

Trockenheit und Hitzewellen

Definition, Ursache und Wechselwirkung



Peter Hoffmann

Hydro-klimatische Risiken

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



1



POTSDAM-INSTITUT FÜR
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

P I K

Forschungsbereiche – Arbeitsgruppen

Klimaresilienz – Klimafolgen



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

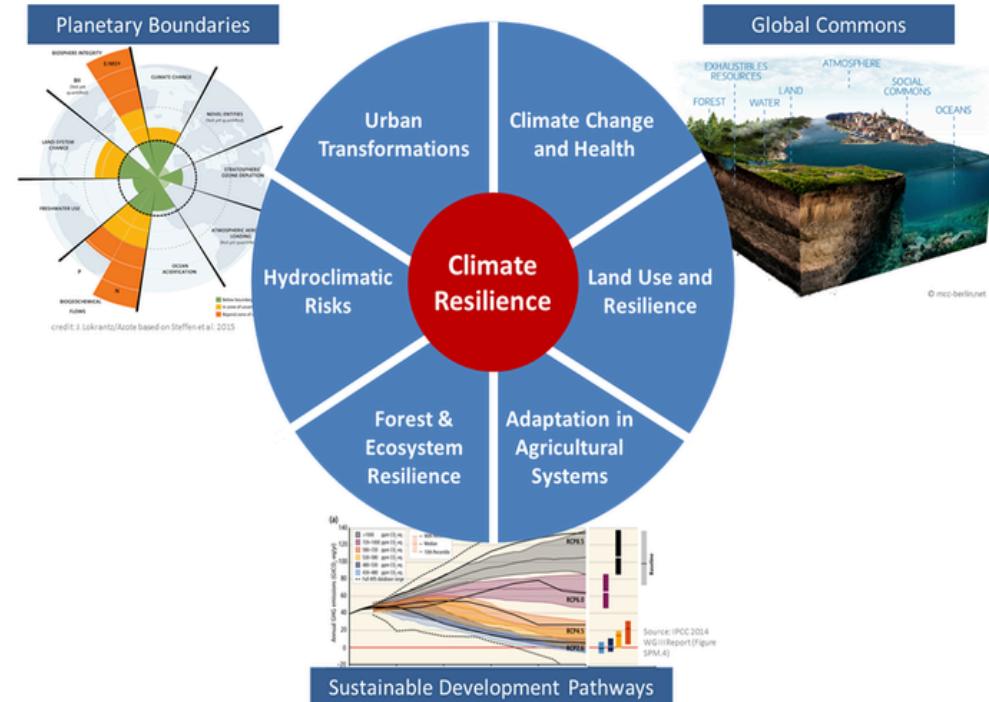
[READ MORE](#)



Complexity Science

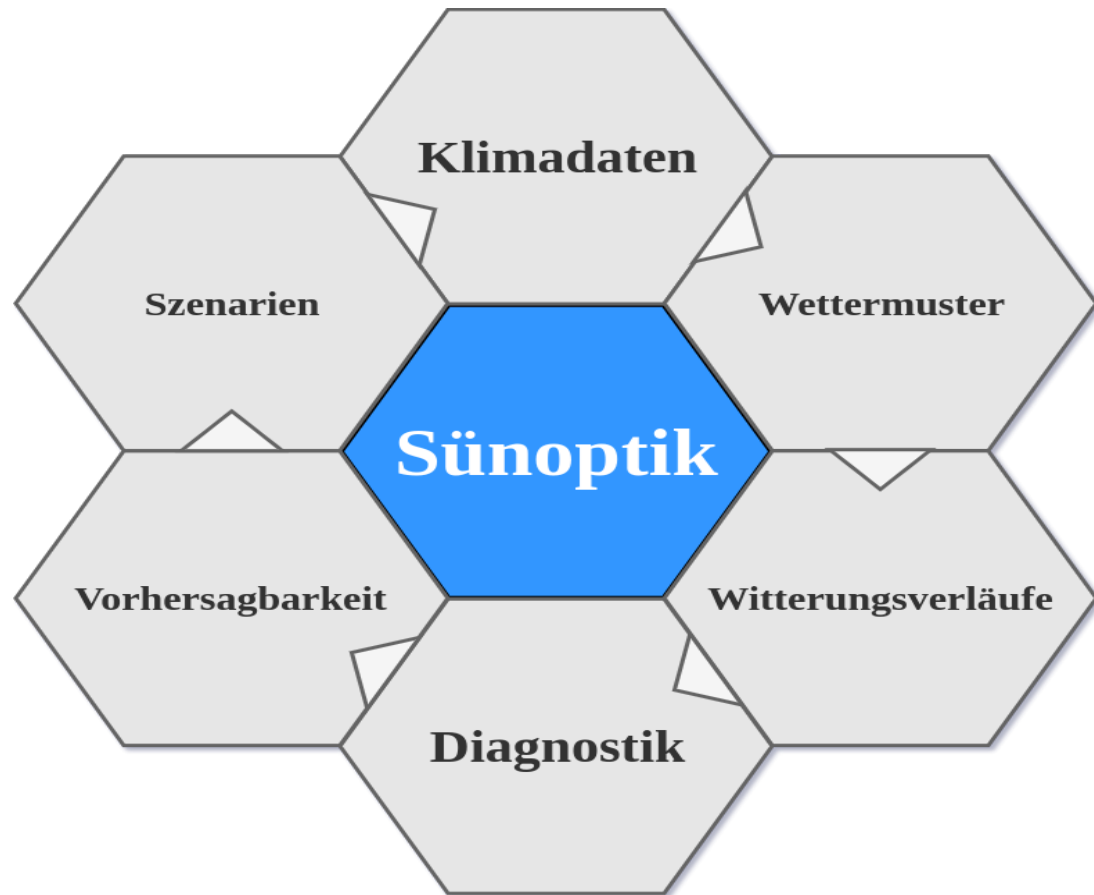
Machine Learning, Nonlinear Methods and Decision Strategies

[READ MORE](#)



Sünoptik

Süringwarte für operationelle Auswertungen der aktuellen Witterung und Klimafolgen



Synoptik des Klimawandels

- Witterung im großräumigen Kontext
- Wettervariabilität (Beständigkeit)
- Witterungsanomalien
- vorausschauende Entwicklungen
- Regeln und Vorhersagbarkeit
- regelbasierte und vorausschauende Szenarien

<http://www.pik-potsdam.de/~peterh/s%c3%bcnoptik/>



Inhalt

Ursachen

Definitionen

Messbarkeit

Regionaler Klimawandel

Folgen und Wechselwirkungen

Saisonale Vorhersagbarkeit und Regeln

Thema für Übung

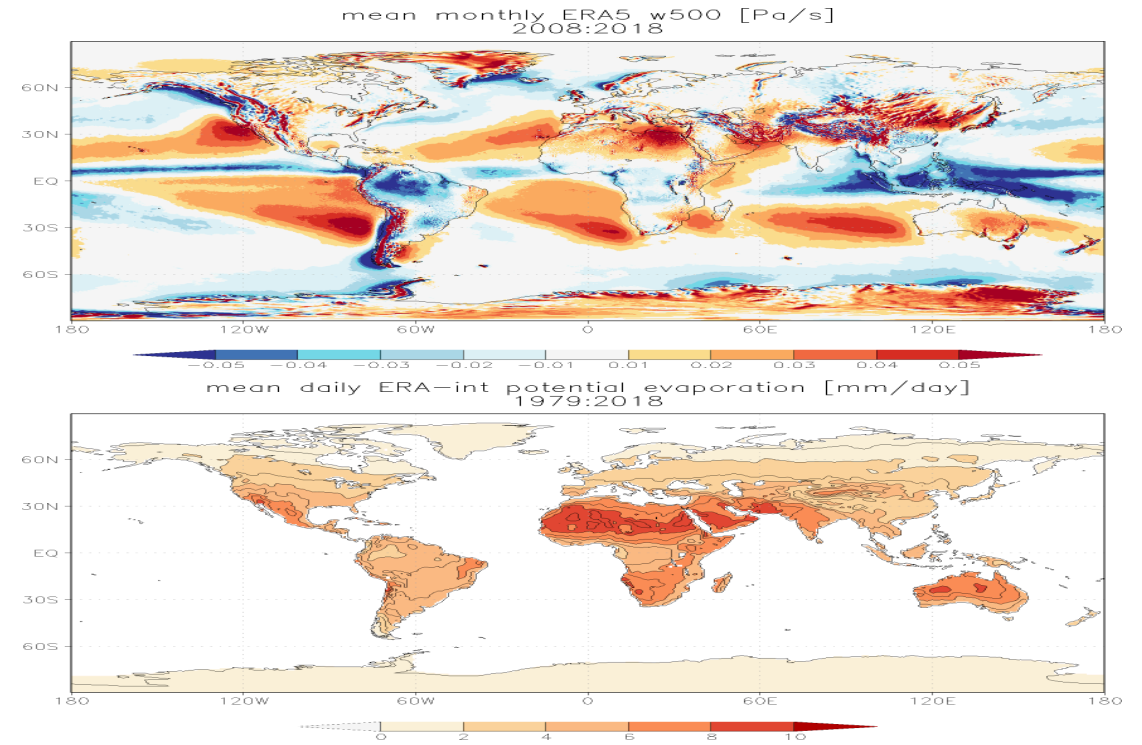
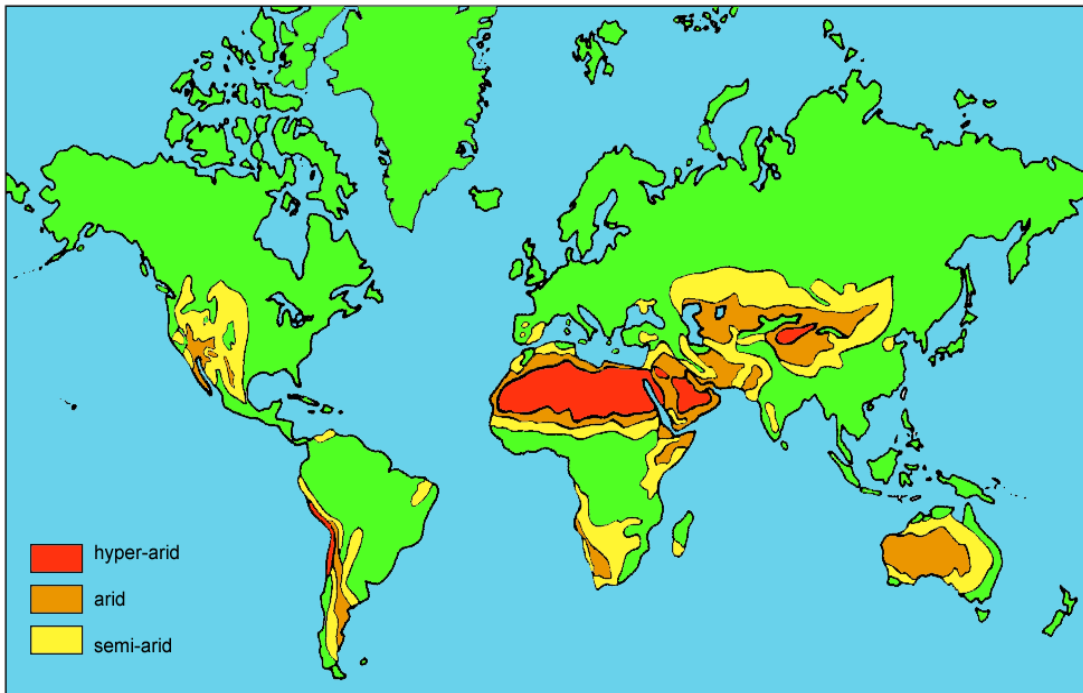


Ursachen

Trockengebiete

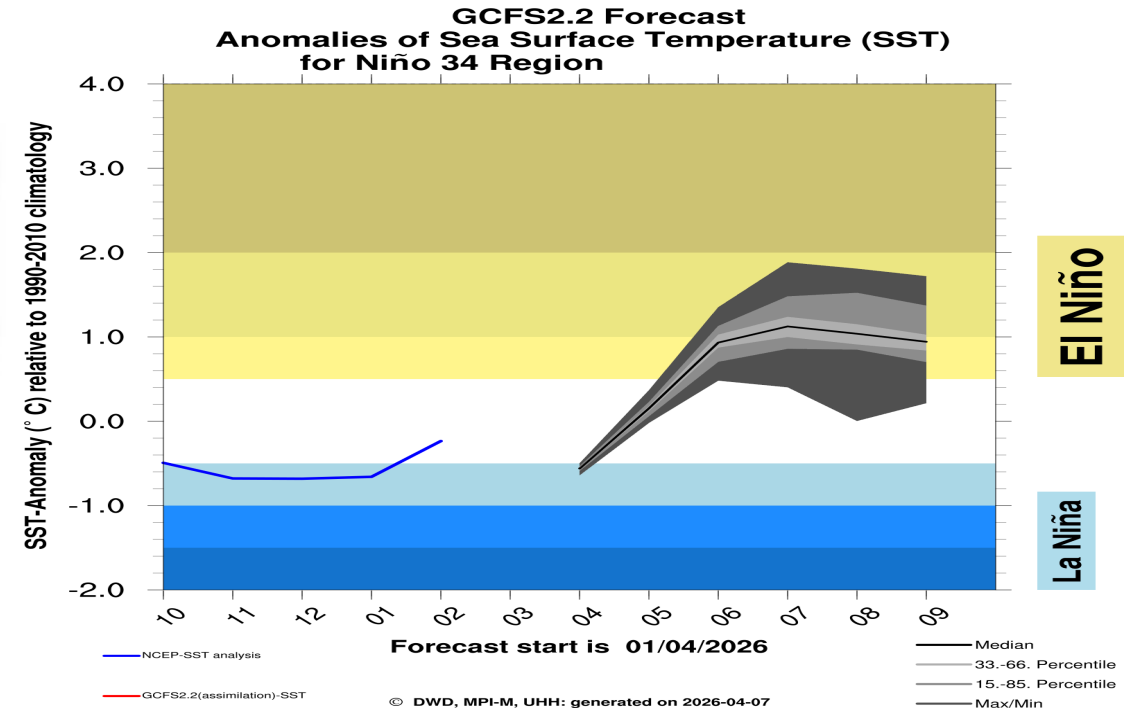
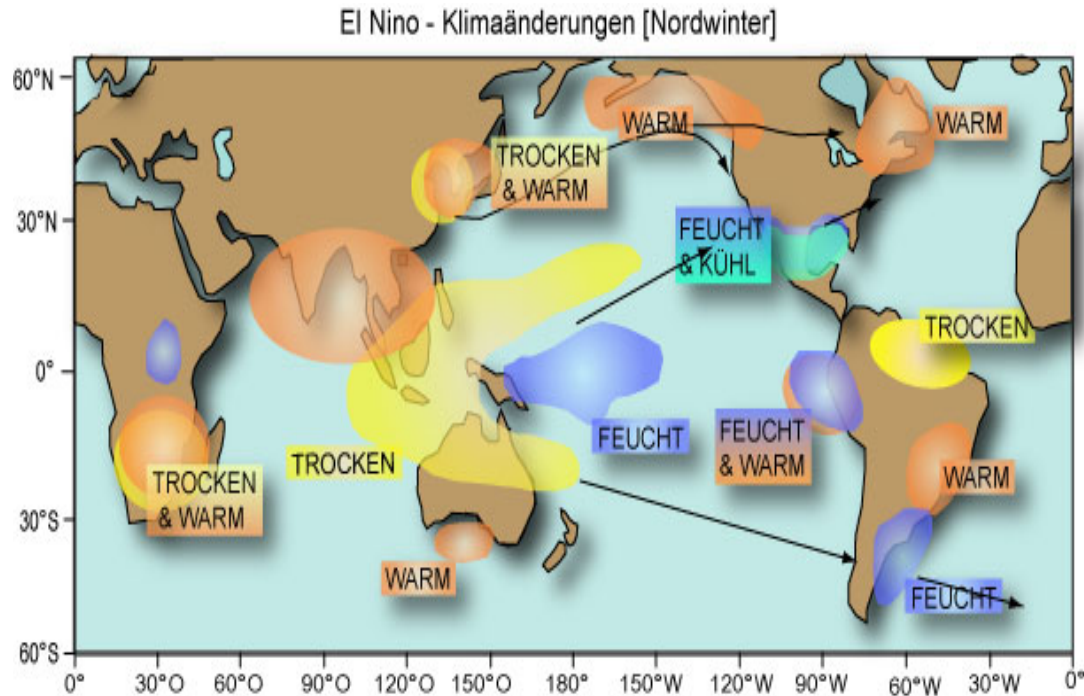
Regionale Verteilung

Aride Regionen sind dominiert durch **großräumiges Absinken** und eine hohe **Potentielle Verdunstung**: ca. 30% der Landflächen



ENSO: El-Niño (überwiegend Tropen)

Dürren in Feuchtgebieten



Dürren in Feuchtgebieten durch Abschwächung großräumiger NO-Passatwinde (z.B. Südostasien bis Südafrika). – **Aktuell:** Für das laufende Jahr wird die Entwicklung eines neuen El-Niño erwartet – lokale SST Anomalien in den ENSO Regionen können mehrere Grad betragen.

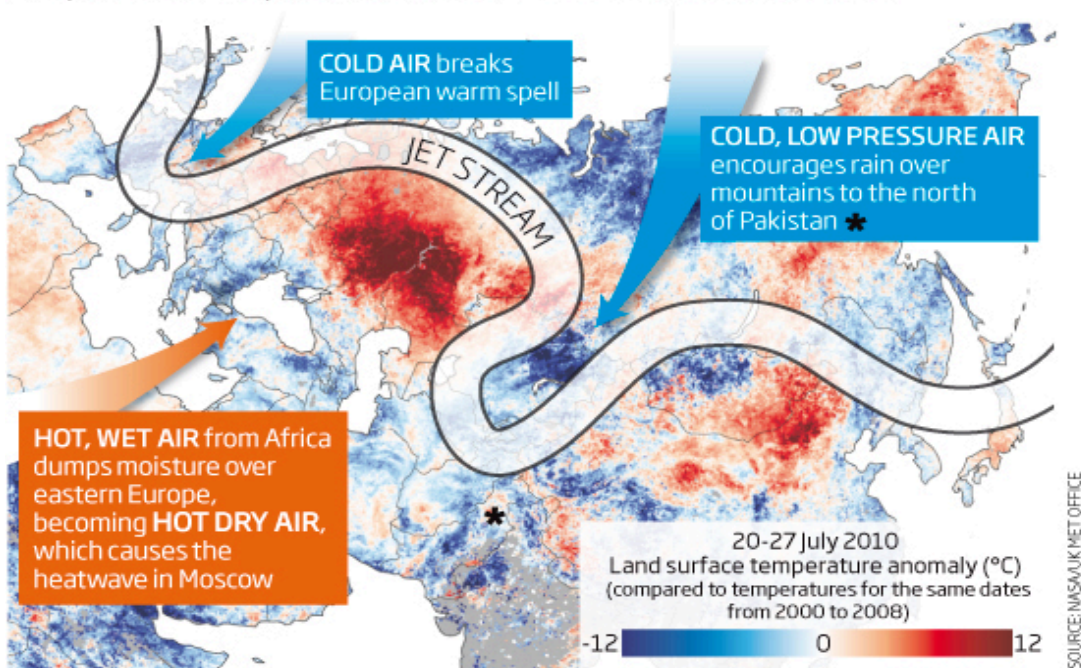
Jetstream (Mittlere Breiten)

Starkwindband und Motor für regionale Wetterphänomene

Holding pattern

In the second half of July, a blocking event froze the meanders of the jet stream over Europe and Asia. The pattern led to extreme weather across the continents

©NewScientist



Jetstream:

Stationäre Wellenmuster im Jetstream über den mittleren Breiten der Nordhemisphäre können über Wochen hinweg zeitgleich verschiedene Wetterextreme auslösen.

