



Photo: NASA

# **Klima und Wasserhaushalt**

**Johannes Sutmöller & Alexander Ney**

# Agenda

---

- Grundlagen des Klimawandels
- Klimaszenarien, von der globalen zur lokalen Skala
- Regionale Klimaszenarien für Deutschland (ReKliEs-De)
- Standortwasserbilanz, Grundlage für die Baumartenempfehlung
- Trockenjahre 2018 bis 2022, Auswirkung auf Wachstum und Vitalität
- erste Ergebnisse des Projektes Klimaextreme in Sachsen-Anhalt
- Fazit und Ausblick

# Klima in der Vergangenheit



**Historie**

**Zukunft**

Foto: Bernd Ahrends

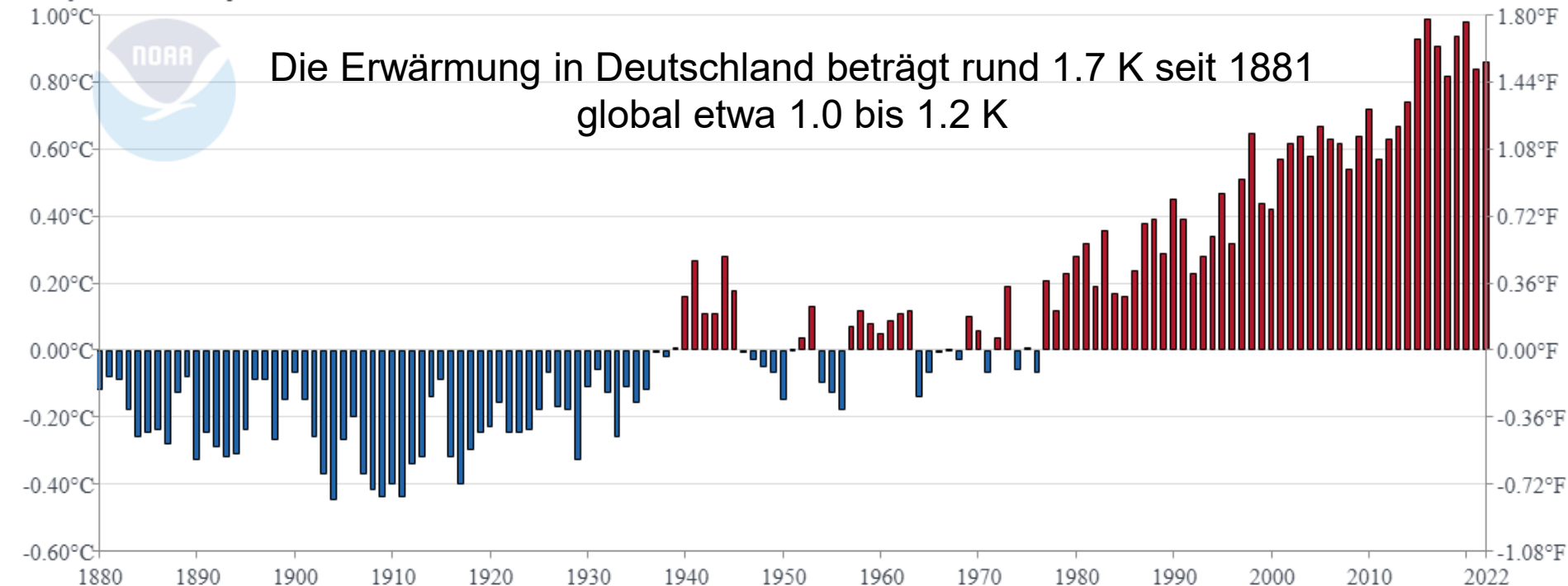


# Klima - Vergangenheit

Abweichung der global gemittelten Erdoberflächentemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts

## Global Land and Ocean

January-December Temperature Anomalies



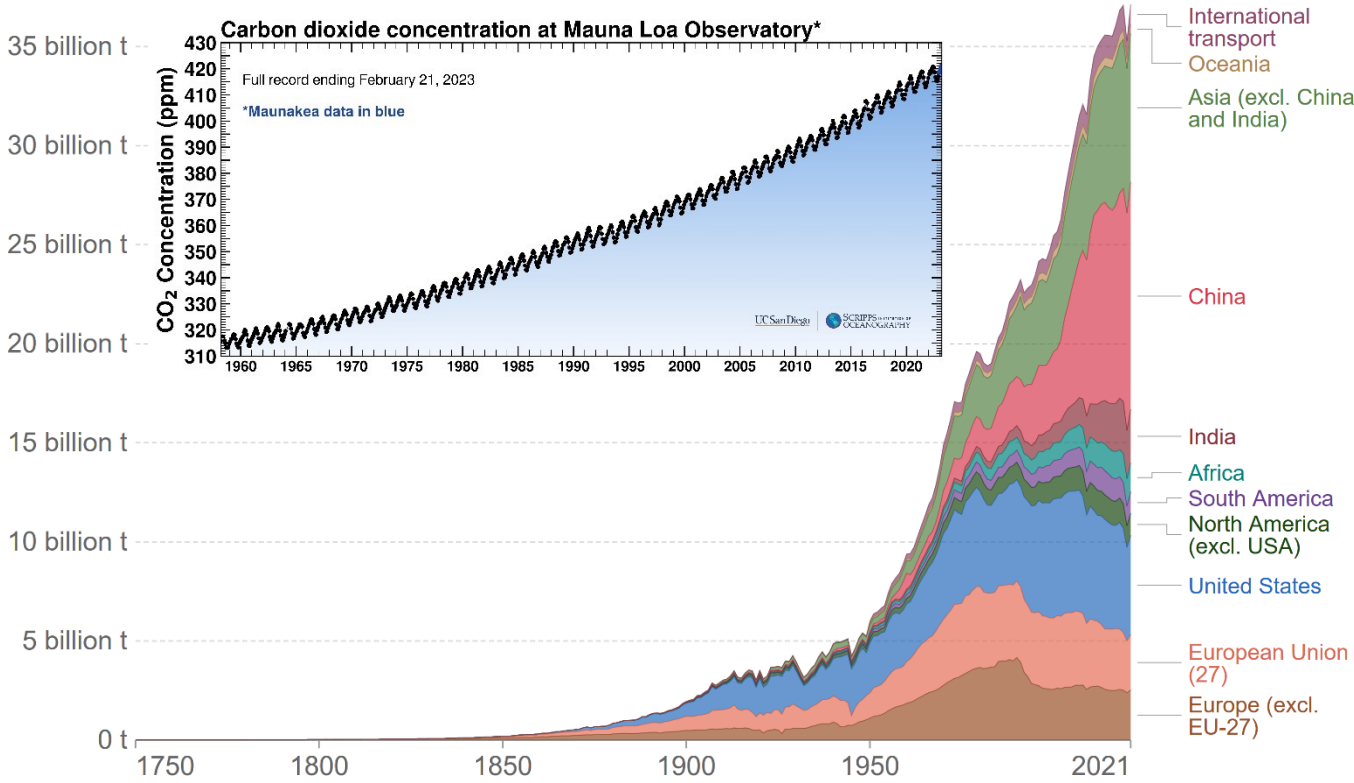
NOAA National Centers for Environmental information, Climate at a Glance: Global Time Series, published September 2022, retrieved on October 13, 2022 from <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>



# Emission - Vergangenheit

## Annual CO<sub>2</sub> emissions by world region

This measures fossil fuel and industry emissions<sup>1</sup>. Land use change is not included.



Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

**1. Fossil emissions:** Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO<sub>2</sub> includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

# Klima in der Zukunft



Historie

Zukunft

Foto: Bernd Ahrends

# (Emissions)-Klimaszenarien

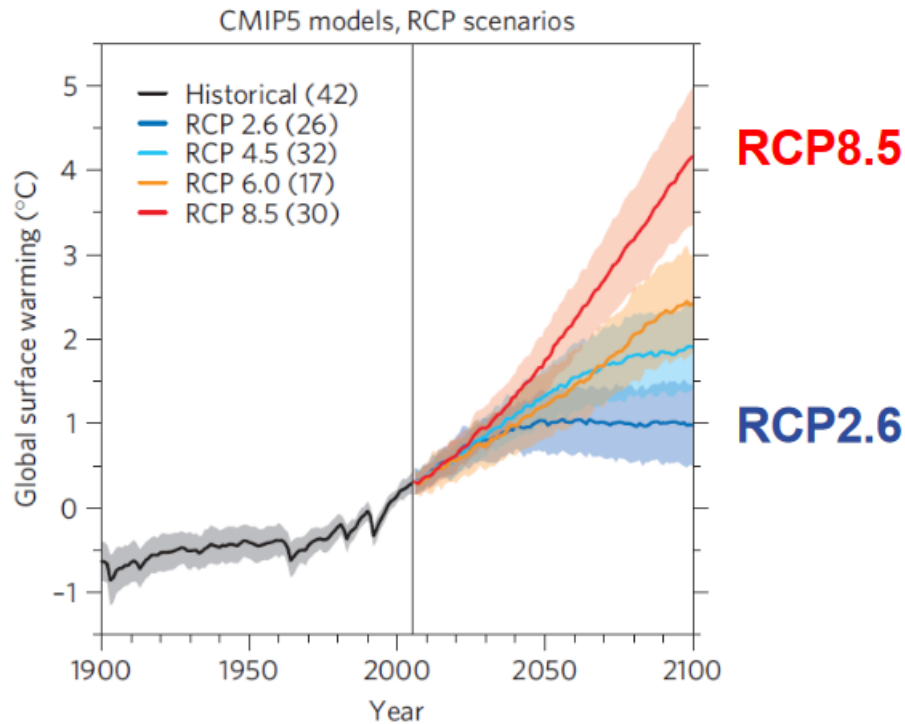


Abbildung aus Knutti and Sedlacek (2013): Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change (3)

## Herausforderungen

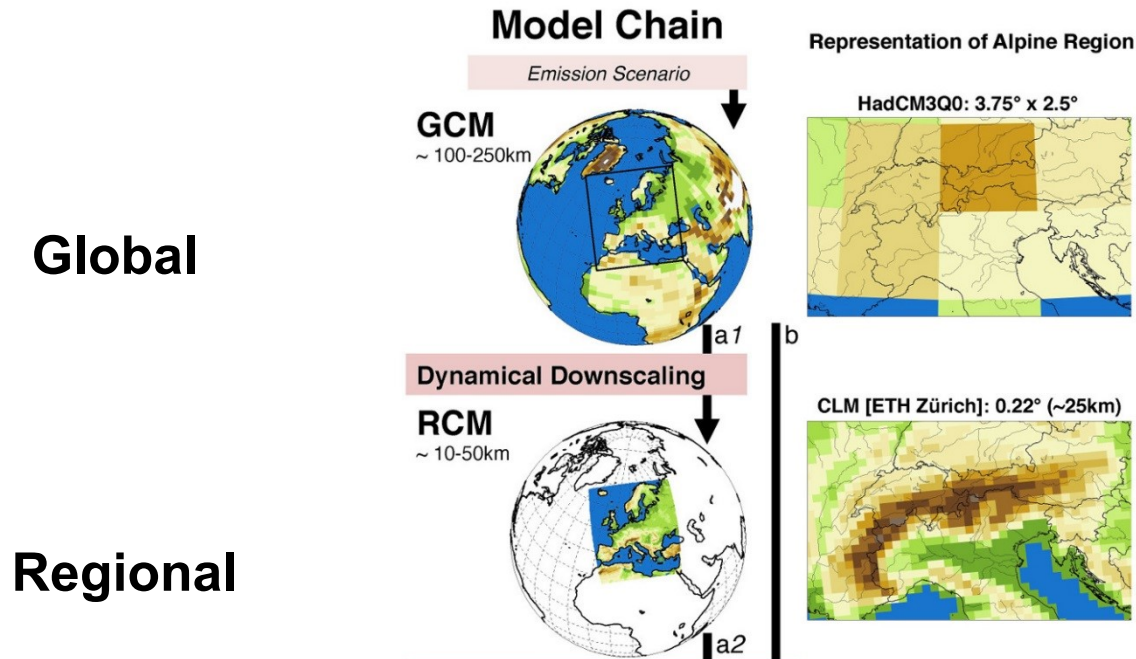
- Vielzahl globaler Modelle mit Emissions-Szenarien
- Mehrere Klimaszenarien
- Räumliche Auflösung (100 km Auflösung)



