

Trockenheit und Hitzewellen

Definition, Ursache und Wechselwirkung

P. Hoffmann

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



PIK-Organigramm

Forschungsabteilung 1

Erdsystem- analyse

Leitung:

**Prof. S. Rahmstorf
Prof. W. Lucht**

Stellvertr. Leitung:

**Dr. K. Thonicke
Dr. G. Feulner**

Forschungsabteilung 2

Klimaresilienz

Leitung:

**Prof. S. Gabrysch
Prof. H. Lotze-Campen**

Stellvertr. Leitung:

**Dr. F. Hattermann
Prof. J. Kropp**

Forschungsabteilung 3

Transformationspfade

Leitung:

**Dr. E. Kriegler (komm.)
Dr. K. Frieler (komm.)**

Stellvertr. Leitung:

**Prof. G. Luderer
Dr. M. Mengel**

Forschungsabteilung 4

Komplexitäts- forschung

Leitung:

**Prof. J. Kurths
Prof. A. Levermann**

Stellvertr. Leitung:

**Dr. N. Marwan
Dr. L. Wenz**

FutureLabs

Sozialer Metabolismus und Klimafolgen

Erdsystem-Resilienz im Anthropozän

**Ungleichheit, menschliches Wohlergehen
und Entwicklung**

Public Economics und Climate Finance

Sicherheit, ethnische Konflikte und Migration

Spieltheorie und Netzwerke interagierender Agenten

Künstliche Intelligenz im Anthropozän

Leitung: **Prof. H. Weisz**

Leitung: **Prof. R. Winkelmann & Dr. J. Donges**

Leitung: **N.N. interim: Prof. H. Lotze-Campen**

Leitung: **Dr. K. Lessmann**

Leitung: **Dr. J. Schewe & N.N.**

Leitung: **Dr. J. Heitzig**

Leitung: **N.N.**

Profil

Forschungsbereich: Klimaresilienz

Arbeitsgruppe: Hydroklimatische Risiken

Schwerpunkte:

- Regionaler Klimawandel
- Klimadiagnostik
- Folgen 1. Ordnung

Sünoptik:

Süringwarte für operationelle Auswertungen der aktuellen Witterung und Klimafolgen

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



Inhalt

Ursachen

Definitionen

Messbarkeit

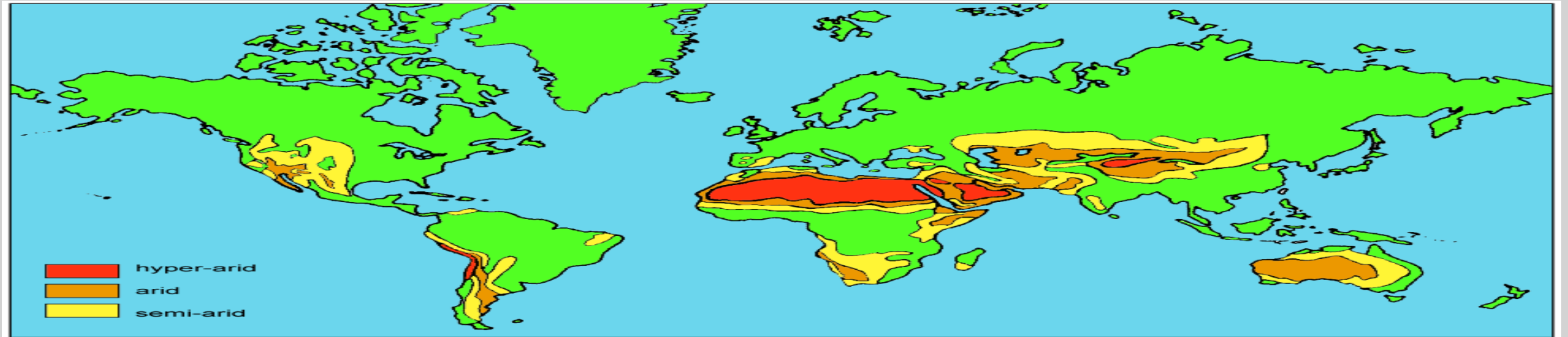
Regionaler Klimawandel

Folgen und Wechselwirkungen

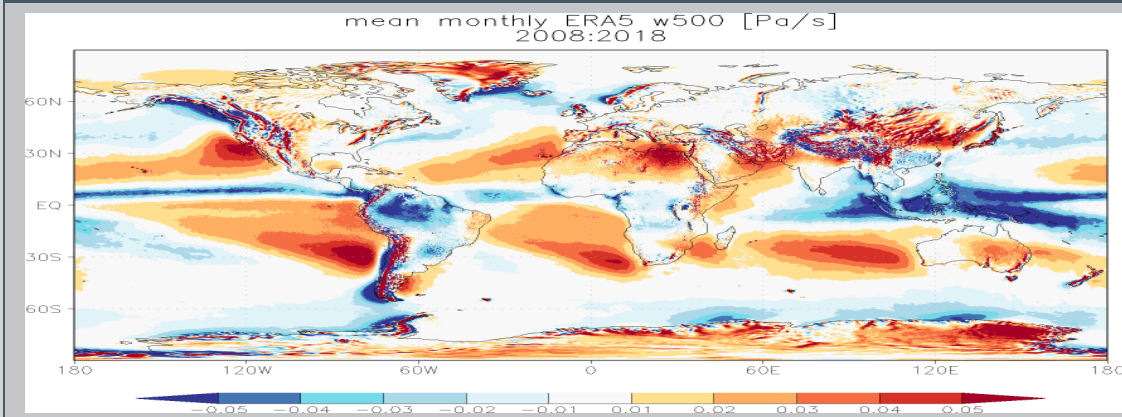
sais. Vorhersagbarkeit

Ursachen

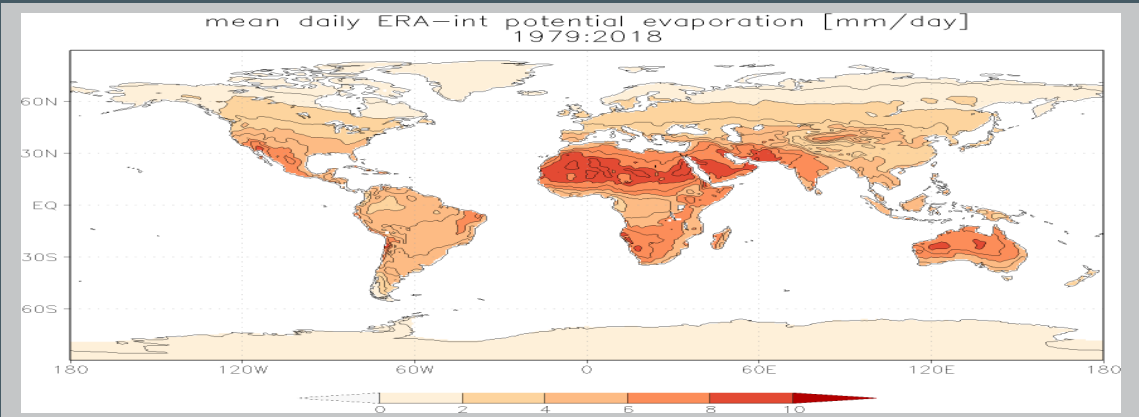
Trockengebiete



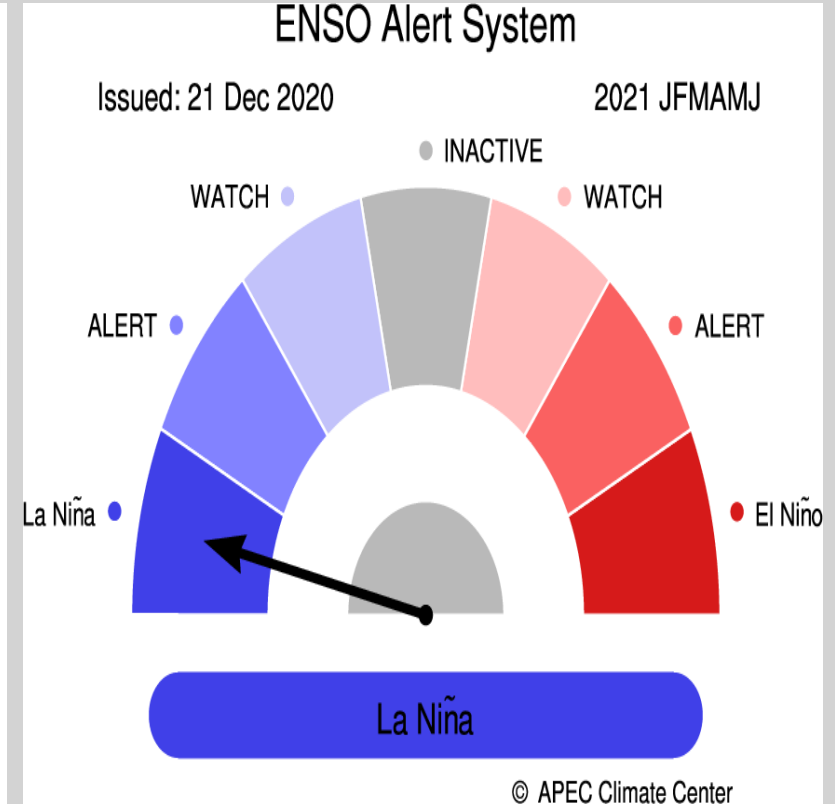
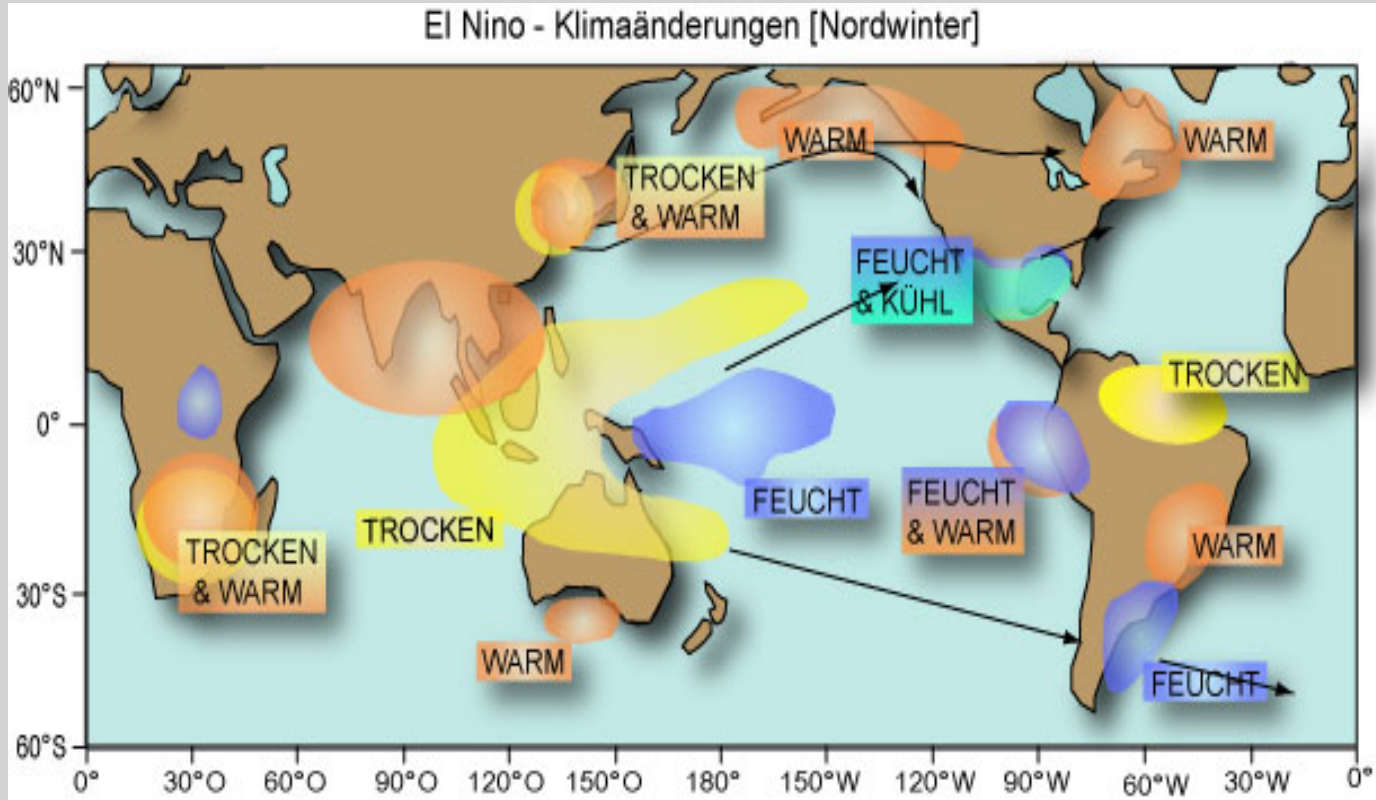
Großräumiges Absinken



Potentielle Verdunstung

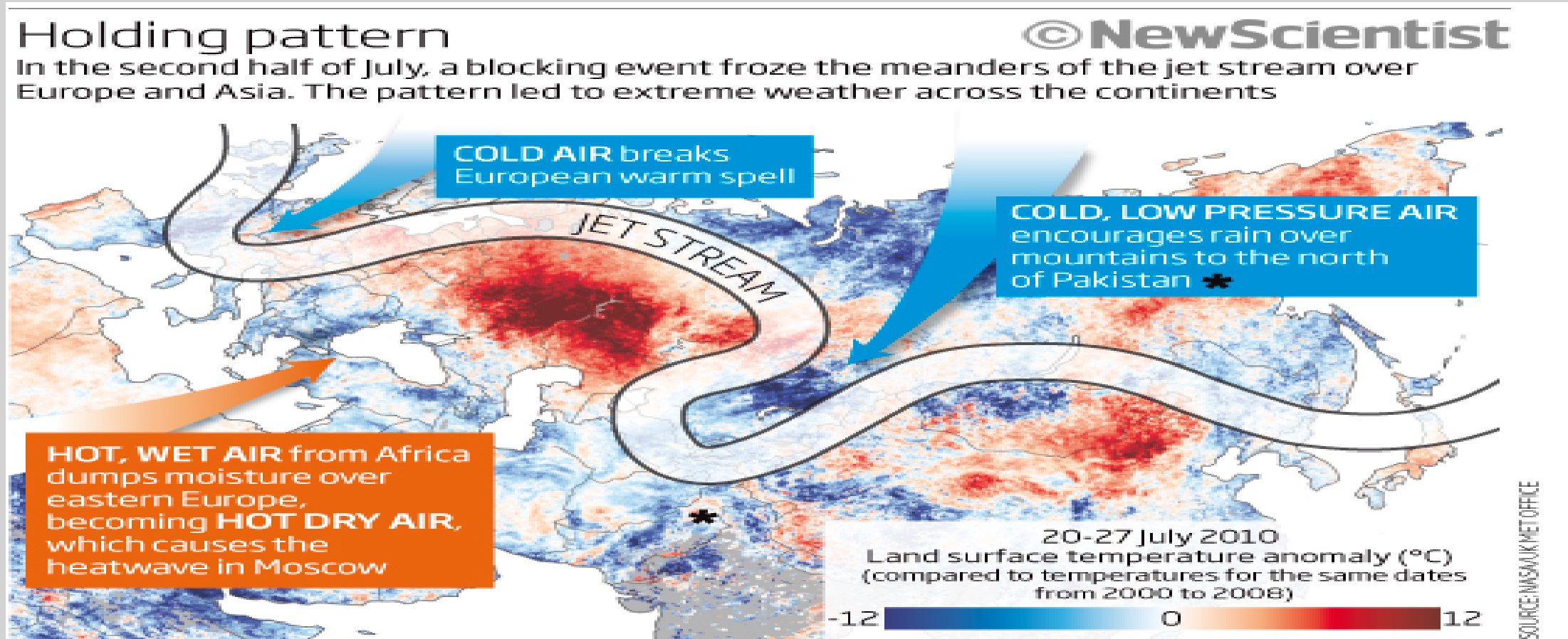


El-Niño (Tropen)



El-Niño: Dürren in Feuchtgebieten durch Abschwächung großräumiger NO-Passatwinde (z.B. Südostasien bis Südafrika). **Aktuelle:** Übergang von La-Niña zu El-Niño erwartet.