Beispiele:

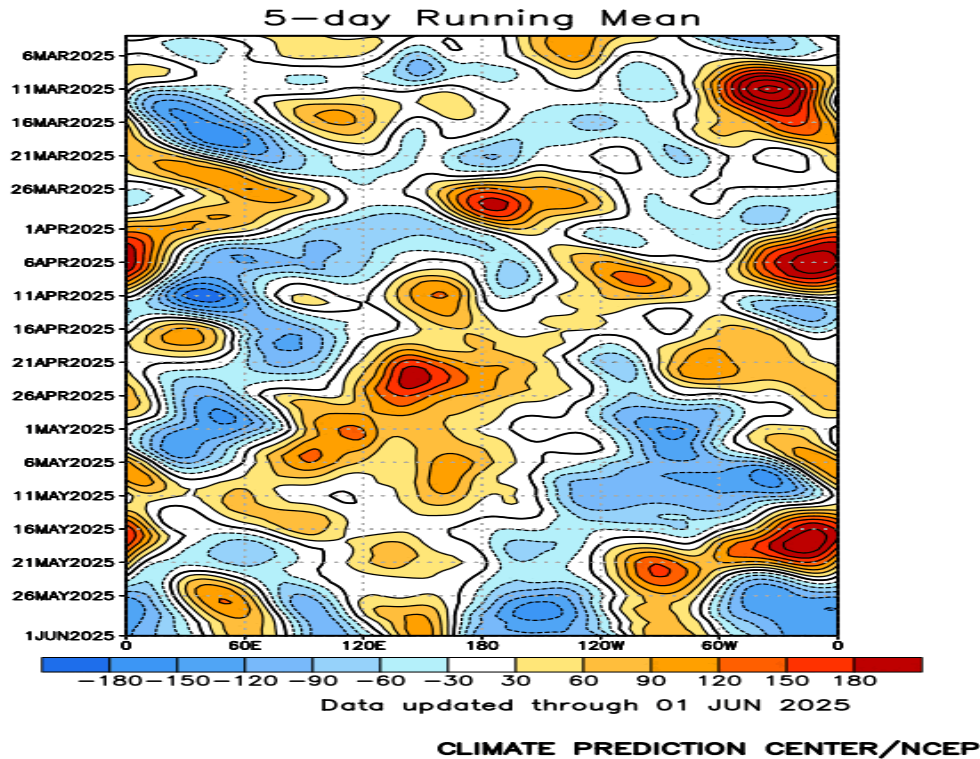
- 2010: Hitzewelle über Russland und Flut in Pakistan
- 2018: anhaltende Extreme entlang mittlerer Breiten

Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes
PNAS, 2012, by Vladimir Petoukhova et al

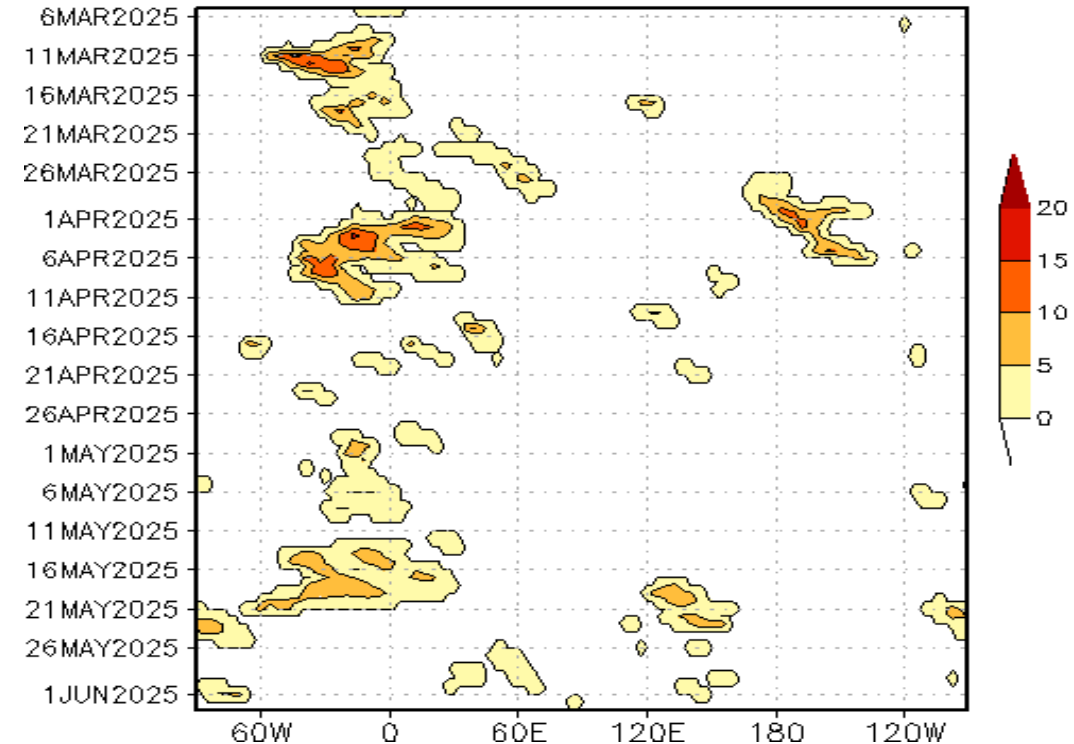


Atmosphärische Blockierungen

Gradienten der Anomalien im Geopotential 500 hPa in Mittleren Breiten



BLOCKING STRENGTH GHGS [$m(deglat)^{-1}$]—OBSERVATIONS
UPDATED THROUGH 03Jun2025



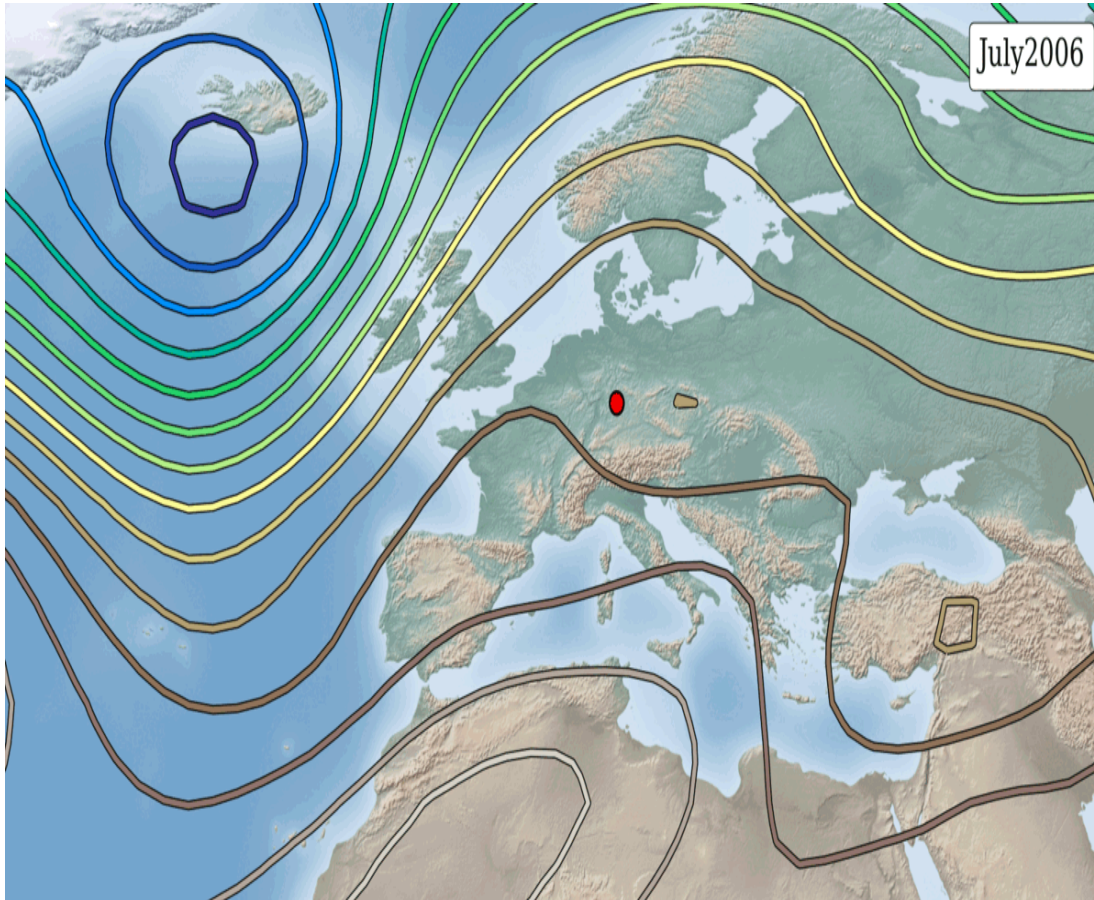
Hovmoller-Plots: zur Darstellung von Änderung der räumlichen Variabilität über der Zeit

GHGS: Geopotential Height 500 hPa Gradient Southern (Tibaldi, 1990)



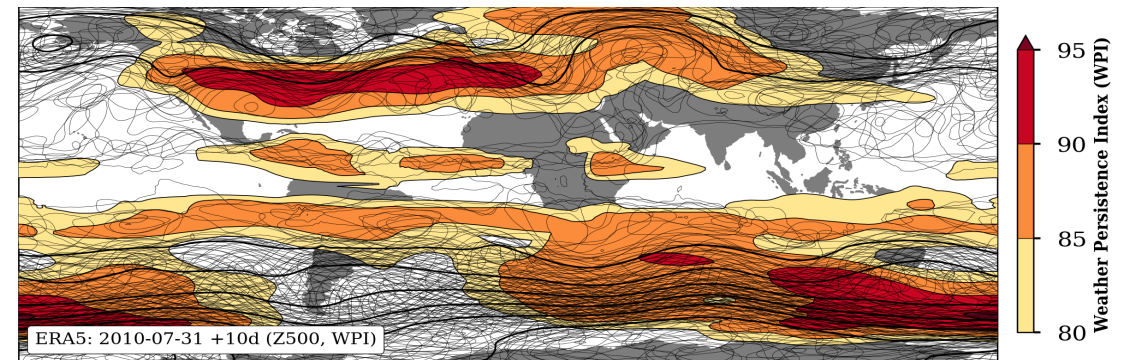
Beständigkeit

Ähnlichkeit aufeinanderfolgender Strömungsmuster



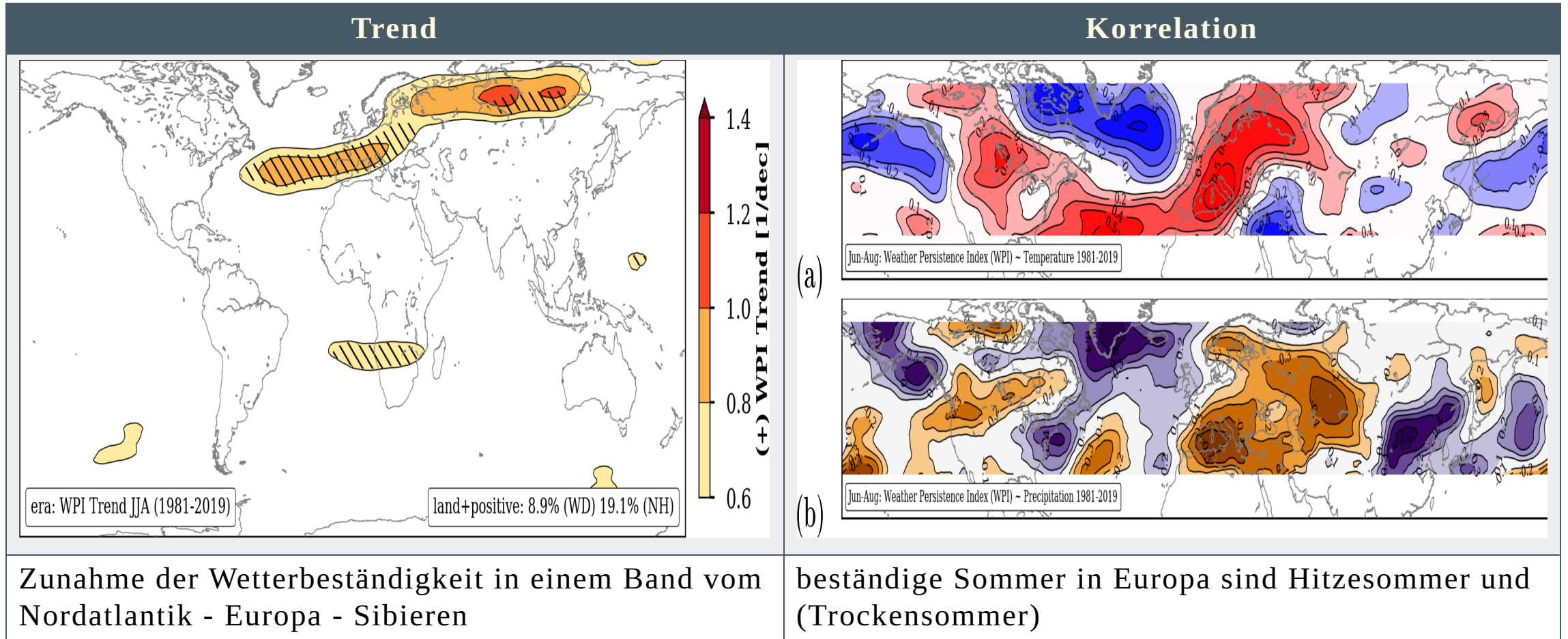
Weather-Persistence-Index:

Konturlinien im Geopotential 500 hPa verlaufen **über Tage in ähnlichen Bahnen**. Je ähnlicher aufeinanderfolgende Isolinien des Geopotentials verlaufen, desto beständiger die lokale Witterung in den entsprechenden Regionen.



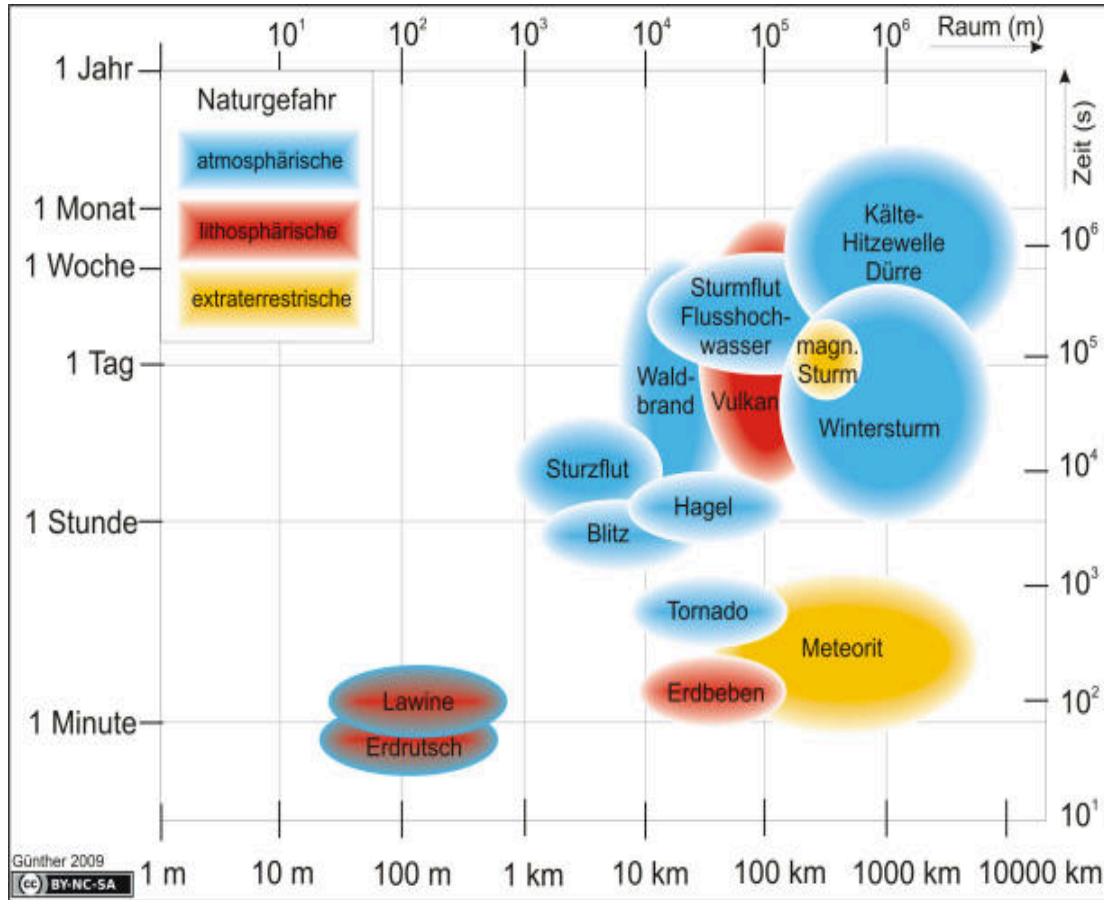
Trends der Wetterpersistenz im Sommer

Persistenz als Merkmal der großräumigen Wettervariabilität



Skalen von Naturgefahren

Meteorologische Extreme / Phänomene



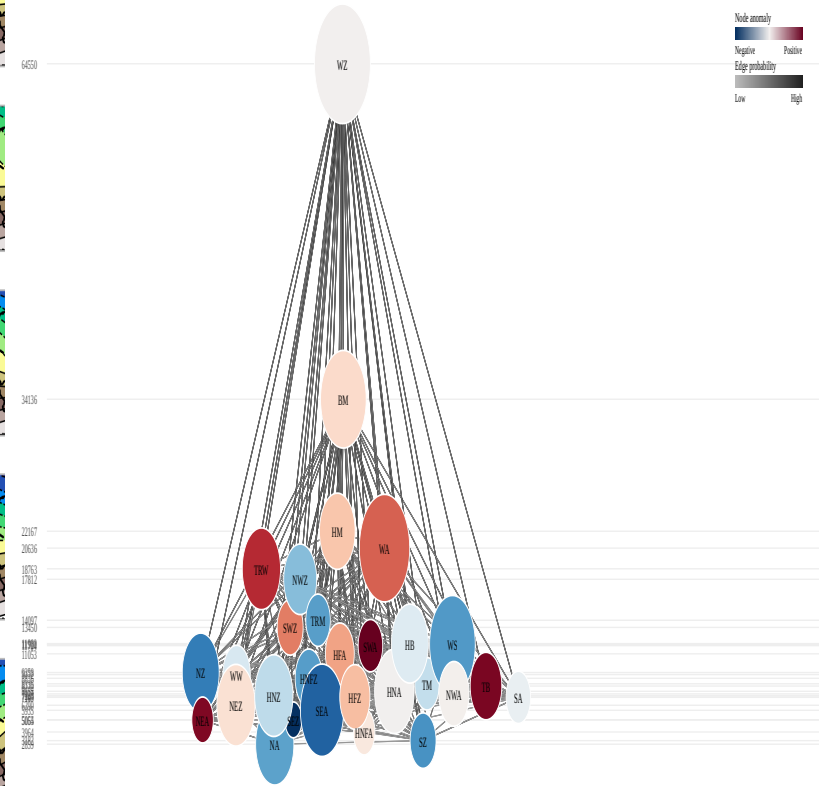
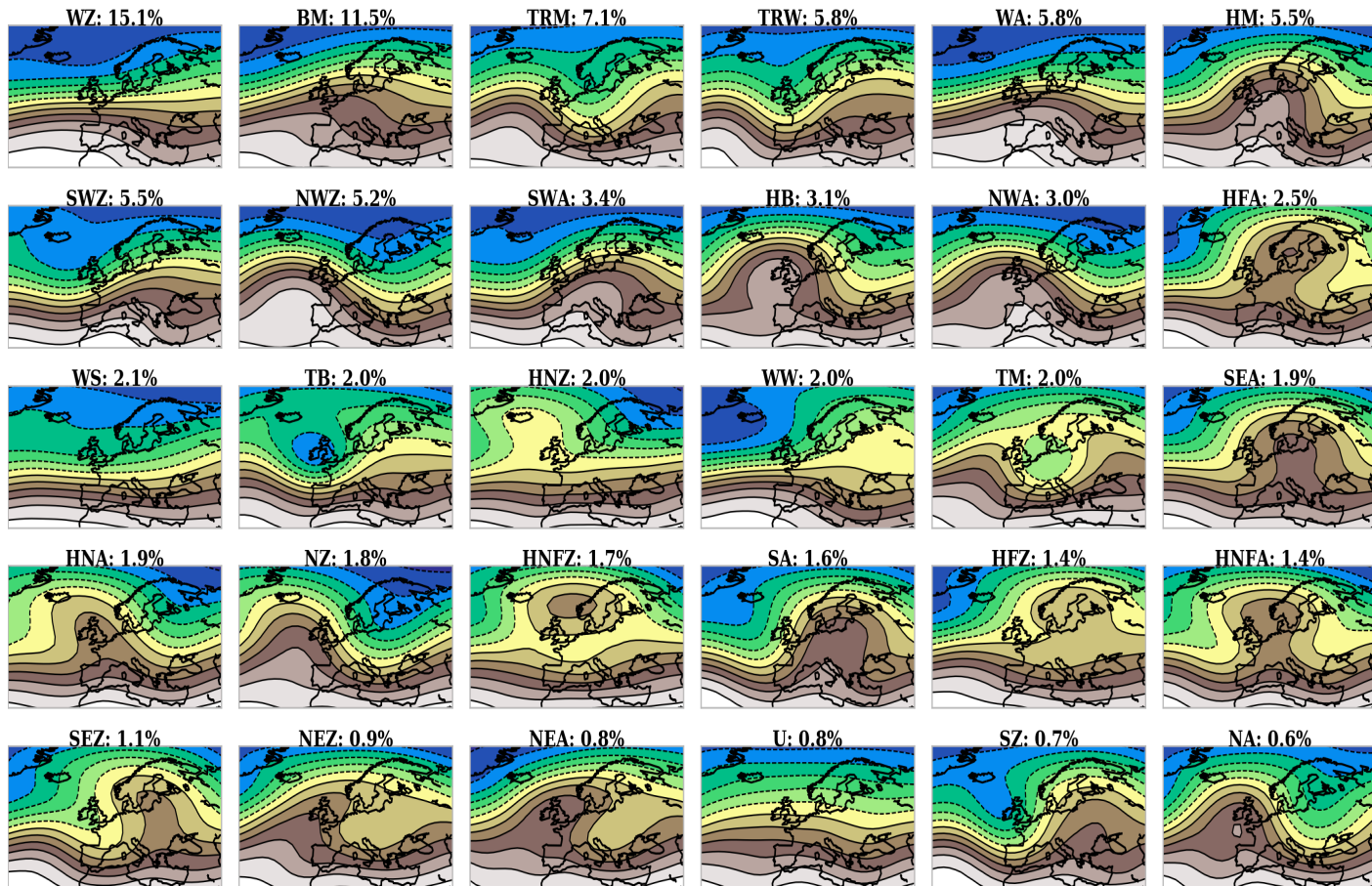
Phänomene:

Kälte- und Hitzewellen gehören zu den klimatologischen Extremen und zeichnen sich gegenüber anderen meteorologischen bzw. hydrologischen Ereignissen durch ihre große räumliche- und zeitliche Skala aus: (ca. 1000 km und > 1 Woche)

- hohe Vorhersagbarkeit von überregionalen Phänomenen
- räumliche Skala im Bereich des Großwetter

Großwetterlagen (Strömungsmuster)

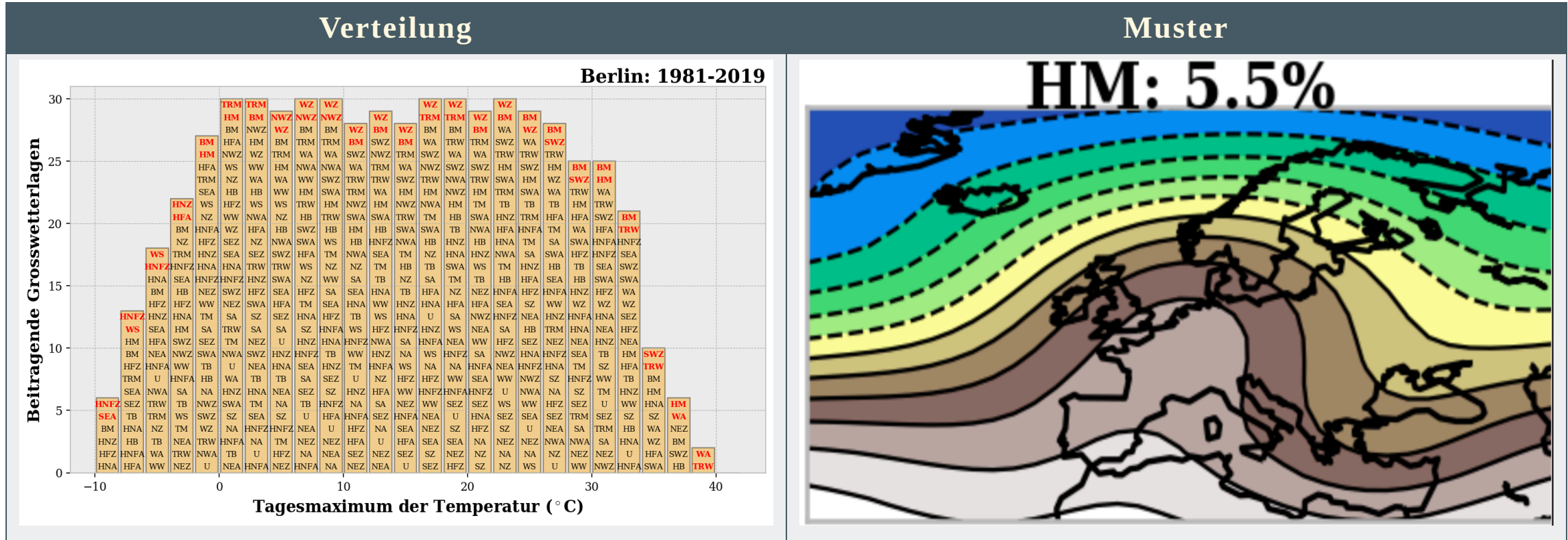
wiederkehrende Strömungsmuster: obere Reihe erklärt ca. 50% der Wettervariabilität