**Umsetzung in die Praxis?**

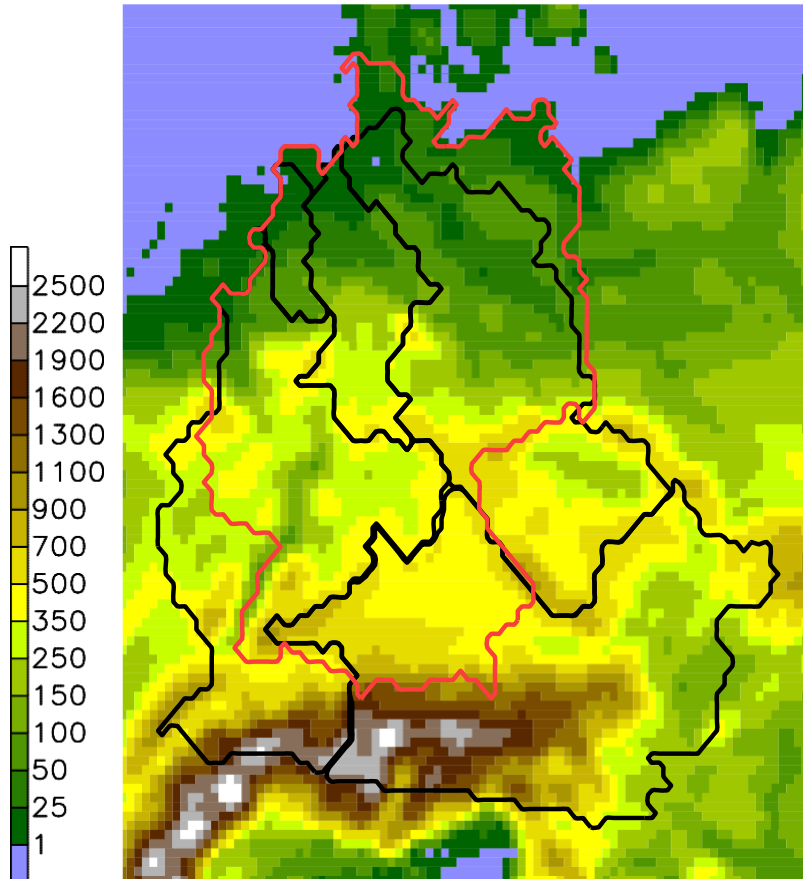


# Klimaszenarien – Global -> Regional



Schweizer Klimaszenarien CH2018 (2018)

Besonders hohe Auflösung: **12 km x 12 km**



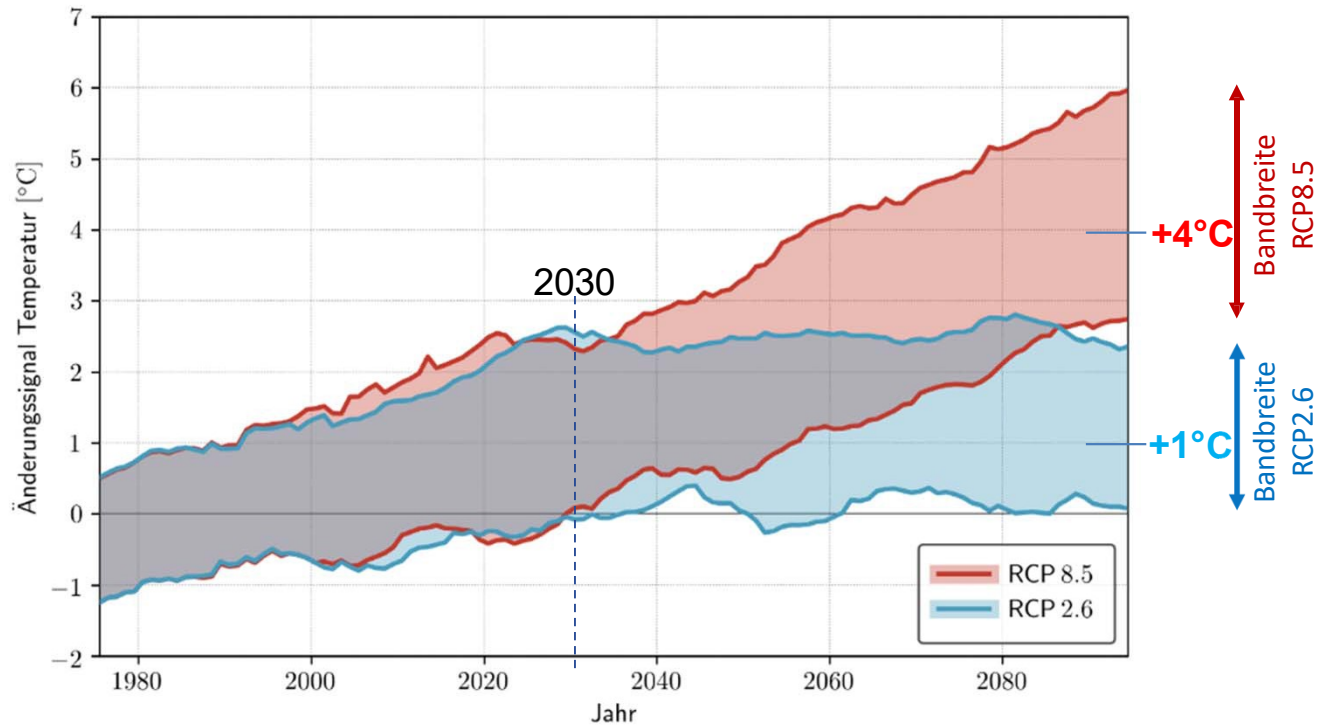
Für Deutschland und die  
Einzugsgebiete großer,  
nach Deutschland  
entwässernder Flüsse

*ReKliEs-De-Untersuchungsgebiet mit der Orographie in der  
Auflösung von 12 km: Deutschland (roter Umriss) und die  
Einzugsgebiete von Donau, Rhein, Elbe, Weser und Ems (schwarz).*

# Auswirkung auf den Temperaturanstieg

Veränderung der Jahresmitteltemperatur (Flächenmittel ReKlies-Gebiet) gegenüber dem Median des Referenzzeitraumes (1971-2000) für die Simulationsensemble des

- Weiter-wie-bisher Szenarios (RCP8.5)
- Klimaschutz Szenarios (RCP2.6)





# Auswirkung auf die Niederschlagsänderung

Niederschlagsänderung, (2071-2100) – (1971-2000), Gebietsmittel Deutschland

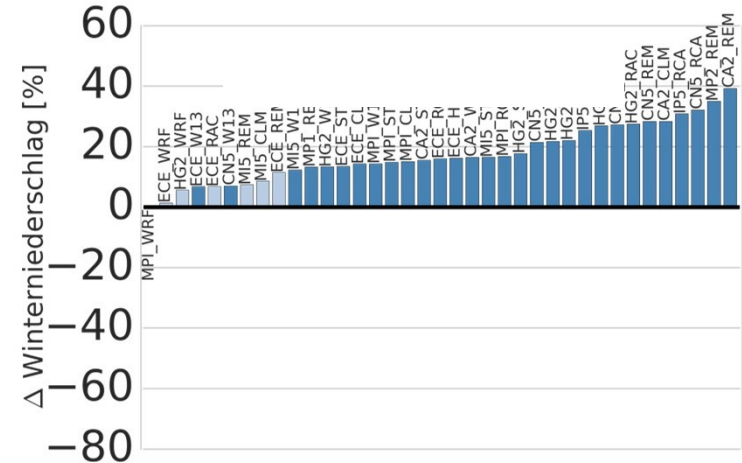
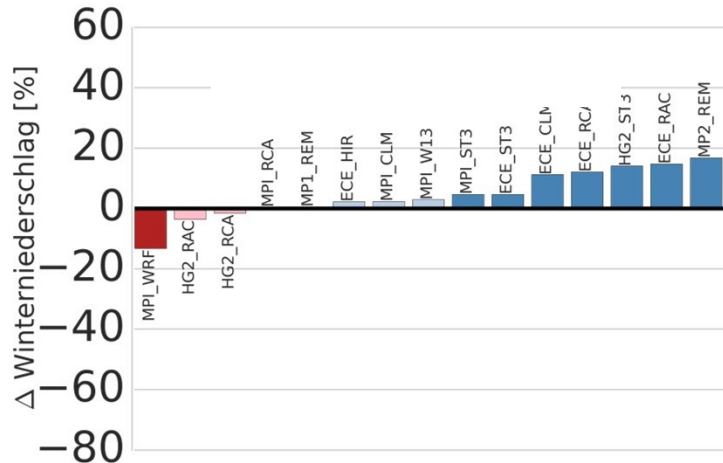
**RCP2.6**

rcp26, Deutschland

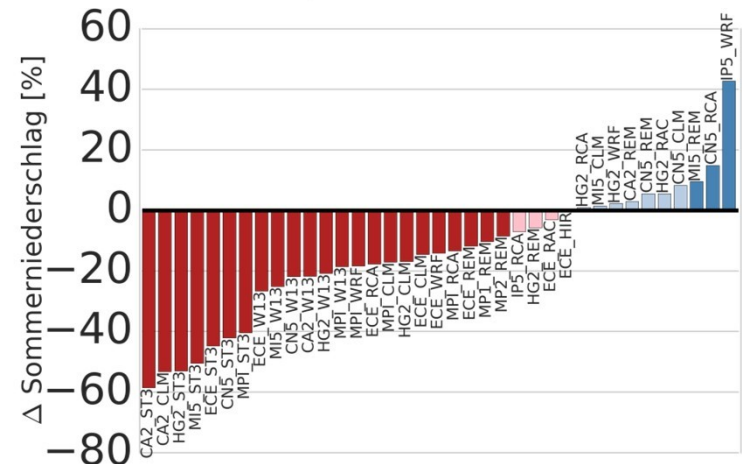
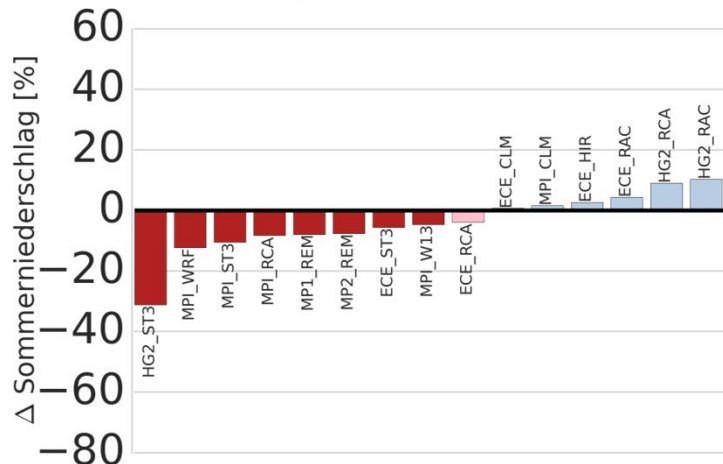
**RCP8.5**

