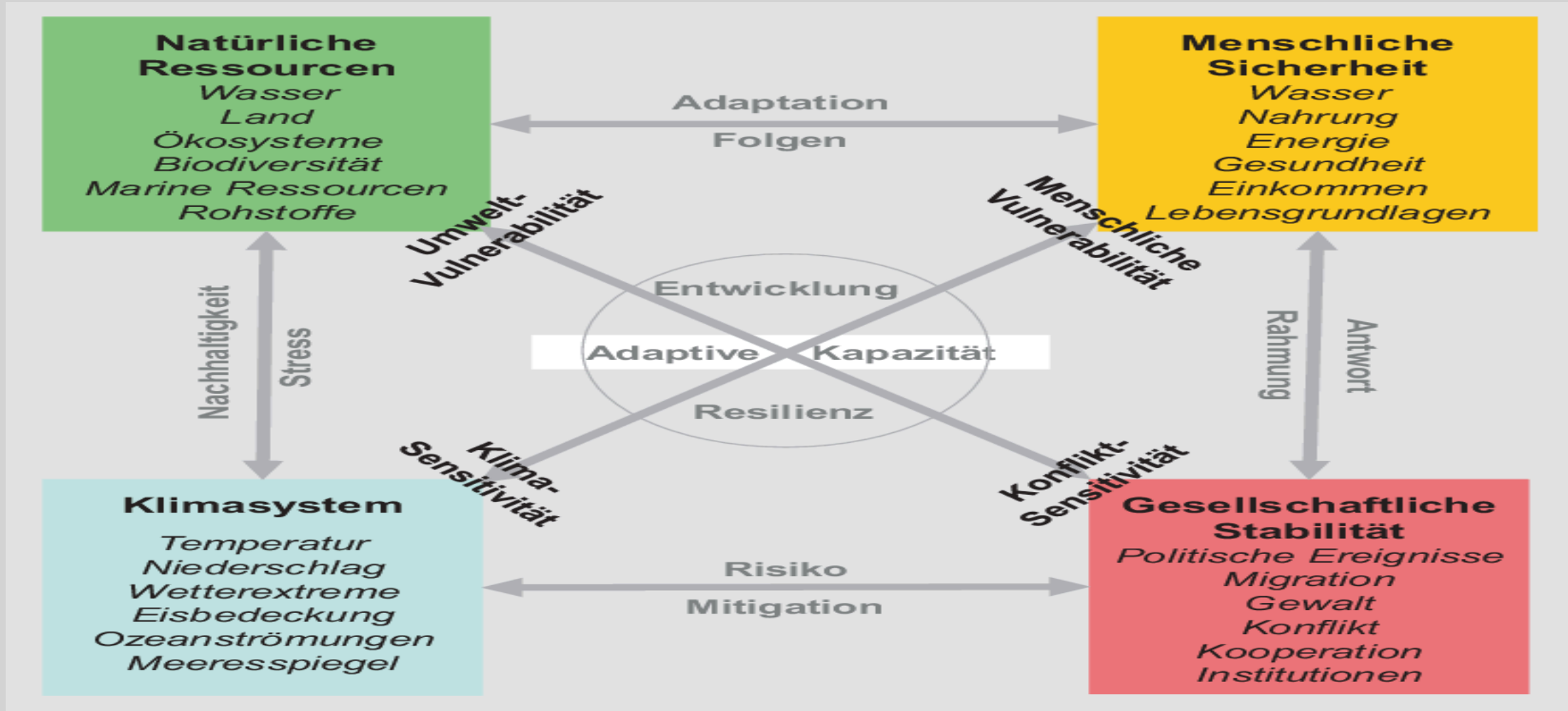
Sektor Landwirtschaft Beurteilung der relevanten Bereiche bezüglich Einfluss des Klimawandels, relativer Wichtigkeit der Veränderungen und des klimabedingten Handlungsbedarfs.