Klassifikation nach Hess/Brezowsky

Kritikalität von Strömungsmustern (Bsp. Hitze)

Kontextualisierung von Extremen



Alle Strömungsmuster können **normale Temperaturen**, aber nur wenige neigen auch zu **extremen Temperaturen**: Süd-West Zyklonal (SWZ), Zonaler Rücken über Mitteleuropa (BM), Hoch über Mitteleuropa (HM), Omega Wetterlagen (HFA).



lokale Extreme im regionalen Kontext



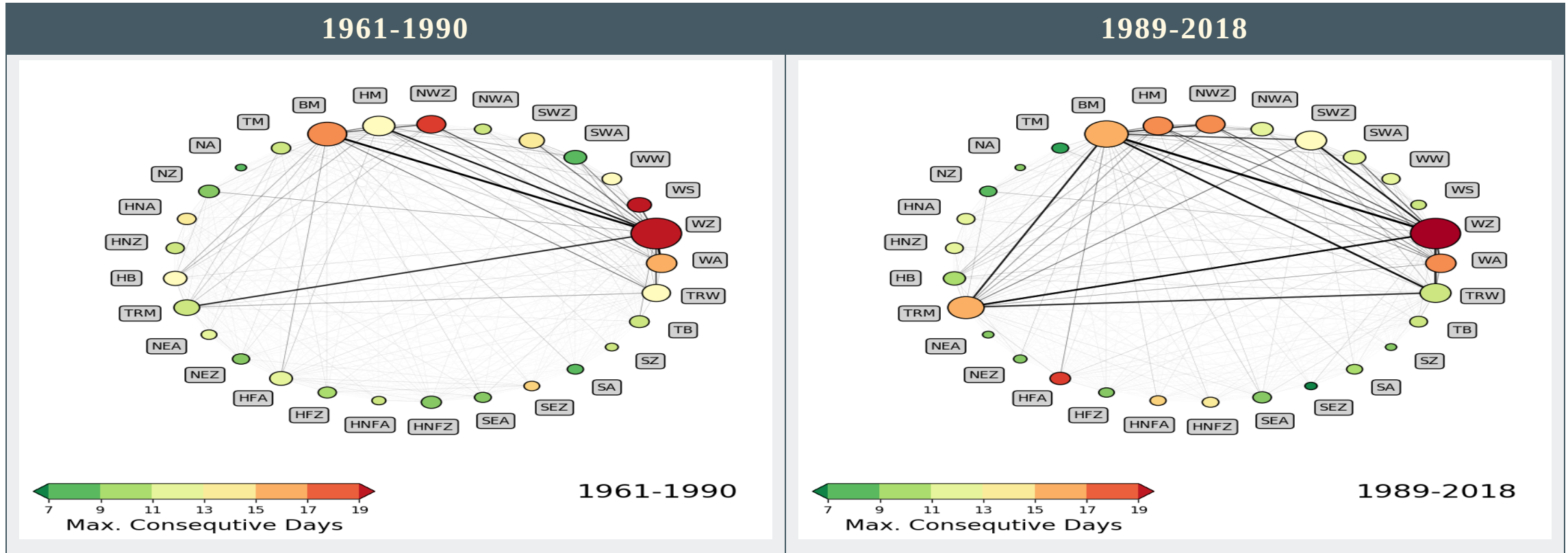
Programmbeispiele:

- <http://localhost:5000/comp?para=tmax&lo=13.5&la=52.5&perc=99.9>
- <http://localhost:5000/comp?para=tmax&lo=24.0&la=62.0&perc=99.9>
- <http://localhost:5000/comp?para=tp&lo=3.0&la=40.0&perc=99.9>



Übergänge von Großwetterlagen und Änderungen

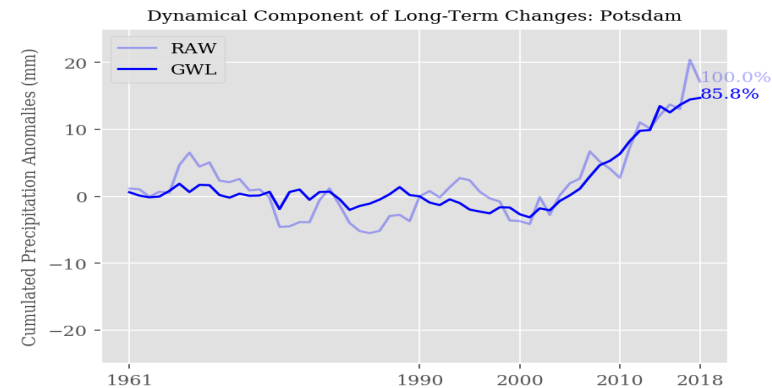
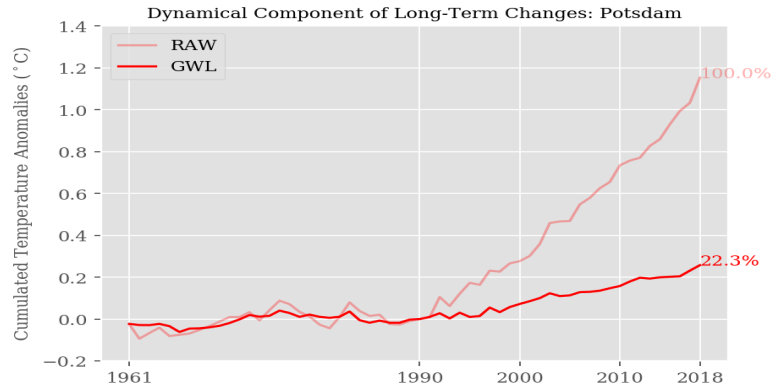
Veranschaulichung der Wettervariabilität als Netzwerk Graph



Knoten und Kanten: Häufigkeit (Größe) – Beständigkeit (Farbe) – Übergänge (Linienstärke)

Dynamischer Anteil

Welchen Anteil an der langfristigen Entwicklung haben veränderte Wetterlagen?

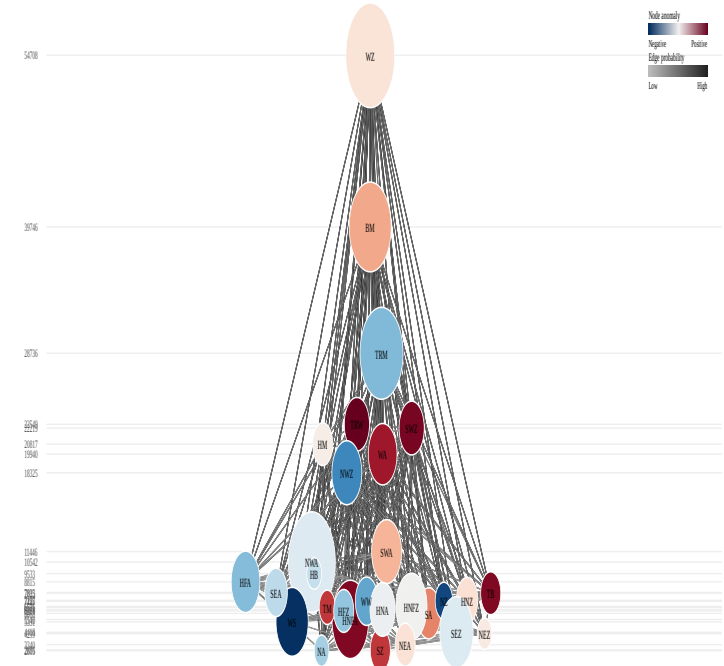


Long-term monthly mean Weather-Type Characteristics: Temperatur (°C)

| | HNA | HPZ | WA | SWA | HM | NEA | HFA | HWZ | NEZ | HM | HBI | HNZ | WZ | NA | SEZ | NWZ | NZ | TM | NWA | SEA | TRM | BNP | BNF | BNZ | U | TRW | SZ | WS | SA | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Jan | 6.1 | 9.6 | 4.0 | 2.4 | 2.9 | 0.0 | 1.2 | 4.8 | 3.3 | 2.4 | 2.0 | -2.3 | -6.3 | 4.3 | -4.4 | -0.8 | 0.9 | 3.7 | 0.0 | 2.1 | 6.2 | -0.2 | 1.5 | 7.6 | -0.6 | 2.1 | 0.6 | -1.6 | -1.5 | 2.1 |
| Feb | -5.0 | -2.0 | 4.2 | 6.3 | 0.3 | -3.2 | 2.0 | 4.1 | 5.3 | -4.3 | 1.0 | -0.3 | -4.5 | 4.2 | -0.0 | -0.2 | 1.2 | -1.6 | -3.5 | 5.1 | 2.7 | -0.3 | 0.4 | -4.2 | -2.9 | 0.0 | 1.9 | 2.2 | 0.9 | 1.7 |
| Mar | 0.8 | 0.5 | 7.4 | 8.3 | 4.3 | -1.8 | 3.5 | 0.4 | 7.4 | 1.7 | 4.8 | 3.9 | 0.9 | 5.6 | 0.9 | 4.3 | 3.1 | 1.4 | 2.3 | 5.9 | 4.8 | 5.3 | 2.6 | 0.9 | 1.1 | 2.6 | 6.4 | 6.9 | 2.3 | 7.3 |
| Apr | 7.7 | 8.5 | 10.5 | 14.7 | 9.8 | 10.8 | 10.0 | 8.3 | 11.6 | 7.6 | 11.2 | 7.2 | 5.5 | 9.1 | 6.6 | 13.0 | 6.5 | 3.8 | 6.1 | 9.5 | 13.7 | 10.6 | 6.0 | 9.1 | 7.2 | 7.6 | 10.2 | 25.0 | 7.5 | 14.8 |
| May | 13.0 | 15.2 | 13.4 | 17.9 | 14.8 | 13.2 | 13.2 | 15.0 | 14.9 | 10.9 | 15.5 | 13.4 | 13.0 | 12.5 | 9.5 | 17.7 | 16.0 | 9.7 | 13.2 | 11.2 | 15.7 | 14.9 | 9.7 | 16.0 | 14.4 | 14.2 | 14.6 | 16.6 | 12.4 | 17.9 |
| Jun | 17.8 | 19.3 | 17.3 | 19.9 | 18.9 | 17.5 | 18.8 | 18.1 | 18.1 | 14.4 | 20.1 | 15.0 | 16.0 | 15.3 | 15.3 | 20.4 | 13.2 | 13.1 | 15.4 | 14.9 | 22.7 | 16.9 | 13.6 | 20.1 | 18.1 | 16.8 | 17.3 | 20.8 | 15.3 | 21.8 |
| Jul | 24.1 | 24.7 | 18.8 | 21.2 | 20.4 | 19.4 | 19.3 | 21.6 | 20.7 | 19.3 | 26.1 | 17.1 | 18.5 | 16.7 | 16.7 | 0.0 | 14.9 | 14.9 | 18.1 | 17.0 | 22.7 | 16.2 | 15.2 | 21.9 | 22.3 | 18.7 | 24.2 | 24.0 | 15.1 | 27.8 |
| Aug | 19.8 | 19.0 | 18.4 | 20.9 | 18.9 | 18.3 | 18.8 | 20.1 | 18.9 | 18.1 | 16.5 | 15.2 | 17.1 | 14.5 | 16.8 | 14.5 | 14.3 | 18.0 | 15.7 | 15.1 | 18.3 | 15.9 | 19.7 | 18.0 | 17.3 | 19.2 | 22.8 | 15.2 | 21.9 | |
| Sep | 11.6 | 14.8 | 14.7 | 17.7 | 14.0 | 14.6 | 14.8 | 13.4 | 15.5 | 12.7 | 15.6 | 12.6 | 12.3 | 13.9 | 11.1 | 14.7 | 12.5 | 11.7 | 12.8 | 12.9 | 15.9 | 15.1 | 12.3 | 16.5 | 13.1 | 13.3 | 15.4 | 16.6 | 12.3 | 16.2 |
| Oct | 5.4 | 8.8 | 10.5 | 13.0 | 9.5 | 7.7 | 9.4 | 7.0 | 12.2 | 5.7 | 7.5 | 7.3 | 6.8 | 9.7 | 6.0 | 7.3 | 8.6 | 5.8 | 8.2 | 10.1 | 9.4 | 11.9 | 6.6 | 5.7 | 7.2 | 8.7 | 9.3 | 10.3 | 8.4 | 11.1 |
| Nov | 1.9 | 0.9 | 7.8 | 6.5 | 3.2 | 0.2 | 4.3 | 2.3 | 8.3 | 2.3 | 3.3 | 2.1 | 2.8 | 6.2 | 3.9 | 2.5 | 4.0 | 0.6 | 2.6 | 4.3 | 2.2 | 6.9 | 2.0 | -9.3 | 0.4 | 3.9 | 5.4 | 5.4 | 4.1 | 6.5 |
| Dec | -4.2 | -4.7 | 4.6 | 4.0 | 4.1 | 0.9 | 1.8 | 3.9 | 3.3 | -4.3 | -6.9 | 1.2 | -4.6 | 4.5 | -0.9 | -3.2 | 2.1 | -1.8 | 0.3 | 2.8 | -3.5 | -1.4 | 0.3 | -1.4 | -2.2 | -2.9 | 0.4 | 1.8 | -0.3 | 0.6 |

Long-term monthly mean Weather-Type Characteristics: Precipitation (mm/d)

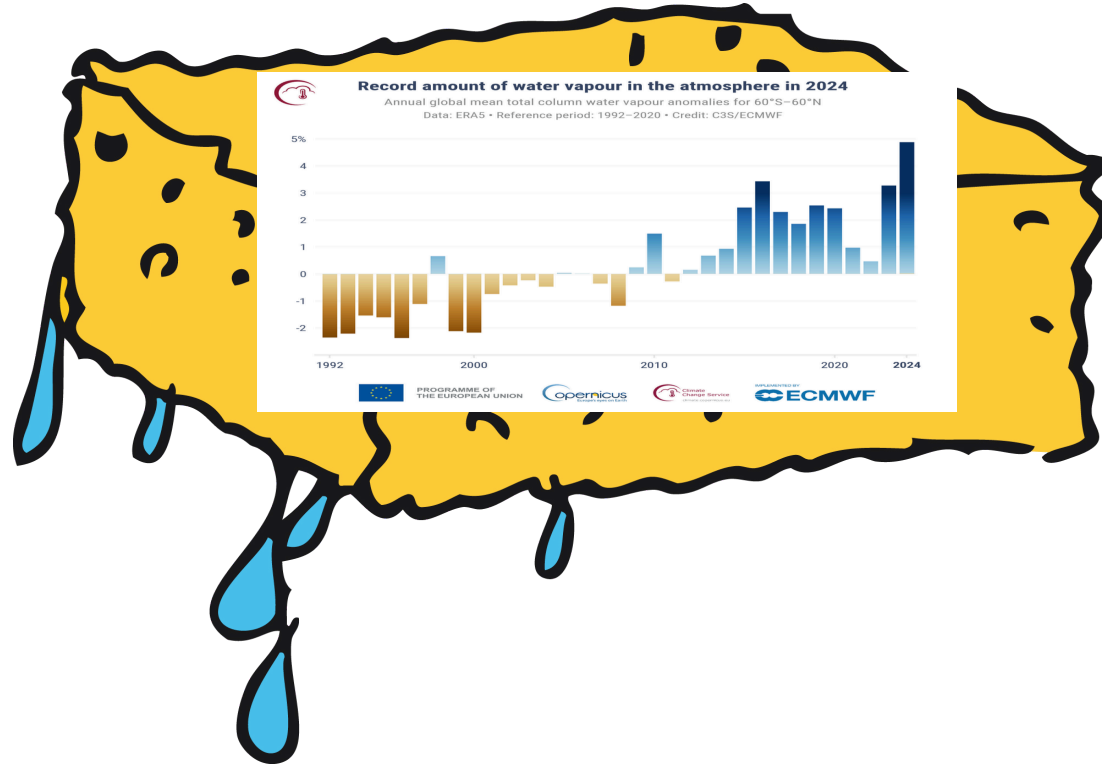
| | HNA | HPZ | WA | SWA | HM | NEA | HFA | HWZ | NEZ | HM | HBI | HNZ | WZ | NA | SEZ | NWZ | NZ | TM | NWA | SEA | TRM | BNP | BNF | BNZ | U | TRW | SZ | WS | SA | |
|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Jan | 0.3 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.0 | 1.6 | 0.1 | 1.9 | 0.8 | 0.3 | 0.9 | 1.6 | 3.0 | 1.2 | 0.3 | 3.2 | 2.0 | 0.0 | 1.3 | 0.1 | 0.8 | 1.3 | 0.4 | 1.0 | 0.8 | 1.1 | 0.4 | 1.1 | 0.1 |
| Feb | 0.5 | 0.8 | 1.2 | 0.2 | 0.5 | 0.9 | 2.1 | 0.1 | 1.8 | 1.1 | 0.2 | 0.7 | 1.4 | 2.8 | 1.8 | 0.3 | 3.0 | 1.5 | 2.2 | 1.1 | 0.0 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 1.1 | 0.6 | 0.8 | 0.3 | 1.2 | 0.0 |
| Mar | 0.1 | 1.9 | 0.9 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 0.8 | 0.1 | 2.9 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 2.7 | 2.2 | 0.1 | 0.7 | 2.6 | 1.9 | 2.3 | 0.7 | 0.1 | 0.9 | 1.8 | 0.4 | 0.1 | 0.5 | 1.2 | 0.6 | 2.5 | 0.4 |
| Apr | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.3 | 0.0 | 1.9 | 0.9 | 2.6 | 1.2 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 2.1 | 0.5 | 1.9 | 1.9 | 1.2 | 1.4 | 0.5 | 0.0 | 1.2 | 1.9 | 0.0 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 2.0 | 2.6 | 0.3 |
| May | 0.3 | 1.8 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 1.6 | 0.3 | 2.9 | 2.3 | 0.2 | 0.3 | 2.5 | 2.6 | 2.2 | 2.1 | 2.2 | 2.1 | 3.8 | 0.6 | 0.9 | 2.7 | 2.5 | 0.2 | 1.6 | 2.6 | 2.9 | 0.8 | 2.7 | 2.2 |
| Jun | 0.9 | 0.9 | 1.9 | 1.5 | 1.1 | 0.3 | 2.3 | 0.3 | 3.3 | 1.9 | 0.2 | 1.0 | 2.5 | 2.9 | 0.6 | 3.1 | 3.1 | 2.2 | 3.9 | 1.9 | 0.6 | 2.4 | 2.7 | 0.7 | 1.9 | 1.9 | 4.0 | 3.1 | 3.0 | 0.4 |
| Jul | 0.2 | 2.0 | 1.2 | 0.5 | 0.8 | 0.0 | 1.7 | 0.8 | 2.9 | 1.4 | 0.1 | 0.4 | 2.2 | 2.9 | 0.0 | 0.0 | 2.9 | 1.0 | 1.0 | 0.3 | 3.5 | 2.9 | 0.8 | 2.4 | 3.5 | 3.1 | 1.9 | 3.3 | 0.0 | |
| Aug | 0.1 | 1.1 | 0.9 | 0.4 | 1.1 | 0.9 | 1.5 | 0.8 | 2.8 | 3.8 | 0.2 | 1.2 | 3.6 | 2.5 | 0.8 | 3.2 | 2.8 | 0.7 | 4.2 | 0.6 | 0.2 | 2.3 | 4.6 | 0.6 | -4.3 | 1.3 | 2.2 | 2.5 | 0.6 | |
| Sep | 0.7 | -3.4 | 1.0 | 0.5 | -0.6 | 0.3 | 2.0 | 0.5 | 1.9 | 1.8 | 0.2 | 0.8 | 1.7 | 2.4 | 0.7 | 0.9 | 3.2 | 2.9 | 4.2 | 0.9 | 0.0 | 1.9 | 2.5 | 0.0 | 2.5 | 0.7 | 2.1 | 2.3 | 0.6 | 0.2 |
| Oct | 0.3 | 1.3 | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.5 | 2.3 | 0.3 | 1.9 | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 1.9 | 2.5 | 0.0 | 2.3 | 3.6 | 1.8 | 3.0 | 0.6 | 0.0 | 0.8 | 1.7 | 0.4 | 2.2 | 0.8 | 1.2 | 1.3 | 2.7 | 0.0 |
| Nov | 0.1 | 1.2 | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 2.3 | 0.2 | 2.4 | 1.1 | 0.3 | 0.8 | 0.2 | 2.5 | 0.6 | 1.9 | 2.5 | 2.6 | 3.4 | 1.0 | 0.2 | 0.5 | 1.7 | 0.1 | 2.9 | 2.0 | 1.6 | 0.6 | 3.1 | 0.0 |
| Dec | 0.3 | 1.2 | 0.9 | 0.7 | 0.4 | 0.5 | 2.2 | 0.2 | 1.9 | 2.6 | 0.4 | 0.7 | 0.6 | 3.2 | 2.1 | 1.0 | 3.7 | 2.1 | 4.5 | 0.8 | 0.1 | 1.1 | 1.6 | 0.4 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 2.6 | 2.4 | 0.1 |