rcp85, Deutschland

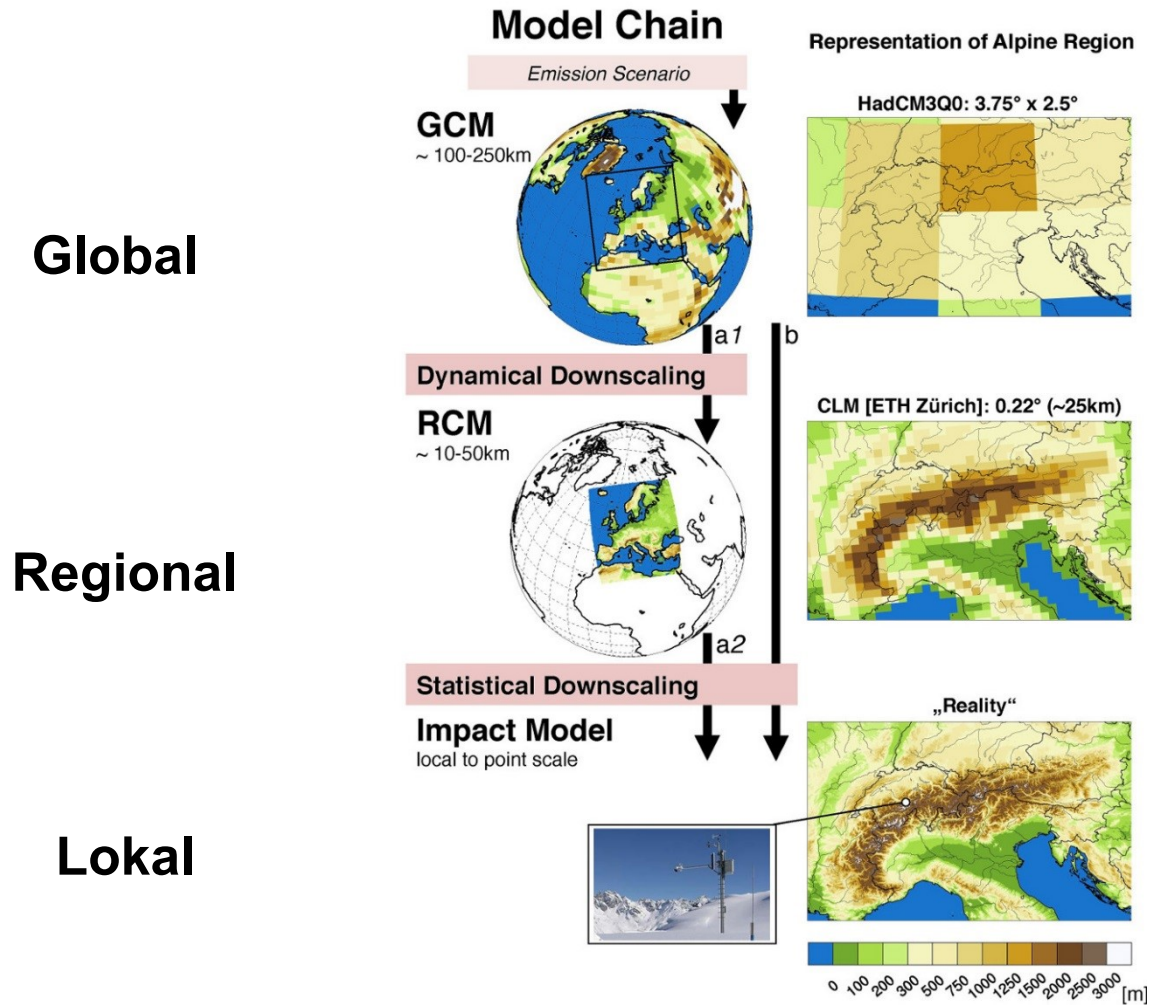
Winter (DJF)



Sommer (JJA)

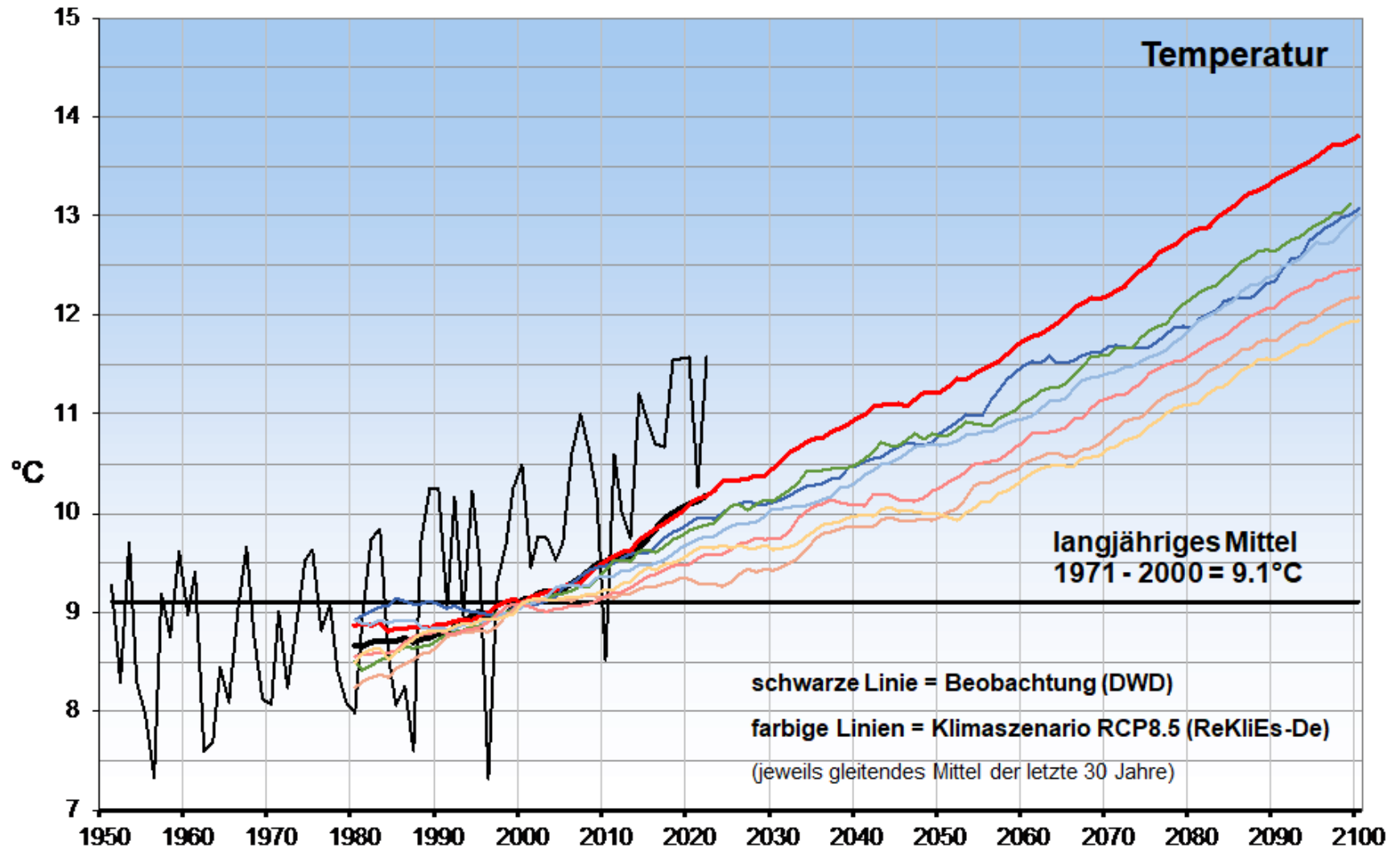


# Klimaszenarien – Global -> Regional -> Lokal



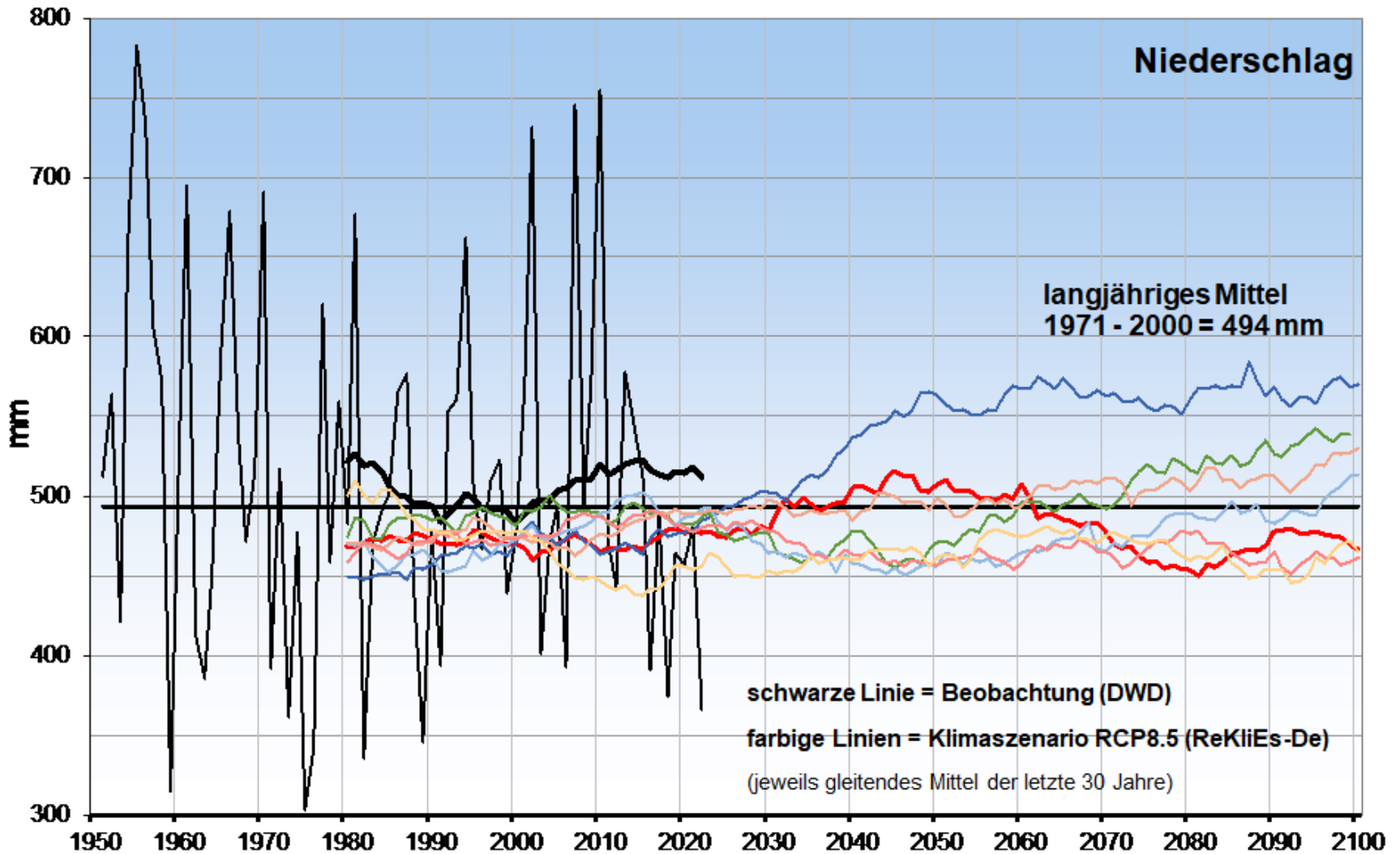
Schweizer Klimaszenarien CH2018 (2018)