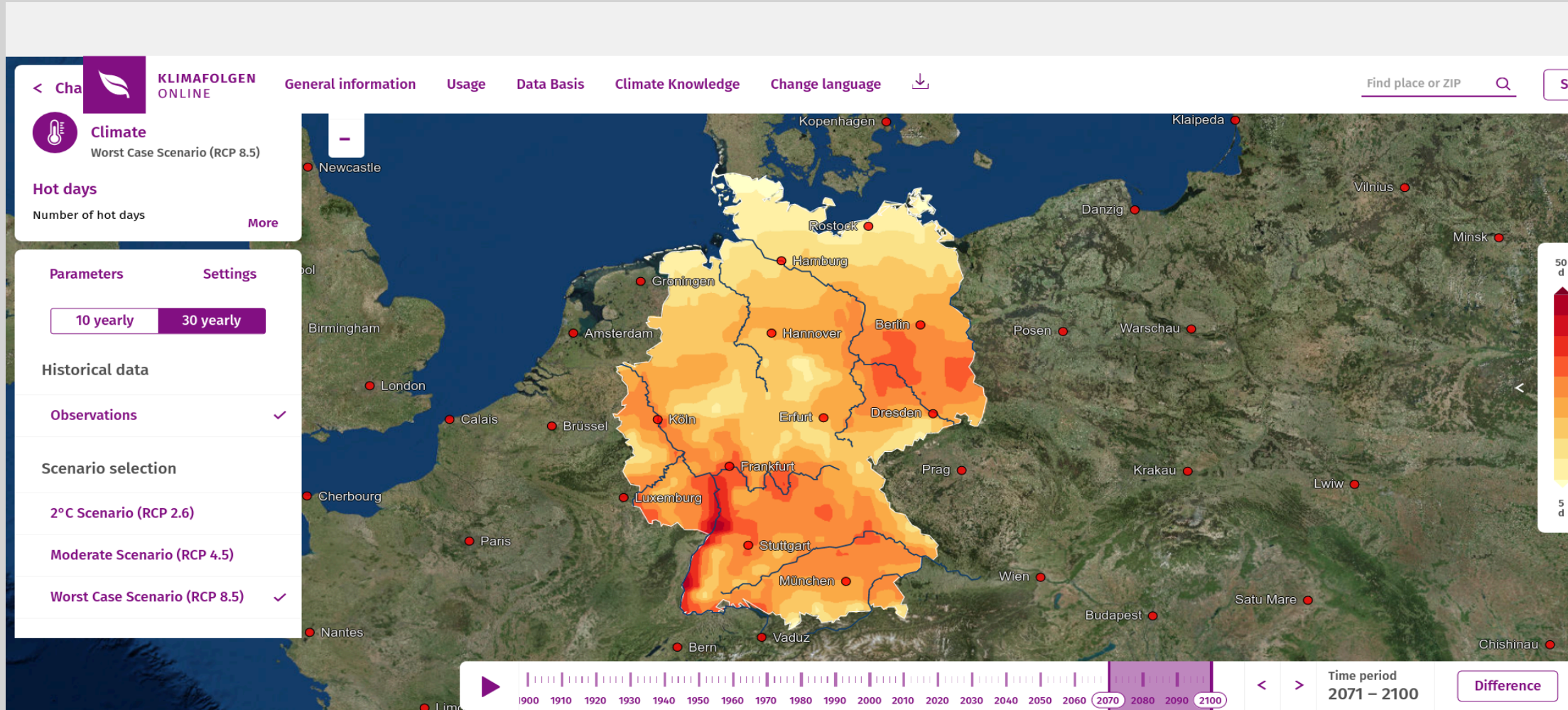
Zu Handlungsfeldern für die Anpassung werden nur solche Bereiche, die in allen drei Dimensionen (Einfluss des Klimawandels, Relative Wichtigkeit der Veränderung und Handlungsbedarf) als mittel oder gross eingestuft sind.