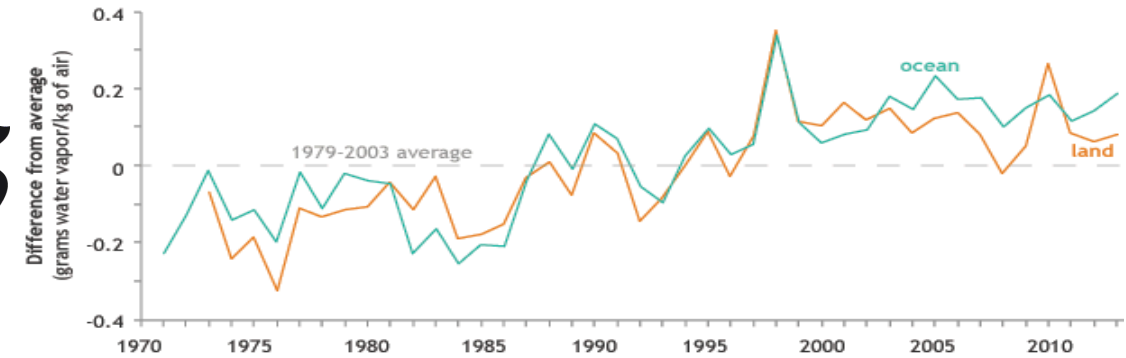
Zusätzlicher Anteil am Erwärmungstrend von ca. 20% durch neue dominante Wetterlagen über Europa (bspw. BM, TRM)

Trends: Spezifische Luftfeuchte & Relative Luftfeuchte

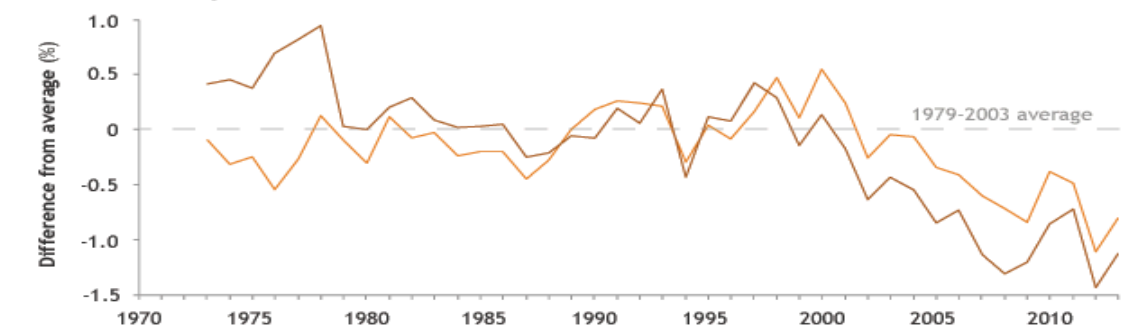
Atmosphäre als Schwamm



Specific humidity over land and ocean



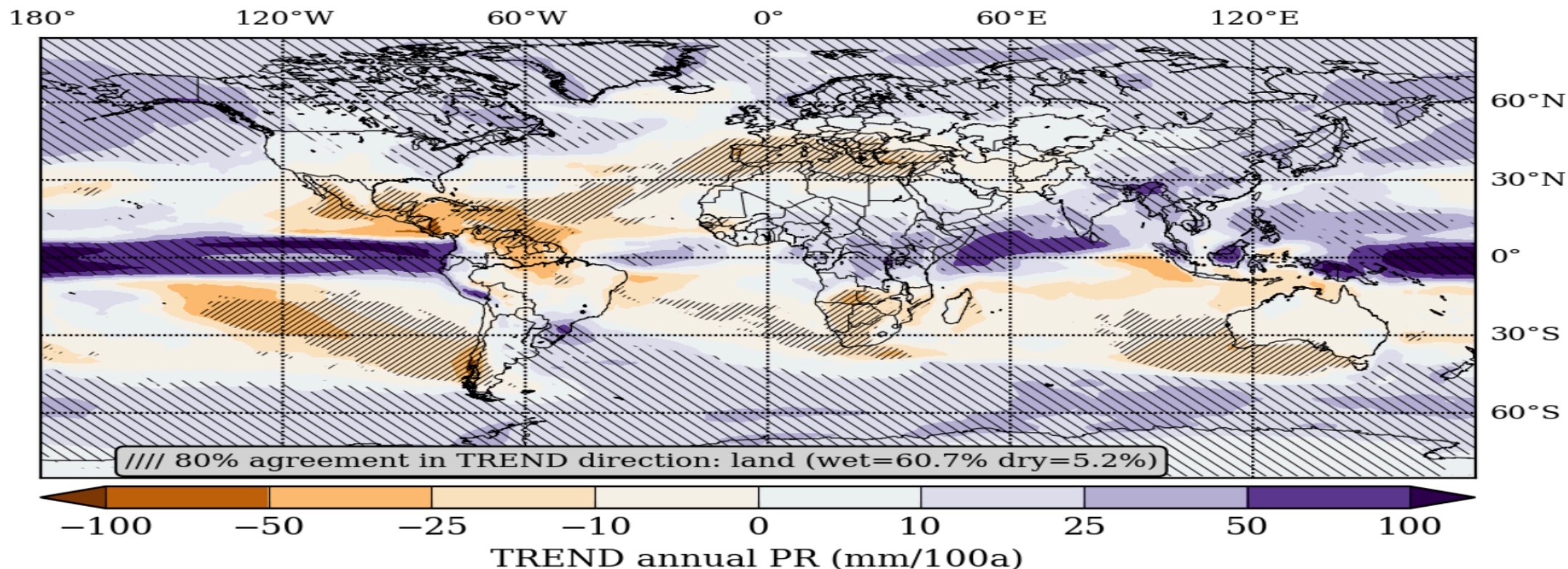
Relative humidity over land



mehr Wasserdampf in der Atmosphäre und gleichzeitig **größere Hemmschwelle** für Niederschläge – **Folgen für Niederschlagsverteilung**: längere Trockenphasen bei gleichzeitig intensiveren Niederschlägen

Niederschlagstrends in Klimamodellen

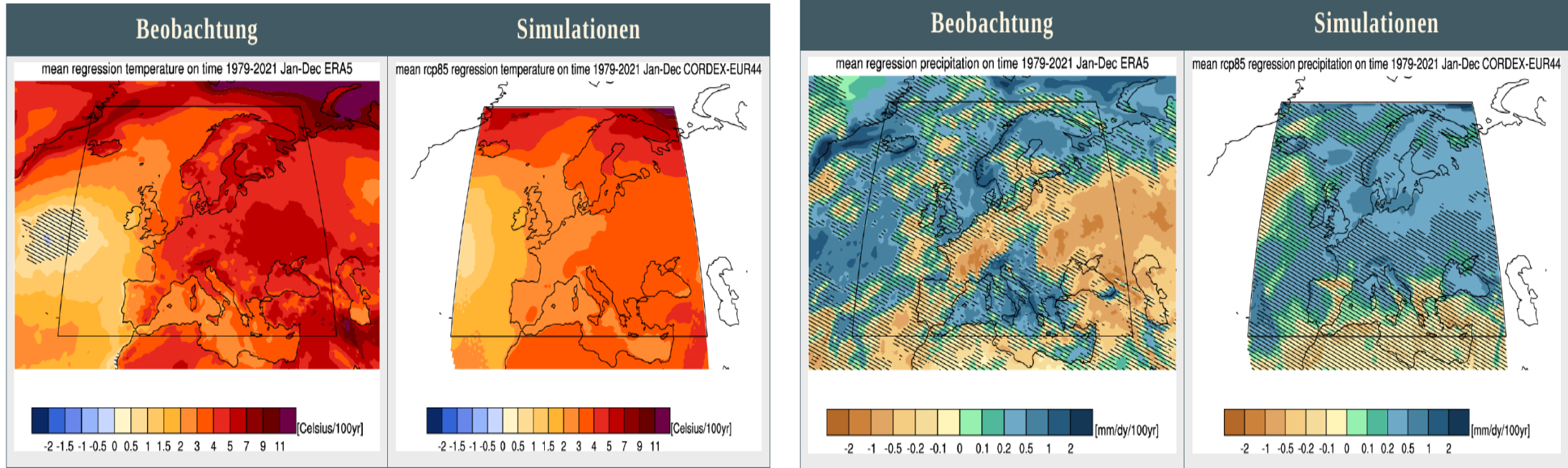
eher mehr als weniger?



CMIP5-RCP85 Modelle projizieren bis zum Ende des Jahrhunderts für 60% der Landflächen eine Zunahme der Jahresniederschläge und nur 5% einen Rückgang (z.B. Mittelmeerraum).

Trendvergleich für Europa: 1979-2021

Reanalyse vs Klimasimulationen



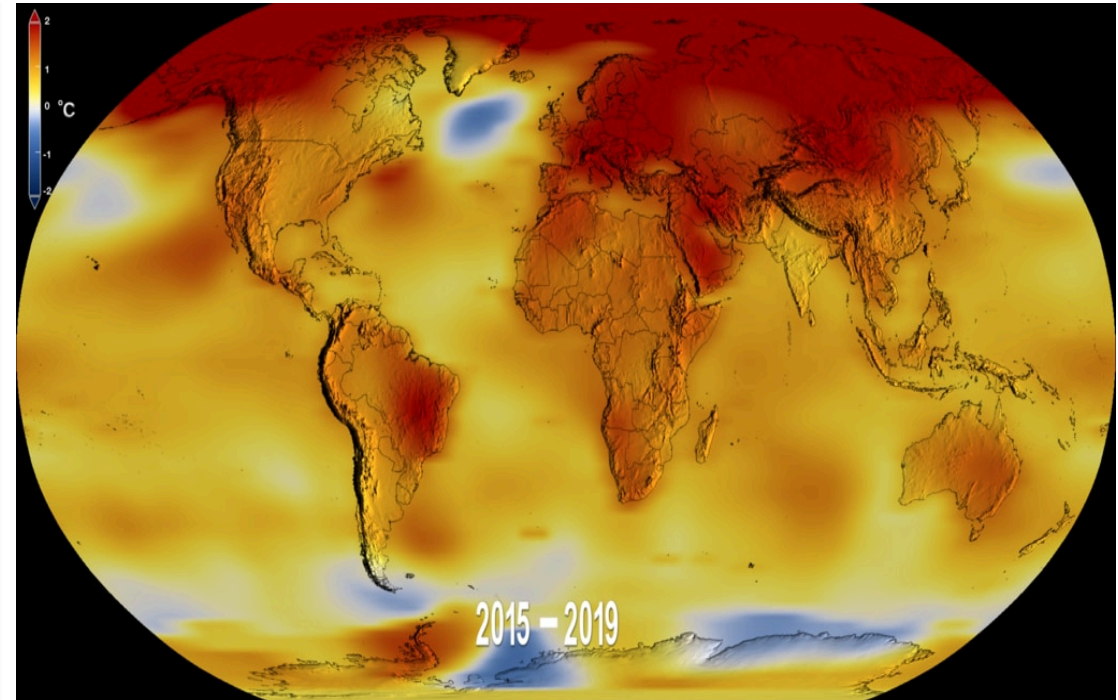
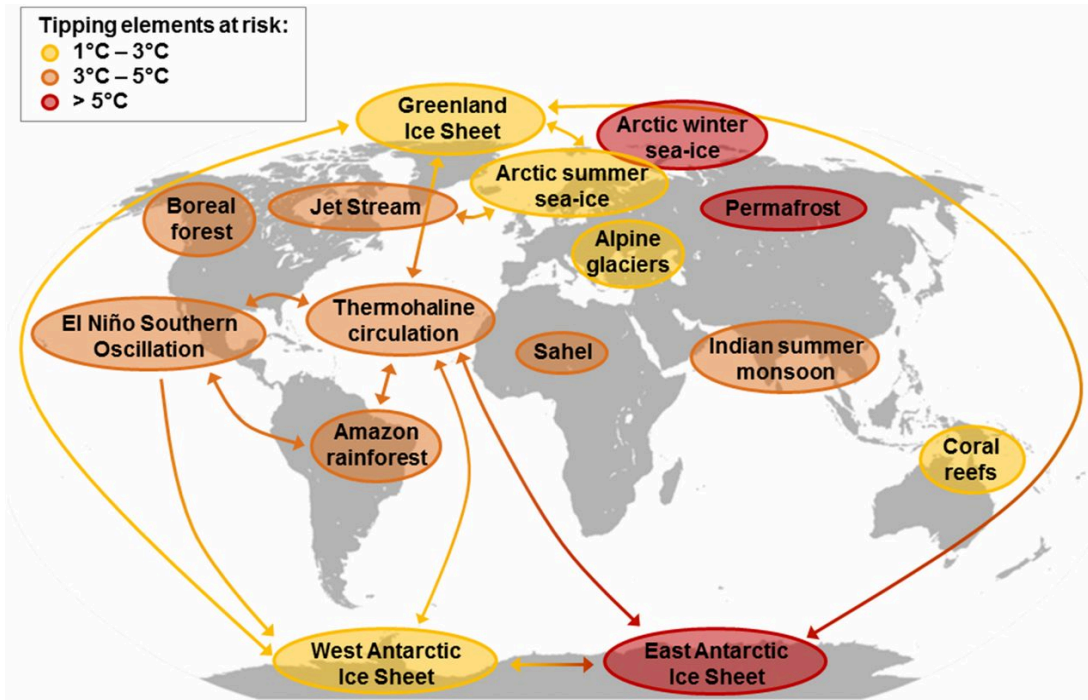
beobachtete Trendmuster im Jahresniederschlag deuten auf Spuren veränderter Großwetterlagen hin – Szenarien zeigen vorwiegend Änderungssignale in Abhängigkeit von der geografischen Breite

© Climate Explorer



Kippelemente im Klimasystem

Signatur des sich abschwächenden Golfstroms



Kippelemente im Klimasystem sind gegenüber einer globalen Erwärmung um mehr als 2 Grad sehr anfällig. Verändern sich diese, hat das **irreversible Folgen** auf das Gesamtsystem und dessen Stabilität – **abschmelzendes Grönlandeis** verlangsamt die **ozeanische Umweltbewegung** im Nordatlantik (AMOC) – Möglicher Einfluss auf Wettersysteme nach Europa.

Definitionen



Extremereignisse

Extreme sind Werte bzw. Ereignisse die, bezogen auf eine oder mehrere Skalen, einen definierten Grenzwert überschreiten.

- Hitzetage: $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ | Tropische Nächte: $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$ bei Hitzewellen

Rekorde sind Maxima oder Minima der betrachteten Größe, die für einen bestimmten Ort oder ein bestimmtes Gebiet und den gewählten Zeitraum gelten.

Beispiel Ort: Potsdam (Jan 1961 bis Apr 2021)

- Tagesmaximum (1992-08-09: 39.1°C)
- Monatsmittel (Apr 2018: 13.6°C , Mai 2018: 17.7°C , Jun 2019: 22.5°C , Aug 2015: 21.8°C)
- Jahresmittel (2018, 2019: 11.3°C)

Extremereignisse sind selten vorkommende Ereignisse, die von einem langjährigen statistischen Durchschnittswert stark abweichen und deren Wiederkehrperiode meist deutlich länger als 10 Jahre ist.

- Elbe-Hochwasser 2002, 2013, Hitzesommer: 2003, 2018, 2019



Definitionen von Extremereignisse

- Basierend auf **statistischen Kriterien** wird ein extremes Ereignis gewöhnlich durch die Überschreitung eines **bestimmten Schwellenwertes** charakterisiert.
- Für die Definition von Extremereignissen werden aber auch sehr oft Werte des **5. und 95. Perzentils** einer Häufigkeitsverteilung als Schwellenwerte angesetzt.
- Eine weitere Möglichkeit ein Extremereignis zu definieren, wäre die Bestimmung eines Schwellenwertes, der sich an dem **Gefahrenpotential** orientiert, das ein solches Ereignis für eine Region mit sich bringt (z.B. Niederschlagshöhe, die eine Überschwemmung zur Folge hat).
- Vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet, können extreme Wetter- und Klimaereignisse als **Störungen meteorologischer Felder** in verschiedenen Raum- und Zeitskalen, die unterschiedliche Entwicklungsstufen durchlaufen, angesehen werden. Erkennung und Untersuchung solcher Störungen erfordert eine kombinierte zeitlich-räumliche Betrachtungsweise der meteorologischen Felder bzw. den Einsatz von multivariaten Verfahren zu deren Analyse. Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass sie zur Aufdeckung von Ursachen des Auftretens eines Extremereignisses führen können.



Dürre

Dürre ist ein aperiodisch eintretender Zustand, der aufgrund der Verhältnisse in der unteren Troposphäre zu einem außergewöhnlich *hohen Wasserdefizit im Boden* führt und bei dem eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen nicht gewährleistet ist.

Meteorologische Dürren: Darunter versteht man eine Periode von Monaten oder Jahren mit *unterdurchschnittlichen Niederschlägen*. Sie werden oft von überdurchschnittlich hohen Temperaturen begleitet und durch anhaltende Hochdruckverhältnisse verursacht. Nicht selten werden solche Bedingungen durch ungewöhnliche tropische Meeresoberflächentemperaturen angestoßen.

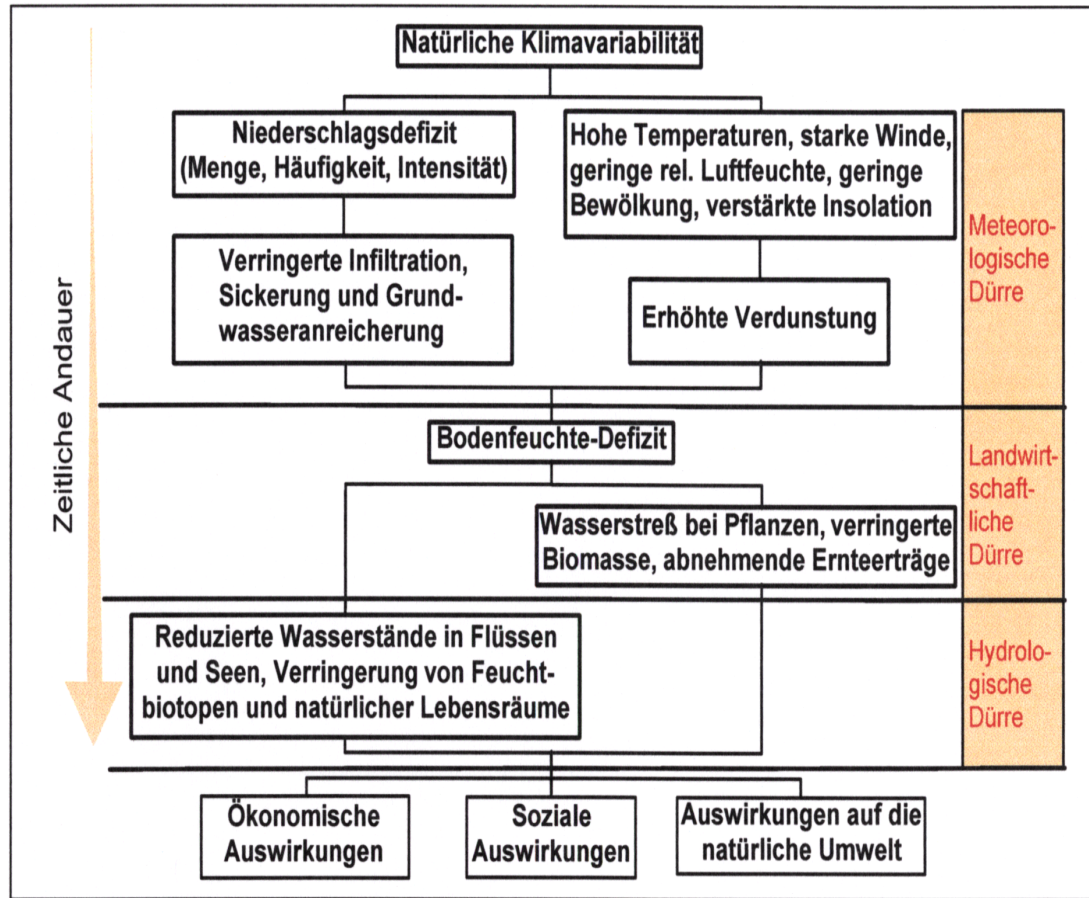
Landwirtschaftliche Dürren: Hier sind die *Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum* und die Ernte bestimmend. Wichtig sind dabei trockene Böden über einen längeren Zeitraum, die durch geringen Niederschlag und/oder höhere Verdunstung entstehen.

Hydrologische Dürren: Entscheidendes Kriterium sind *geringe Wasserressourcen*. Die Ursachen liegen in verringerten Abflüssen und geringen Wasservorräten in Brunnen, Seen und anderen Reservoirs. Hydrologische Dürren entwickeln sich langsam und sind außer von geringen Niederschlägen auch vom Wassermanagement abhängig.



Auswirkung von Dürre

Ökonomisch und Sozial



Dürrekatastrophe:

Hält eine Dürre über mehrere Jahre an, kann sie zu einer Dürrekatastrophe führen. Das Ausmaß hängt ab von:

- Bevölkerungsdichte
- Migrationsverhalten
- Landnutzungssystem
- Wasserversorgung
- Ernährungsmöglichkeit

Desertifikation

Unter Desertifikation versteht man die **Ausbreitung wüstenähnlicher Verhältnisse** in Gebiete hinein, in denen sie klimatisch eigentlich nicht existieren. – Die Desertifikation umfasst die **Degradation von Böden** und Vegetation, ist also vom Menschen in hohem Maße beeinflusst und ein *irreversibler Prozess*.

Positive Rückkopplung zwischen Dürre und Desertifikation: Dürre bzw. Dürrekatastrophe verstärken die Desertifikation – Desertifikation erhöht die Wahrscheinlichkeit von Dürren



Bodendegradation

Anthropogene Bodendegradationen sind dauerhafte oder irreversible Veränderungen der Strukturen und Funktionen von Böden oder deren Verlust, die durch physikalische und chemische oder biotische Belastungen durch den Menschen entstehen und die Belastbarkeit der jeweiligen Systeme überschreiten.