# Klimaszenarien – Downscaling (Bsp. Magdeburg)





# Klimaszenarien – Downscaling (Bsp. Magdeburg)



## Wie wirkt sich der Klimawandel auf den Wasserhaushalt der Wälder aus?



Foto: NW-FVA

# Wasserhaushalt - Standortwasserbilanz

## Klimatische Wasserbilanz

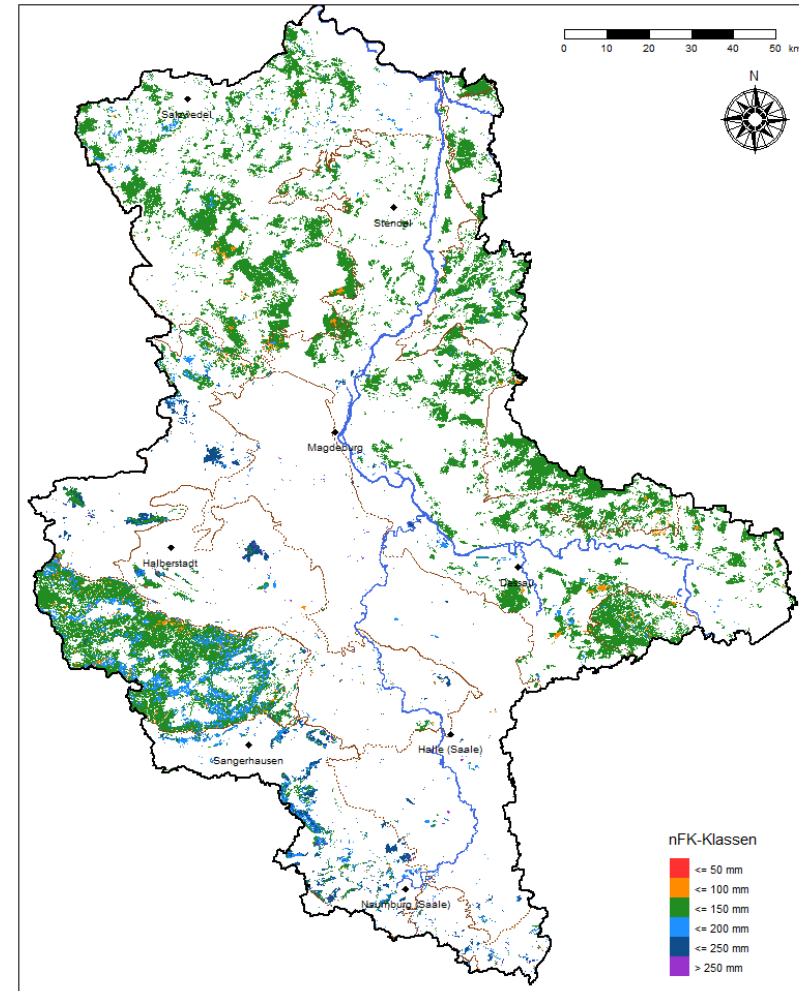
Summe aus Niederschlag und potenzieller  
Grasreferenzverdunstung (FAO-Norm)  
(hier: für die forstliche Vegetationsperiode berechnet)

## Nutzbare Feldkapazität (nFK)

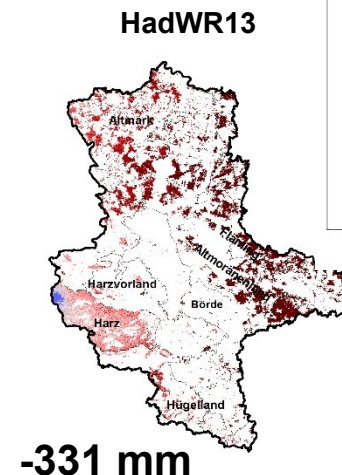
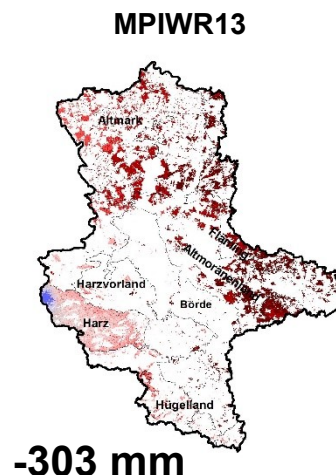
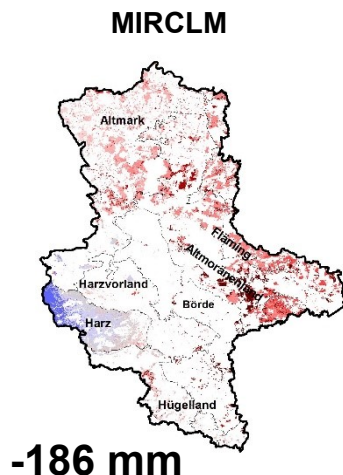
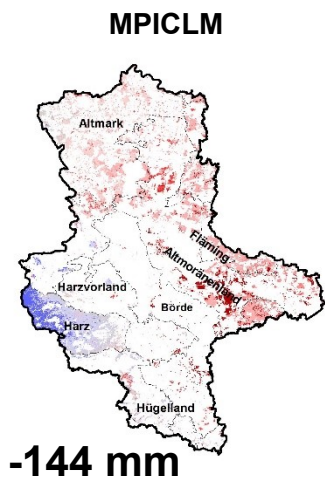
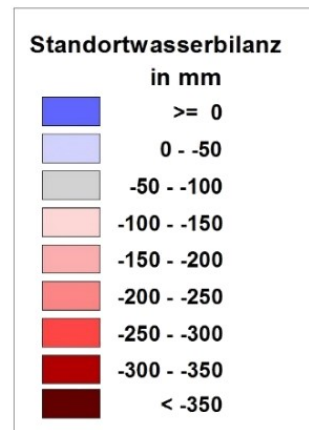
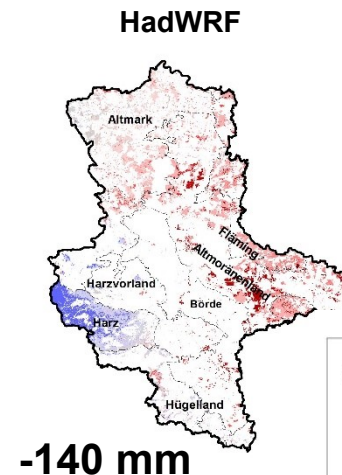
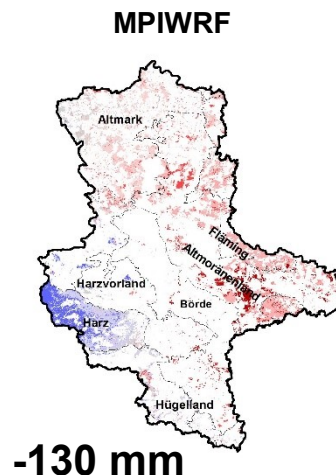
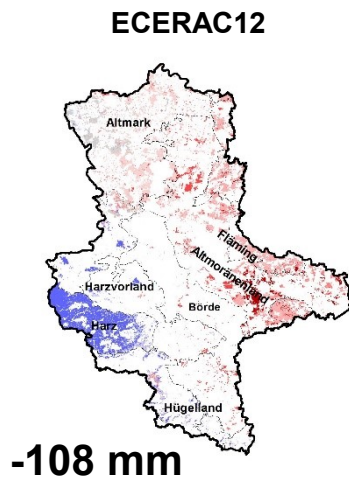
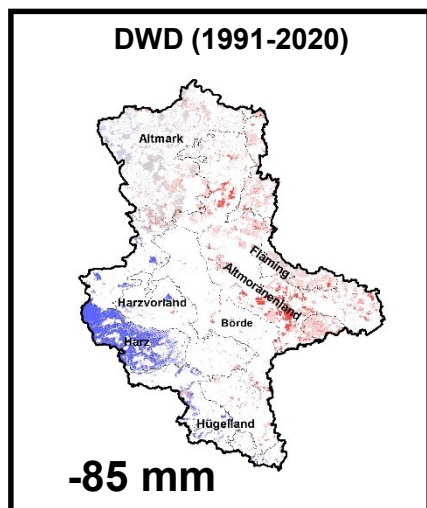
Wassergehalt zwischen pF-Werten 1,8 und 4,2  
(Feldkapazität und permanenter Welkepunkt);  
Bodenkarten, forstliche Standortskartierung

## Standortwasserbilanz

Summe aus pflanzenverfügbarem Bodenwasser (nFK)  
und Klimatischer Wasserbilanz  
(hier: in der forstlichen Vegetationsperiode)



# Standortwasserbilanz (mm) in der VegPer. in Sachsen-Anhalt (2071 – 2100)



Datengrundlage: DWD Beobachtungen; Klimaszenario RCP8.5

# Risikoklassifizierung im Anhalt an die Standortwasserbilanz

Trockenstressrisiko	Fichte	Buche	Eiche/ Douglasie	Kiefer
gering	> 0 mm	> -50 mm	> -150 mm	> -200 mm
mittel	0 bis -80 mm	-50 bis -100 mm	-150 bis -350 mm	-200 bis -450 mm
hoch	< -80 mm	< -100 mm	< -350 mm	< -450 mm

- Roterle  
- Moorbirke

- Weißtanne  
- Japanlärche  
- Bergulme  
- Schwarznuss

- Roteiche  
- Ahornarten  
- Esche  
- Hainbuche  
- Linde  
- Europ. Lärche  
- Küstentanne