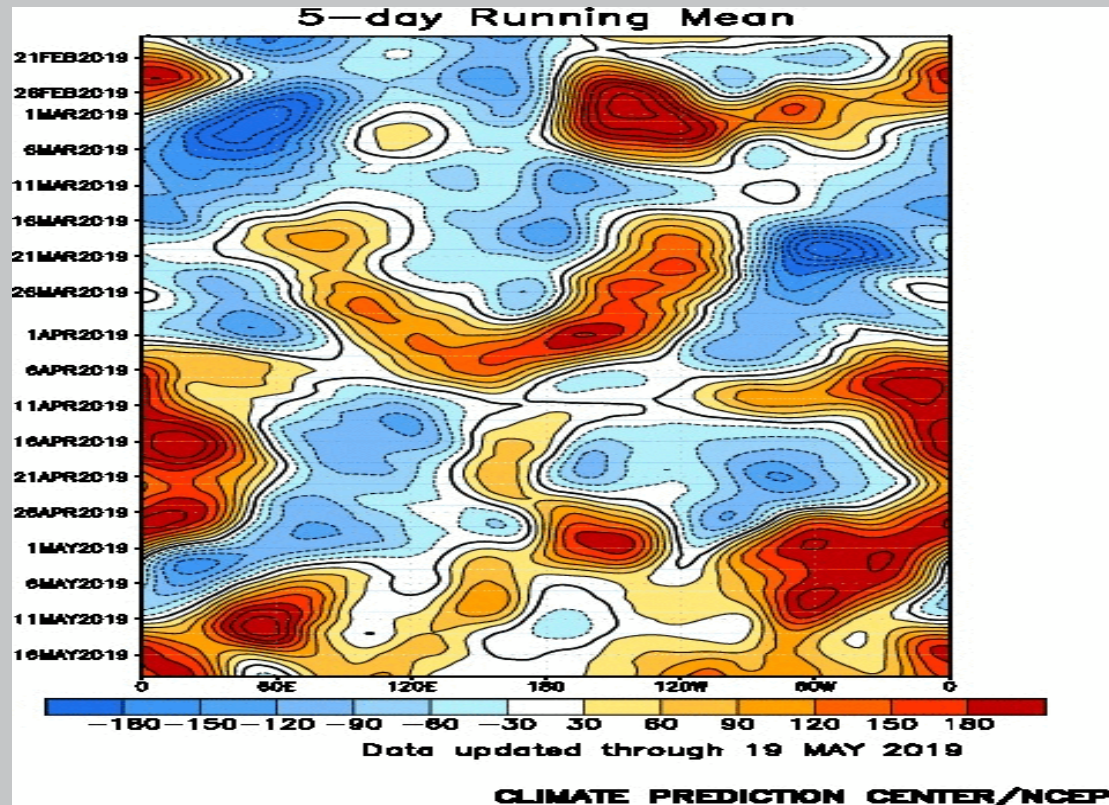
Jetstream (Mittlere Breiten)



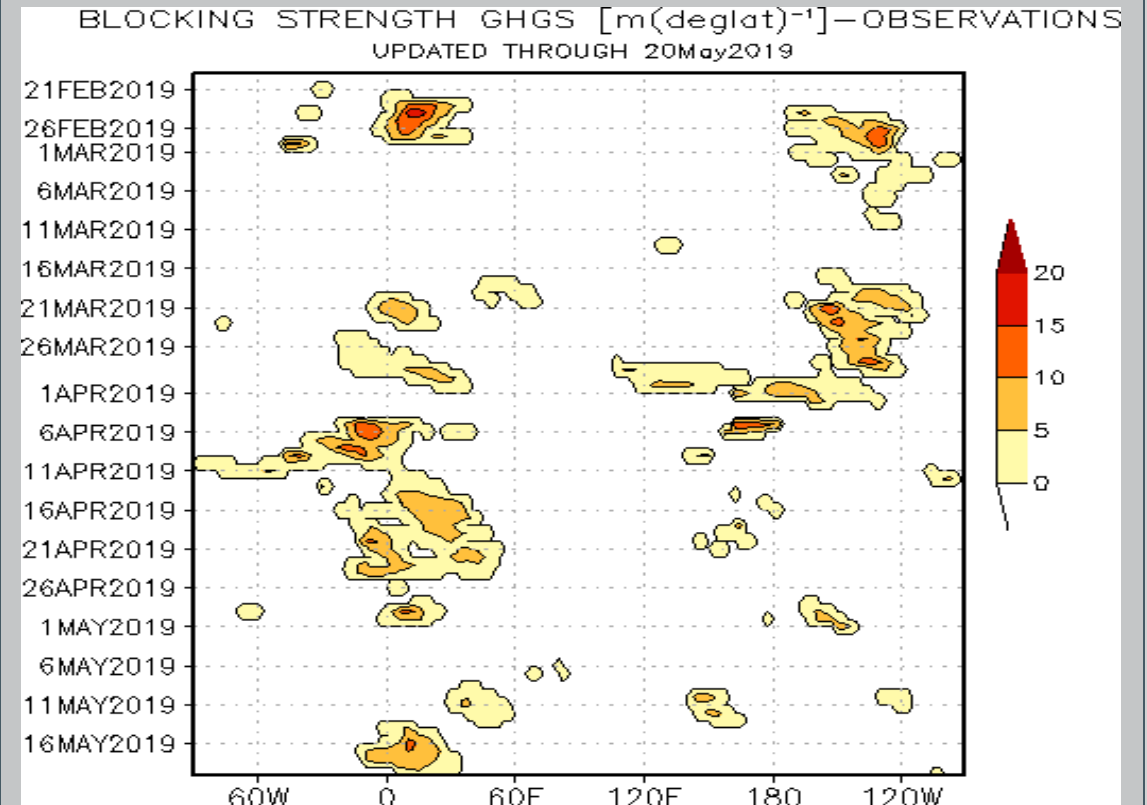
Stationäre Wellenmuster im Jetstream über den mittleren Breiten der Nordhemisphäre können zeitgleich verschiedene Wetterextreme auslösen.

Atmosphärische Blockierungen

Anomalien Z500 (60°N-90°N)

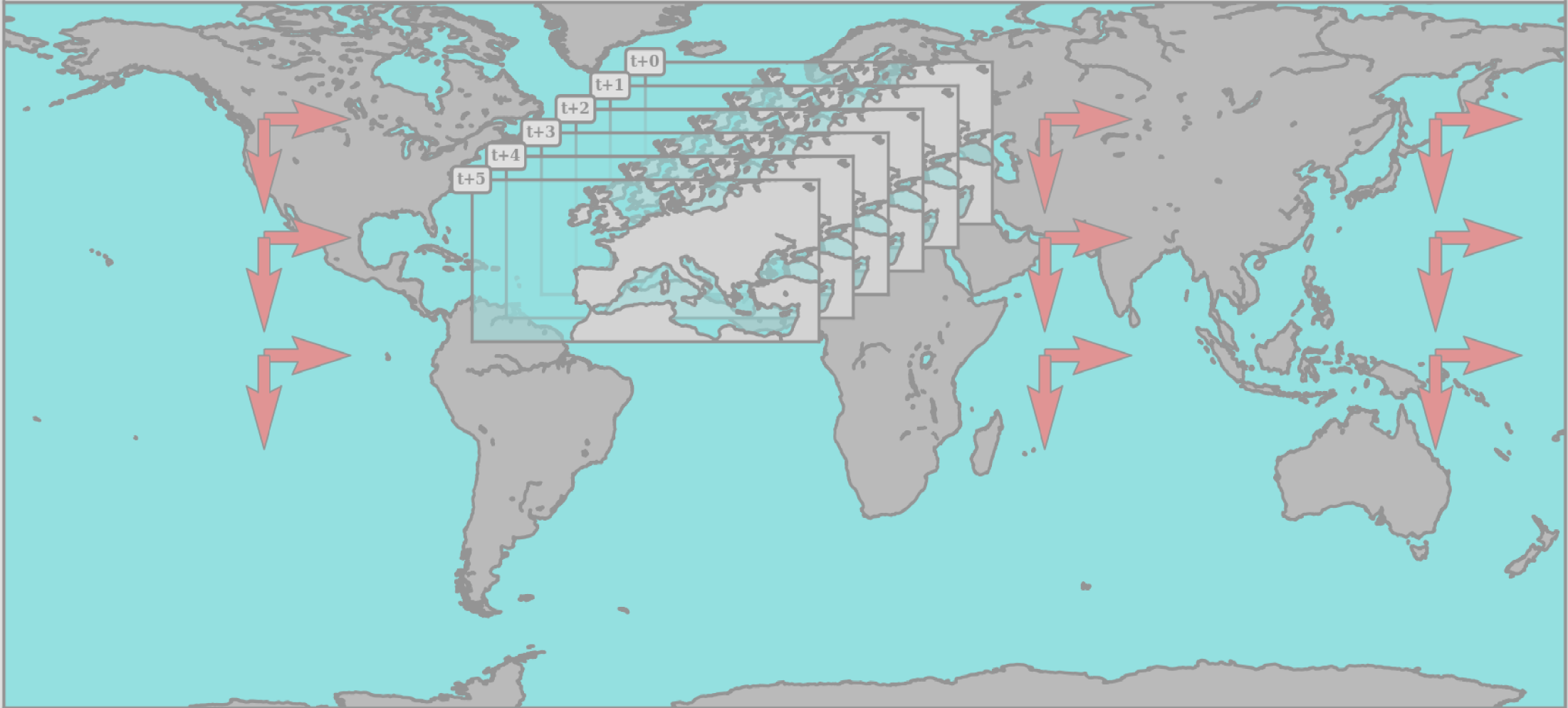


Blocking Index (GHGS>0) (Tibaldi, 1990)



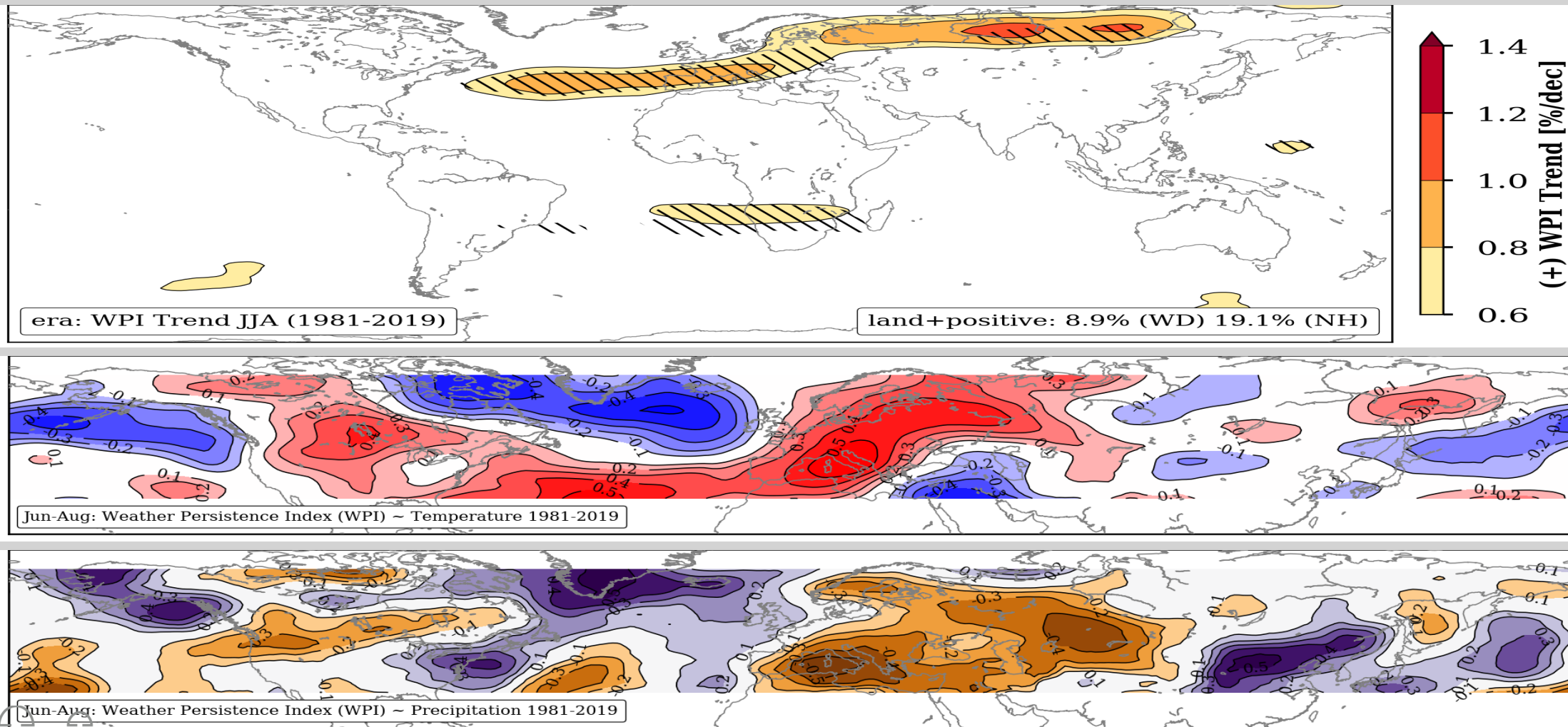
Hohe und stationäre Anomalien im Geopotential 500 hPa: Blocking über Nordatlantik

Ähnlichkeit aufeinanderfolgender Strömungsmuster

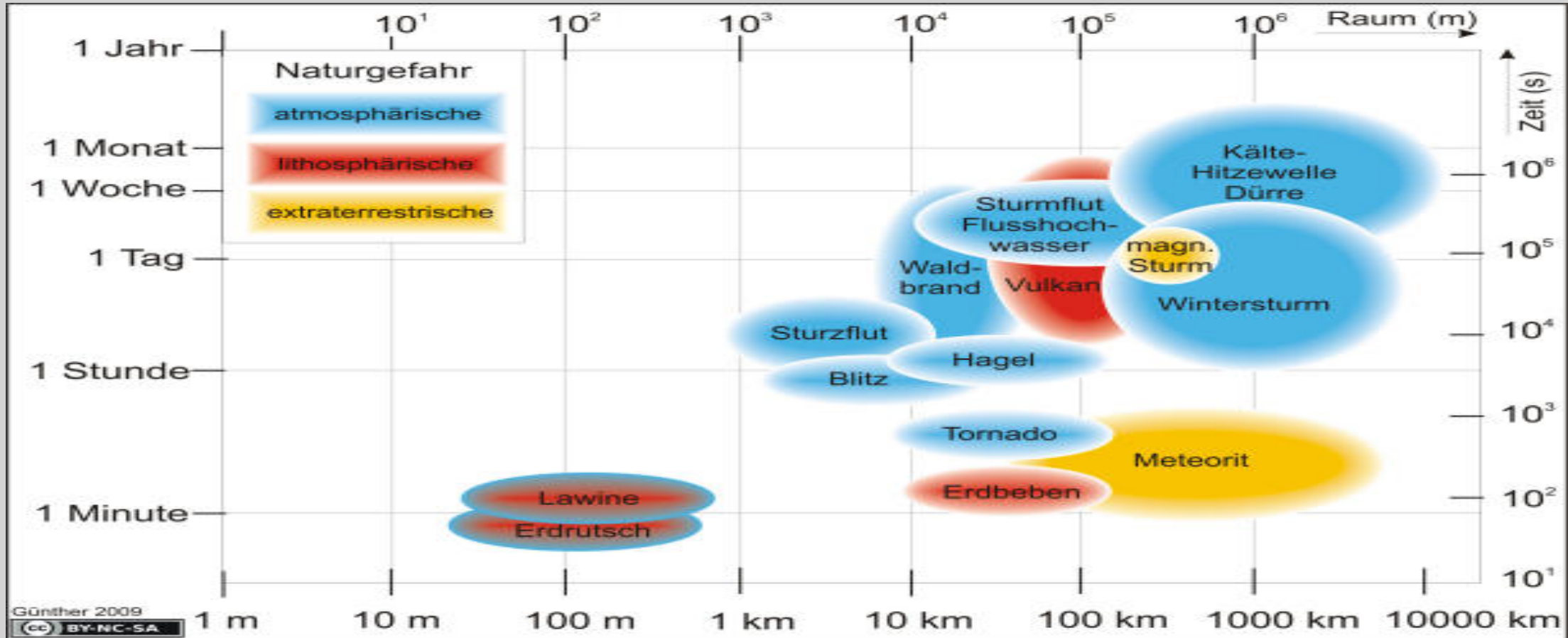


Trends der Persistenz von Wetter-/Strömungsmustern im Sommer

© Hoffmann (PIK)



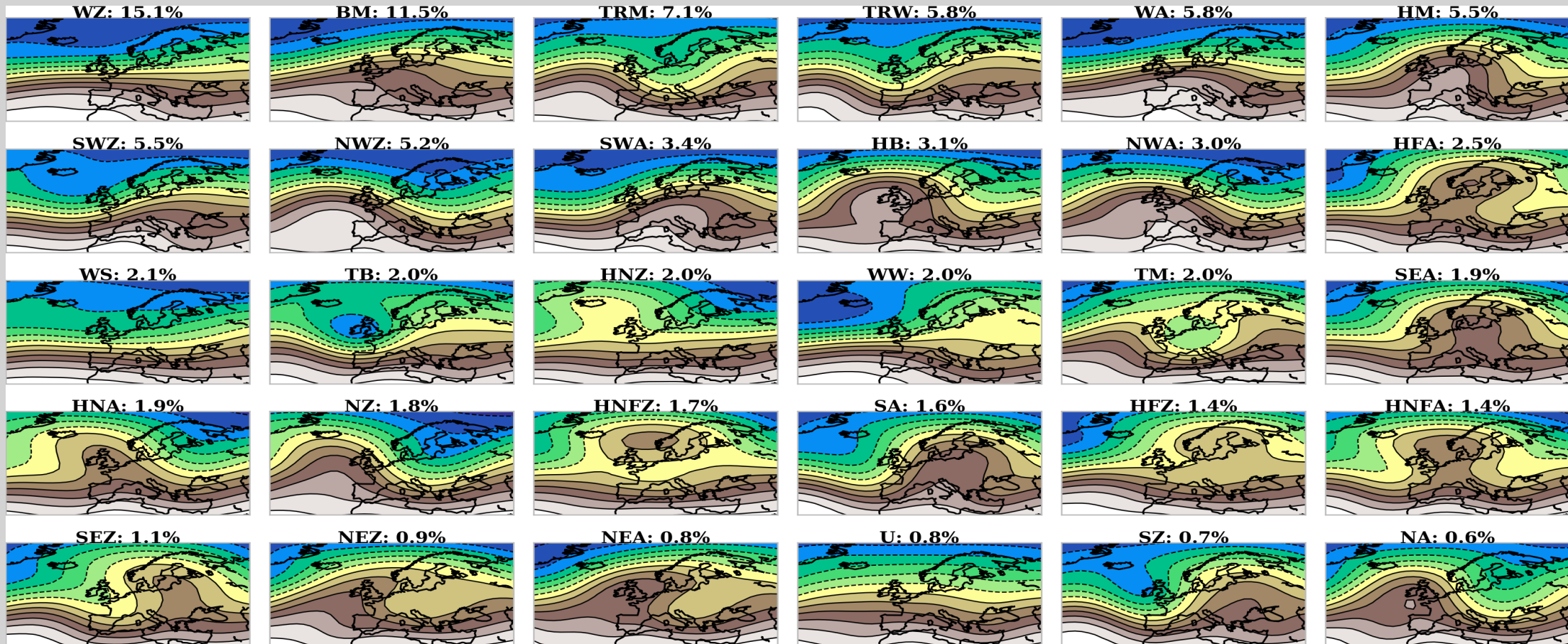
Skalen von Naturgefahren



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)