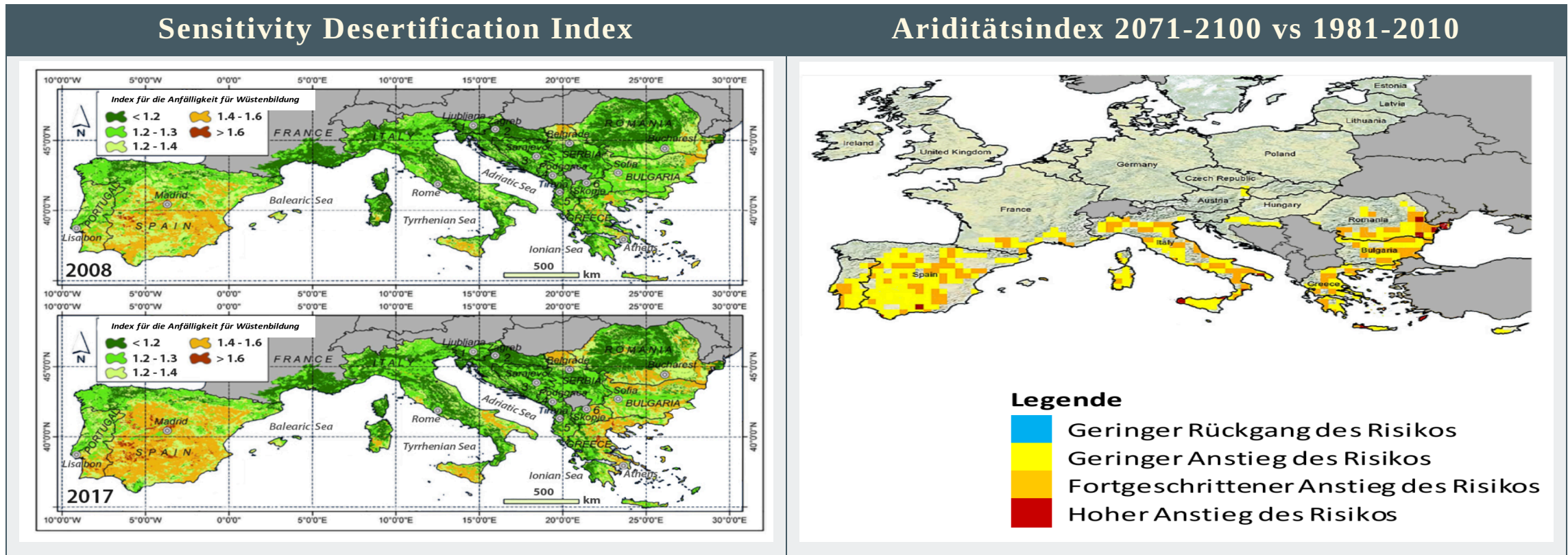
Landwirtschaft:

- Übermäßige u. einseitige Beanspruchung der Böden durch Monokulturen
- Falsche Bewässerungsmethoden
- Überweidung, die Vegetation kann sich nicht mehr erholen & Abholzung



Beispiel: Südeuropa

Aridität: Vergleich langfristiger durchschnittlicher Wasserversorgung (Niederschläge) zu entsprechenden Wasserbedarf (Verdunstung u. Vegetation).

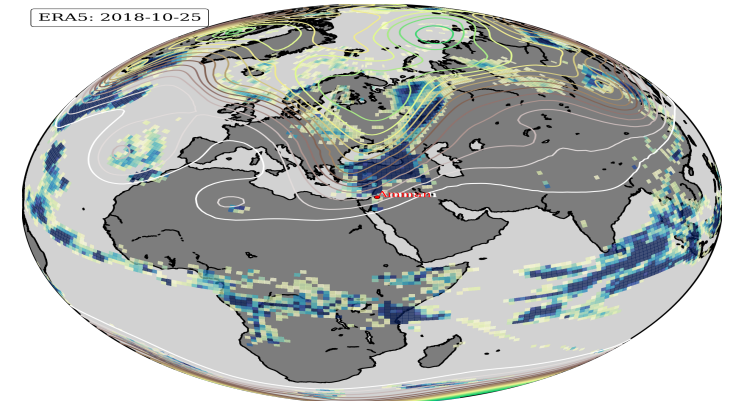
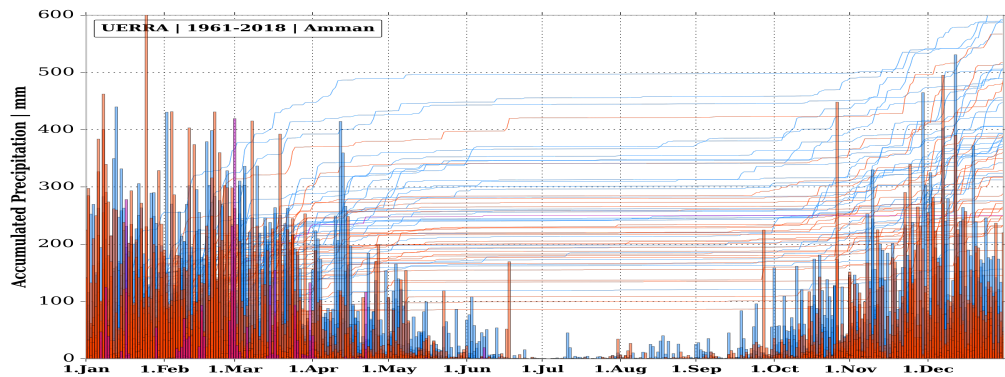
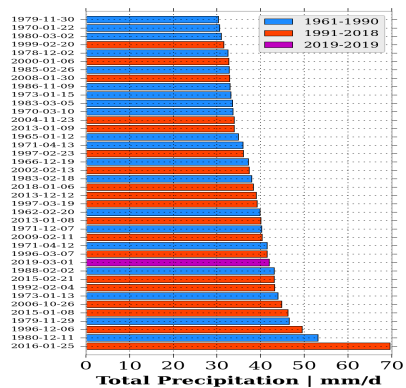


© Prävälje et al. (2017)

© Spinoni et al. (2018)

Beispiel: Jordanien

CapTainRain: Capture and Retain Heavy Rainfall in Wadi-Systems



Starkregenereignisse können in Wadies zu gefährlichen Regenwasseransammlungen führen.



Messbarkeit



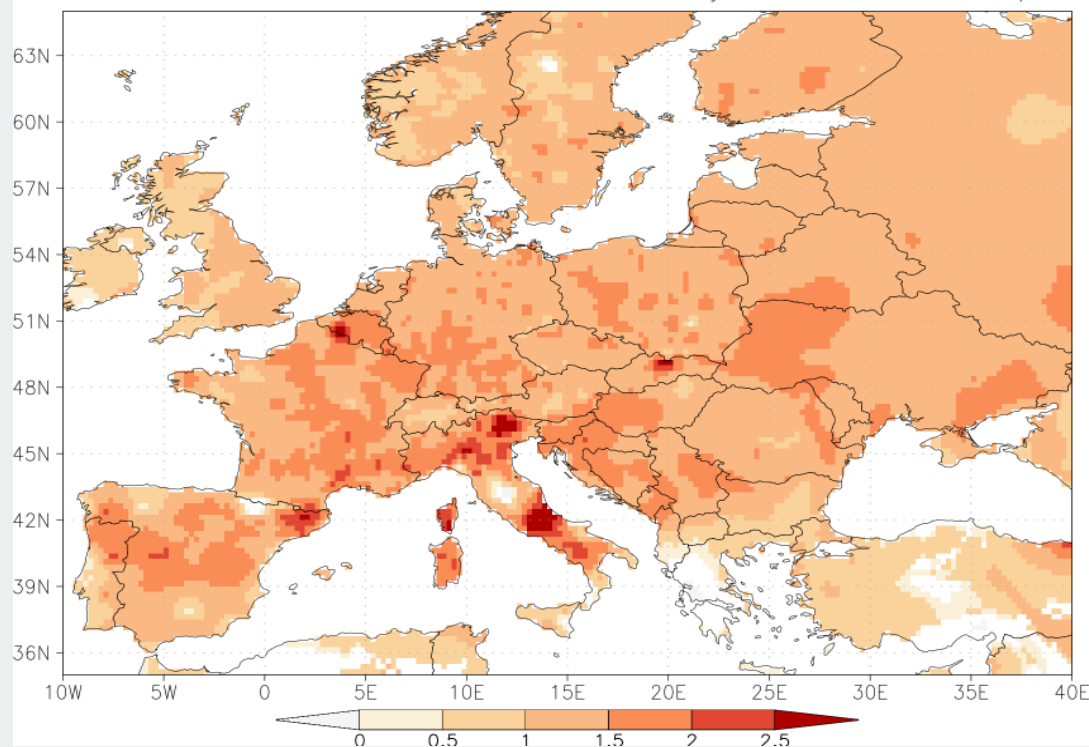
Perzentile / Trends der Extreme

Extreme zeigen stärkere Änderungssignale als Mittelwerte

Auslöser kritische Strömungsmuster

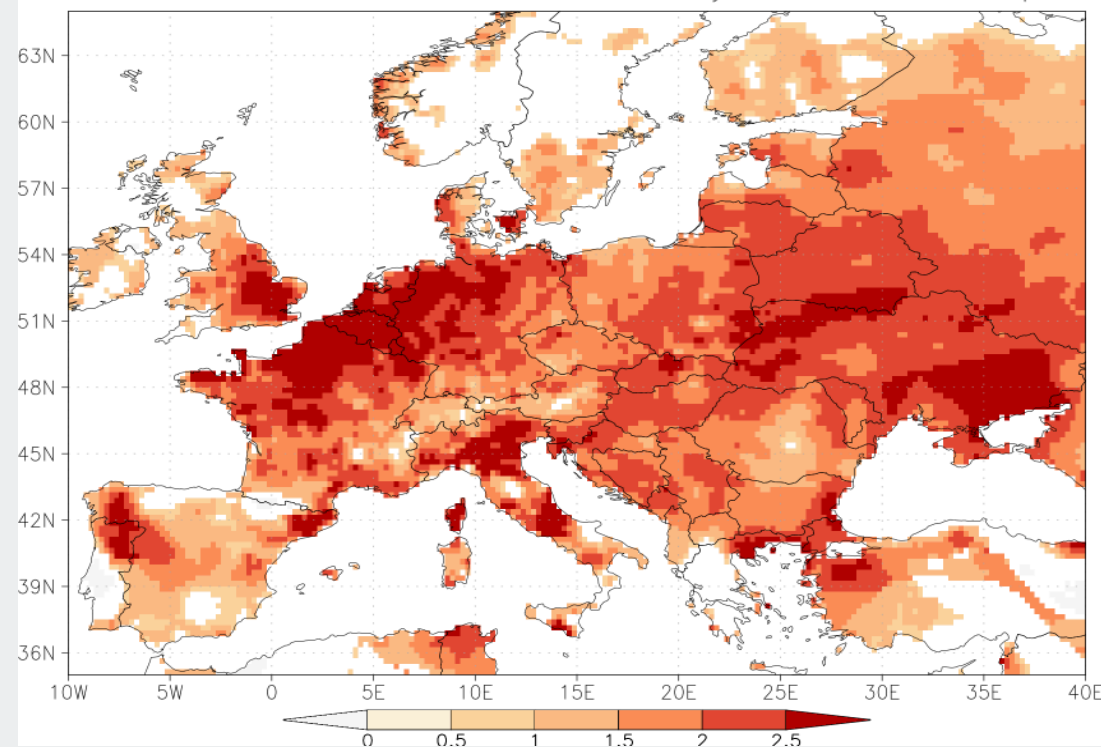
Jahresmittel der Maximaltemperatur

diff annual E-OBS 28.0e annual mean of daily Tmax 1994–2023
with annual E-OBS 28.0e annual mean of daily Tmax 1961–1990 $p < 10\%$



Jahresmaximum der Maximaltemperatur

diff annual E-OBS 28.0e annual max of daily Tmax 1994–2023
with annual E-OBS 28.0e annual max of daily Tmax 1961–1990 $p < 10\%$



Meteorologische Dürreindizes

| Index | Abk. | Quelle |
|---|------|---|
| BLUMENSTOCK`s Index | | BLUMENSTOCK (1942) |
| Rainfall Anomaly Index (<i>Niederschlag-Anomalie-Index</i>) | RAI | VAN ROOY (1965) |
| Dezil-Methode | | GIBBS & MAHER (1967) |
| PED`s Index (<i>Index von PED</i>) | Si | PED (1975) |
| BHALME & MOOLEY Drought Index (<i>Dürre Index von BHALME & MOOLEY</i>) | BMDI | BHALME & MOOLEY (1980) |
| Standardized Anomaly Index of KATZ & GLANTZ (<i>Standardisierter Anomalie-Index von KATZ & GLANTZ</i>) | | KATZ & GLANTZ (1986) |
| Dürreindex für Waldschäden | | KÖNIG & MAYER (1989) |
| PÁLFAI Aridity Index (<i>Ariditäts-Index von PÁLFAI</i>) | PAI | PÁLFAI(1991) |
| Drought Severity Index (<i>Index für "Schwere Dürre"</i>) | DSI | BRYANT et al. (1992) |
| Standardized Precipitation Index (<i>Standardisierte Niederschlag-Index</i>) | SPI | McKEE et. al (1993) |
| Trockenheitsindex nach BRUSCHEK | | BRUSCHEK (1994) |
| Effective Drought Index (<i>Index für "Tatsächliche Dürre"</i>) | EDI | BYUN & WILHITE (1999) |
| Monthly Drought Index (<i>Monatliche Dürre Index</i>) | | BIGLER et al. (2006) |
| Reconnaissance Drought index (<i>Informierender Dürre Index</i>) | RDI | TSAKIRIS et al. (2007) (Erweiterung von SPI) |
| Precipitation Potential Evaporation Anomaly (<i>Niederschlag-Potentielle Evaporation-Anomalie</i>) | PPEA | BURKE & BROWN (2008) |
| ELLENBERG`s Drought Index (<i>Dürre Index von ELLENBERG</i>) | EQ | MÁTYÁS et al. (2010) (forest vegetation) |



Weitere Dürreindizes

BRUSCHEK-Trockenheitsindex: Der Trockenheitsindex nach BRUSCHEK (1994) ist ein jährlicher Index, der sich aus der Niederschlagssumme, dividiert durch die Anzahl der Sommer-tage errechnet.

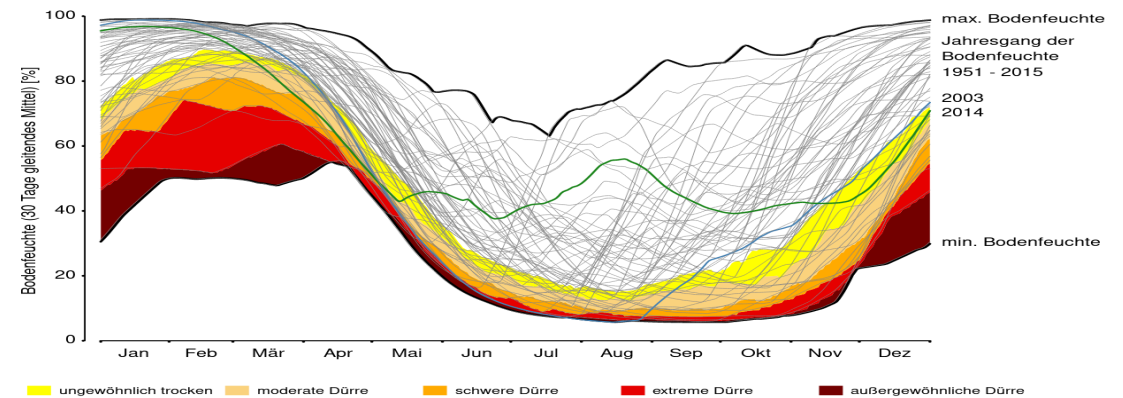
Kysely-Tage: Das Tagesmaximum der Lufttemperatur (Tmax) überschreitet mindestens an 3 Tagen in Folge 30.0°C und die Kysely-Tage werden solange über die gesamte nachfolgende Periode gezählt, wie Tmax an keinem Tag die Temperatur von 25.0°C unterschreitet

Palmer-Drought-Severity-Index (PDSI) In diesen Index gehen Niederschlag, Bodentemperatur und Verdunstung ein und er misst die Bodenfeuchte auf einer Skala von -10 (trocken) bis +10 (feucht). Der negative Teil der Skala wird wie folgt klassifiziert:

Tab.3: Dürre-Intensitäten nach dem U.S. National Weather Center (METTE et al. 2011)

| Dürregrad | Wiederkehr [Jahre] | Mögliche Folgen | PDSI | SPI |
|---------------------|--------------------|---|---------------|---------------|
| Milde Dürre | 3 – 4 | Geringe Drosselung des Wachstums; erhöhtes Feuerrisiko; möglicher Beginn (Ende) einer Dürre | -1,0 bis -1,9 | -0,5 bis -0,7 |
| Mäßige Dürre | 5 – 9 | Getreideschäden; hohes Feuerrisiko; Rückgang der Wasserstände | -2,0 bis -2,9 | -0,8 bis -1,2 |
| Starke Dürre | 10 – 17 | Ernteeinbußen: sehr hohes Feuerrisiko; Wassermangel | -3,0 bis -3,9 | -1,3 bis -1,5 |
| Extreme Dürre | 18 – 43 | Ernteaufälle; extremes Feuerrisiko; großflächiger Wassermangel | -4,0 bis -4,9 | -1,6 bis -1,9 |
| Exzeptionelle Dürre | >43 | Großflächige Ernteaufälle; Feuergefahr; Erschöpfung von Wasservorräten | ab -5,0 | ab -2,0 |

PDSI: Palmer Drought Severity Index, SPI: Standard Precipitation Index



© UFZ (Dürremonitor)

Standardized Precipitation Index (SPI)

$$SPI_{ijk} = \frac{P_{ijk} - \overline{P_{ij}}}{\sigma_{ij}}$$

- P Precipitation, i location, j timeframe, k year

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Potentielle Verdunstung:

Haude-Formel: (Sättigungsdefizit)

$$ETP_{\text{Haude}} = a_{\text{Haude}} \cdot (e_s - e)$$

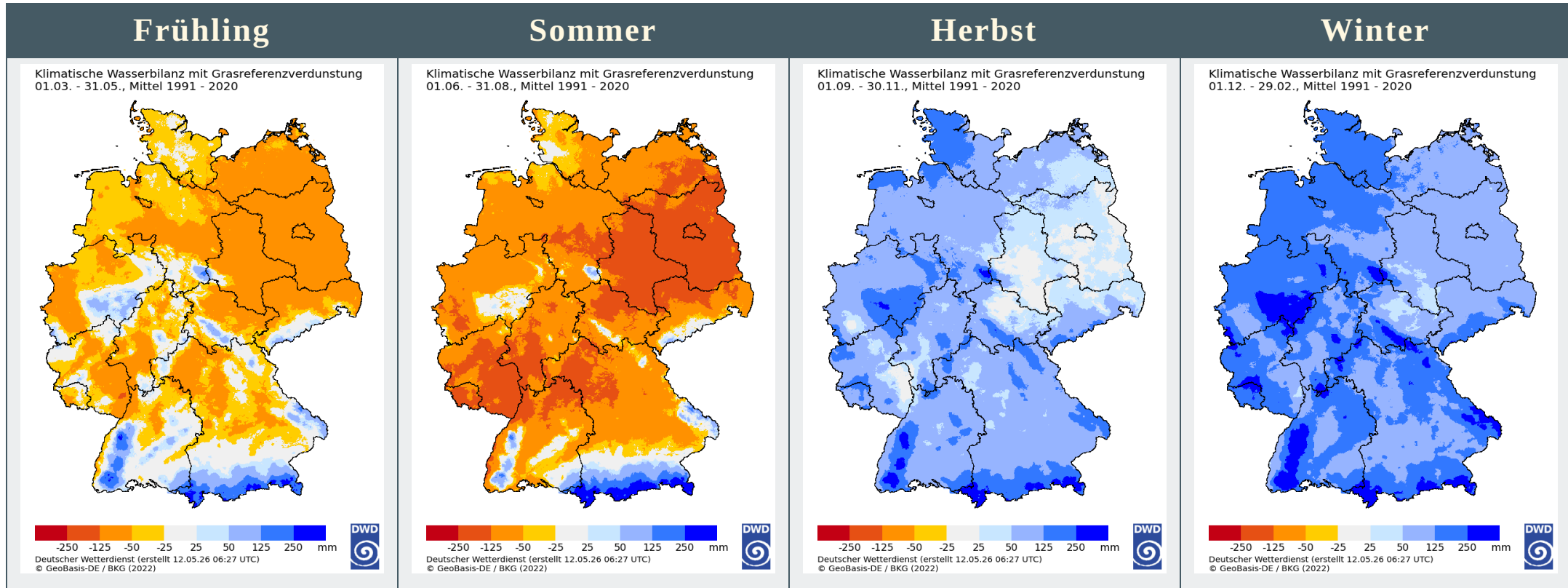
Penman-Monteith:

berücksichtigt Strahlung, Temperatur, Wind und spezifische Pflanzenparameter



Klimatische Wasserbilanz

Wasserüberschuss oder Wassermangel



Klimatische-Wasserbilanz: Gegenüberstellung von Niederschlagssumme zu potentieller Verdunstung: im Sommer überwiegt die Verdunstung und im Winter die Niederschlagsmenge



ETCCDI

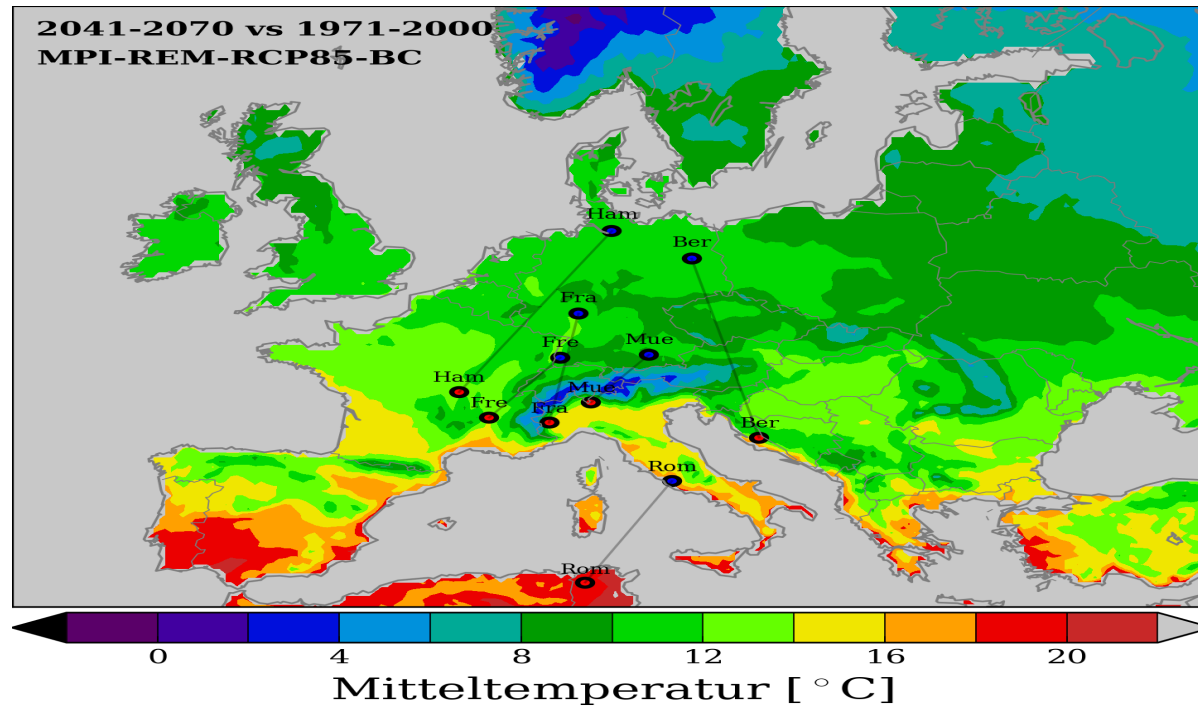
Expert Team on Climate Change Detection and Indices

| Kennzahlen | Einheit | Parameter | Erläuterung |
|------------|---------|---------------------------|--|
| TN_{ij} | °C | daily minimum temperature | calendar day (i) years (j) |
| TX_{ij} | °C | daily maximum temperature | calendar day (i) years (j) |
| PR_{ij} | mm | daily precipitation | calendar day (i) years (j) |
| WSDI | days | warm spell duration | $\sum_{CD} (TX_{ij} > TX_{in90}) \geq 6$ |
| CSDI | days | cold spell duration | $\sum_{CD} (TN_{ij} < TN_{in10}) \geq 6$ |
| HD | days | Hot Days | $TX_{ij} > 30^{\circ}C$ |
| SD | days | Summer Days | $TX_{ij} > 25^{\circ}C$ |
| TR | days | Tropical Nights | $TN_{ij} > 20^{\circ}C$ |
| CCD | days | Consecutive dry days | $\sum_{CD} (PR_{ij} < 1mm)$ |
| CWD | days | Consecutive wet days | $\sum_{CD} (PR_{ij} > 1mm)$ |