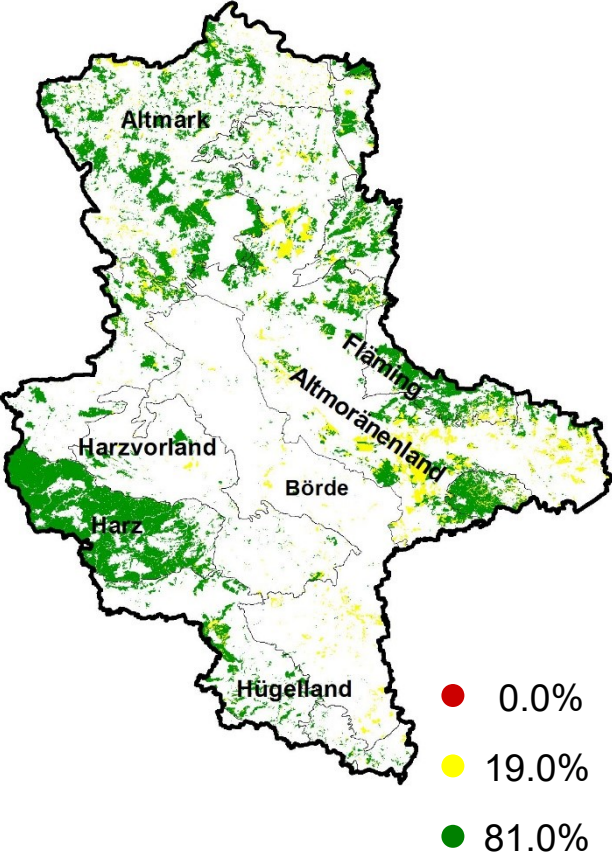
- Sandbirke  
- Schwarzkiefer

Böckmann et al. 2019, Klimaangepasste Baumartenwahl,  
Aus dem Walde 61

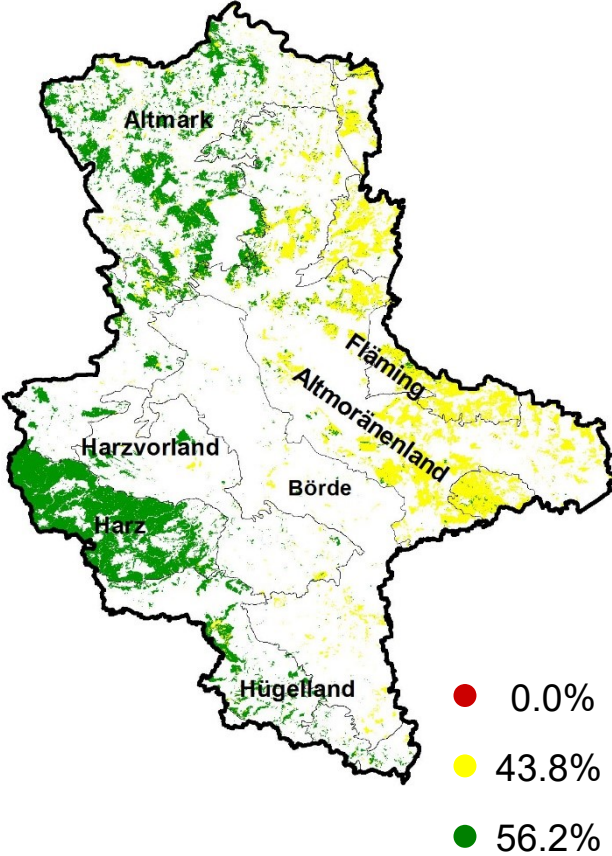


# Risikoabschätzung Eiche/Douglasie

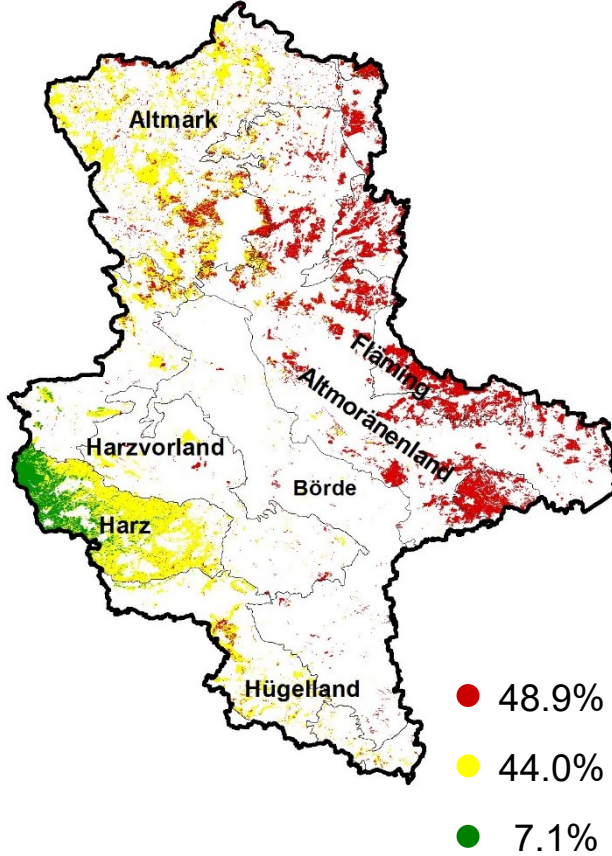
DWD (1991-2020)



ECEARTH\_RACMO (2071-2100)



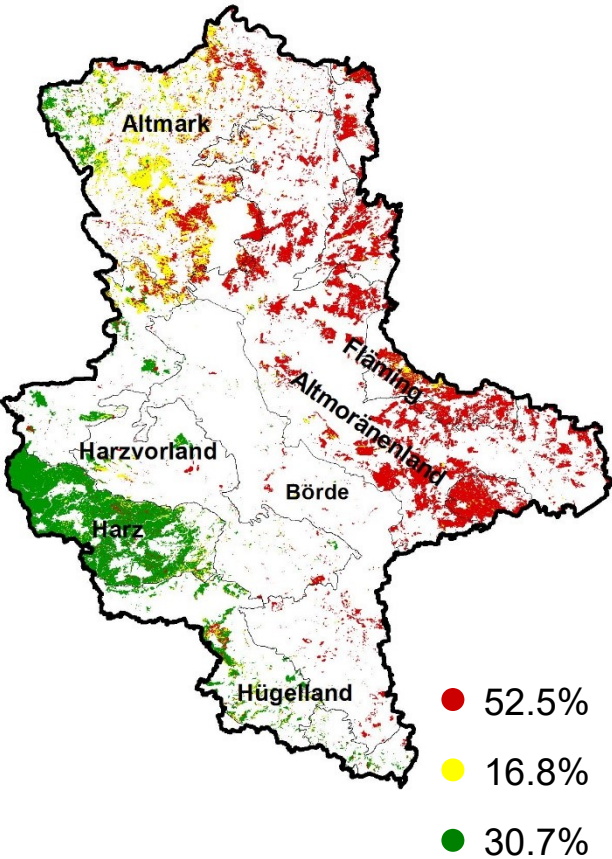
HadGEM2\_WETTREG2013 (2071-2100)



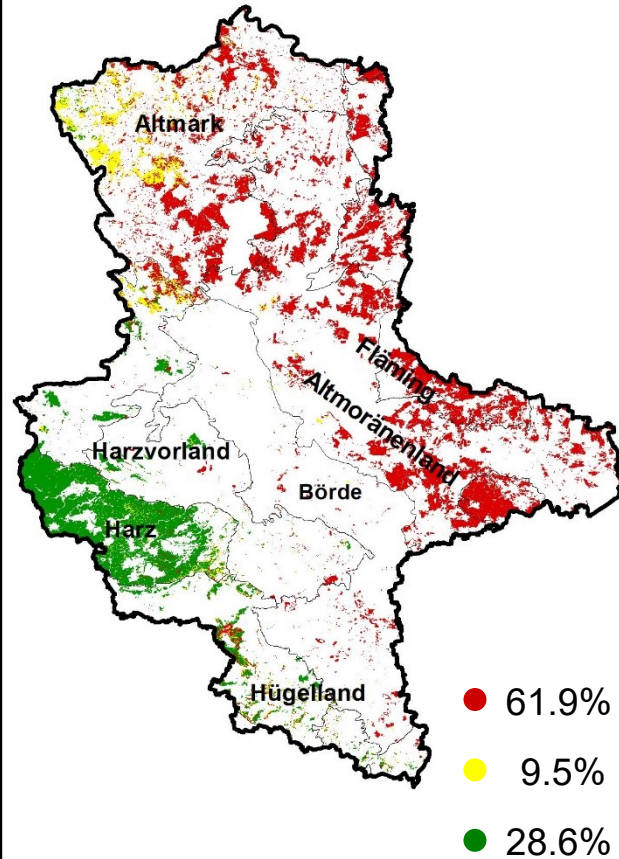
Datengrundlage: DWD-Messdaten; Klimaszenario RCP8.5

# Risikoabschätzung Buche

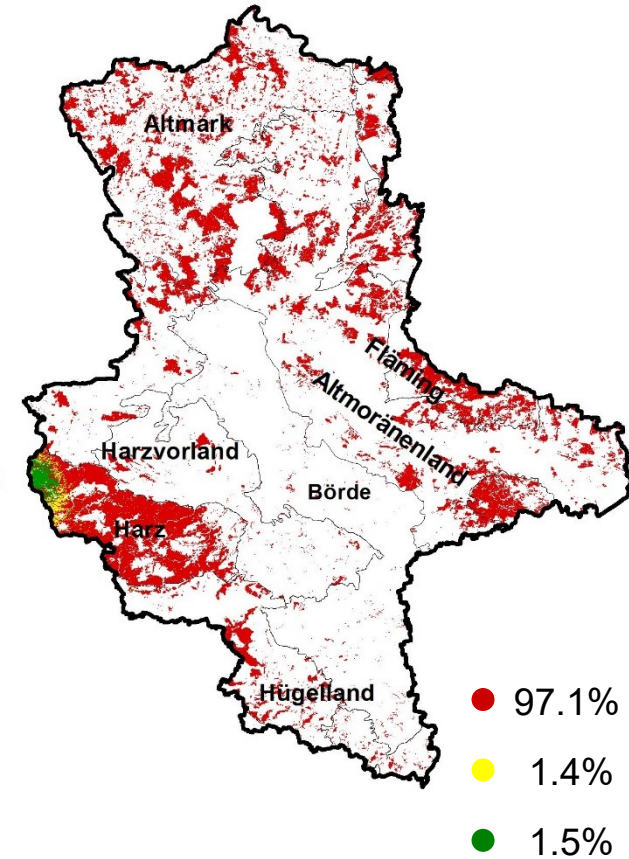
DWD (1991-2020)



ECEARTH\_RACMO  
(2071-2100)



HadGEM2\_WETTREG2013  
(2071-2100)