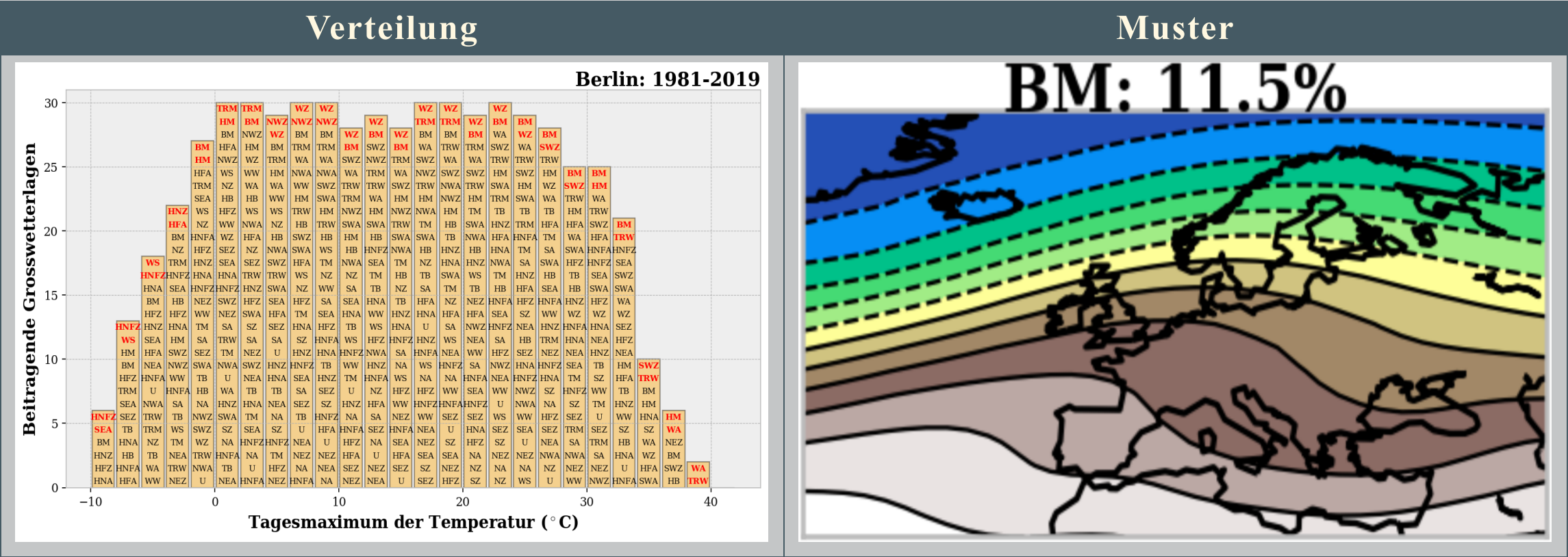
Großwetterlagen (Strömungsmuster)

© Hoffmann (PIK)



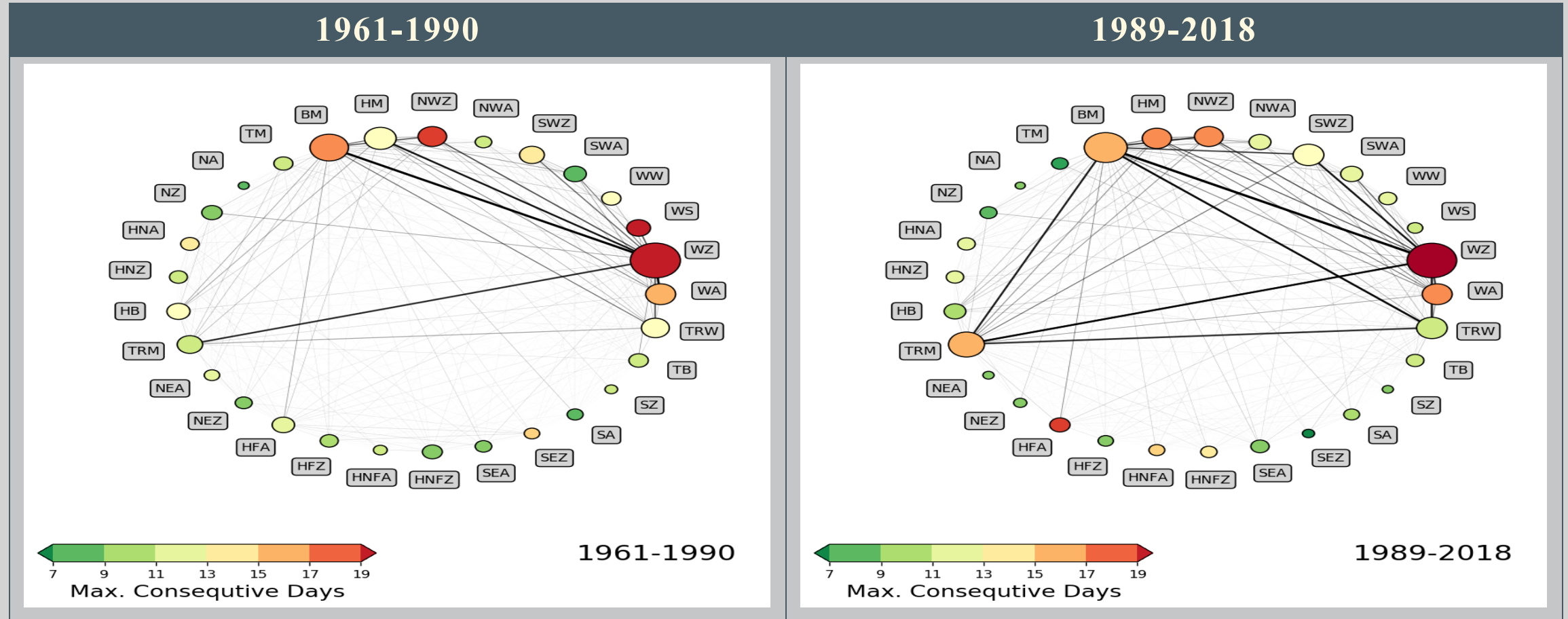
Bestimmte atmosphärische Strömungsmuster über Europa begünstigen bzw. neigen im Sommerhalbjahr zu Hitzewellen und Trockenheit.

Kritikalität von Strömungsmustern



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

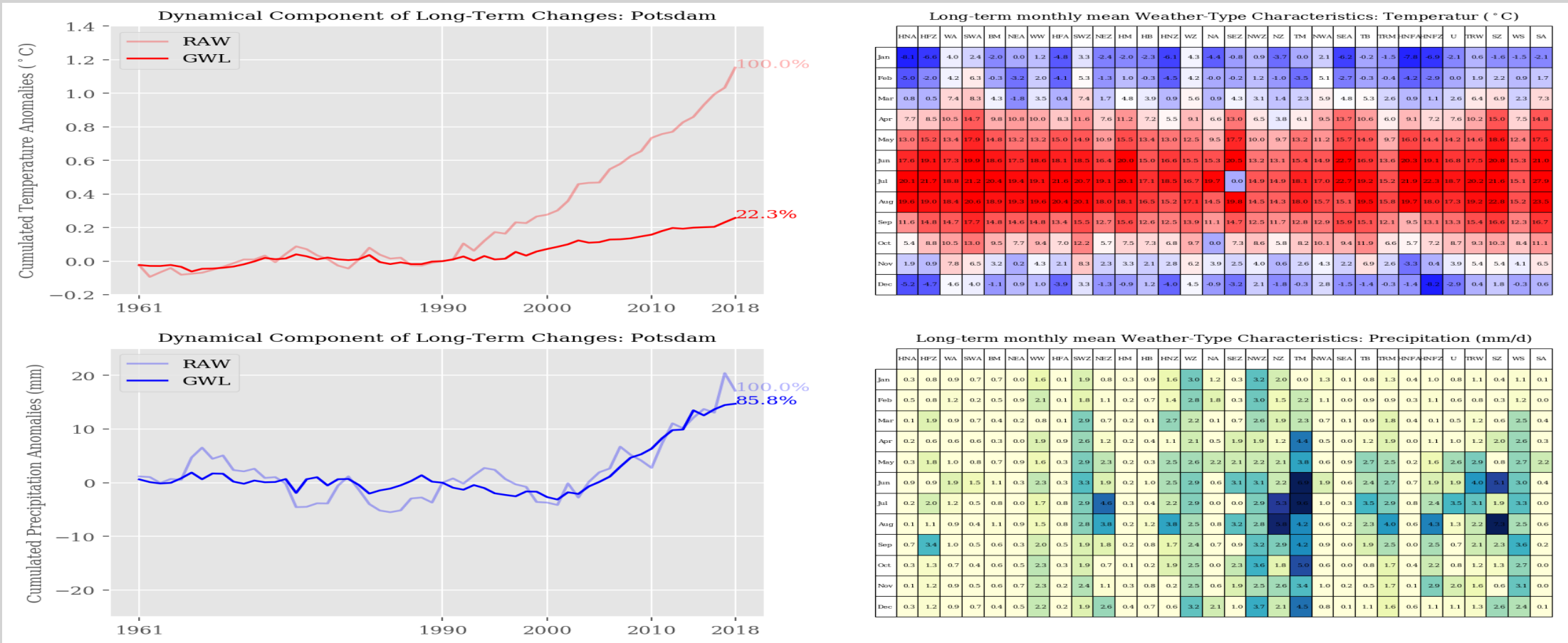
Sequenzen von Großwetterlagen



© Hoffmann & Spekat (2020)

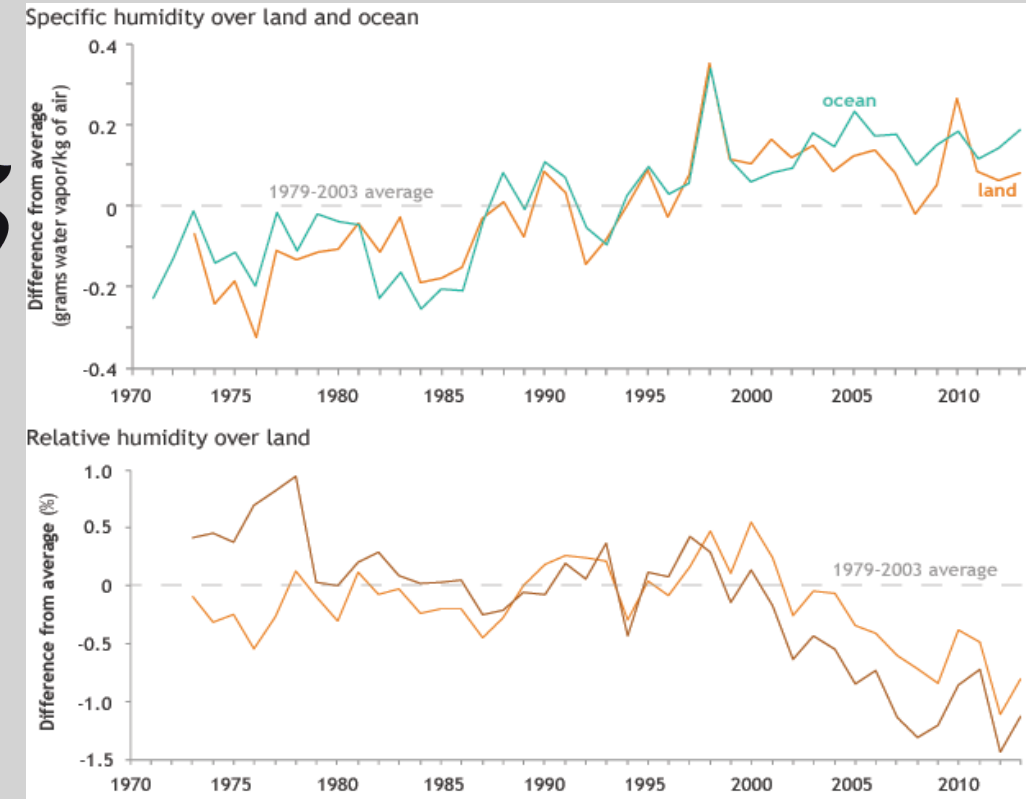
Dynamischer Anteil

© Hoffmann & Spekat (2020)



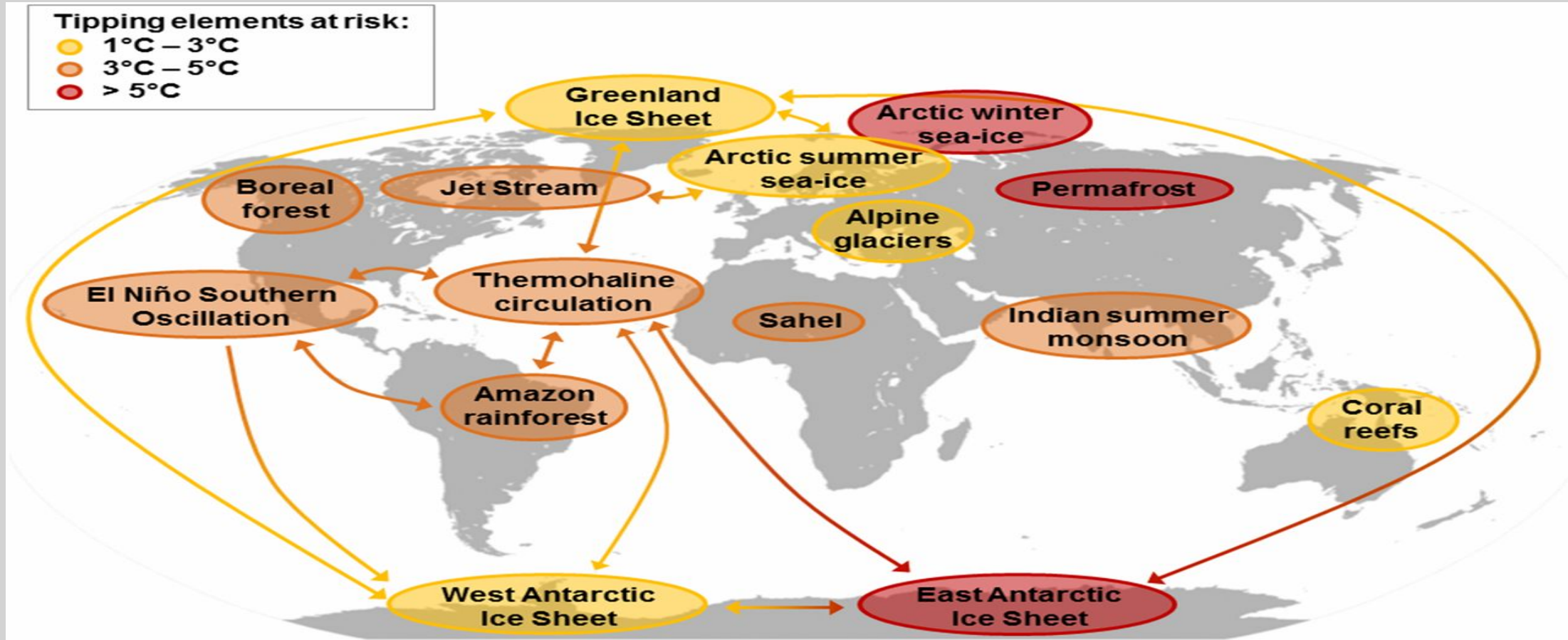
Dynamischer Anteil an der jahreszeitlichen Temperatur- und Niederschlagsentwicklung in Potsdam

Trends: Spezifische Luftfeuchte & Relative Luftfeuchte



mehr Wasserdampf in der Atmosphäre und gleichzeitig größere Hemmschwelle für Niederschläge

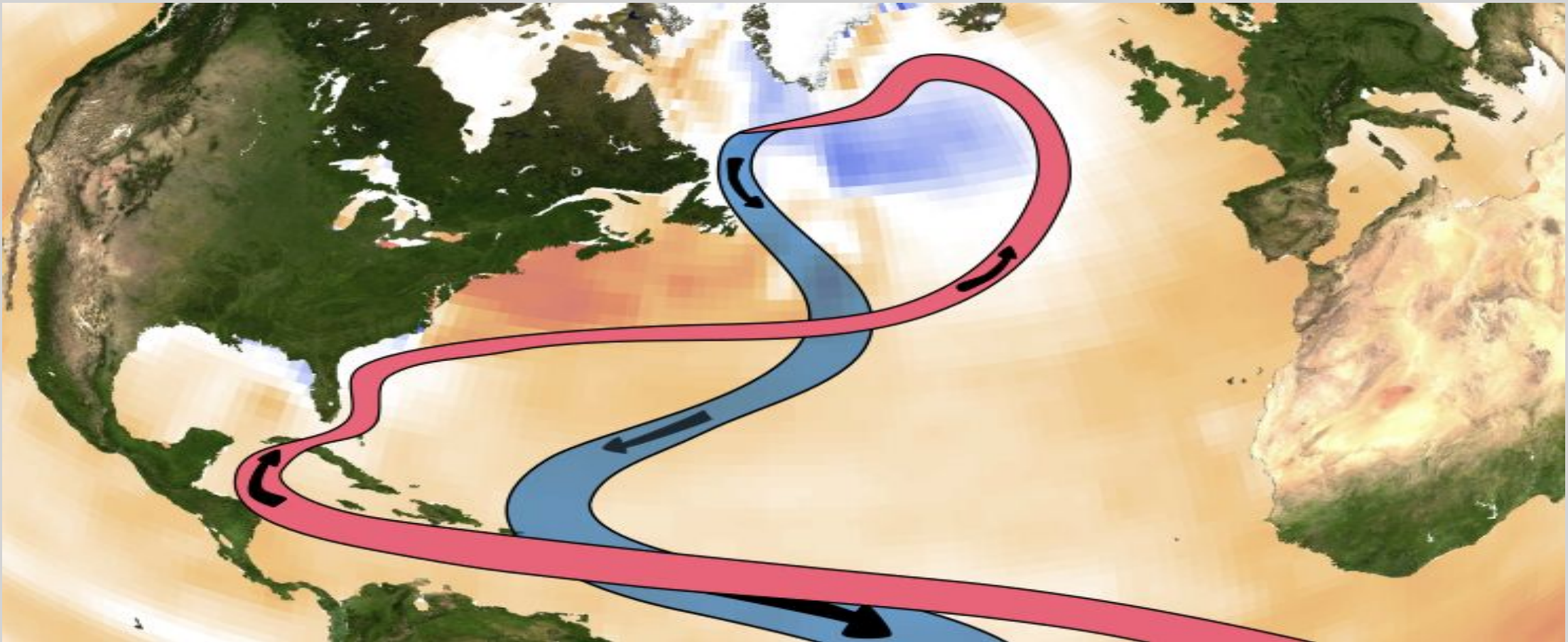
Kippelemente im Klimasystem



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.