Hitzewelle: Überschreitung der Maximaltemperatur von 30°C an mindestens drei Tagen in Folge

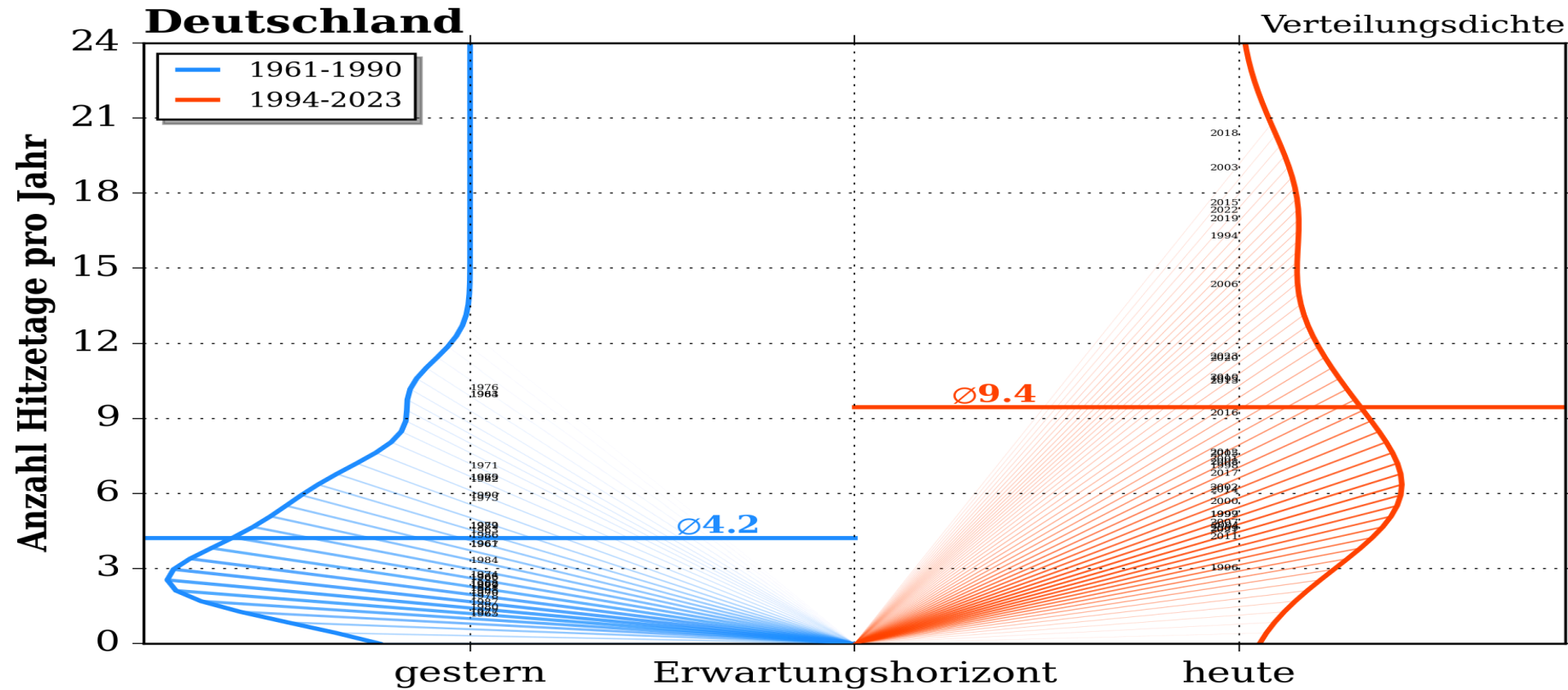


Regionaler Klimawandel



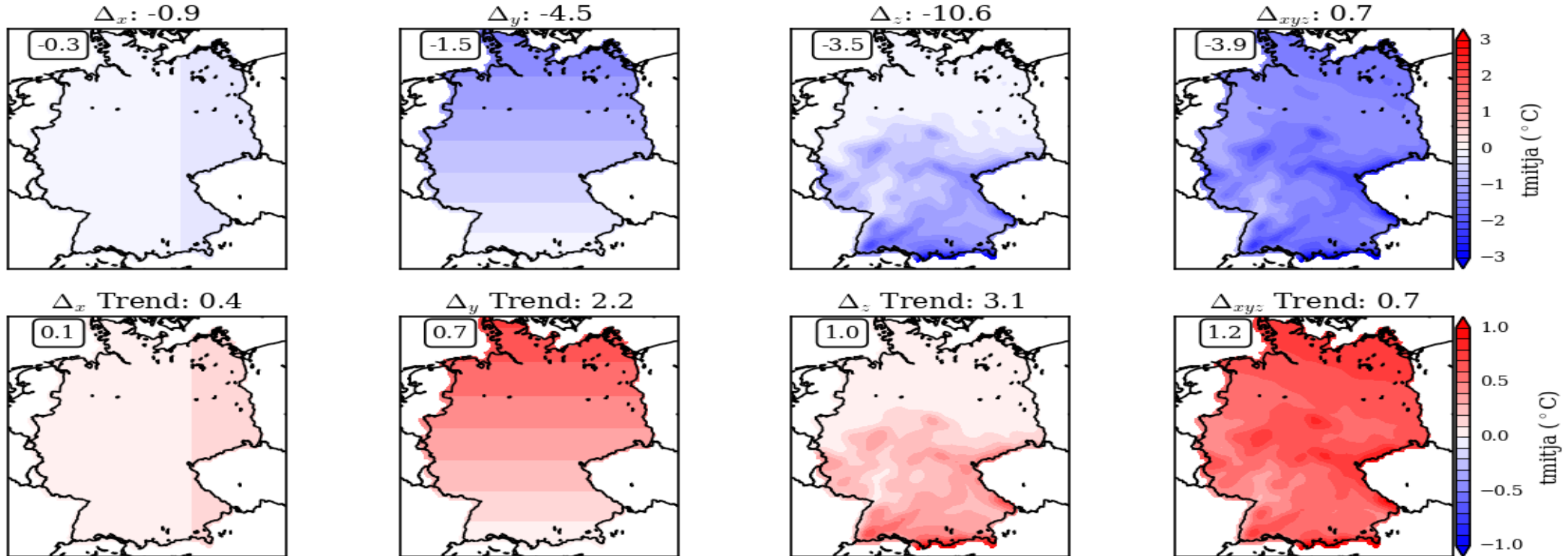
Erwartungshorizonte Hitzetage

Verteilungsänderung jenseits der Mittelwerte



Regionale Zerlegung nach Himmelsrichtungen

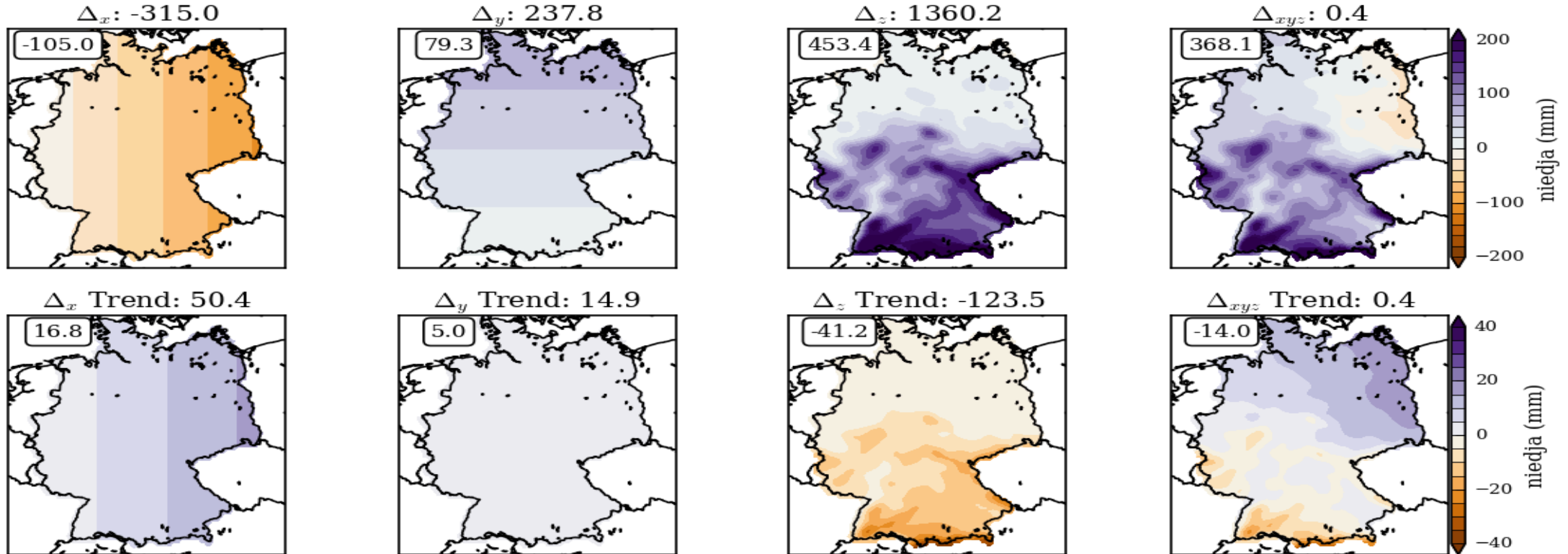
Jahresmitteltemperatur: 1961-2018



regionale Kontraste verringern sich: stärkere Erwärmung im Norden und in Höhenlagen

Regionale Zerlegung nach Himmelsrichtungen

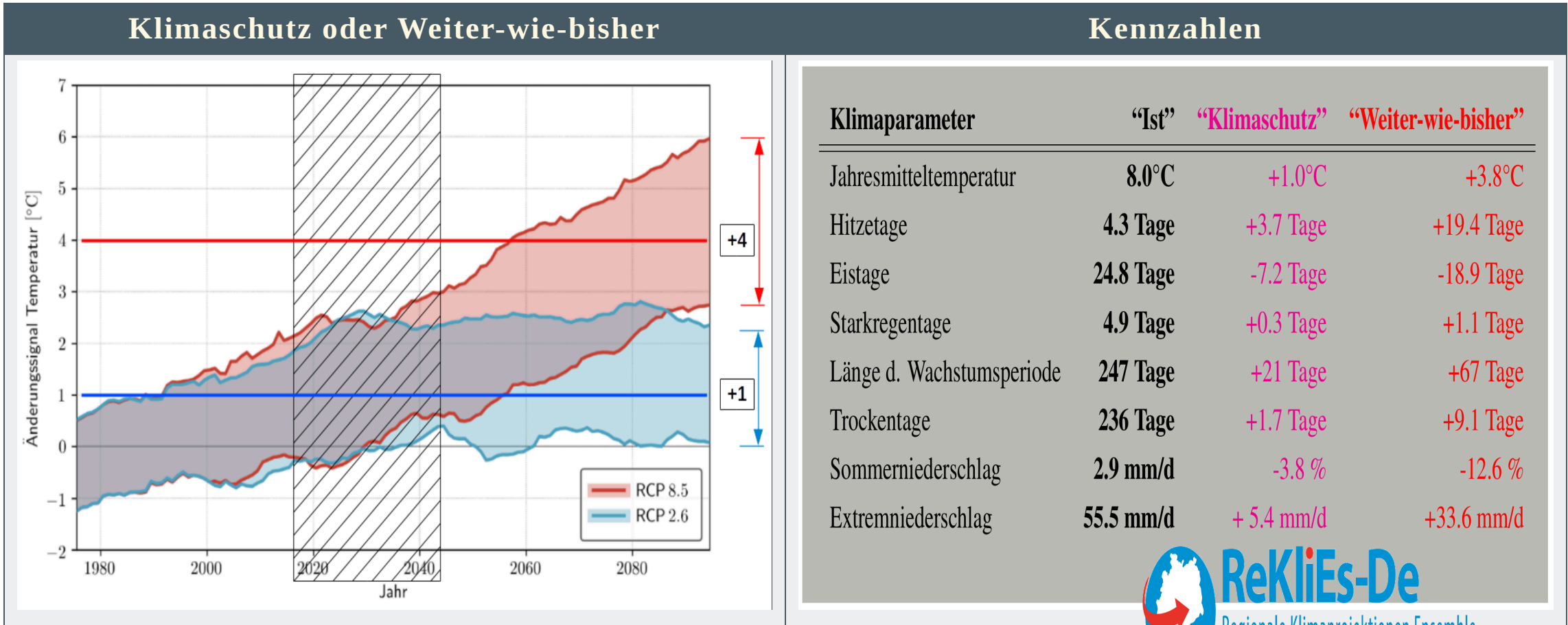
Jahresniederschlag: 1961-2018



regionale Kontraste verringern sich: Regen wird unabhängiger vom Relief

Regionale Klimaprojektionen für Deutschland

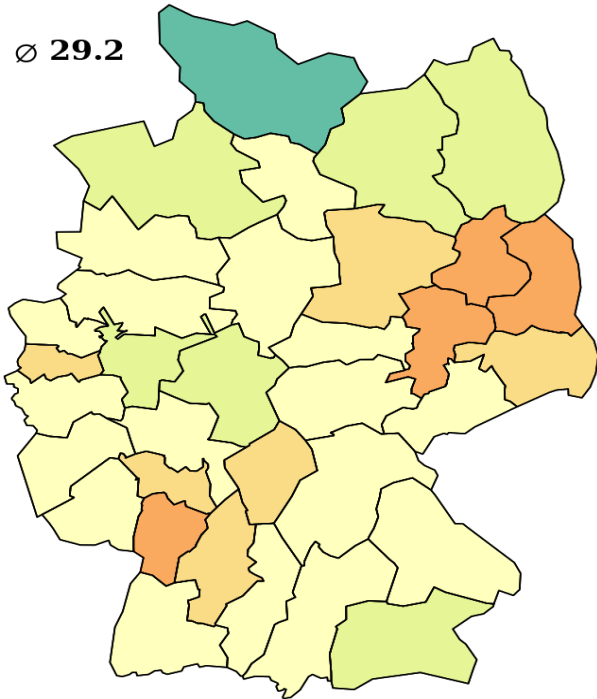
RCP8.5: 2071-2100 vs 1971-2000



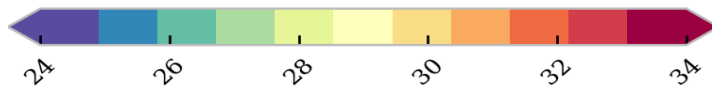
Hitzeintensität

Dritt-heißester Tag im Jahr: 99%-Perz.

OBS:1961-1990

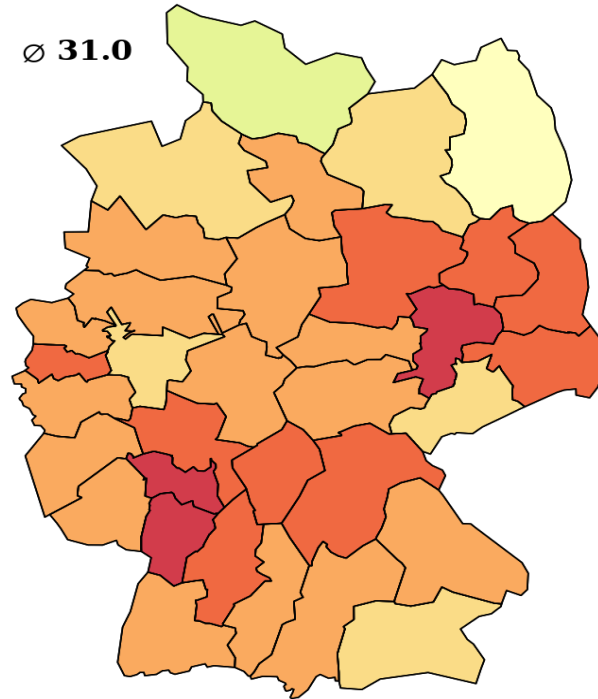


Ø 29.2



Hitzeintensität [GradC]

OBS:1991-2020

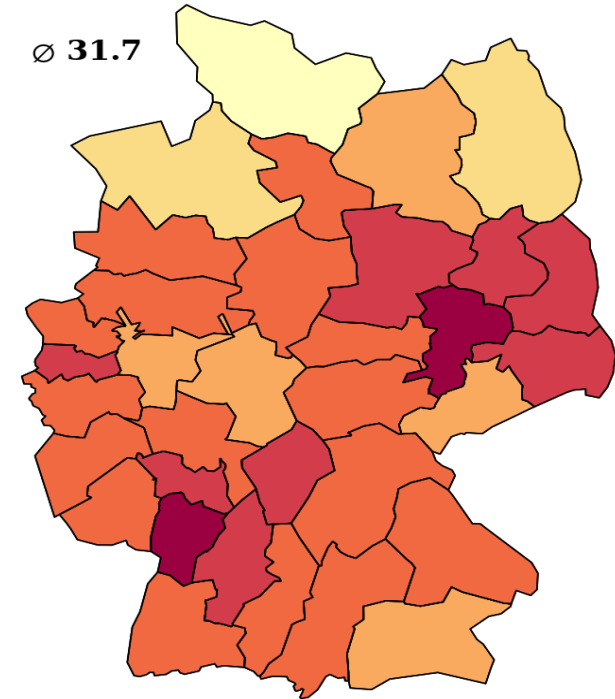


Ø 31.0



Hitzeintensität [GradC]

RCP85:2031-2060



Ø 31.7

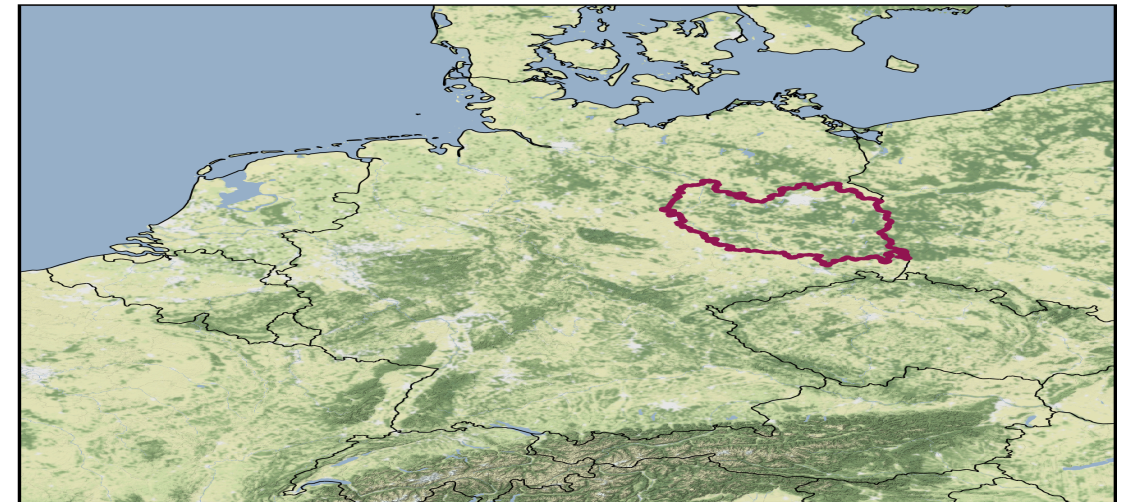
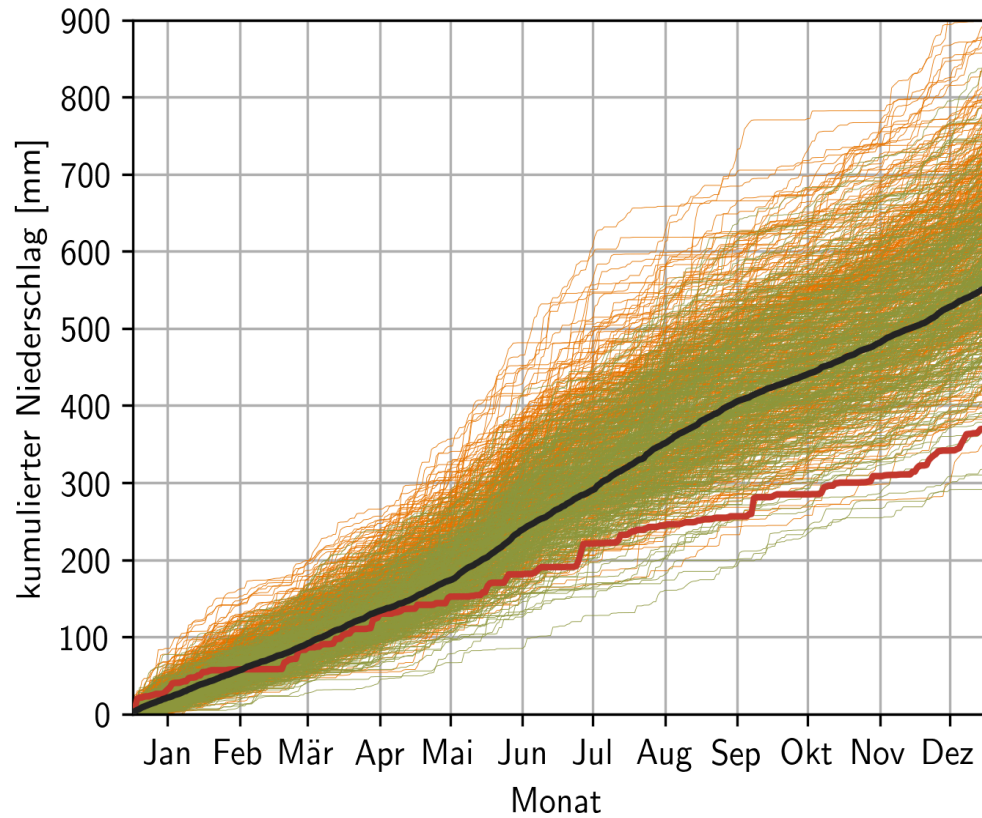


Hitzeintensität [GradC]



Wie häufig findet man Trockenjahre wie 2018 in Klimaszenarien?