Datengrundlage: DWD-Messdaten; Klimaszenario RCP8.5

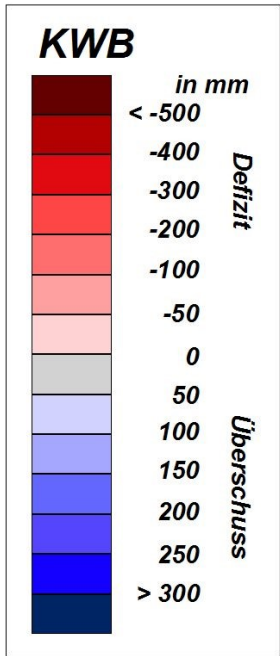
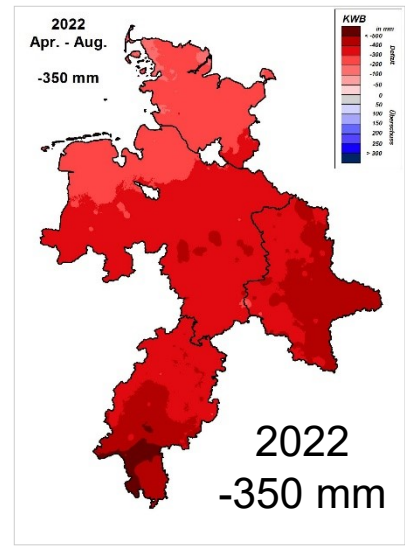
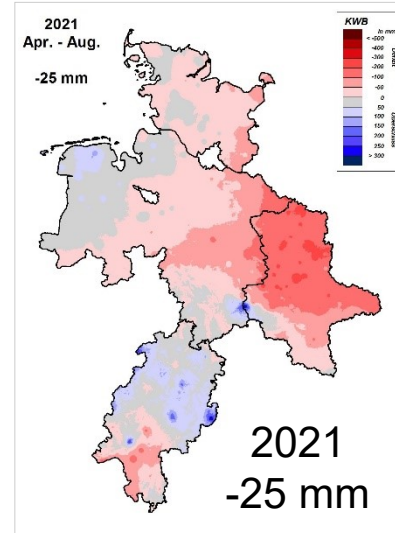
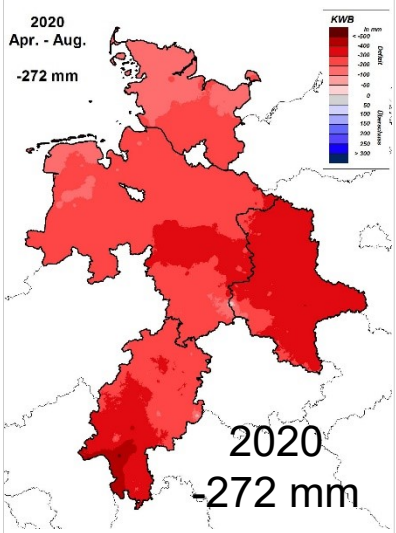
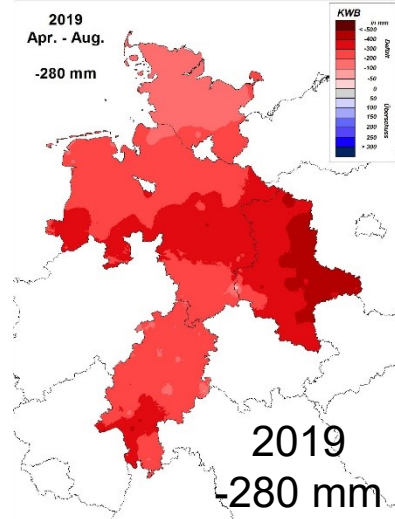
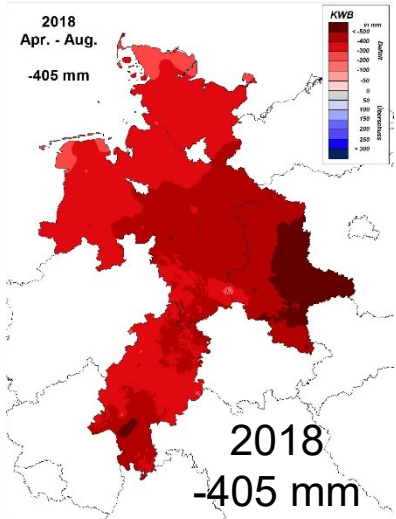


**Wie sind die letzten Trockenjahre im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten und vergangenen Trockenperioden einzuordnen?**



Foto: NW-FVA

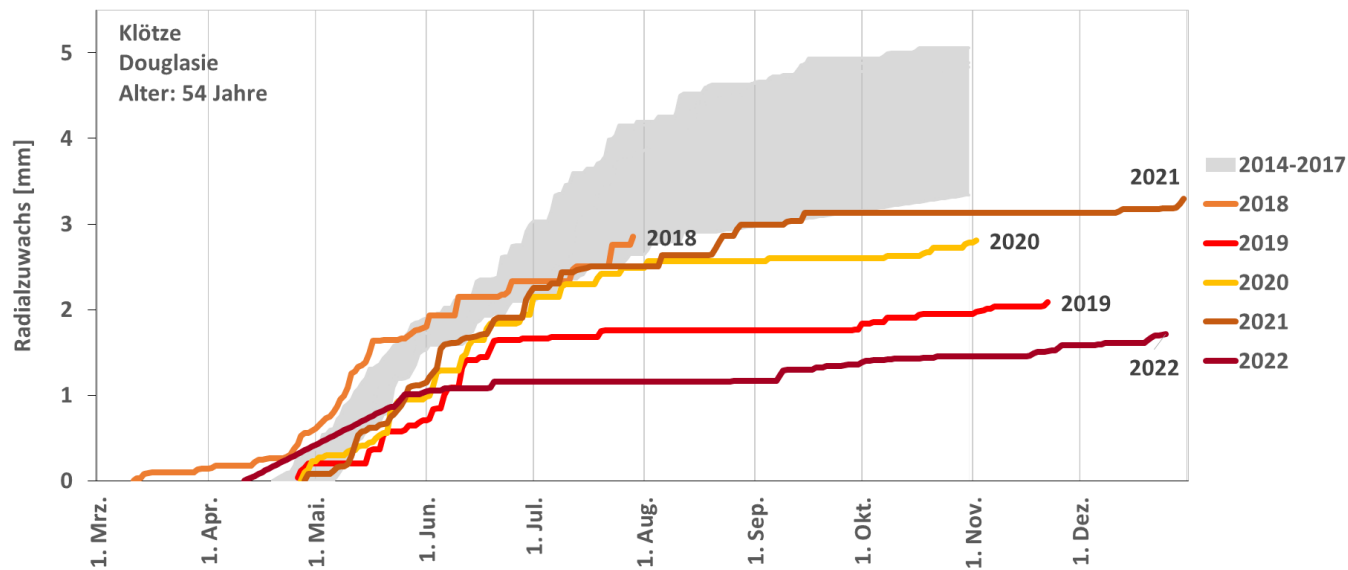
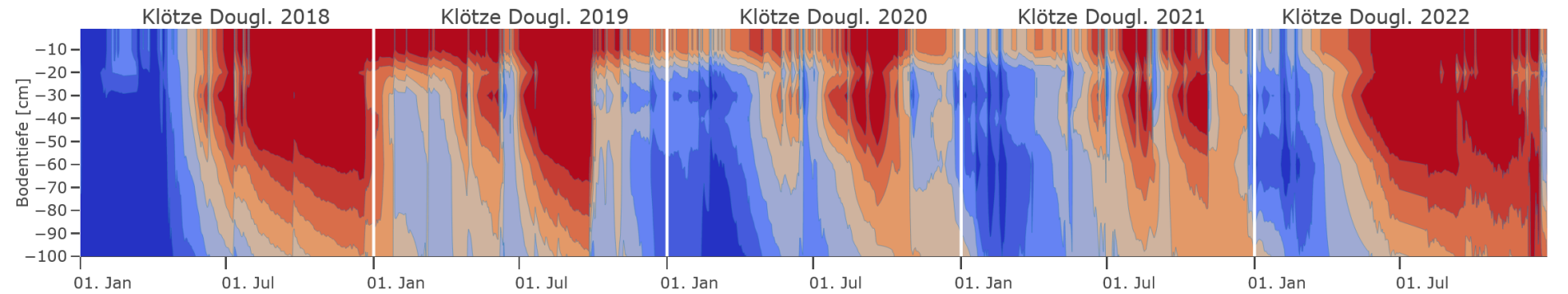
# Trockenjahre 2018 - 2022, Klimatische Wasserbilanz in der Veg.-Periode



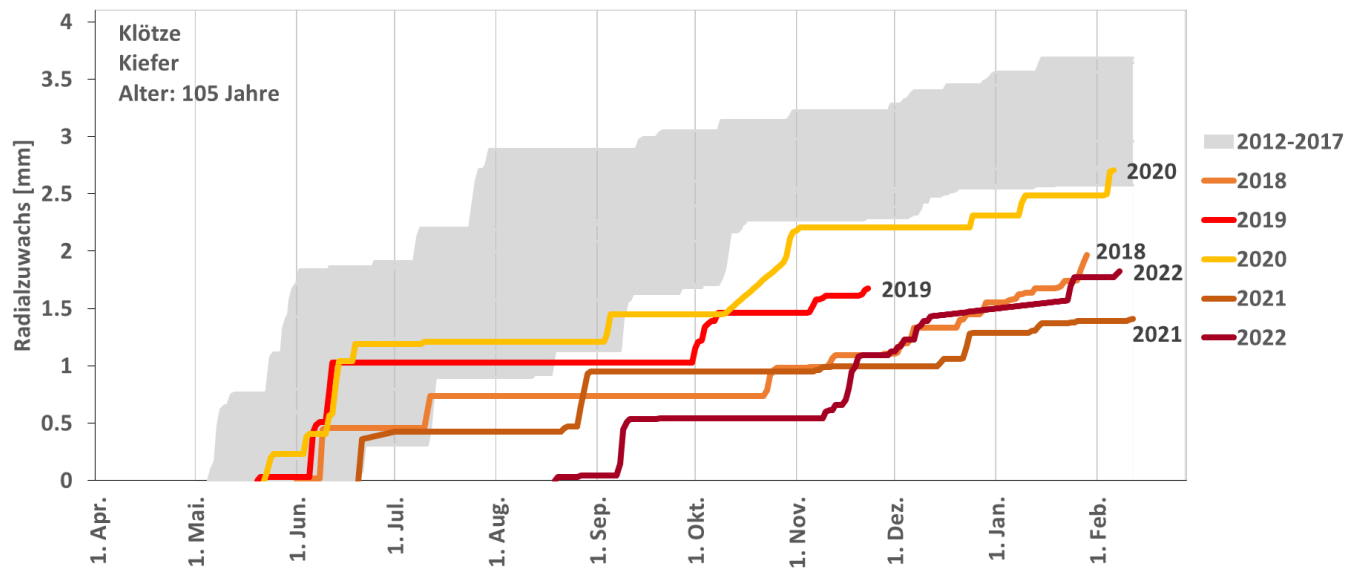
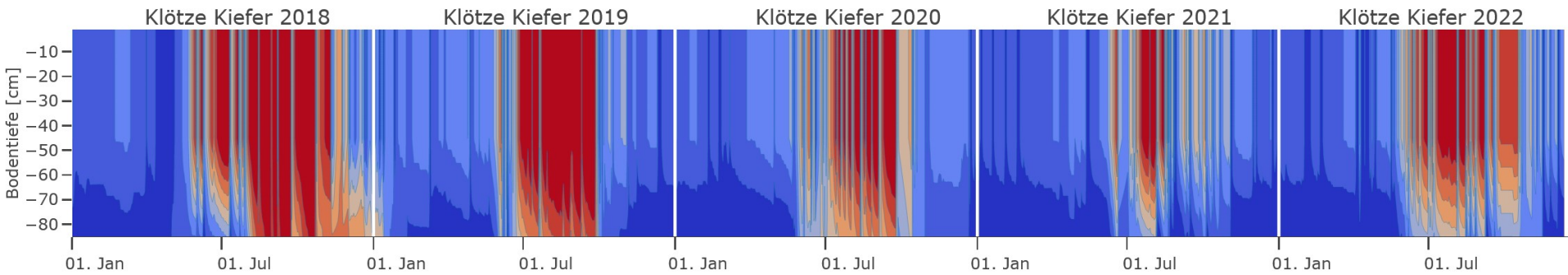
KWB-Mittel 1981 – 2010:  
-100 mm