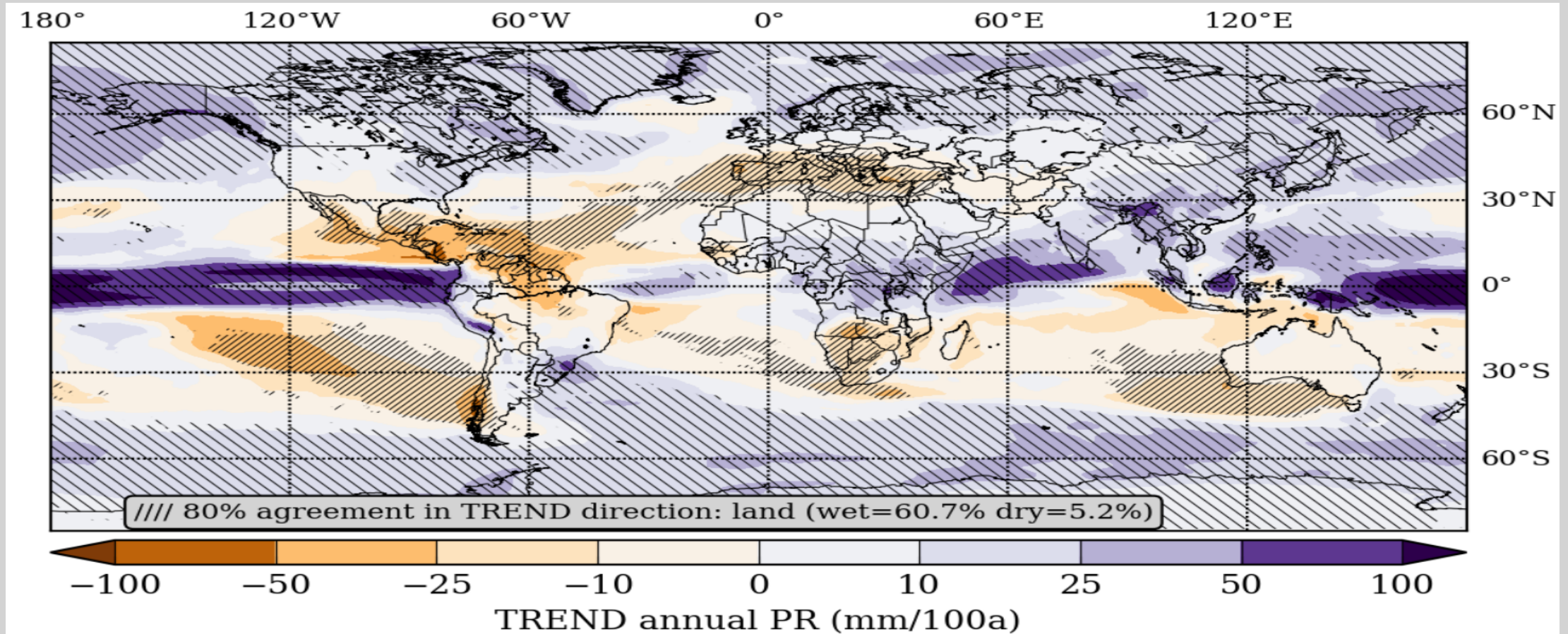
Golfstrom - Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)

© Caesar L. et al. (2018)



Abschmelzendes Grönlandeis verlangsamt die ozeanische Umweltbewegung im Nordatlantik.

Niederschlagstrends

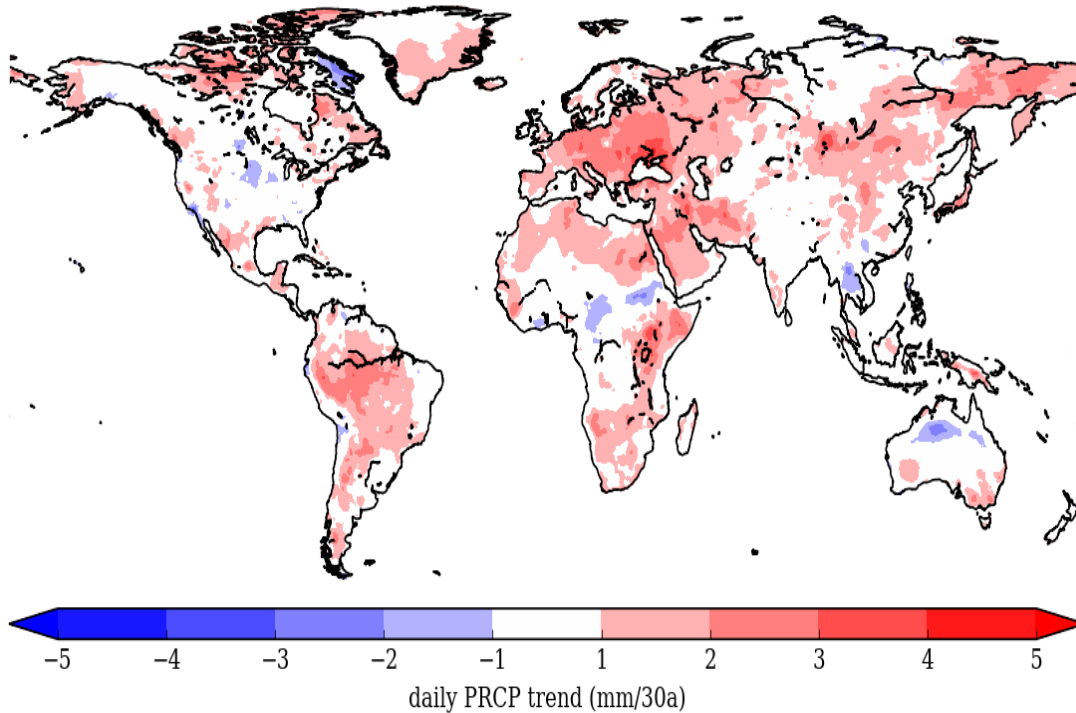


CMIP5-RCP85 Modelle projizieren bis zum Ende des Jahrhunderts für 60% der Landflächen eine Zunahme der Jahresniederschläge und nur 5% einen Rückgang (z.B. Mittelmeerraum).

Trends in Extremen

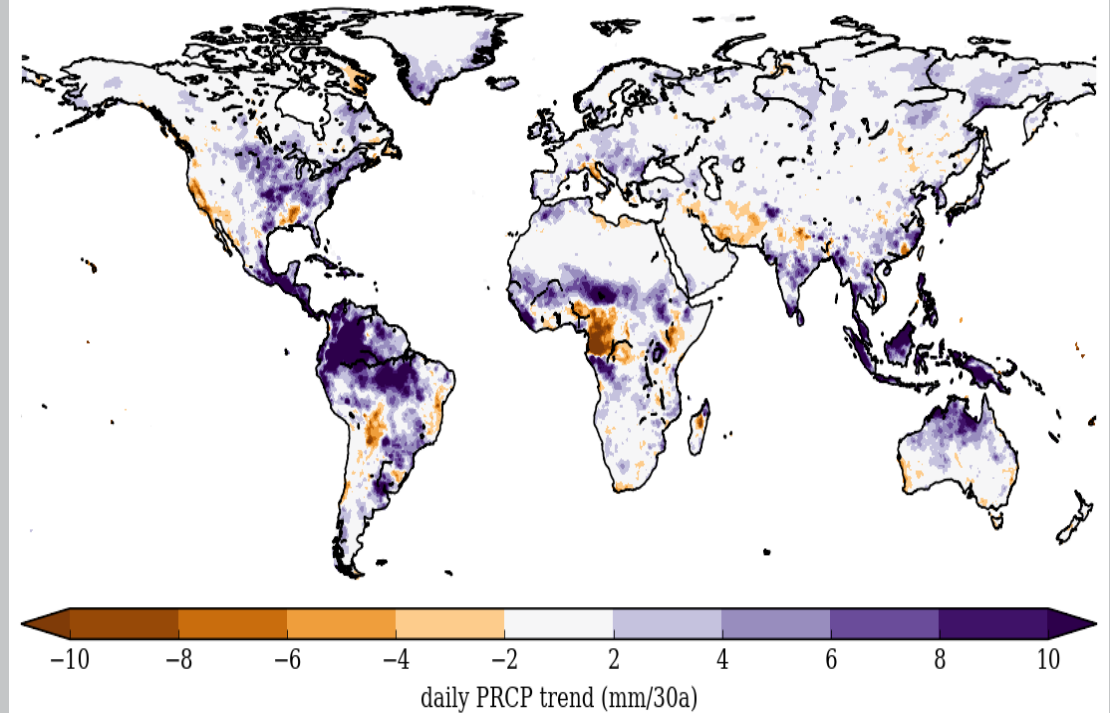
Hitzeintensität

TMAXair_daily_WFDEI: 1979-2015, TREND, 99th-Percentile



Regenintensität

Rainf_daily_WFDEI_CRU: 1979-2015, TREND, 99th-Percentile



Seltenheit: dritthöchste Wert pro Jahr (99th Perzentil)

Definitionen

Extremereignisse

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

- *Hitzetage: $t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$*

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. Perzents** 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.

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.
- Die Desertifikation ist 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.

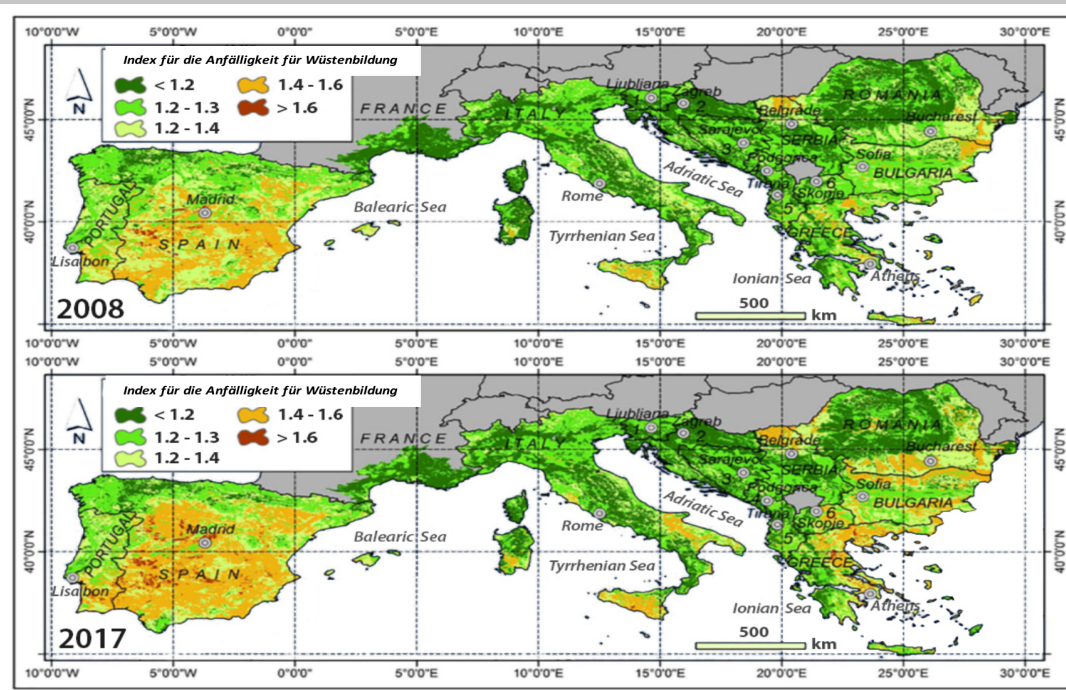
Landwirtschaft:

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



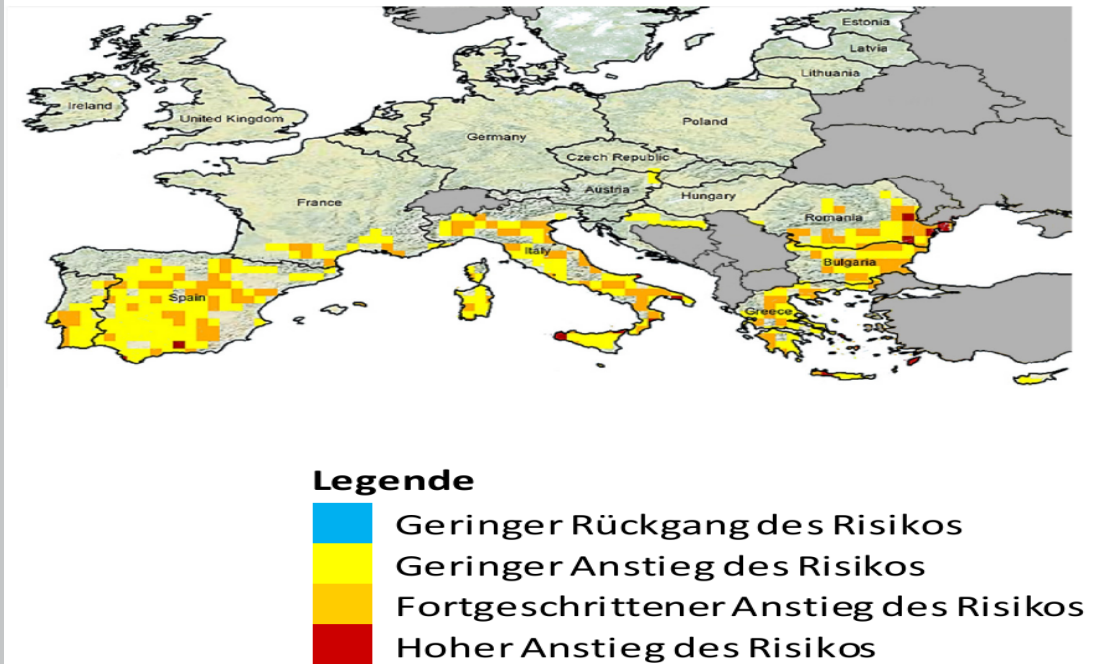
Beispiel: Europa

Sensitivity Desertification Index



© Prävălie et al. (2017)

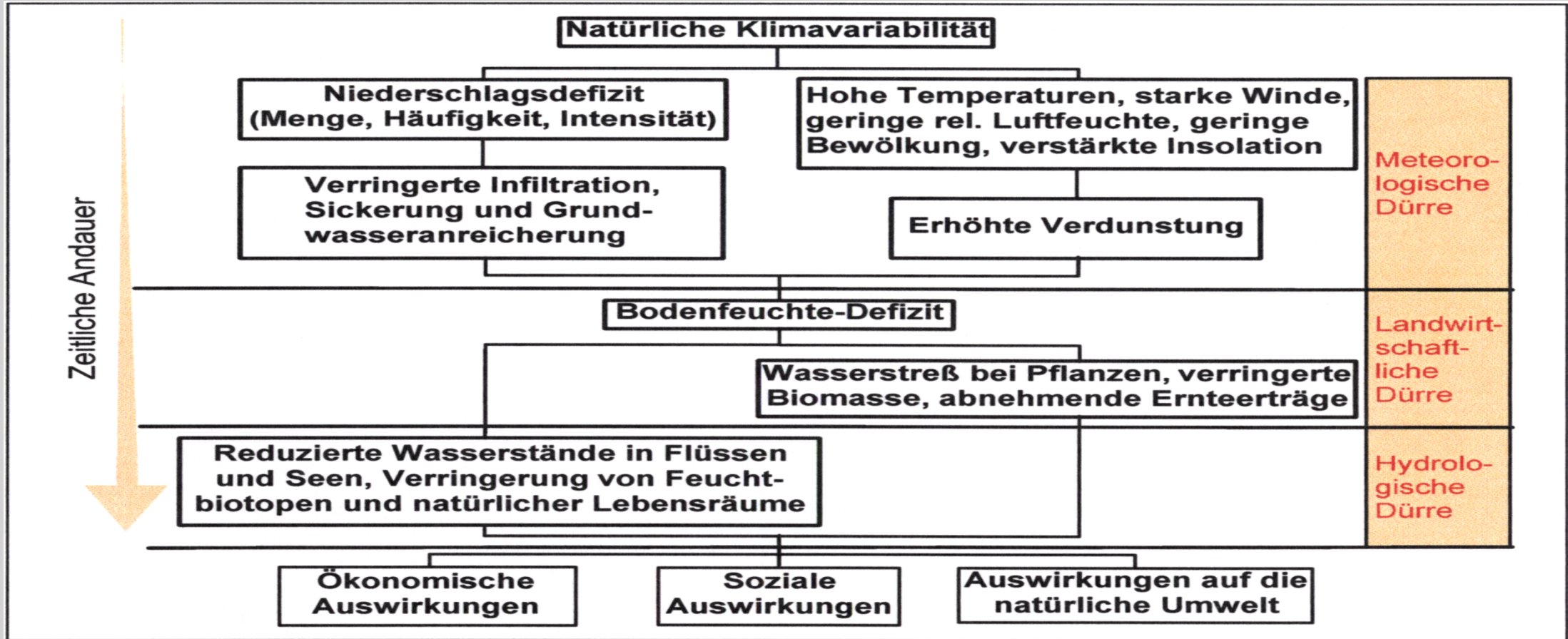
Ariditätsindex 2071-2100 vs 1981-2010



© Spinoni et al. (2018)