Unterschätzung von Trockenjahren?



- 2018 (rot)
- Beobachtungsmittel 1971-2000 (schwarz)
- Jahre in Klimamodellen von 2071-2100 und RCP85 (farbig)

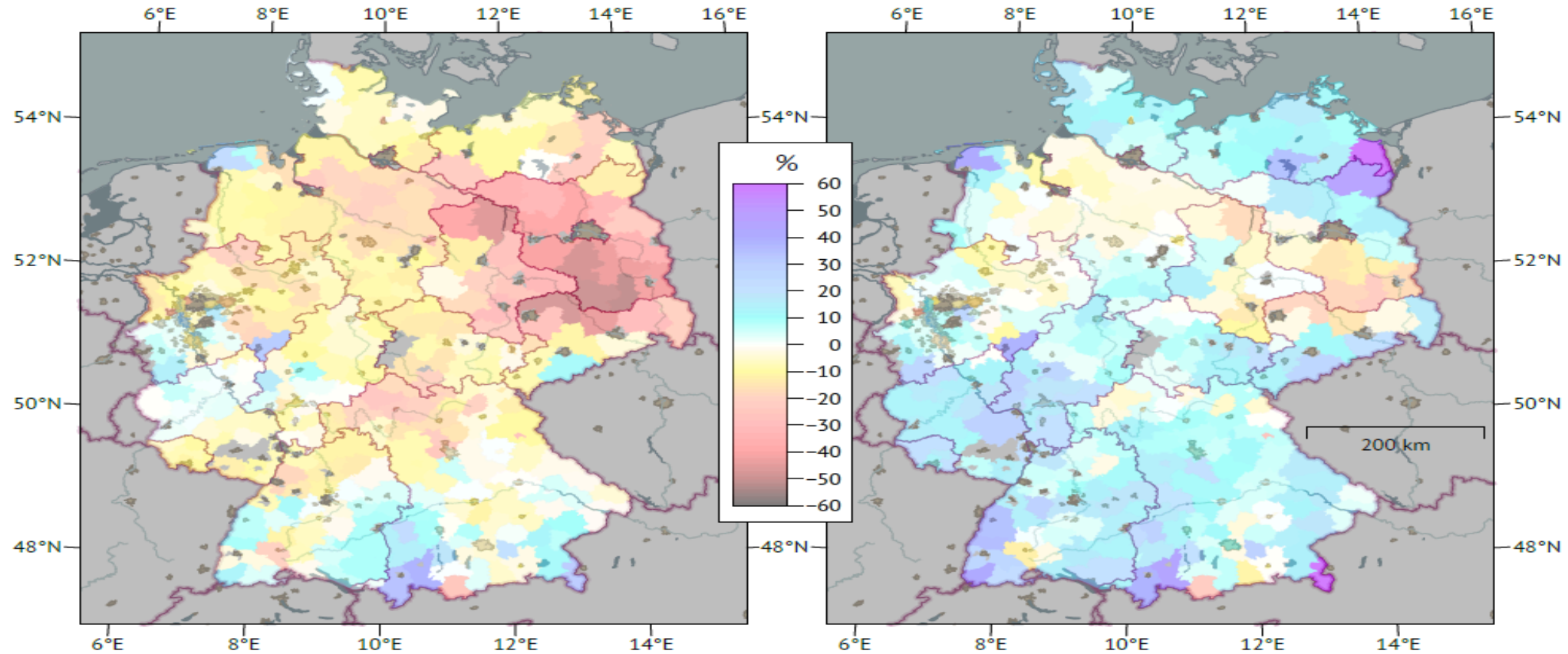


Folgen und Wechselwirkungen



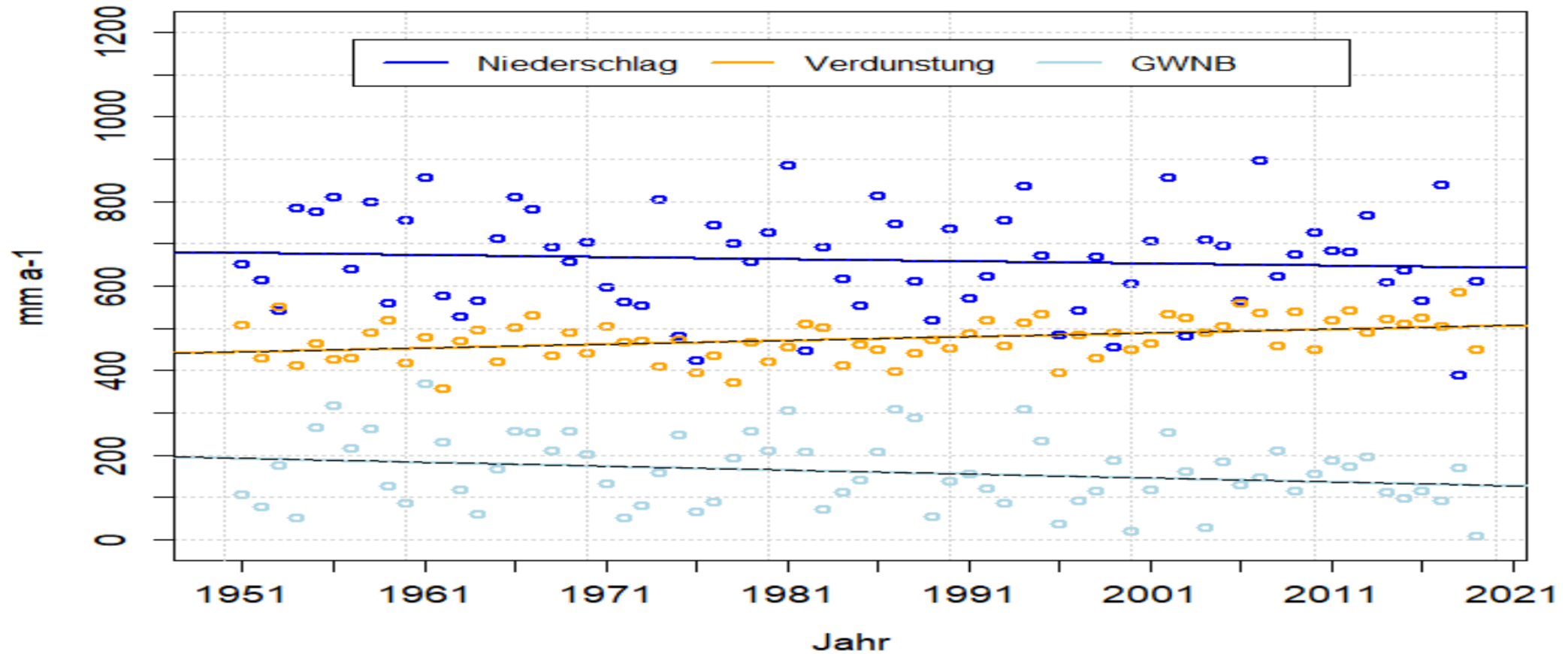
Landwirtschaftlicher Ertrag für Winterweizen 2018

Vergleich zum Mittel (links) und 2003 (rechts)



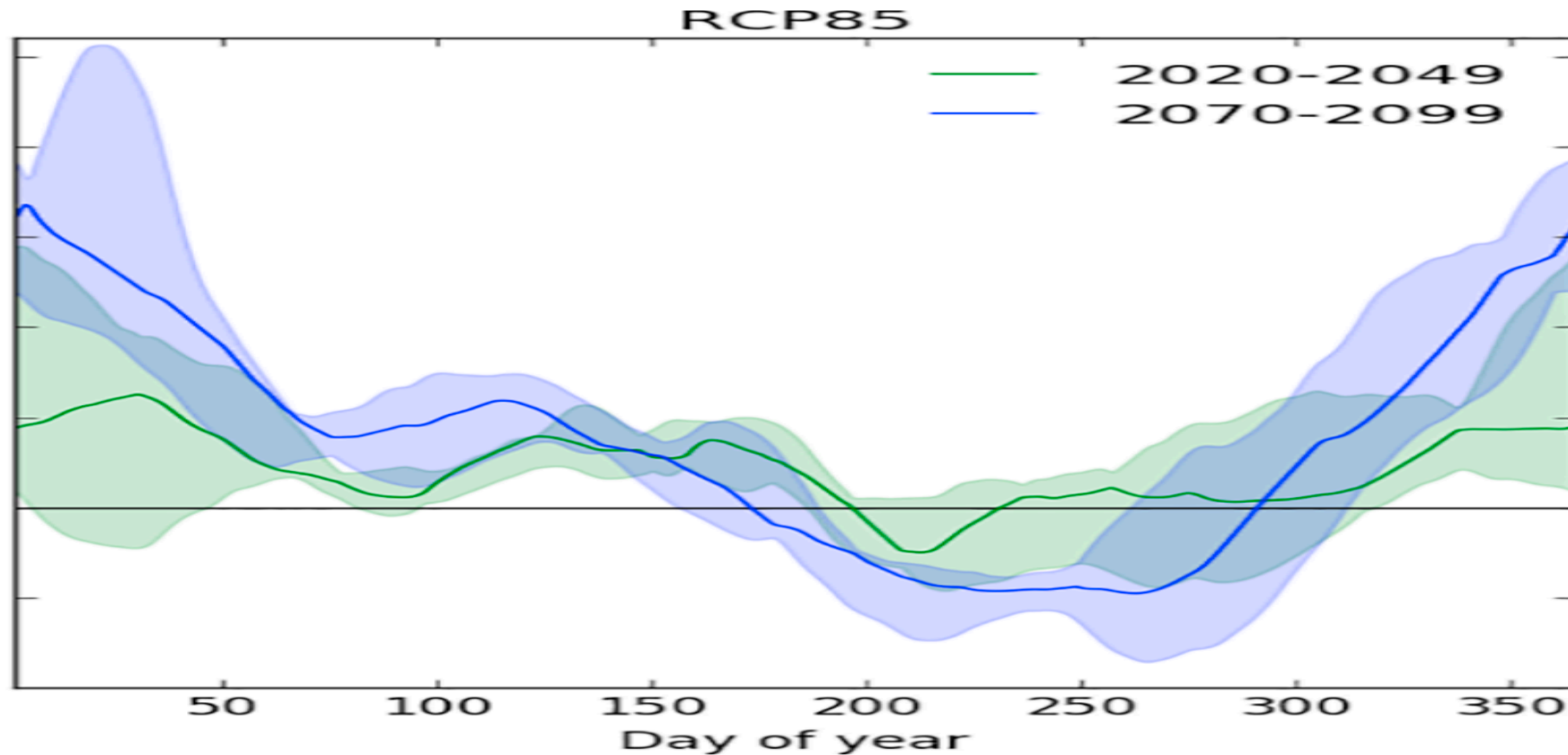
Wasserhaushaltsgrößen

Sinkende Grundwasserneubildung trotz nahezu gleichbleibender Jahresniederschläge



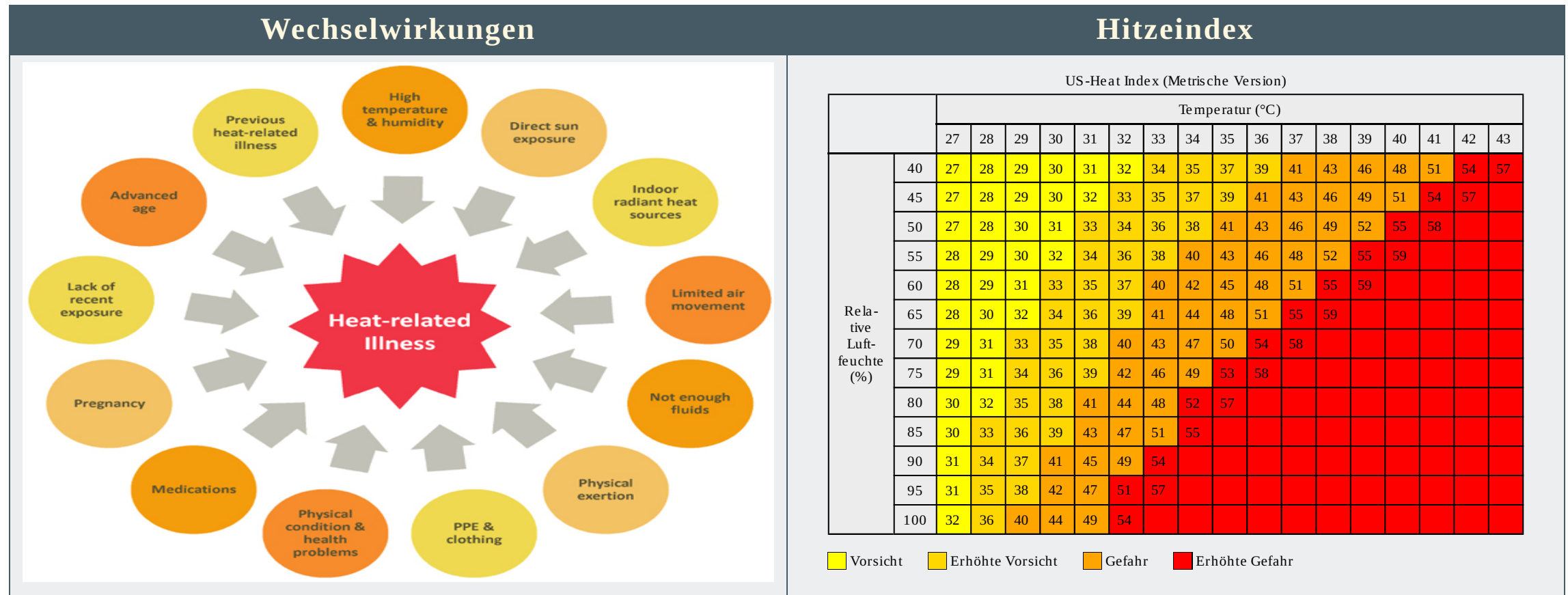
Niedrigwasser: Bsp. Donau

Größere Spreizung der jahreszeitlichen Ganglinien:
winterliches Hochwasser und sommerliches Niedrigwasser werden häufiger



Gesundheitsbelastung

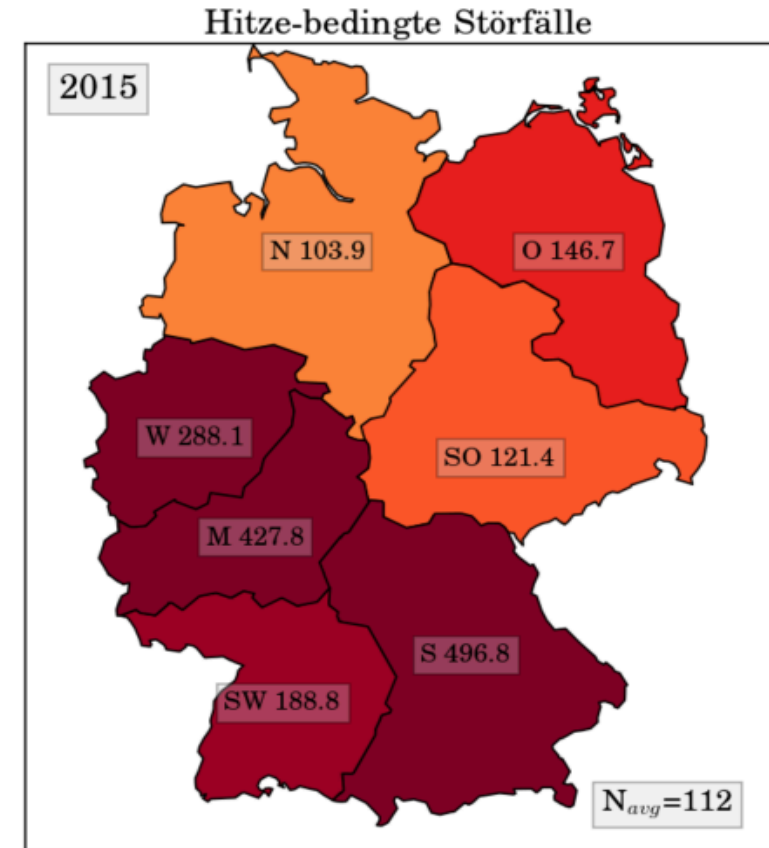
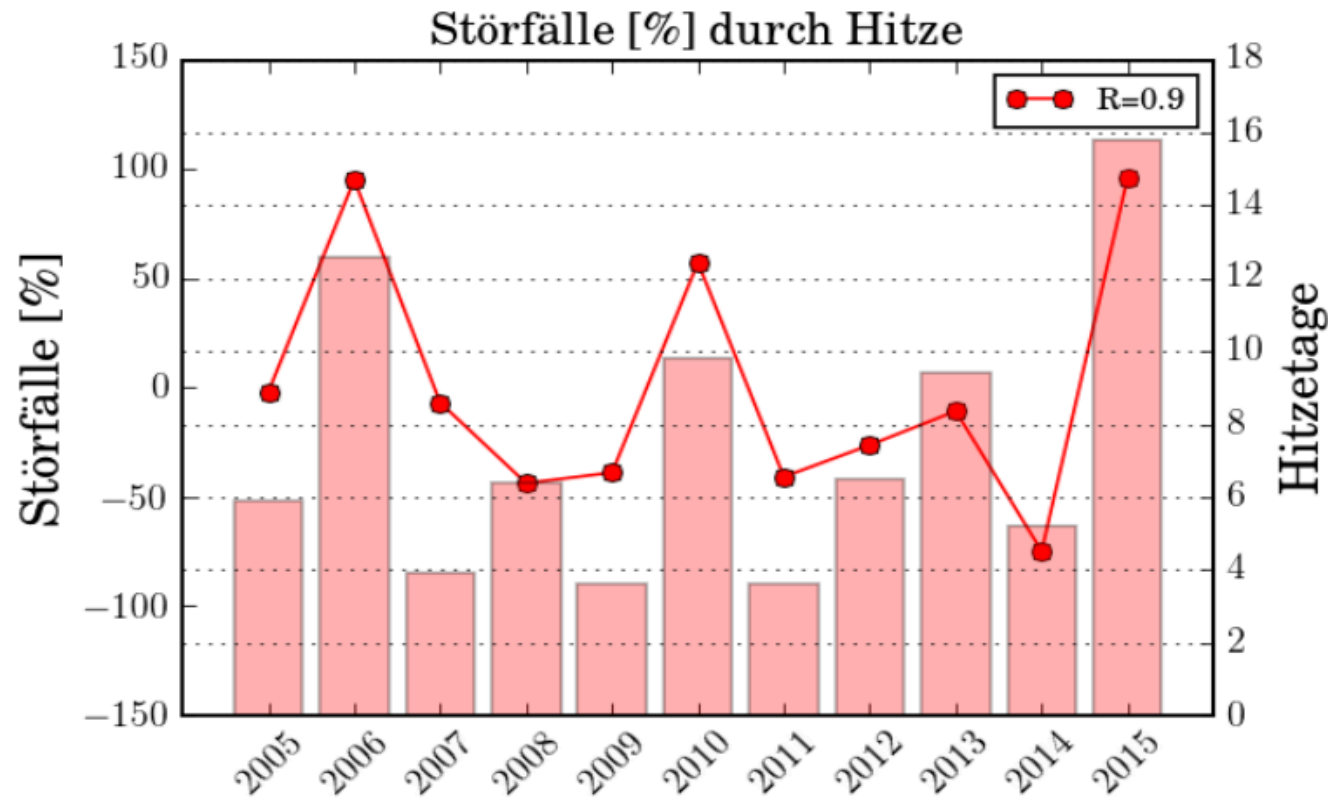
Je gesättigter die Luft, desto langsamer ist der Verdunstungsprozess durch Schwitzen.
 Es drohen Hitzschlag bei kritischer Schwelle!



Tage in Potsdam mit $>37^{\circ}\text{C}$ & $>50\%$: 2010/07/12, 1994/08/01, 1943/08/20, 1932/08/21

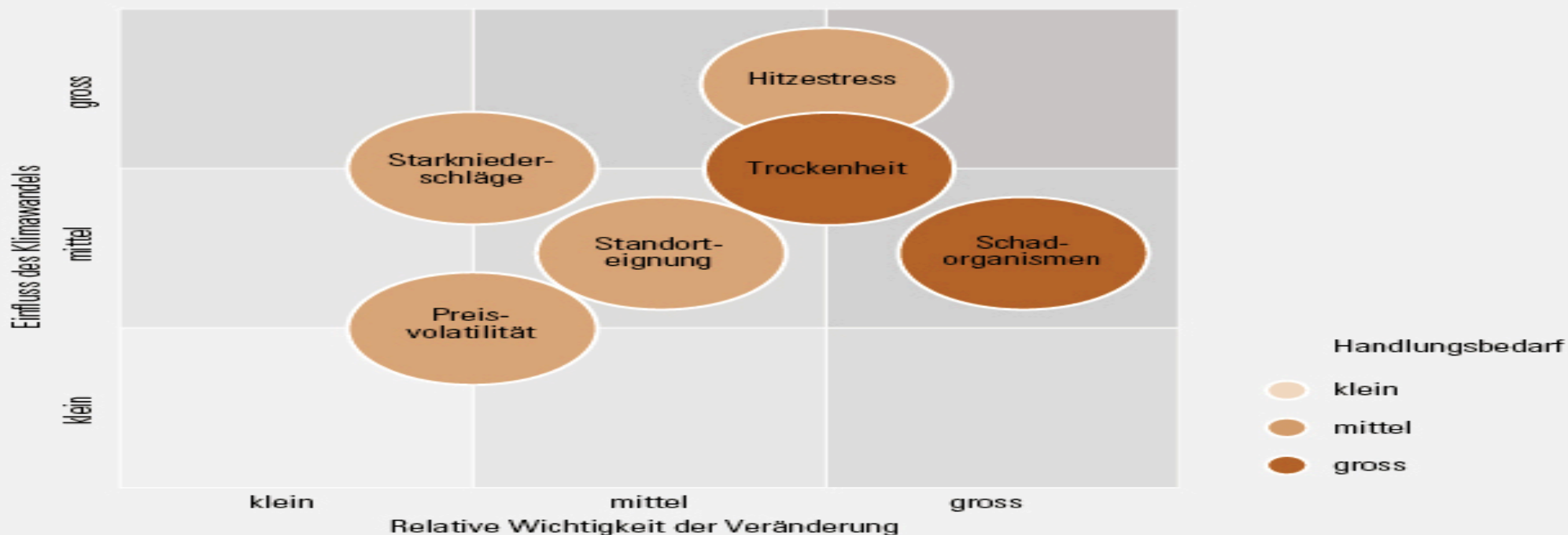
Verkehr und Infrastruktur

Hoher Zusammenhang zwischen der jährlichen Anzahl von Hitzetagen und der Anzahl von hitzebedingten Zugausfällen/Verspätungsminuten



Anpassungsmatrix: 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.