# Bodenwassergehalte und Zuwachs 2018 bis 2022 – Klötze (Dgl)



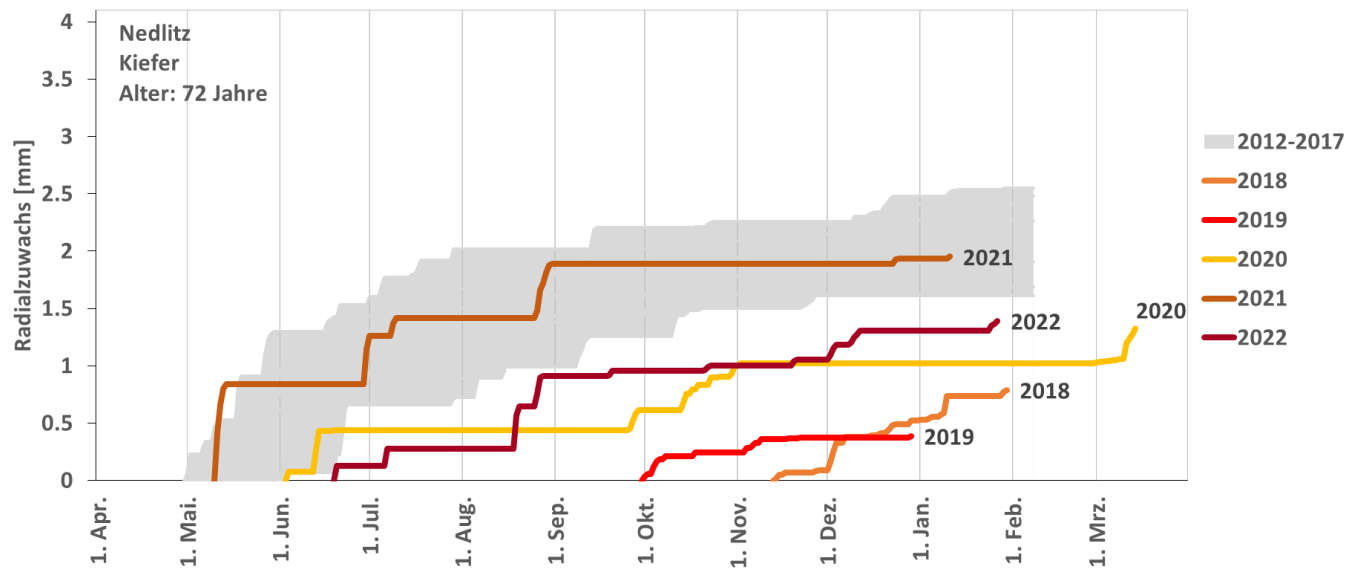
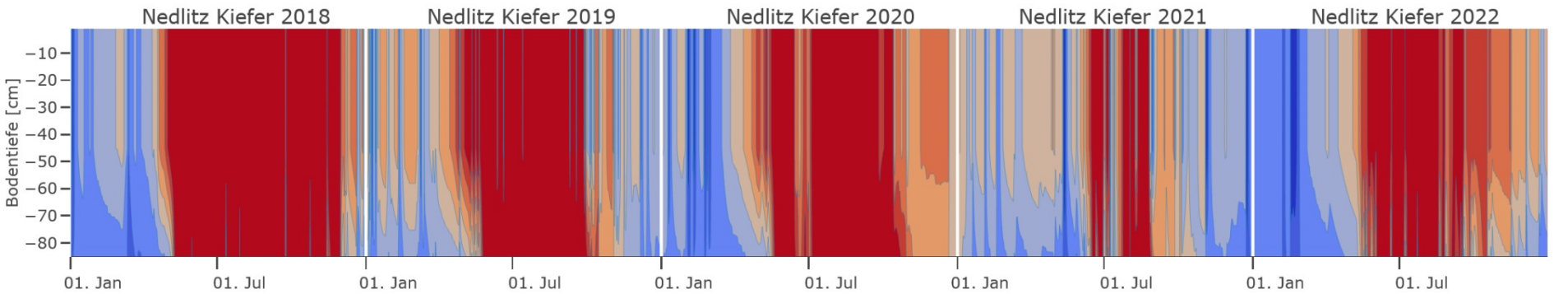
# Bodenwassergehalte und Zuwachs 2018 bis 2022 – Klötze (Ki)



pflanzenverfügbares Bodwasser [% nFK]

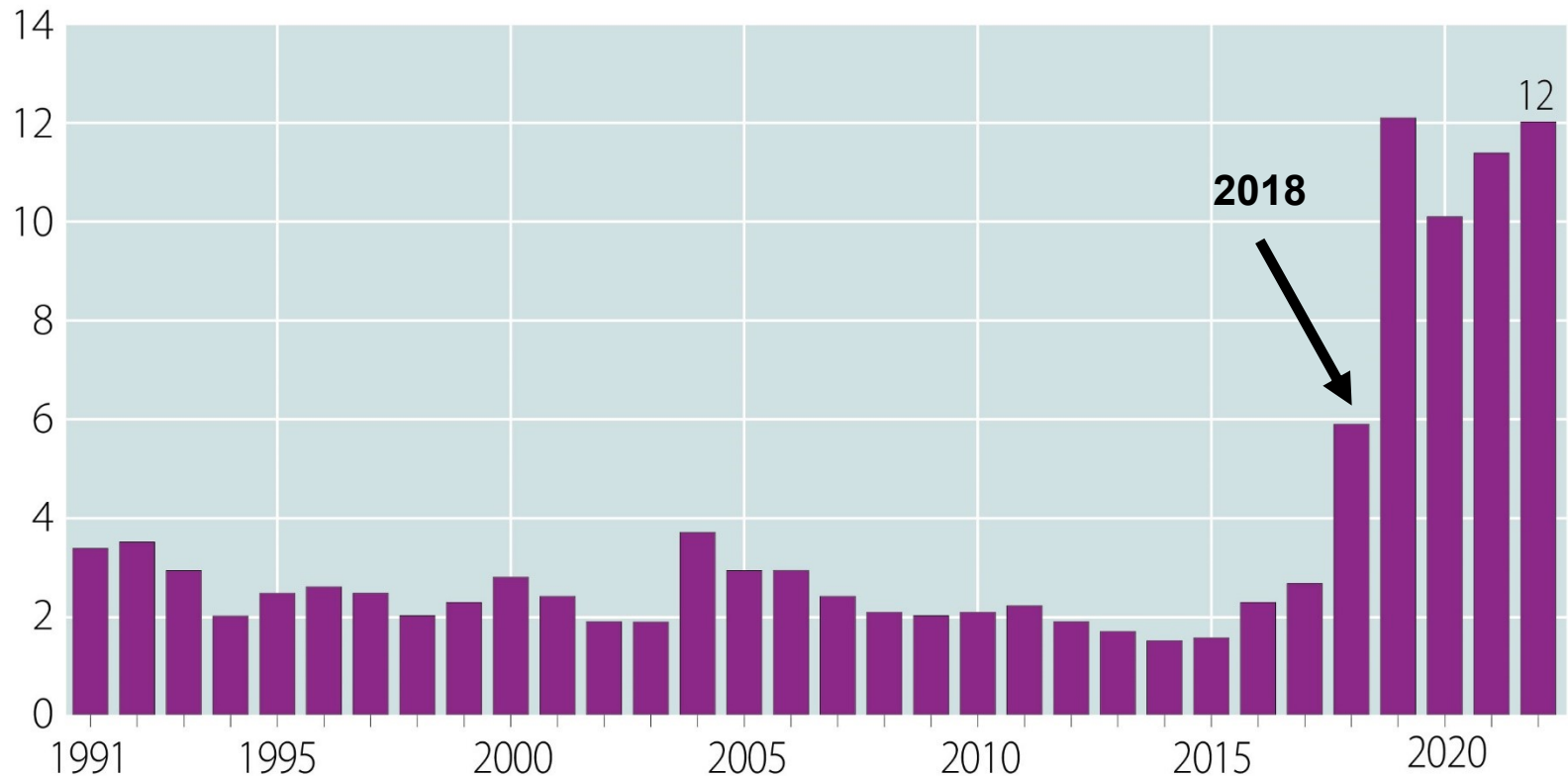
- 100
- 80
- 60
- 40
- 20

# Bodenwassergehalte und Zuwachs 2018 bis 2022 – Nedlitz (Ki)



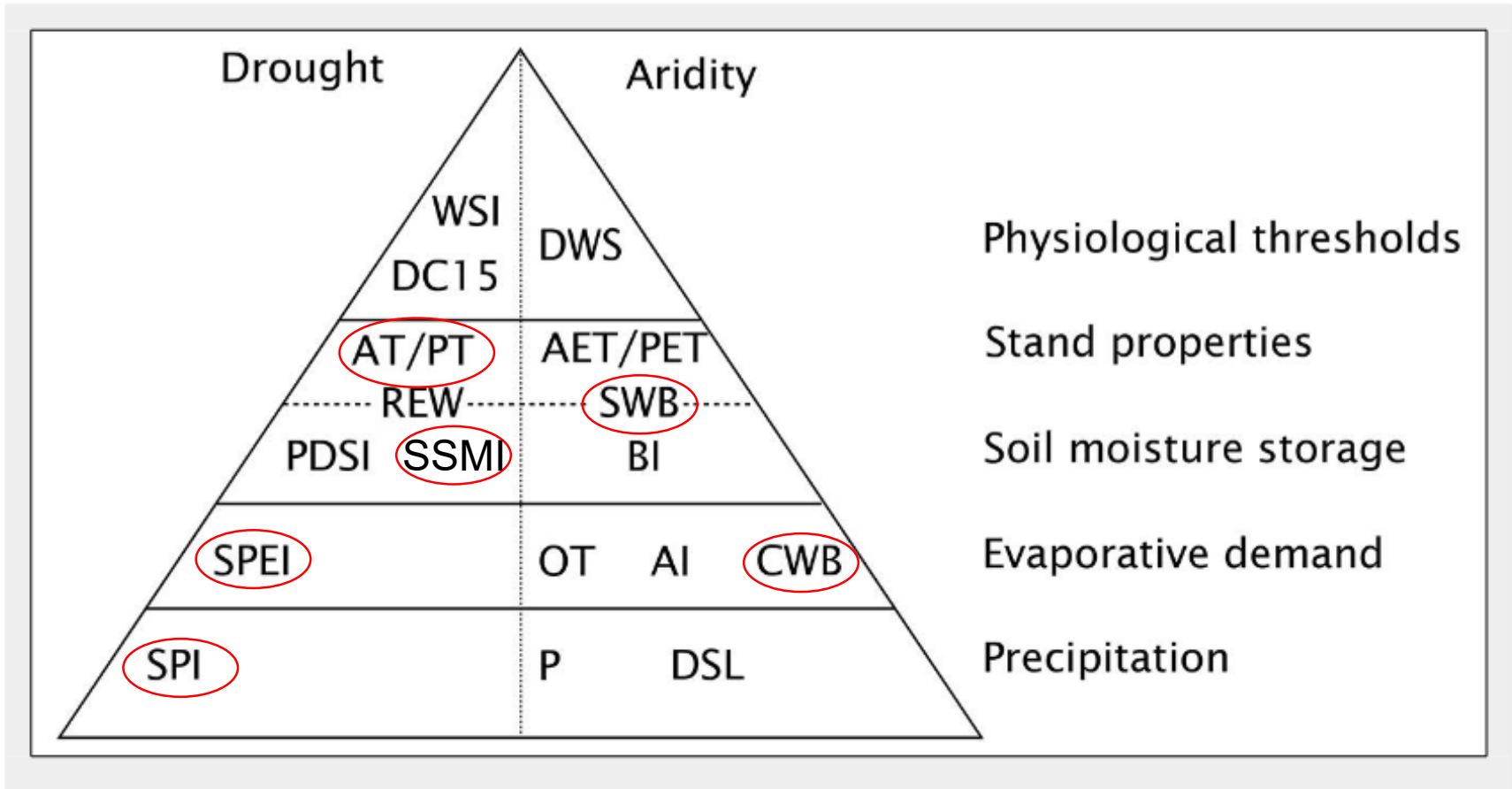
# Waldzustand in Sachsen-Anhalt

Anteil starker Schäden (inkl. abgestorbener Bäume),  
alle Baumarten, alle Alter in %