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

Auswirkung von Dürre



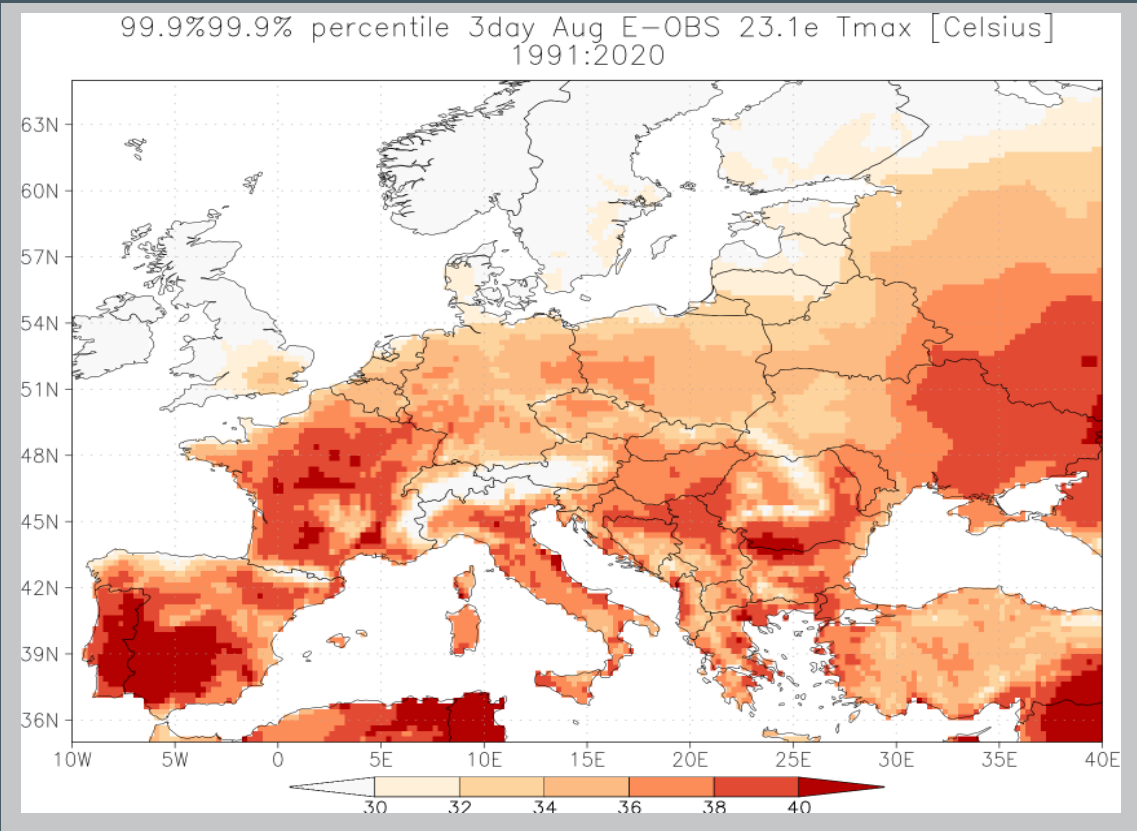
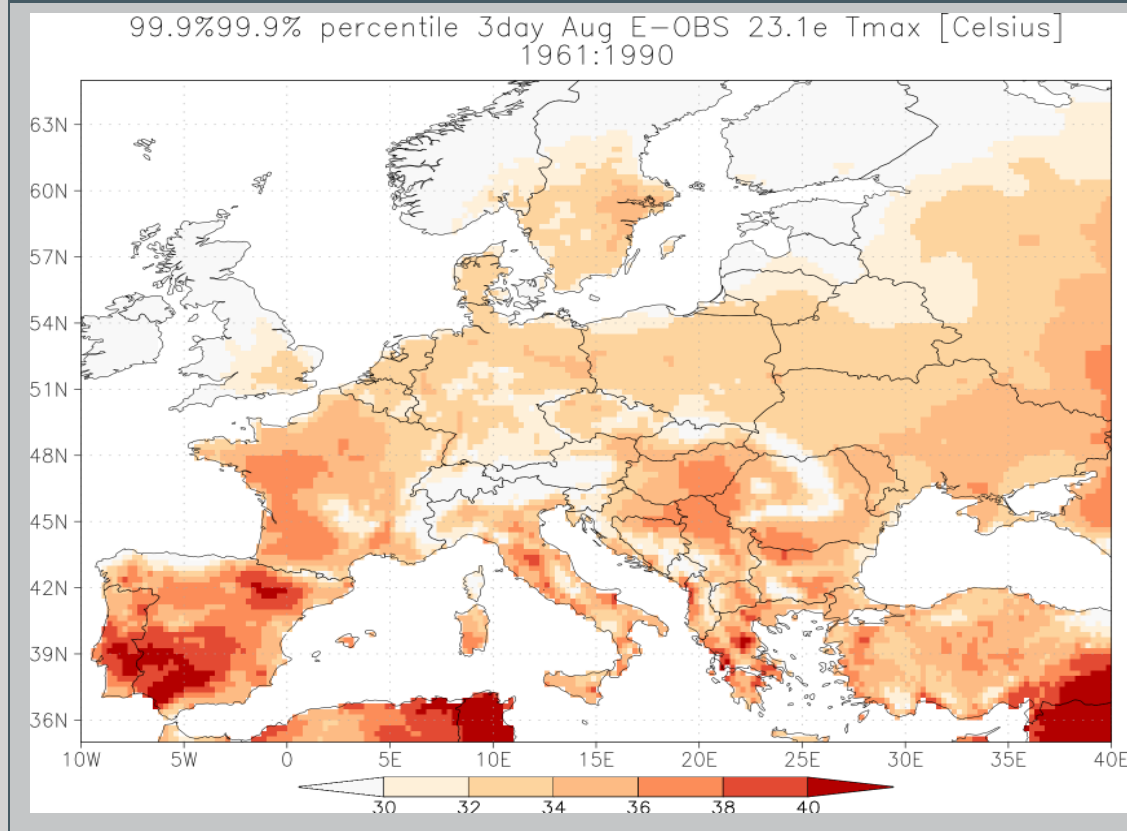
Dürrekatastrophe: Hält eine Dürre über mehrere Jahre an, kann sie zu einer Dürrekatastrophe führen. Das Ausmaß hängt ab von: (1) der Bevölkerungsdichte, (2) dem Migrationsverhalten, (3) dem Landnutzungssystem (4) der Wasserversorgung, (5) der Ernährungsmöglichkeit.

Messbarkeit

Perzentile

Tmax Aug:1961-1990 (99.9th)

Tmax Aug:1991-2020 (99.9th)



Extreme zeigen stärkere Änderungssignale als Mittelwerte: Extreme werden in der Regel durch bestimmte Strömungsmuster begünstigt.

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 Sommertage errechnet.

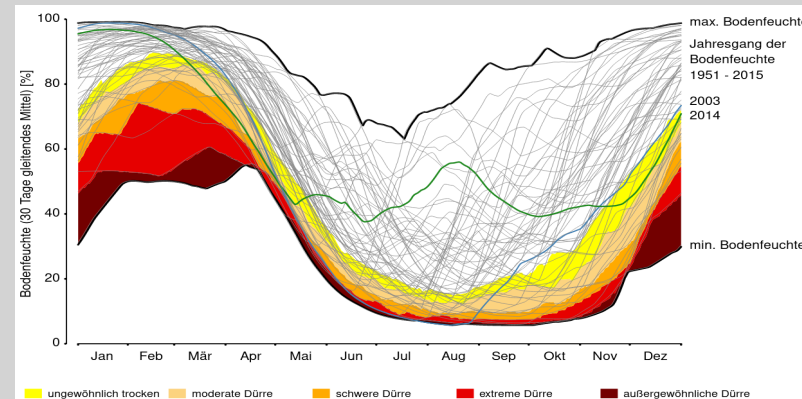
Kysely-Tage: Das Tagesmaximum der Lufttemperatur (T_{\max}) überschreitet mindestens an 3 Tagen in Folge 30.0°C und die Kysely-Tage werden solange über die gesamte nachfolgende Periode gezählt, wie T_{\max} an keinem Tag die Temperatur von 25.0°C unterschreitet

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	Ernteaussfälle; extremes Feuerrisiko; großflächiger Wassermangel	-4,0 bis -4,9	-1,6 bis -1,9
Exzeptionelle Dürre	>43	Großflächige Ernteaussfälle; 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)

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

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

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Potentielle Verdunstung

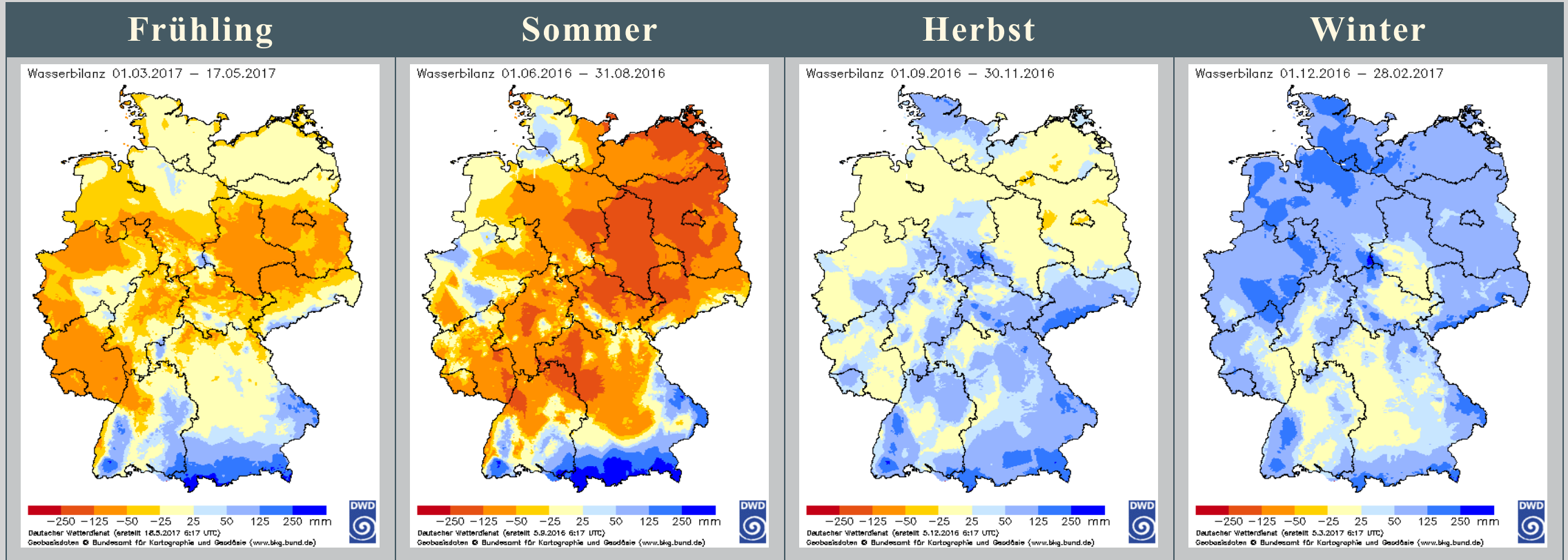
Haude-Formel: (Sättigungsdefizit)

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

Penman-Monteith:

berücksichtigt Strahlung, Temperatur, Wind und spezifische Pflanzenparameter

Klimatische Wasserbilanz

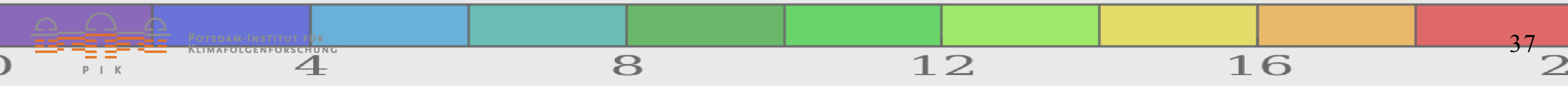
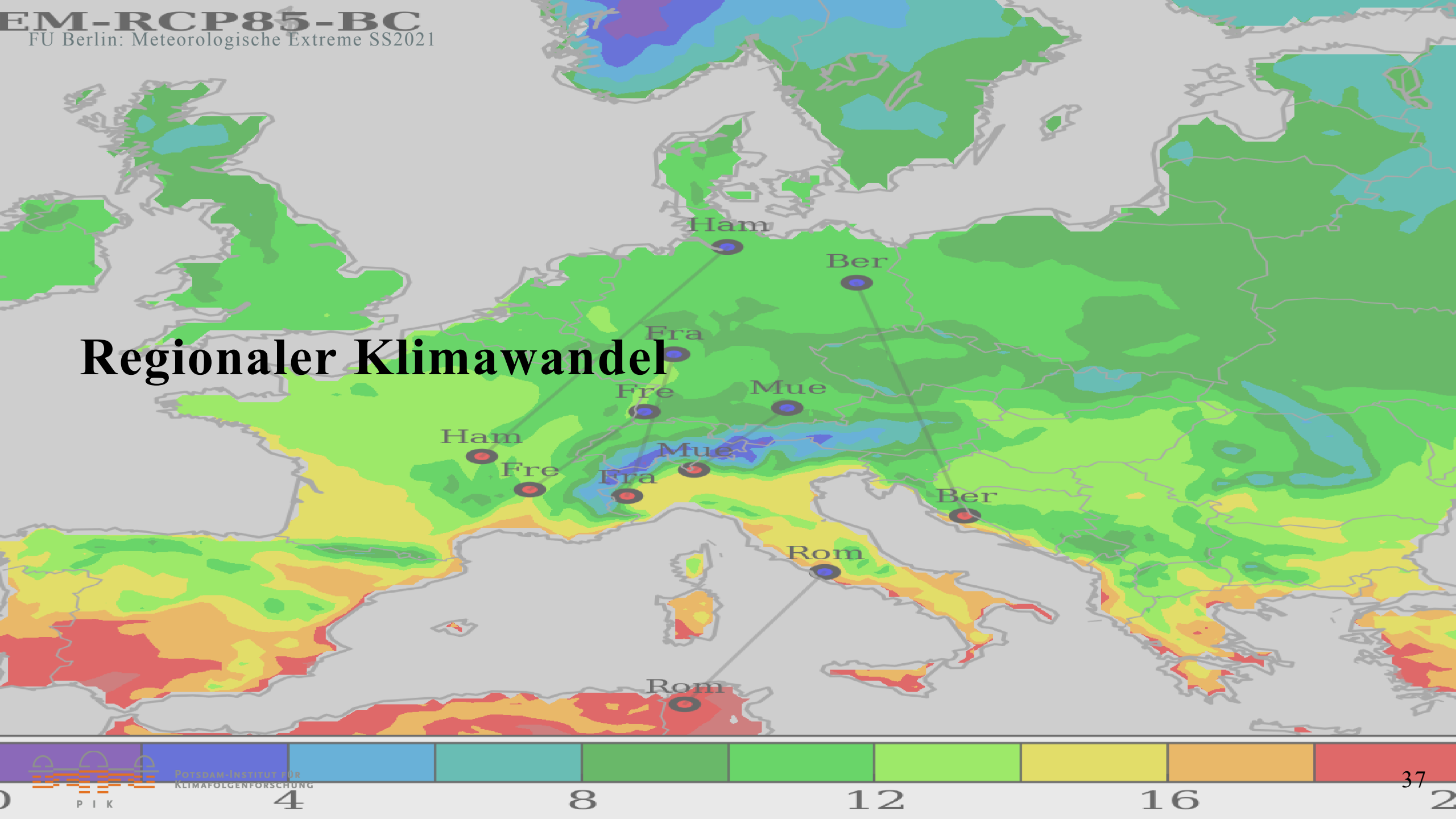


Klimatische-Wasserbilanz: Gegenüberstellung von Niederschlagssumme zu potentieller Verdunstung: im Sommer überwiegt die Verdunstung und im Winter die Niederschlagsmenge

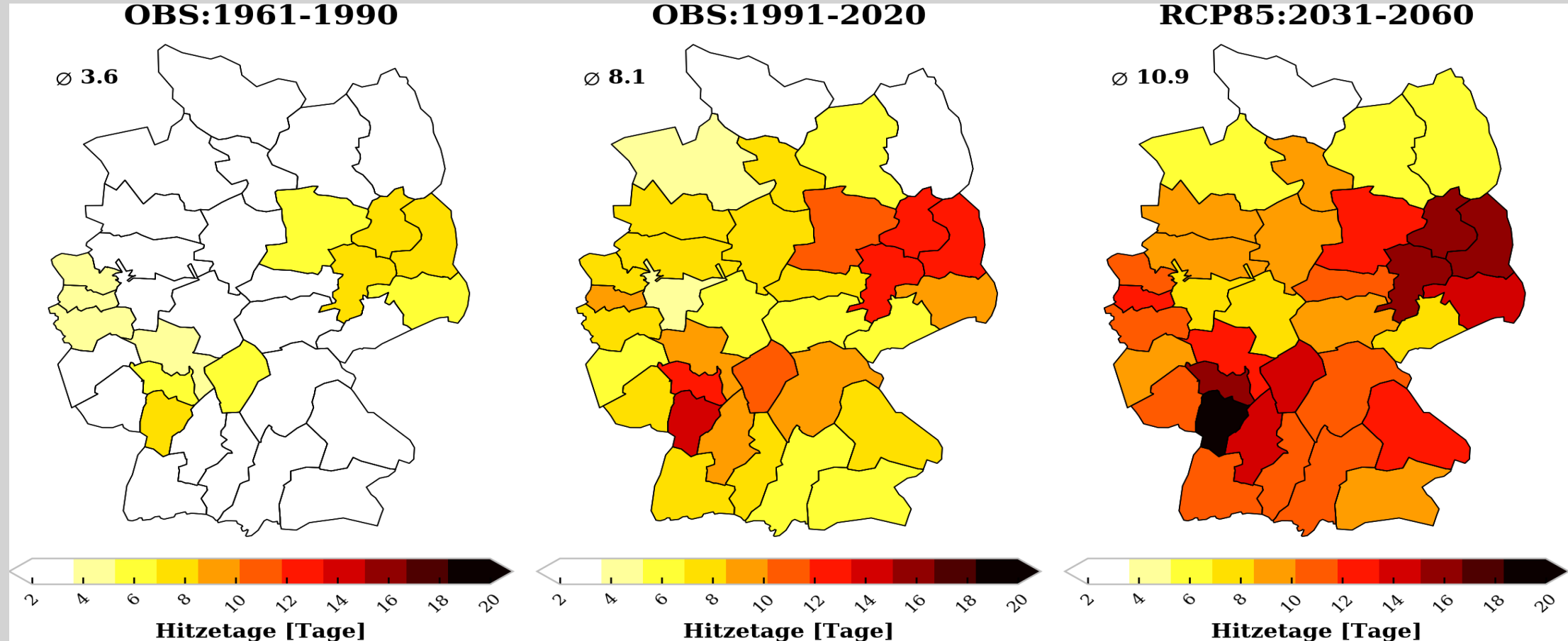
ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection and Indices