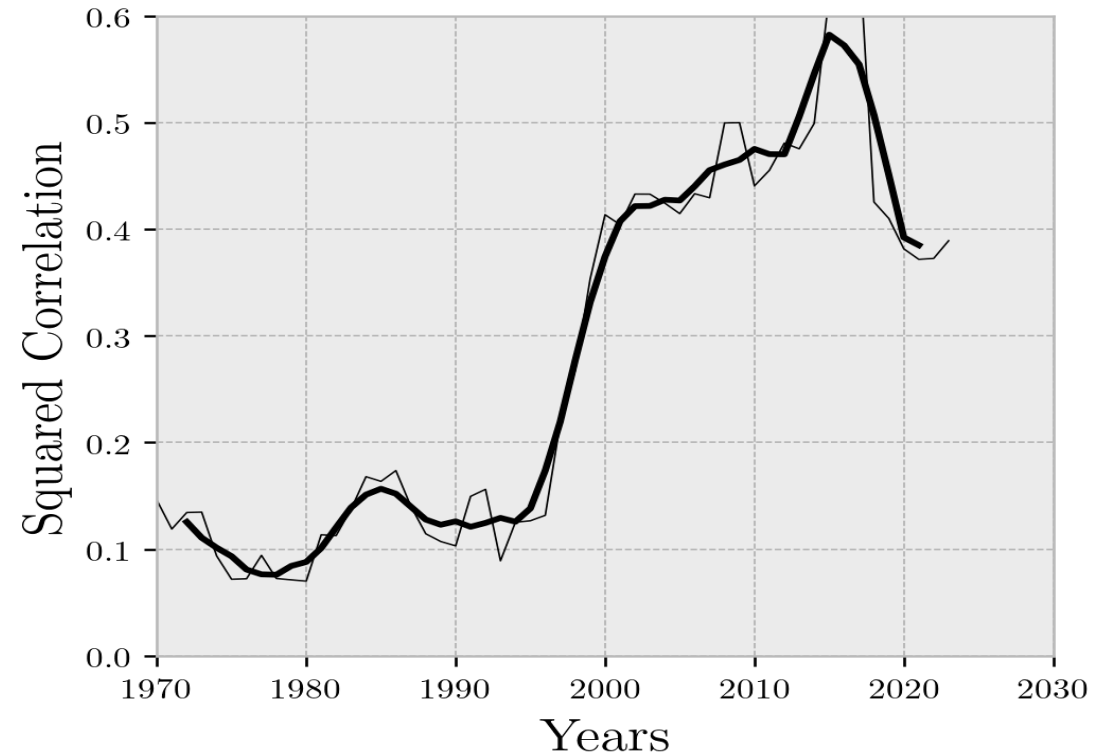
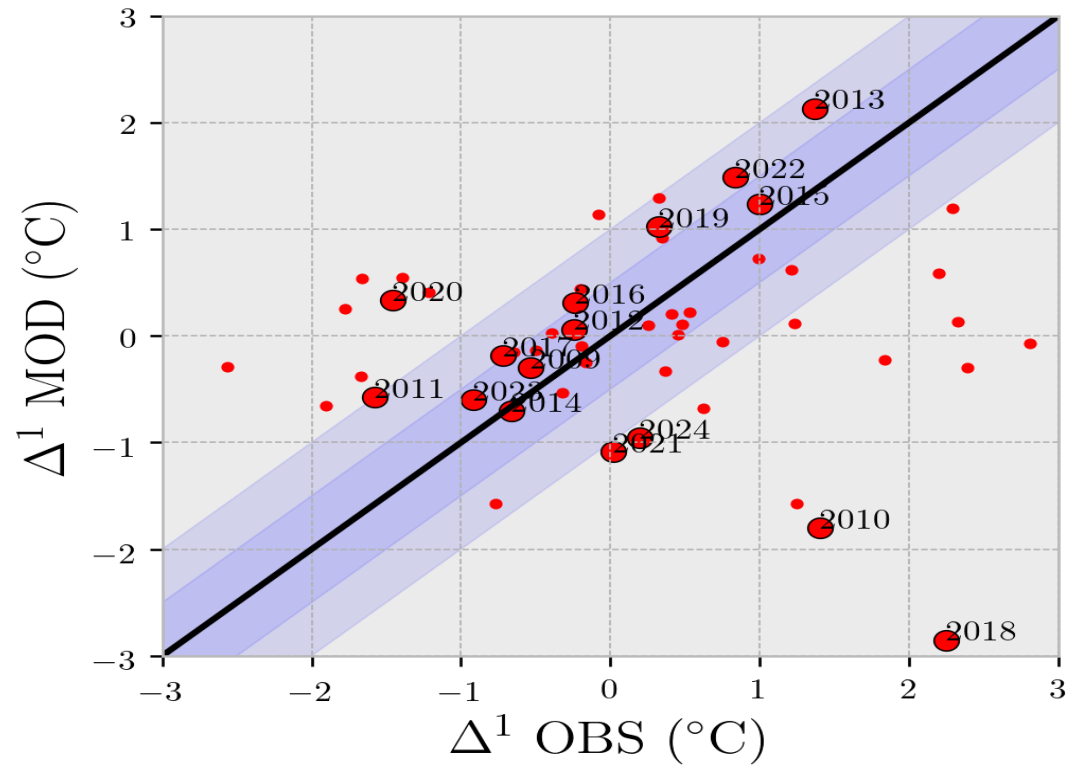
Quelle: BAFU

Saisonale Vorhersagbarkeit und Regeln



Sommertemperatur als Funktion der Vormonate Jan-Apr

Erste Differenzen

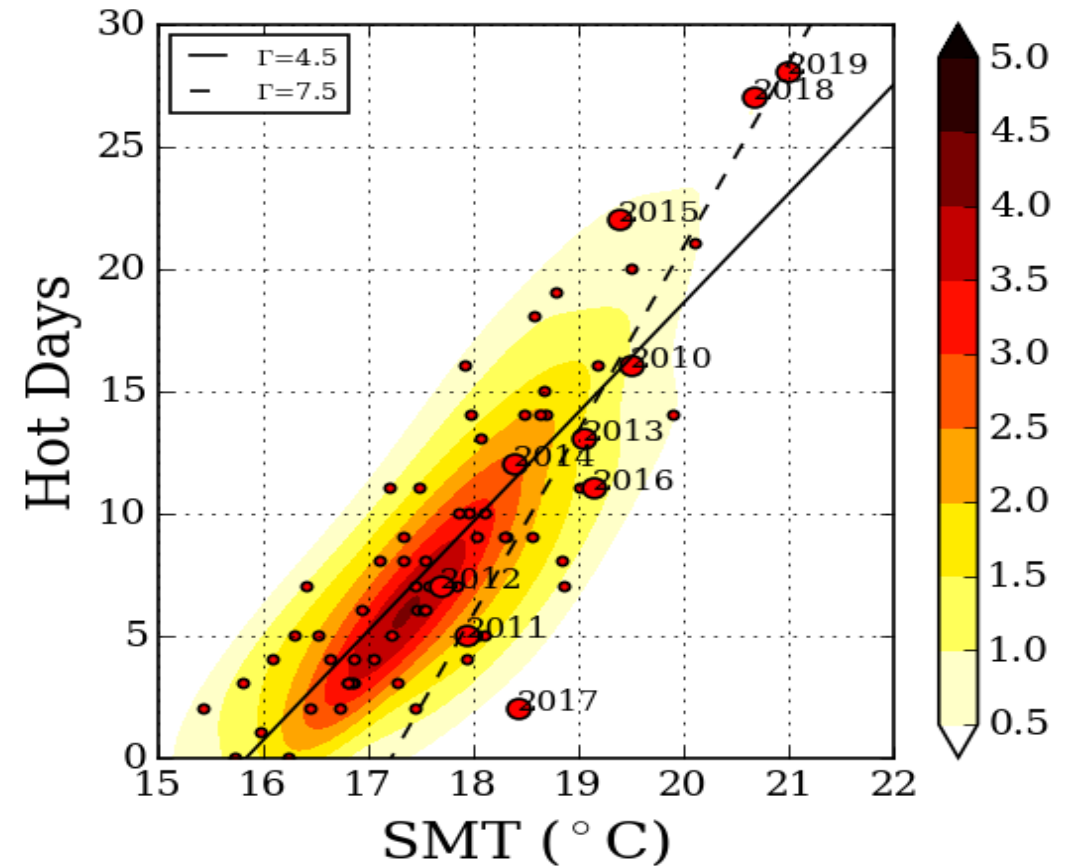
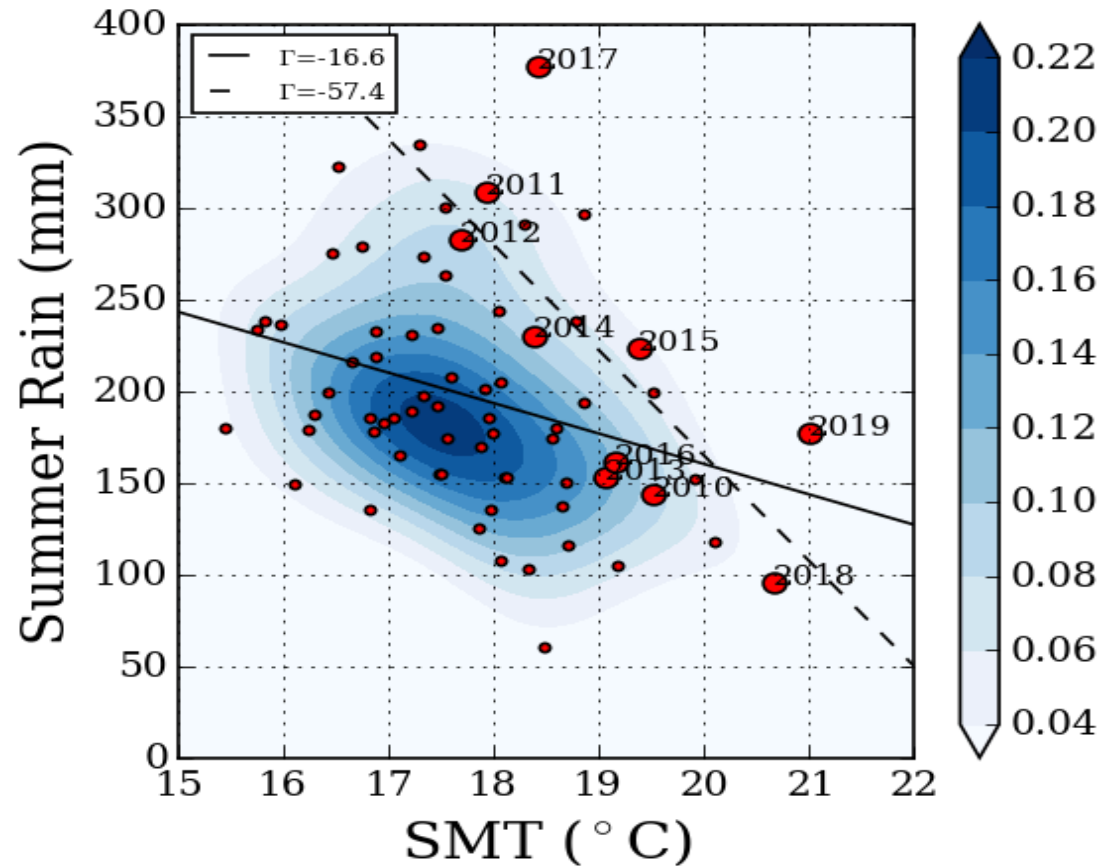


$$\Delta^{-1}\{\overline{\sigma T_{JJA}}\} = a \cdot \Delta^{-1}\{\sigma T_{Jan}\} + b \cdot \Delta^{-1}\{\sigma T_{Feb}\} + c \cdot \Delta^{-1}\{\overline{\sigma T_{Apr}}\} + \varepsilon$$

© Hoffmann (2018)

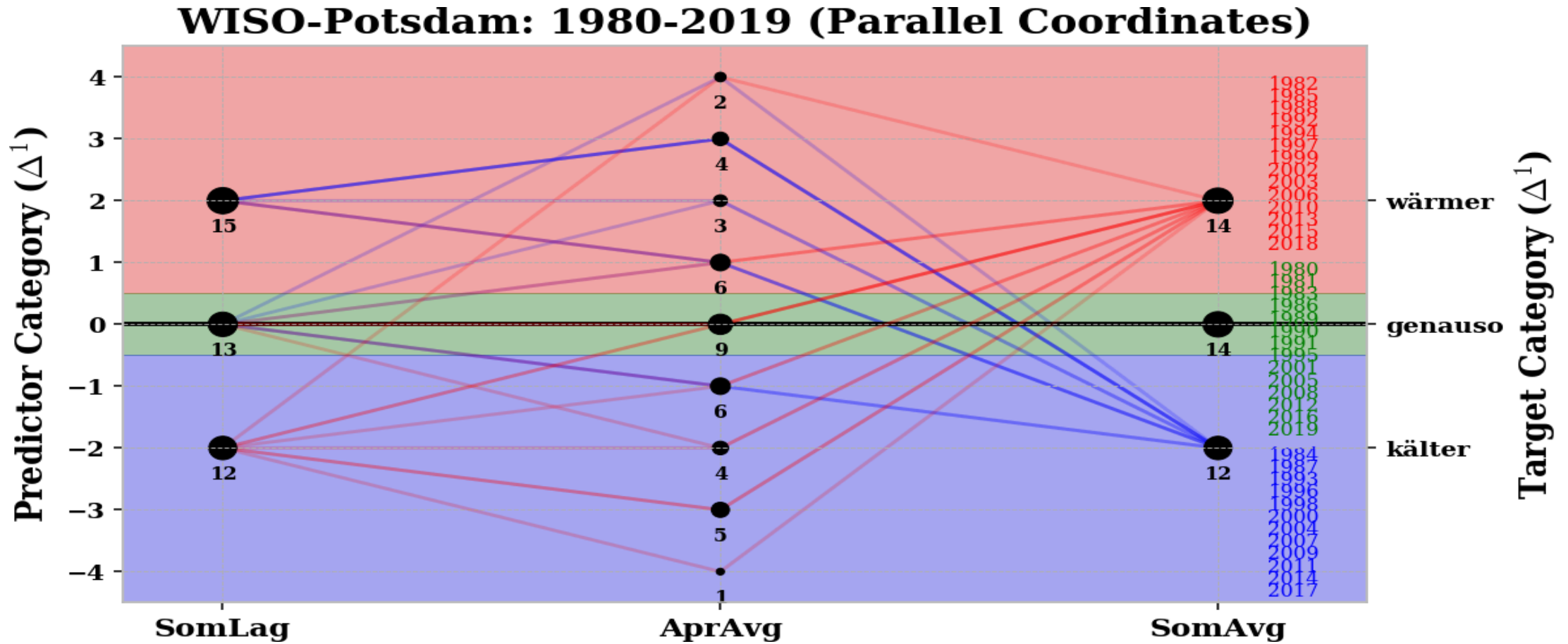
Sommertemperatur ~ Regensumme, Hitzetage

+1°C wärmerer Sommer bedeutet +7 Hitzetage und -50mm Regen



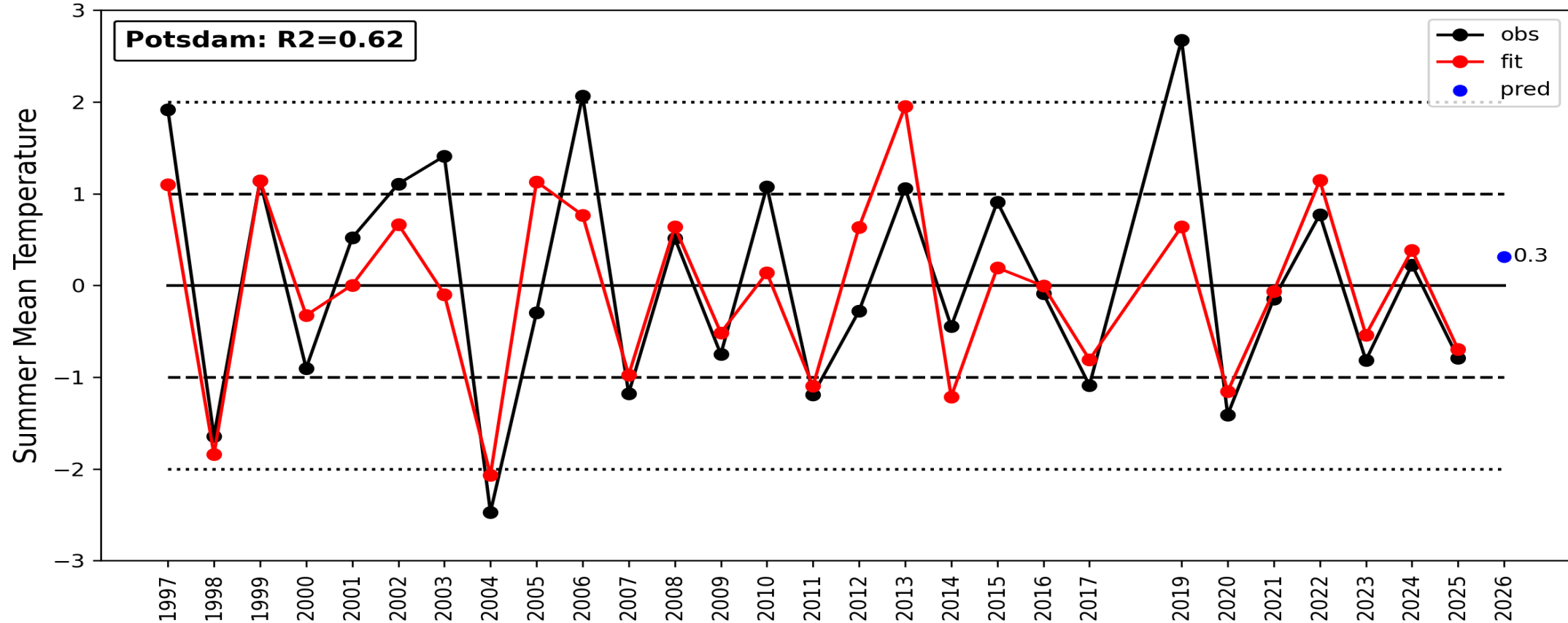
Regeln

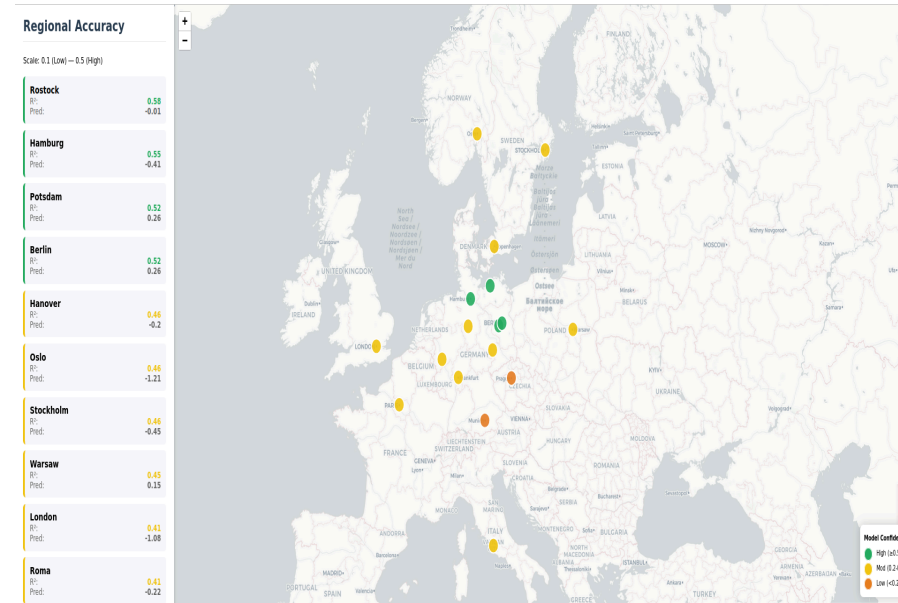
kühler Sommer (Vorjahr) ~ kühler April ~ warmer Sommer (Ausnahme 2018)



Prognose

Zusammenhang zw. Sommermitteltemperatur & Frühjahr





Thema für Übung

Eine regelbasierte Vorhersage

git clone <https://gitlab.pik-potsdam.de/peterh/wiso.git>



Aufgaben

a.)

Analysieren Sie eine tägliche Temperaturmessreihe (z.B. Berlin oder Potsdam) und aggregieren Sie die Tageswerte zu monatlichen Mittelwerten und monatlichen Standardabweichungen. Berechnen Sie dann jeweils die ersten Differenzen zum Vorjahr.

b.)

Tragen Sie die Werte der ersten Differenzen in ein paralleles Koordinatensystem ein. Beginnen Sie mit den Mittelwerten für April und den Mittelwerten für den Sommer (Jun-Jul-Aug). Markieren Sie positive Sommeranomalien (rot) und negative Anomalien (blau). Vergleichen sie die Regeln in verschiedenen Klimaperioden.

c.)

Regressieren Sie Schrittweise ($\overline{\sigma T}_{Apr}$, σT_{Feb} , ...) und Diskutieren Sie mögliche Gründe.

d.)

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit anderen europäischen Städten.