Quelle: BAFU

Wirkungskette: **Klimasystem - Ressourcen - Sicherheit - Stabilität**



Klima- & Klimafolgendienste



Fazit

- **Welche zukünftigen Entwicklungen sind sicher?**

- Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch steigende CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre (Faktor Mensch)
- steigende Temperaturen, Gletscherschwund, Meeresspiegelanstieg
- weltweit höhere Neigung zu Extremwetter
- klimatische Verschiebungen

- **Welche zukünftigen Entwicklungen sind unsicher?**

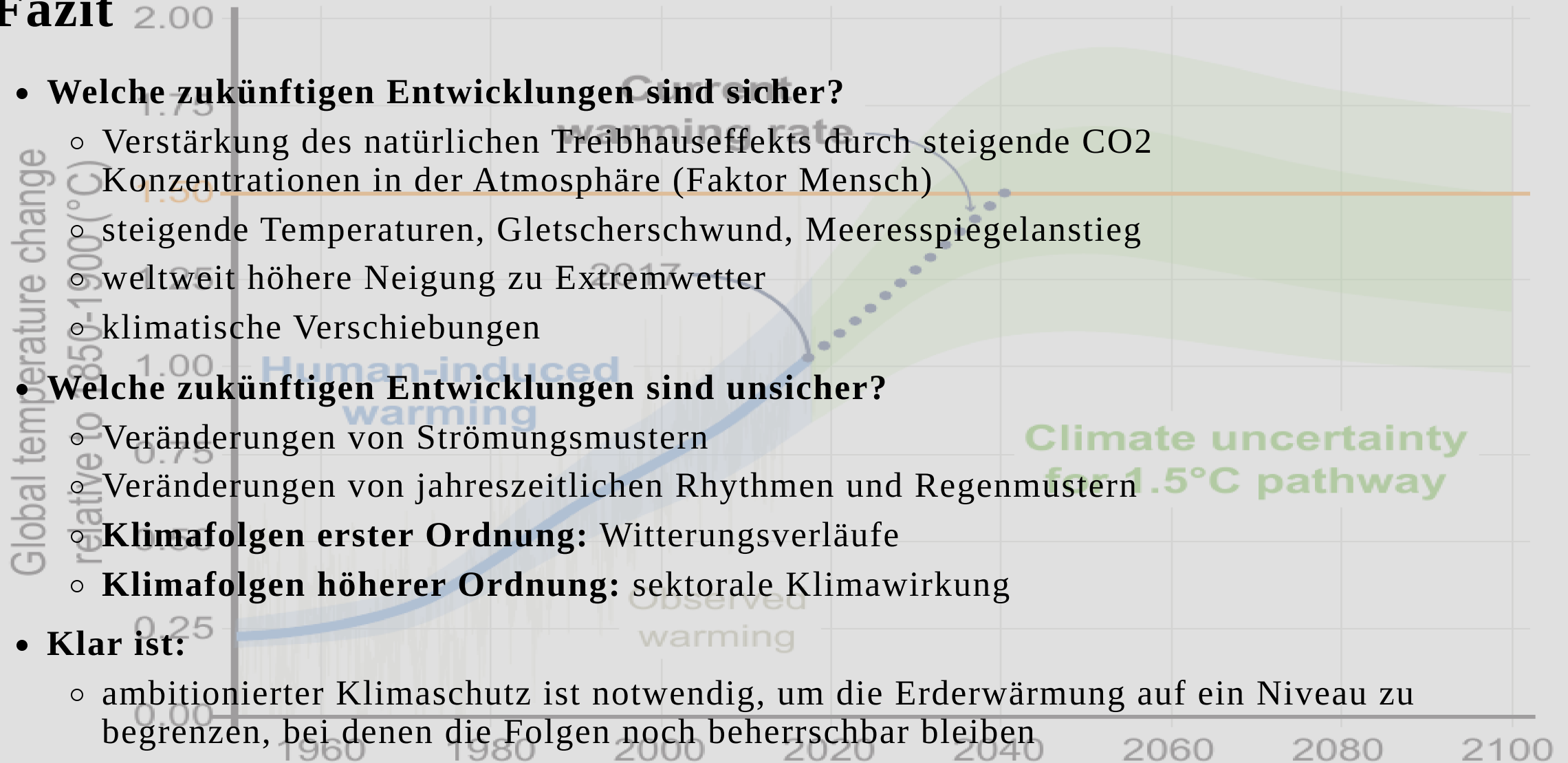
- Veränderungen von Strömungsmustern
- Veränderungen von jahreszeitlichen Rhythmen und Regenmustern