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	$\sum_{CD} (TN_{ij} < TN_{in10}) \geq 6$
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	$\sum_{CD} (PR_{ij} > 1mm)$

Regionaler Klimawandel



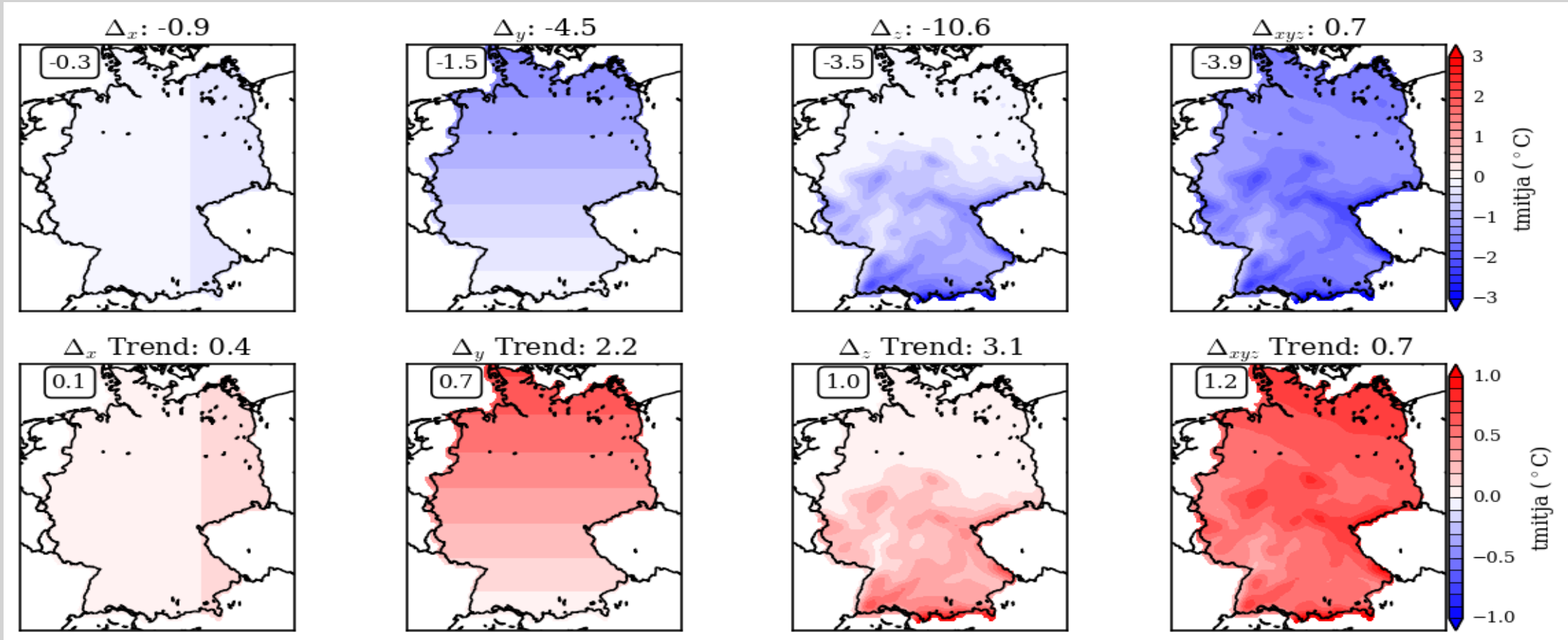
Hitzetage



1 Grad Temperaturerhöhung seit 1961-1990 hat zu einer Verdopplung der Hitzetage geführt. Die Hitzeintensität steigt stärker an als Mittelwerte.

Regionale Verschiebungen

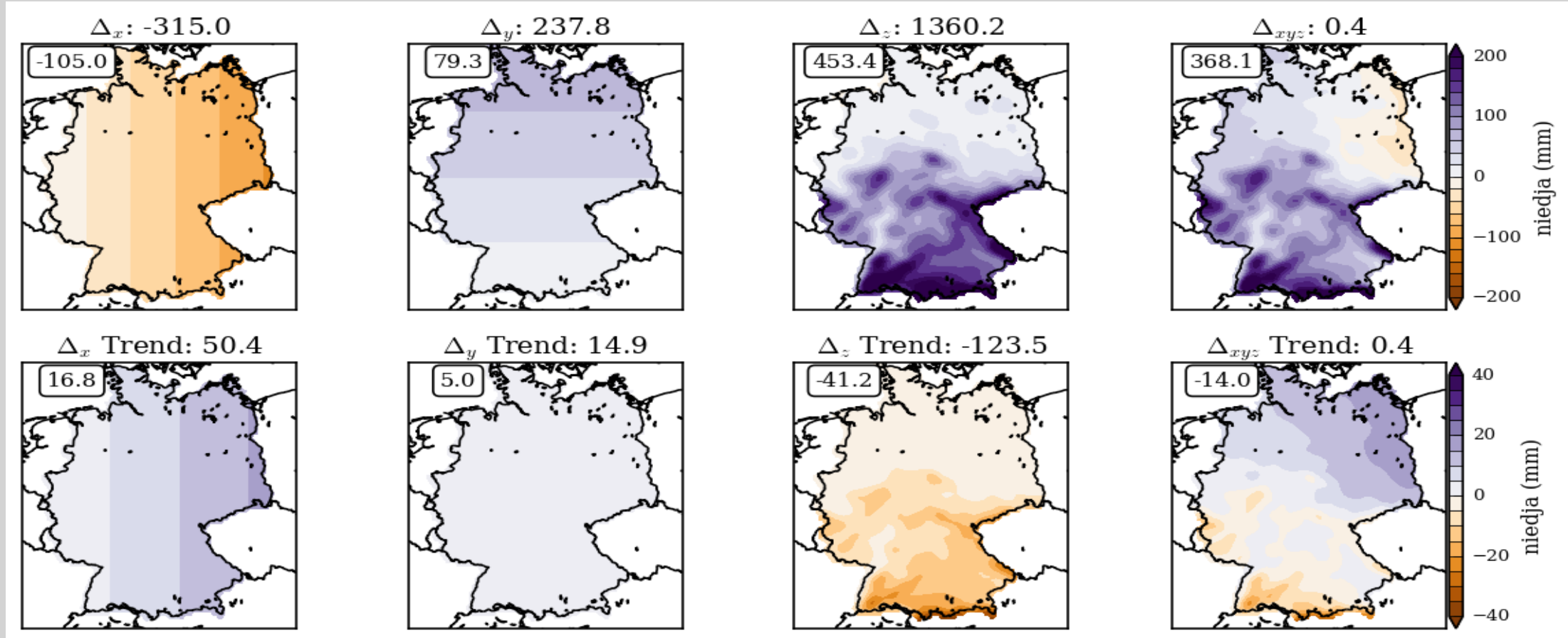
Jahresmitteltemperatur: 1961-2018



Zerlegung nach Himmelsrichtungen und Trend: regionale Kontraste verringern sich.

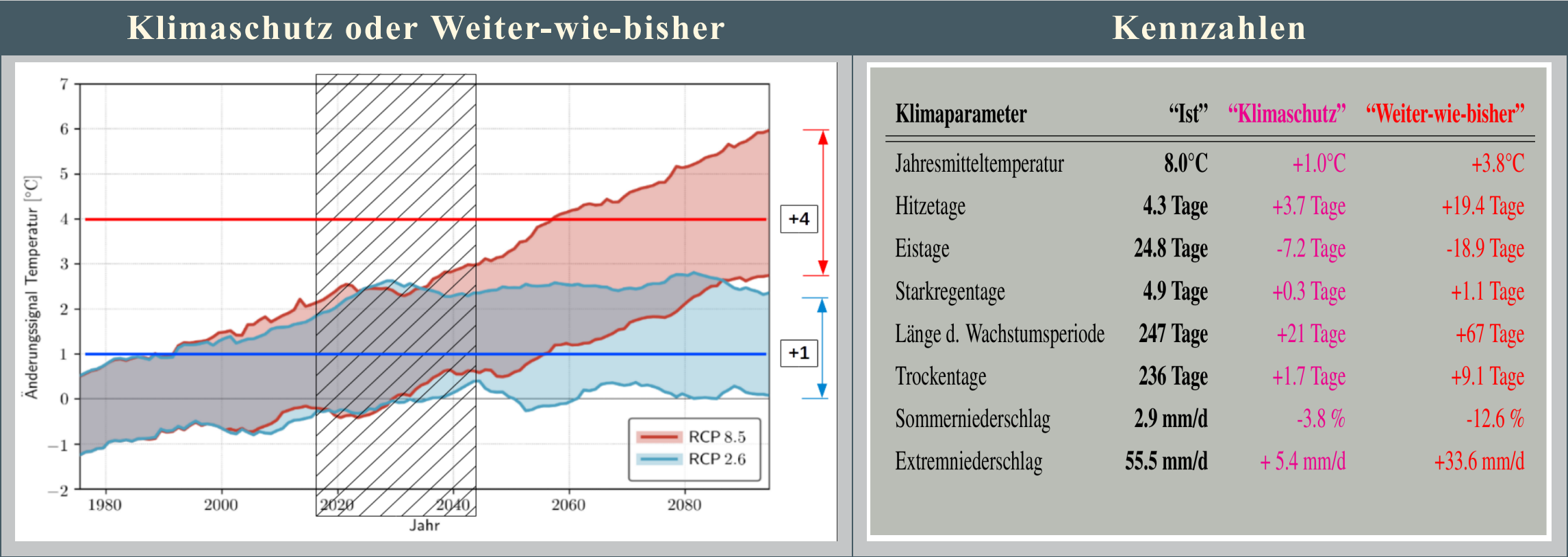
Regionale Verschiebungen

Jahresniederschlag: 1961-2018



Zerlegung nach Himmelsrichtungen und Trend: Regen wird unabhängiger vom Relief.

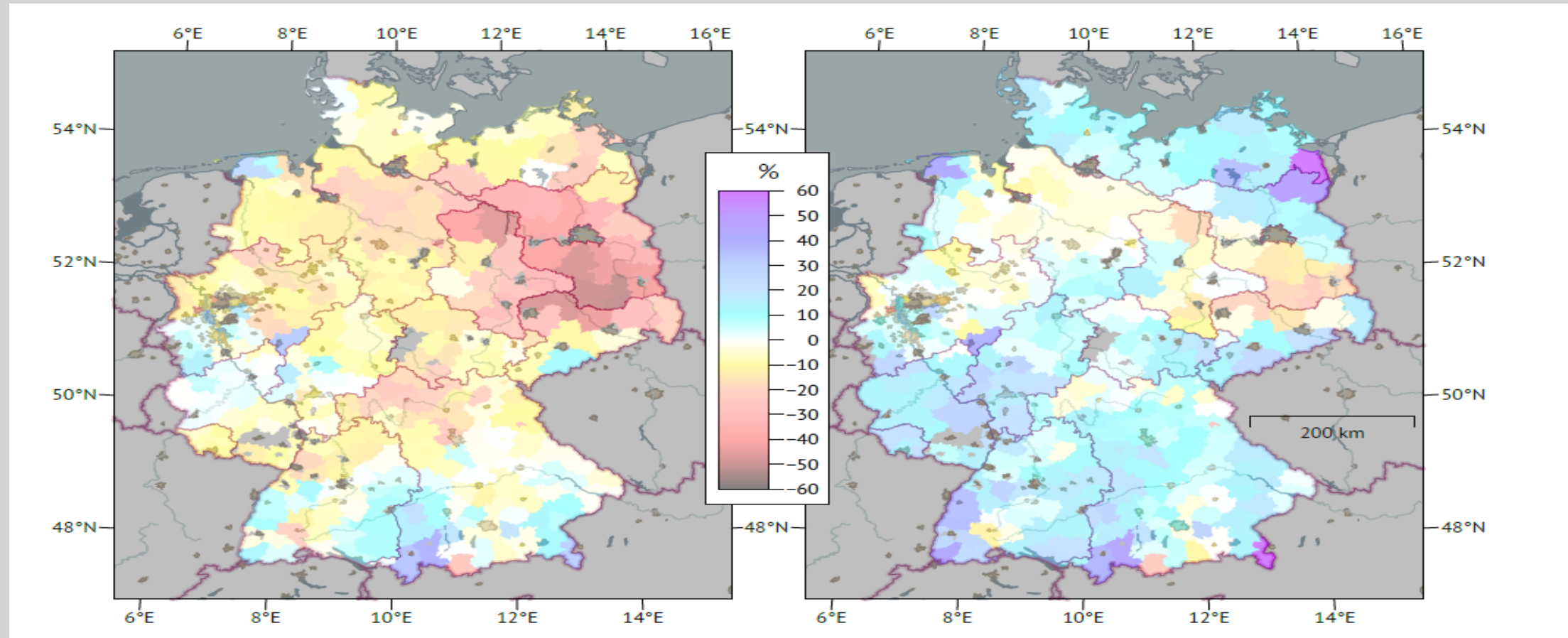
Projektionen: 2071-2100 vs 1971-2000



Folgen und Wechselwirkungen

Landwirtschaftlicher Ertrag für Winterweizen 2018

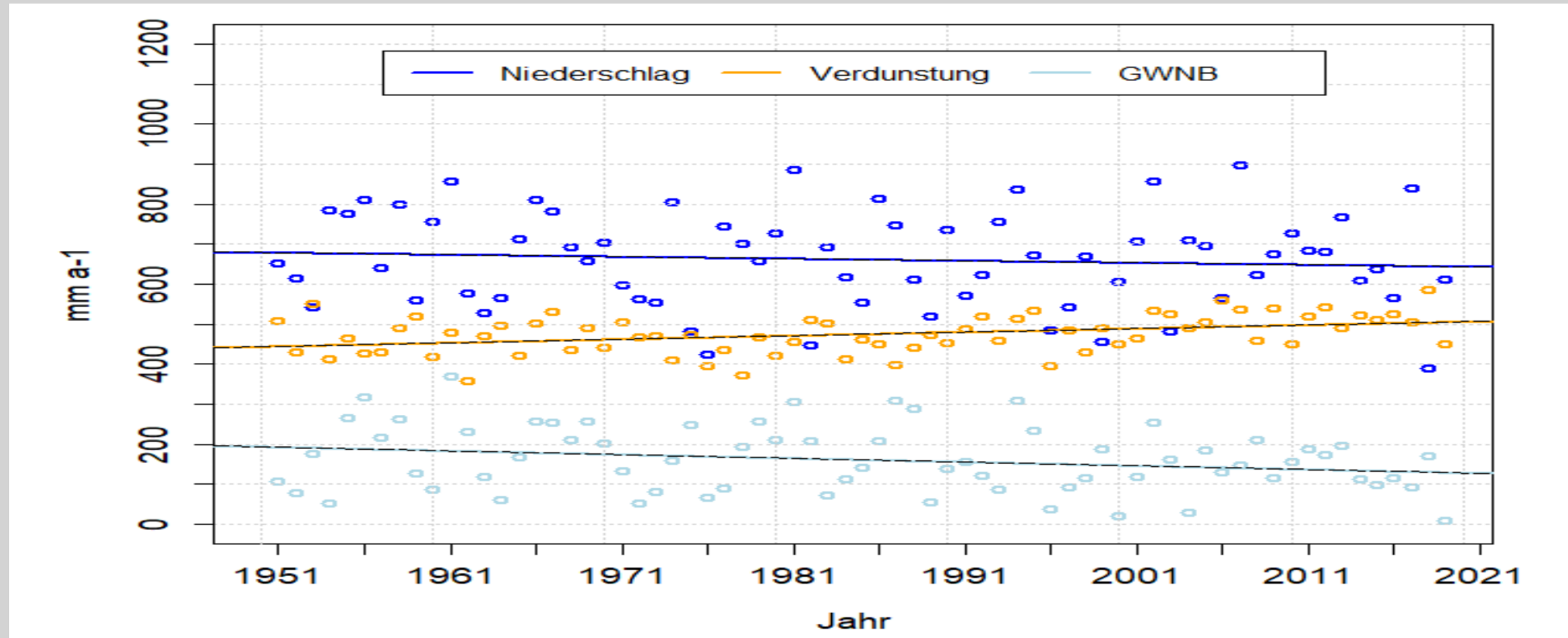
© Conradt et al. (2018)



Vergleich zum **Mittel** (links) und **2003** (rechts)

Wasserhaushaltsgrößen

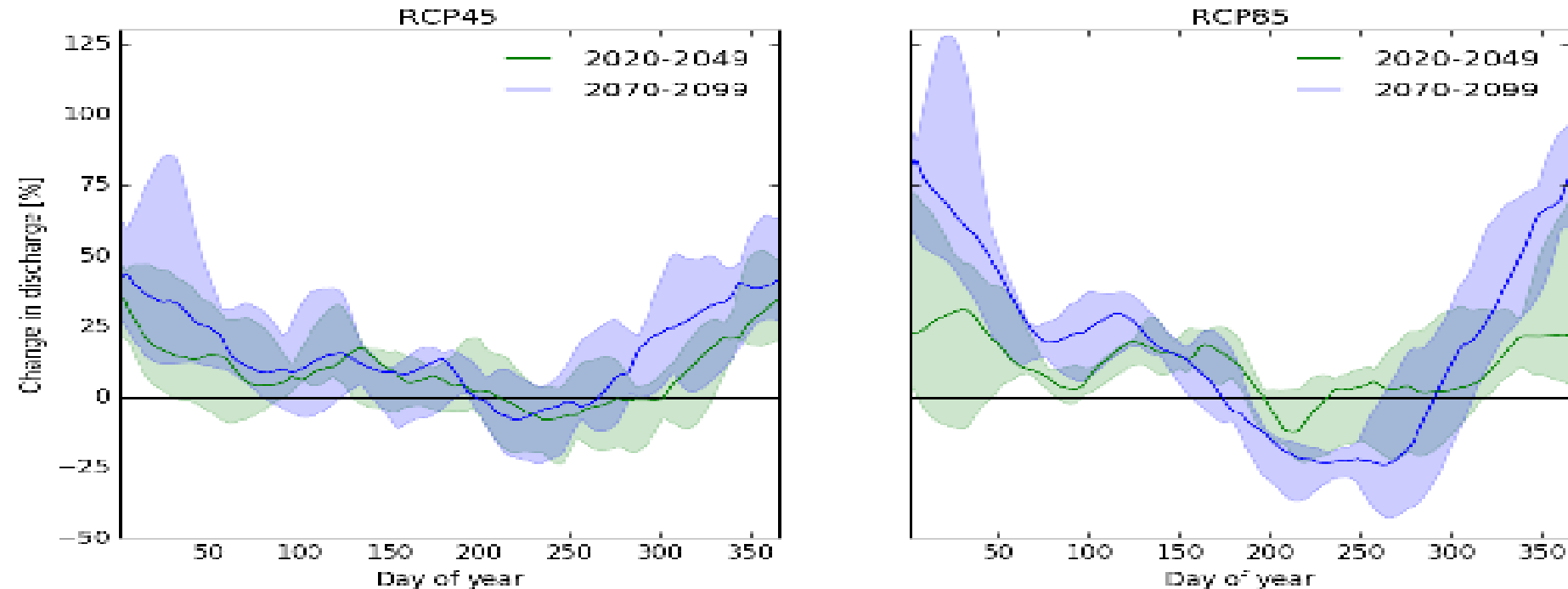
© Hattermann (PIK)



*Sinkende **Grundwasserneubildung** trotz nahezu gleichbleibender Jahresniederschläge: höhere Verdunstung (Potsdam)*

Niedrigwasser: Bsp. Donau

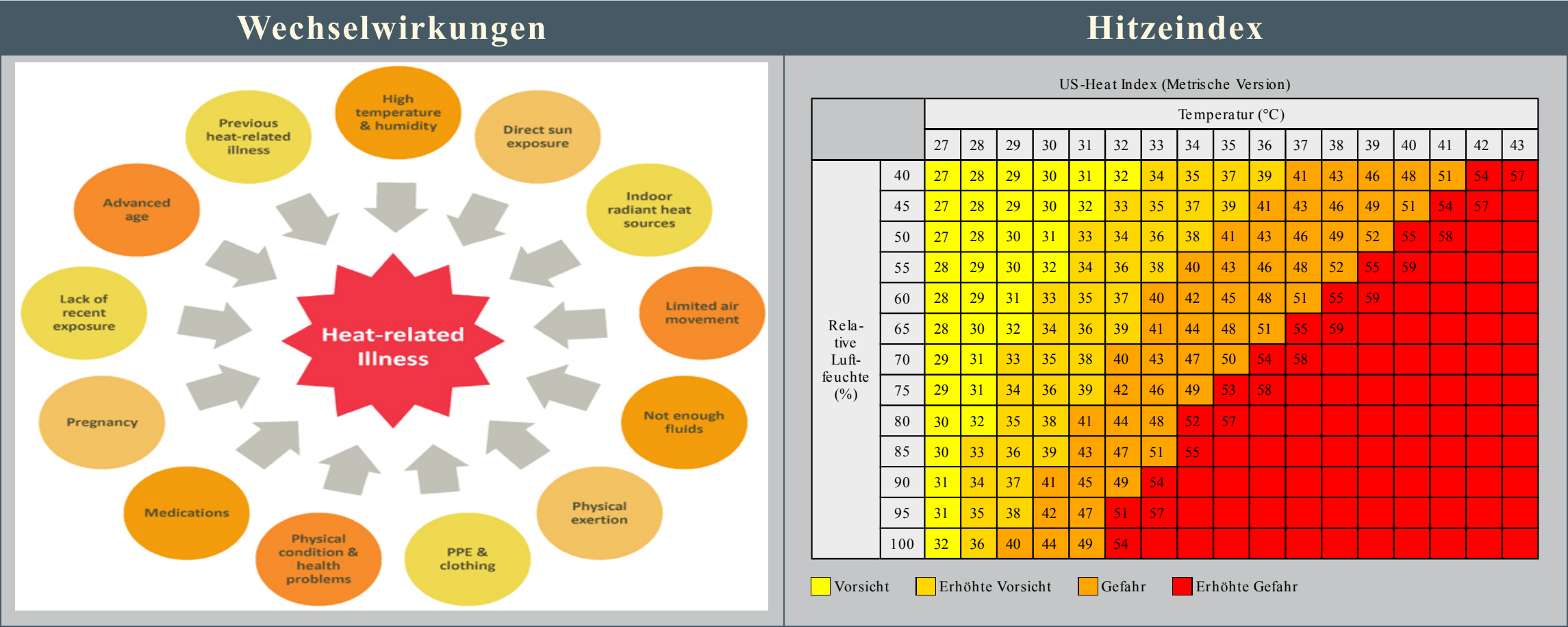
© Hattermann (PIK)



Auch Niedrigwasser und Trockenheit kann zunehmen!

Jahresgang des Gesamtabflusses: Sommerliche Niedrigwasserstände nehmen unter Klimawandel zu

Gesundheitsbelastung

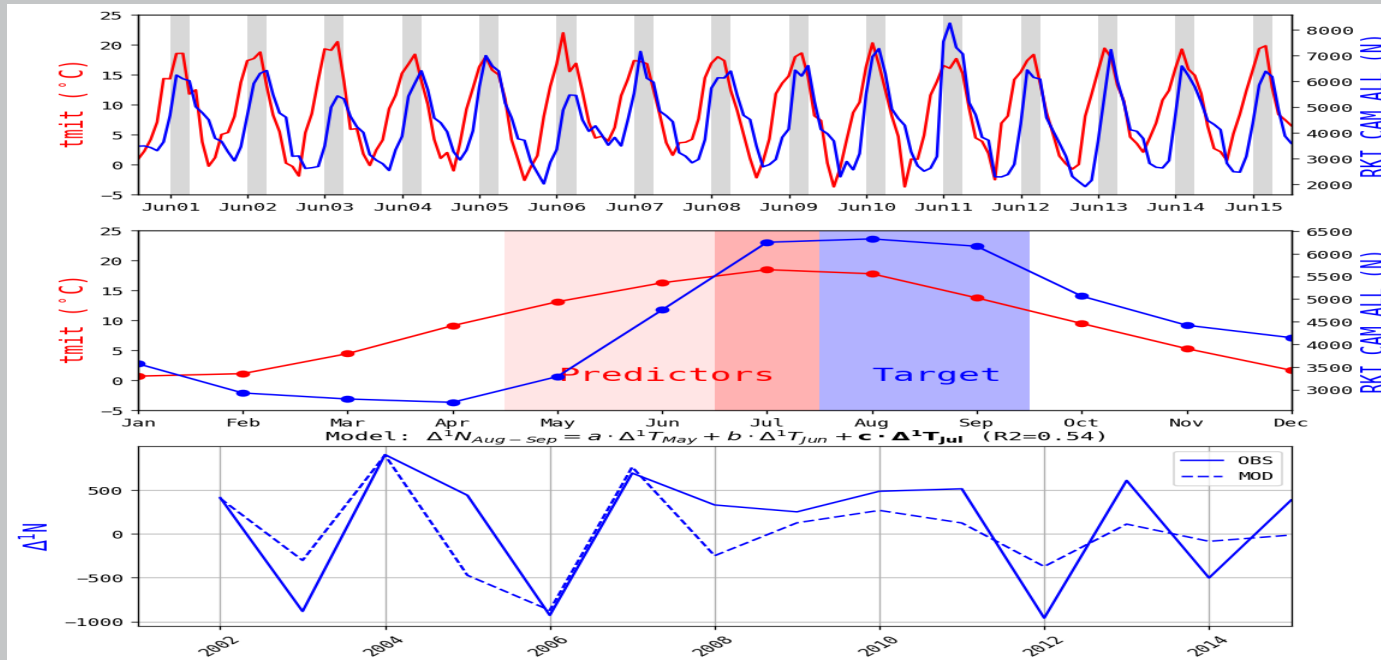


Je gesättigter die Luft ist desto langsamer ist der Verdunstungsprozess durch Schwitzen. Es drohen Hitzschlag bei kritischer Schwelle!

Durchfallerkrankungen (Campylobacter)



Saisonalität



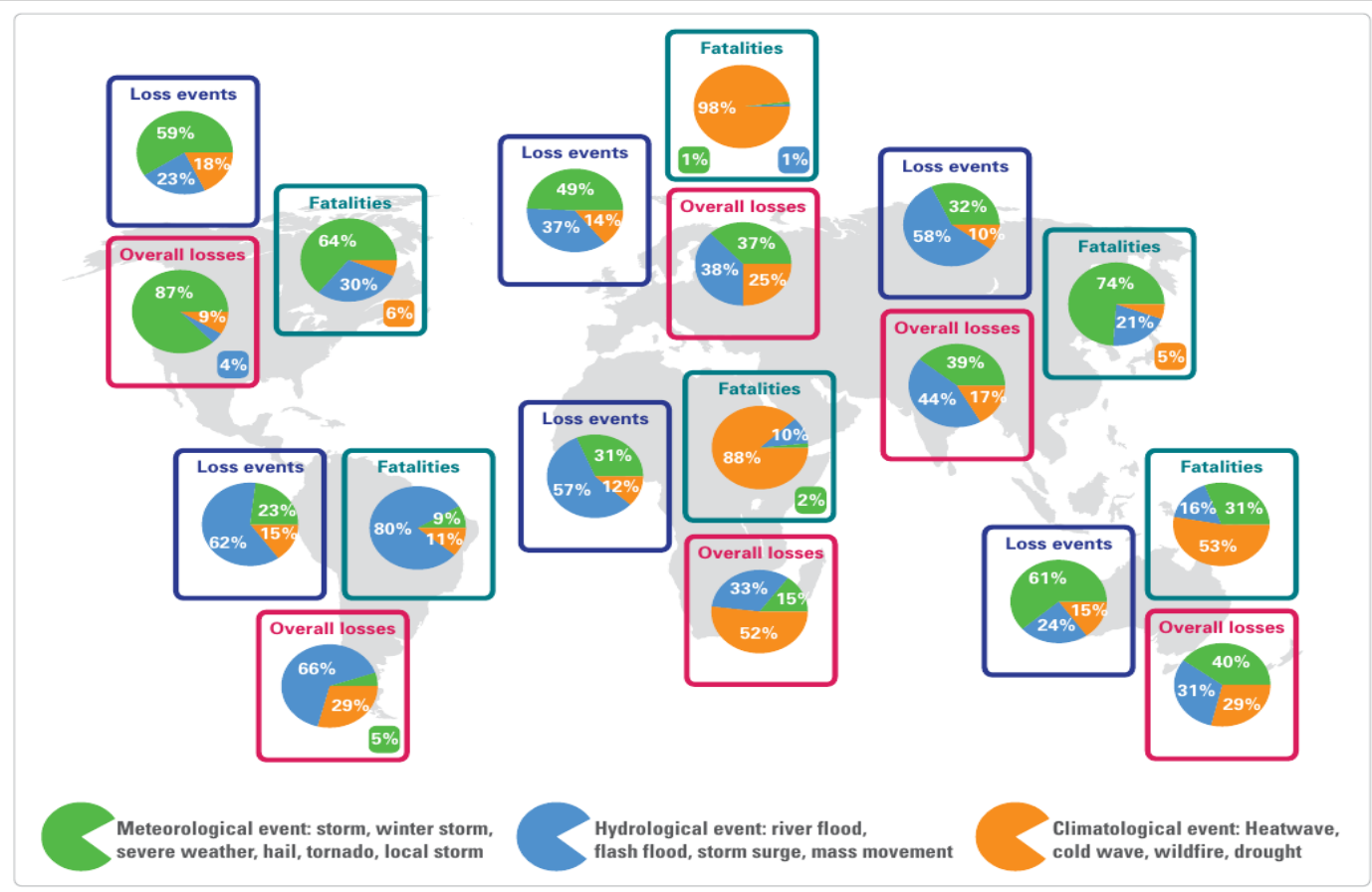
Wechselwirkung



Zeitversatz zwischen Temperaturverlauf und Infektionskurve: möglich Ursache Lebensdauer von Masthühner von ca. 6 Wochen.

Verluste und Tode durch Extremereignisse

© MunichReNatCatSERVICE

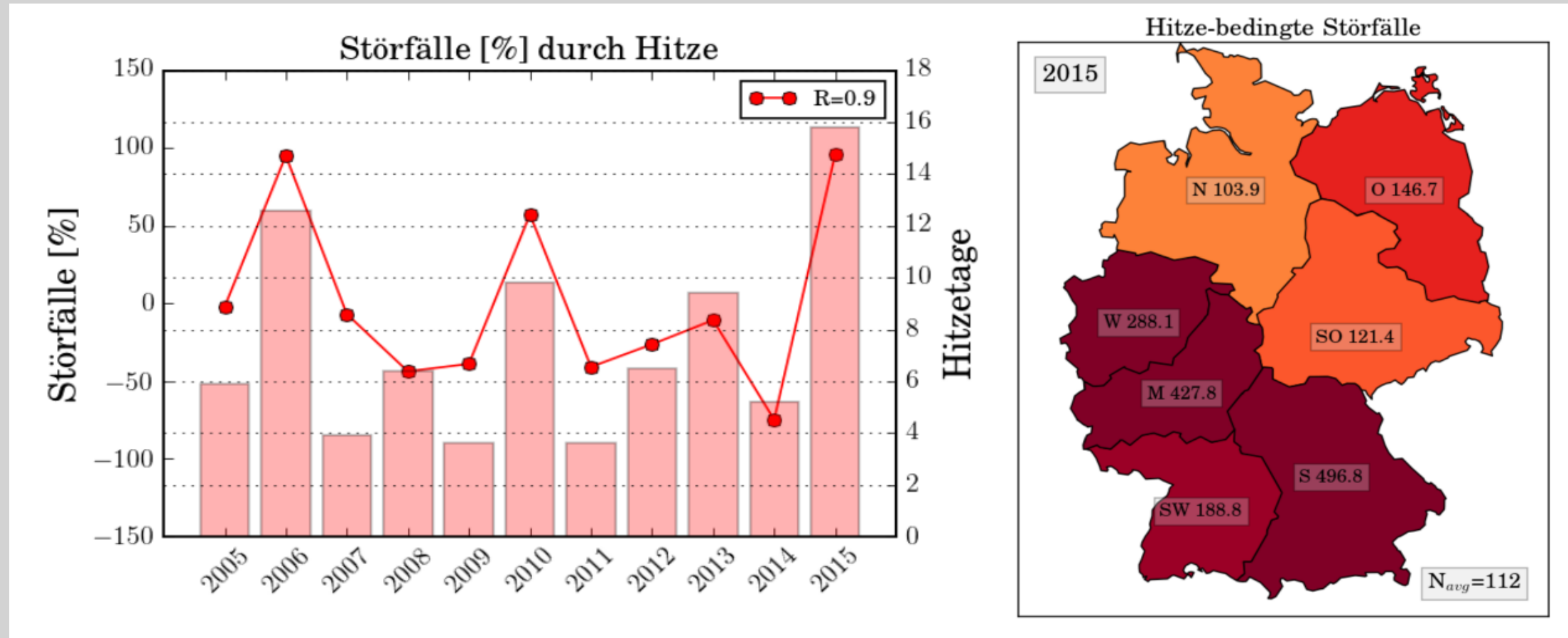


Region	Jahr	Dauer in Wochen	T _{max}	Opferzahl
Indien	2015	6	49 °C	2.500
Pakistan	2015	2	45 °C	1.300
Russland	2010	8	>40 °C	55.000
Europa	2006	5	39 °C	3.500
Indien	2003	3	50 °C	1.200
Europa	2003	2	47 °C	70.000
Indien	2002	2	49 °C	1.000
Indien	1998	10	50 °C	2.500
Griechenland, Türkei	1987	2	50 °C	1.000
USA	1980	~10	45 °C	1.300
USA, Kanada	1936	2	44 °C	1.700

Klimatologische Extreme (Hitze- und Kältewellen, Dürren, Waldbrände) rufen die höchsten Opferzahlen hervor im vergleich zu anderen meteorologischen Extremen (z.B. Stürme).