- **Klimafolgen erster Ordnung:** Witterungsverläufe

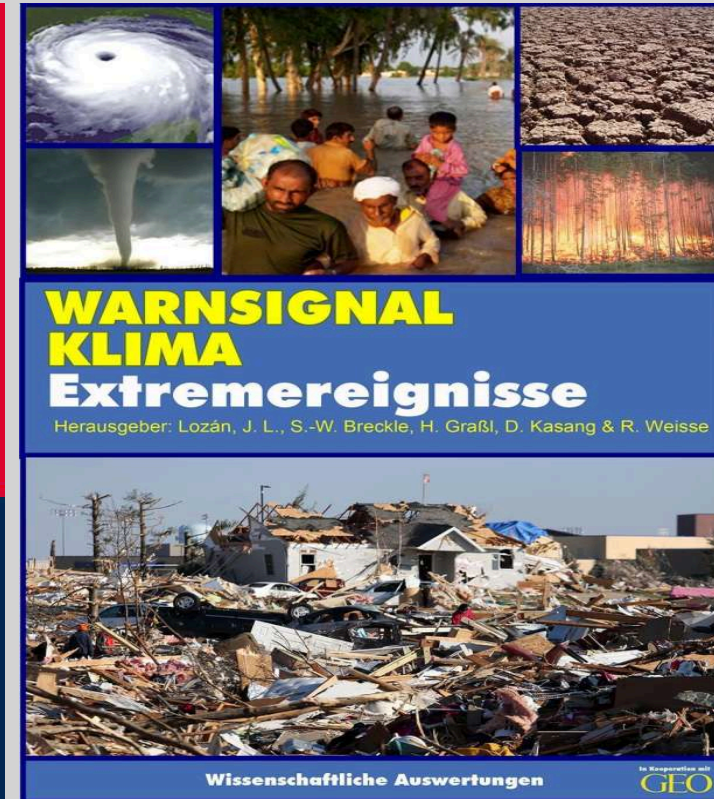
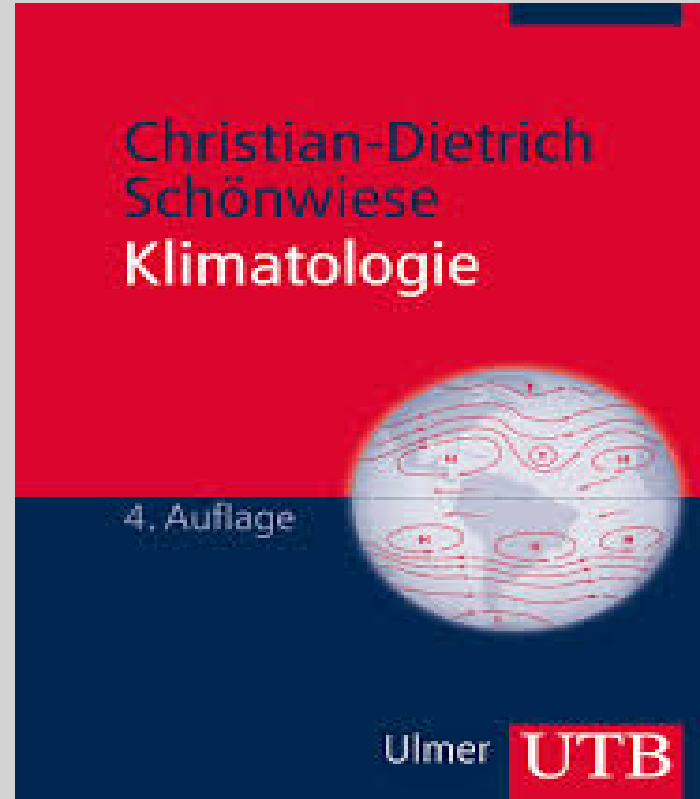
- **Klimafolgen höherer Ordnung:** sektorale Klimawirkung

- **Klar ist:**

- ambitionierter Klimaschutz ist notwendig, um die Erderwärmung auf ein Niveau zu begrenzen, bei denen die Folgen noch beherrschbar bleiben



Links



[NOAA](#); [CimateExplorer](#); [Deutscher Klimaatlas](#); [Impact2C](#); [Climate4You](#); [Klimafolgenonline](#)