Verkehr und Infrastruktur

© Hoffmann (PIK)



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

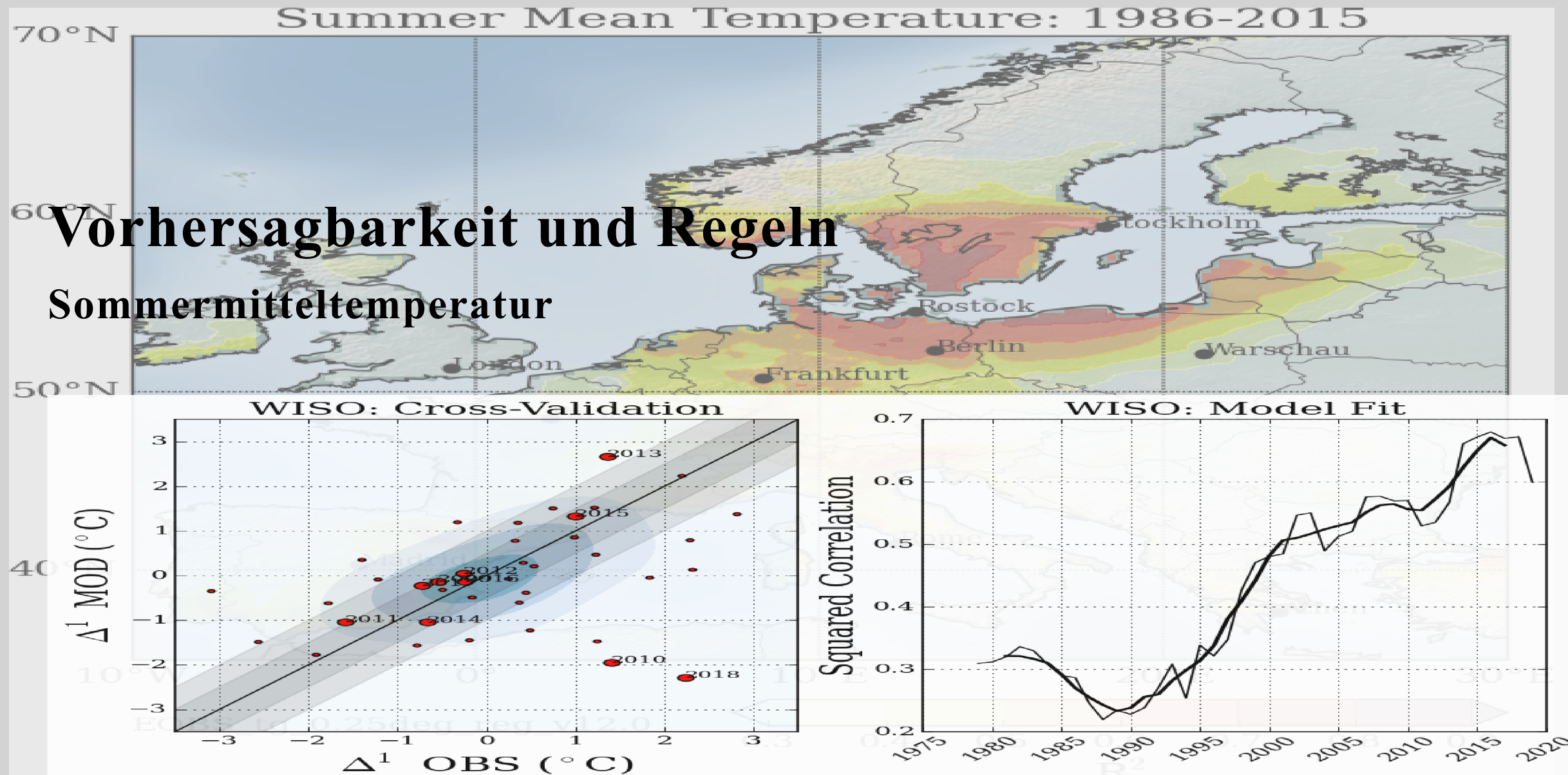
Anpassungsmatrix: Landwirtschaft

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



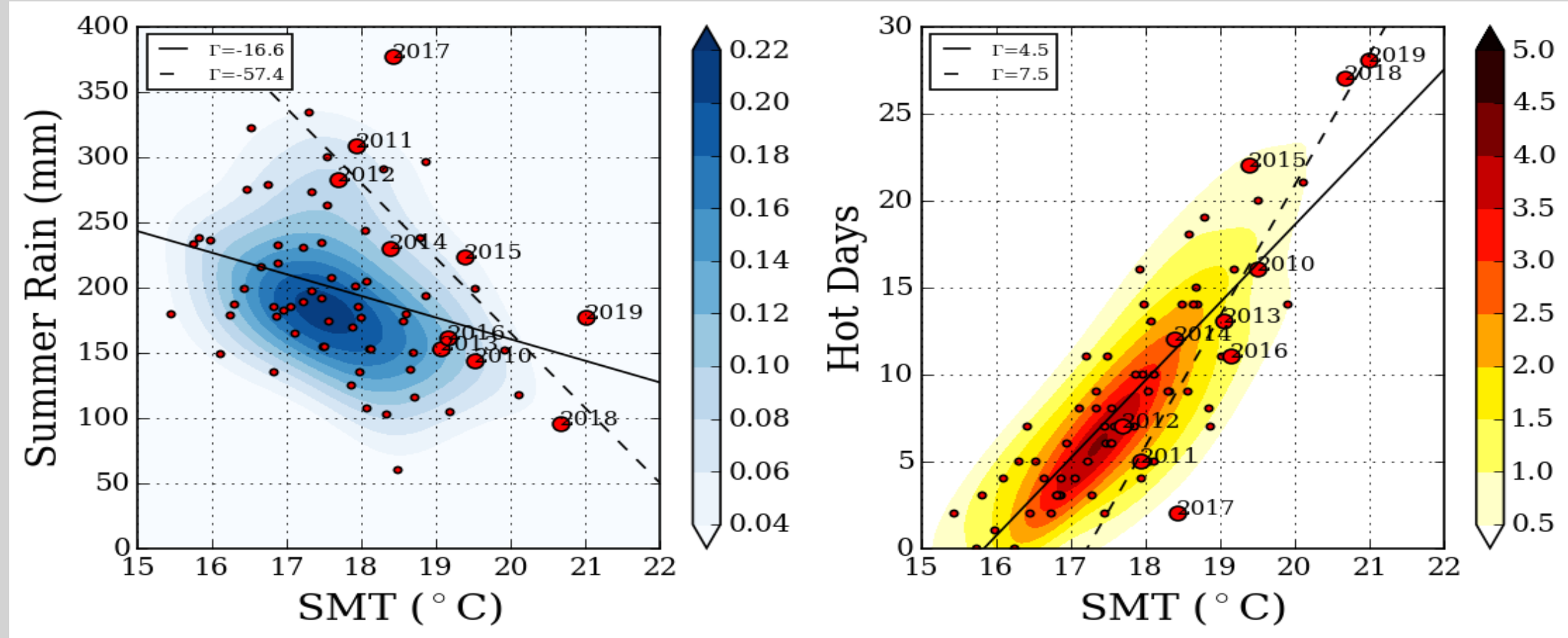
Zu Handlungsfeldern für die Anpassung werden nur solche Bereiche, die in allen drei Dimensionen (Einfluss des Klimawandels, Relative Wichtigkeit der Veränderung und Handlungsbedarf) als mittel oder gross eingestuft sind.

Quelle: BAFU



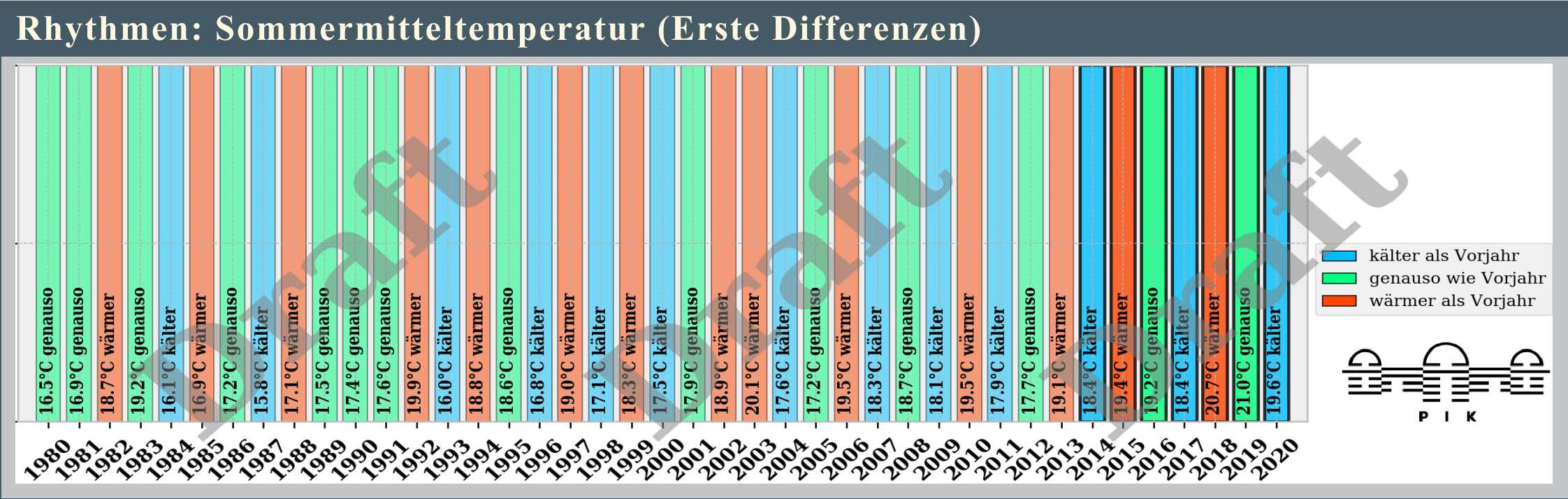
Sommertemperatur ~ Regensumme, Hitzetage

© Hoffmann (PIK)



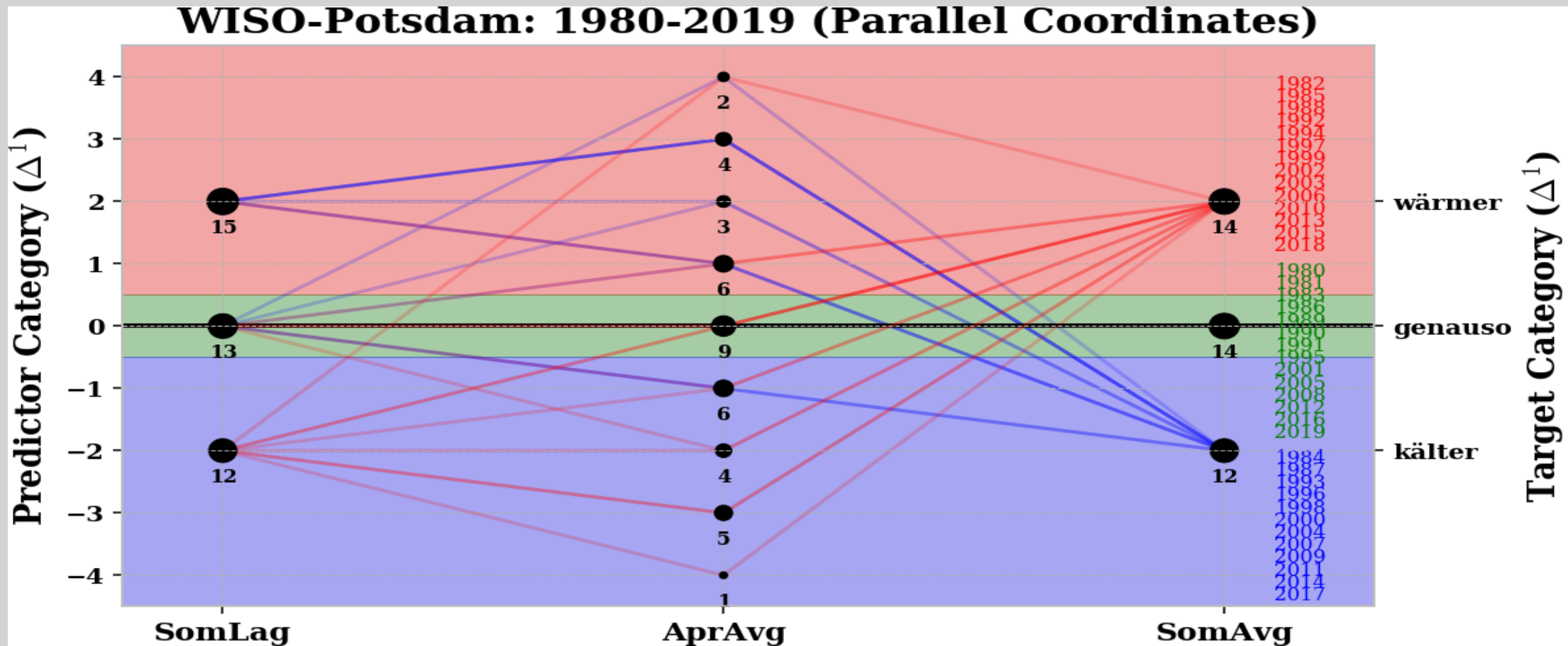
+1°C wärmerer Sommer bedeutet +7 Hitzetage und -50mm Regen (Bsp. Potsdam)

Rhythmen



Regeln

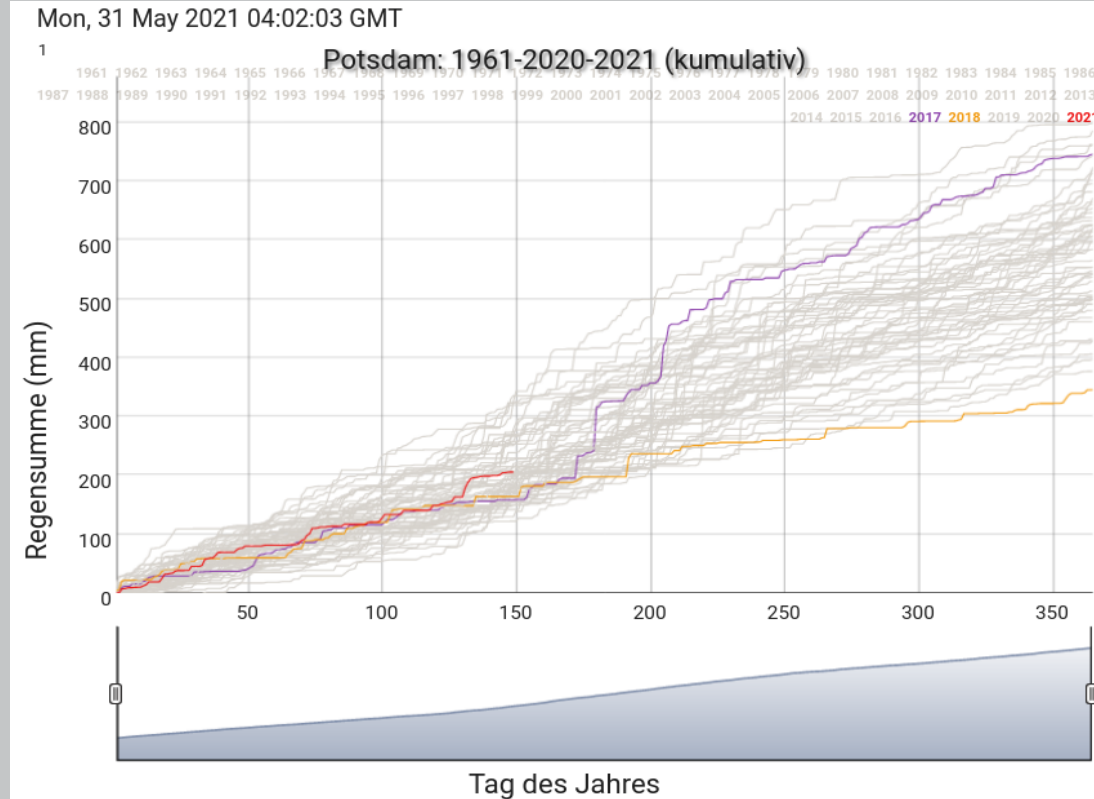
© Hoffmann (PIK)



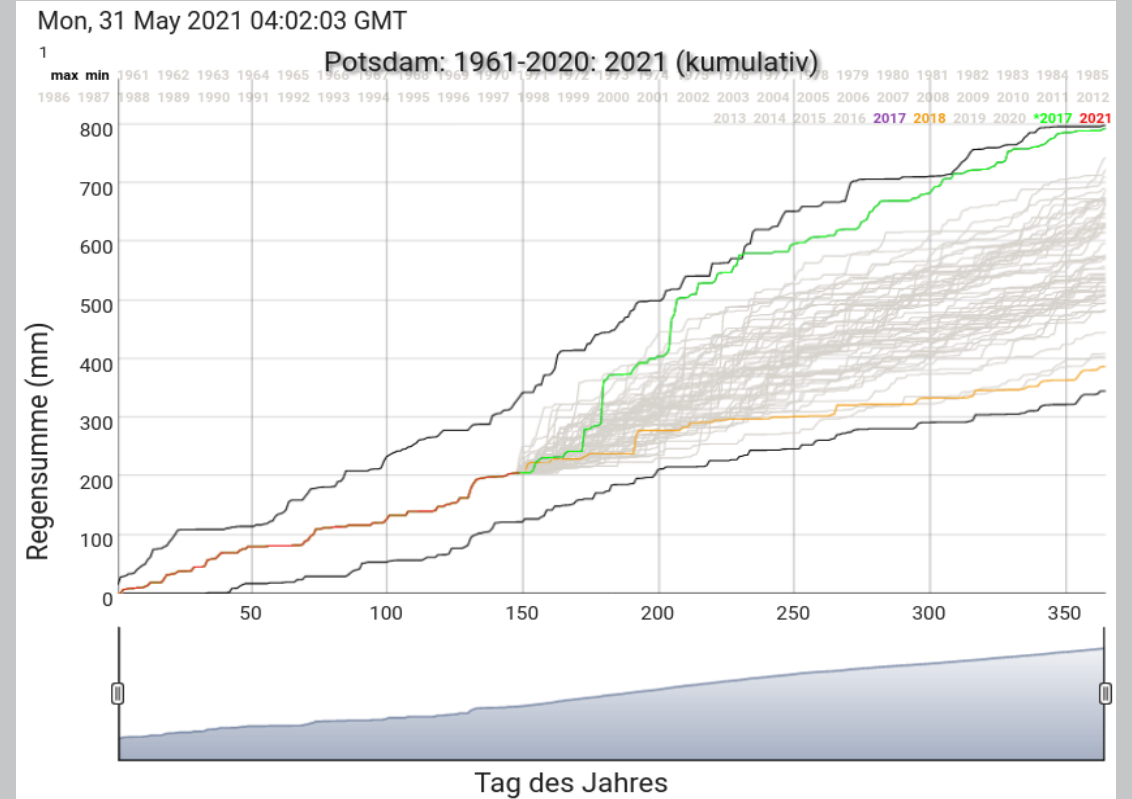
Regeln: kühler Sommer ~ kühler April ~ warmer Sommer (Ausnahme 2018)

Restjahresverläufe - Analogjahre

Regensumme



Restjahresregensumme



Was wäre wenn der weitere Witterungsverlauf den Jahren 2017 oder 2018 folgen würden? Und welches der Jahre hat bisher den ähnlichsten Verlauf?

Zusammenfassung:

- Hitzewellen und Dürren gehören zu den Klimaextremen und sind großskalige Phänomene.
- Es gibt verschiedene Definitionen für Trockenheit und Dürre.
- Durch klimatische Veränderungen steigen Risiken für Klimaextreme.
- Klimakennzahlen beschreiben meteorologischen Rahmenbedingungen.
- Faktoren für Hitze und Niederschlagsdefizit haben u.a. atmosphärische Ursachen.
- Es gibt Hinweise, dass Modelle diese Faktoren unterschätzen.
- Die Folgen sind Sektorübergreifend.
- Eine bessere Vorhersagbarkeit wird zunehmend wichtiger.