# Indikatoren zur Trockenstresserkennung



Speich et al. (2021)

# Projekt Klimaplastischer Bundeswald

---

## Ziele

### a) **Witterungsanalyse**

- Identifizierung von extremen Witterungsperioden in der Vergangenheit anhand von unterschiedlichen hydrometeorologischen Indikatoren

### b) **Analyse der Ergebnisse von Klimamodellen**

- Vergleich der Indikatoren mit Klimäläufen des Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) bis 2100
- Auswertung der Klimaprojektionen für das „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario (RCP 8.5)

### c) **Vergleich mit Reaktionsmustern der Hauptbaumarten**

- Wirkungsanalyse auf die Vitalität und Mortalität der Hauptbaumarten

# Trockenheit und Dürre

- **Trockenheit**
  - Abwesenheit von Feuchtigkeit
- **Dürre**
  - konzeptionelle Definition
    - z. B. Dürre ist eine lange Trockenperiode
  - operationelle Definition
    - hilft dabei Beginn, Ende und Schweregrad einer Dürre zu bestimmen
    - in der Regel durch Vergleich der aktuellen Situation mit dem historischen Durchschnitt (mind. 30-jährigen Betrachtungszeitraum)
    - Je nach Andauer der Dürre wird diese entsprechend ihren Auswirkungen Bezeichnung als

Klassifizierung	Beschreibung	Dauer
Meteorologische Dürre	Rein meteorologischer Wassermangel	1-2 Monate trockener als üblich
Landwirtschaftliche Dürre	Fordert Ernteverlust ein	2-4 Monate trockener als üblich
Hydrologische Dürre	Beeinträchtigung des Grundwassers und von Pegeln	4-12 Monate trockener als üblich
Sozio-ökonomische Dürre	Wassermangel mit wirtschaftlichen Folgen	≥ 12 Monate trockener als üblich

nach DWD

**Zusammenfassung: Dürre zieht den Vergleich zum Normalzustand und wird dabei durch drei Aspekte definiert**

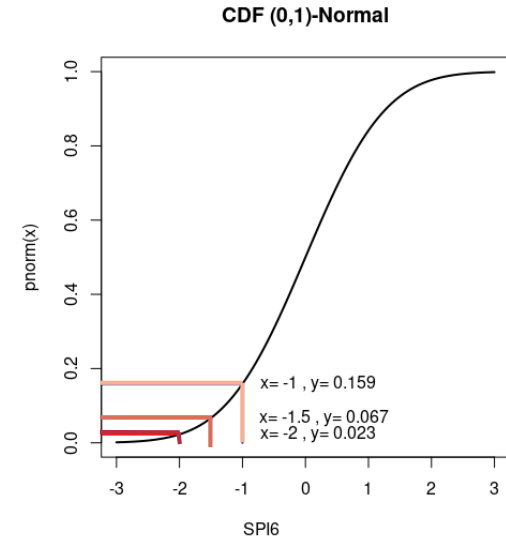
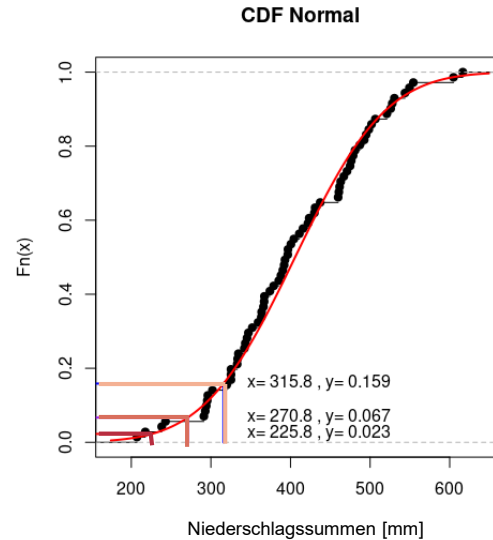
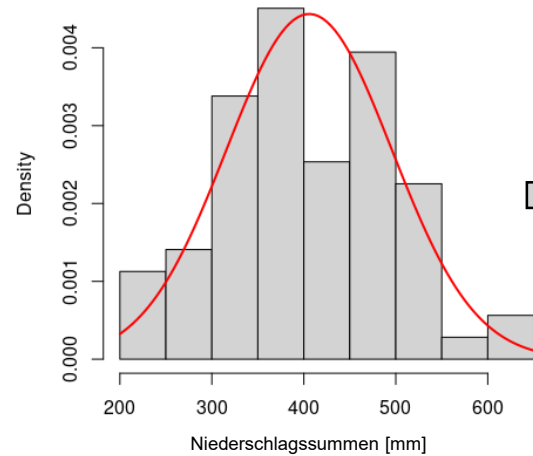
- 1. Wasserhaushaltsdefizit**
- 2. Anomalie**
- 3. Dauer**

**Wie detektiert und bewertet man Dürre?**



# Berechnung von Dürreindizes

Vegetationszeit Mai bis Oktober (1950-2020)



Bsp.: Standardisierter Niederschlag Index (SPI6) für Oktober

1. Akkumulation aller Niederschlagssummen für Monate Mai bis Oktober für alle Jahre im Betrachtungszeitraum
2. Bestimmung der besten Verteilungsfunktion
3. Diese Verteilungsfunktion wird in standardisierte Normalverteilung mit Mittelwert Null und Varianz Eins transformiert, was den Wert des SPI ergibt

# Berechnung von Dürreindizes

Klassifizierung	Wertebereich	Wahrscheinlichkeiten in %
Extrem zu feucht	> 2	2,3
Deutlich zu feucht	1.5 bis 2	4,4
Mäßig zu feucht	1 bis 1.5	9,2
Normalbereich	0 bis 1	34,1
Normalbereich	-1 bis 0	34,1
Mäßige Dürre	-1.5 bis -1	9,2
Schwere Dürre	-2 bis -1.5	4,4
Extreme Dürre	< -2	2,3

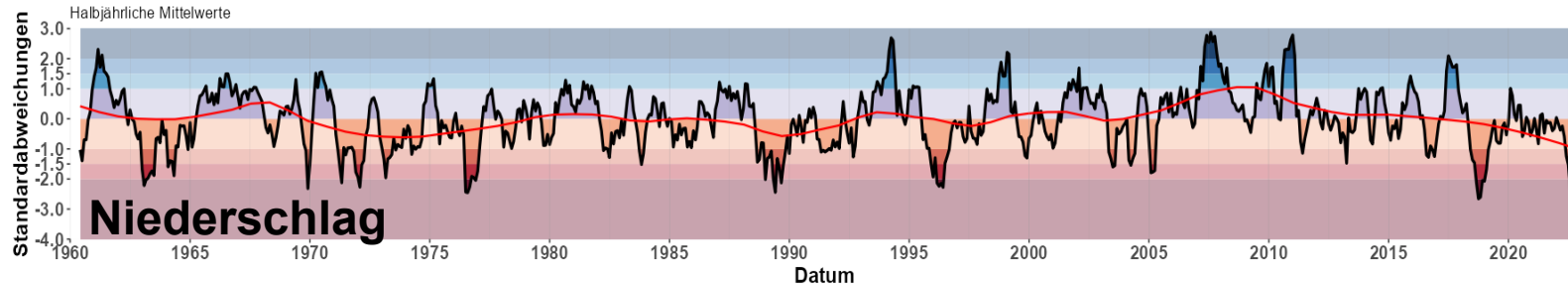
Index	Input
<b>SPI</b> Standardized Precipitation Index -4 bis 4	<b>Niederschlag</b>
<b>SPEI</b> Standardized Precipitation Evapotranspiration Index -4 bis 4	<b>Klimatische Wasserbilanz</b> (= Niederschlag - Verdunstung)
<b>SSMI</b> Standardized Soil Moisture Index -4 bis 4	<b>Bodenfeuchtemodellierungen</b> für durchwurzelten Bodenraum (2 m)
<b>Transpirationsverhältnis</b> 0 bis 1	$\frac{\text{Aktuelle Transpiration}}{\text{Potentielle Transpiration}}$ (Modellierungen)

nach DWD

# Rückblick auf die Feuchtigkeitsverhältnisse am Standort Klötze Kiefer

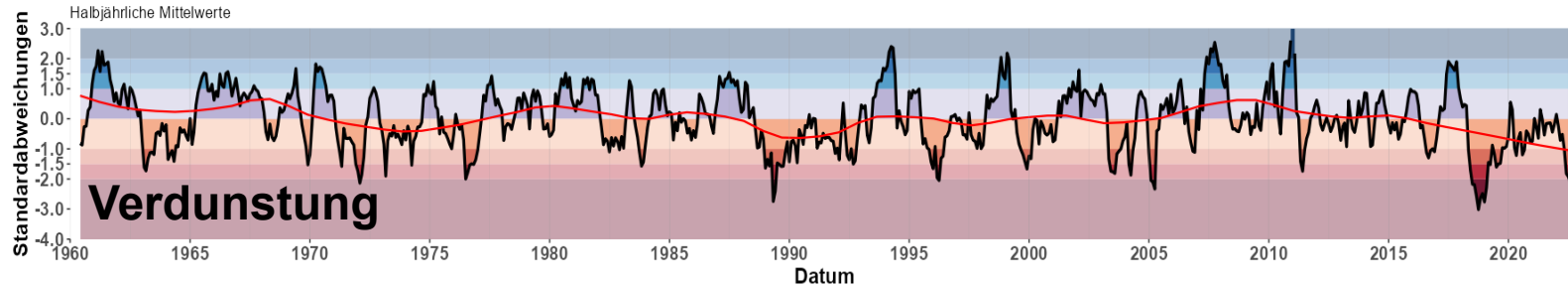
Standardisierter Niederschlag Index (SPI6) am Standort Kloetze Kiefer (1960-2022)

Halbjährliche Mittelwerte



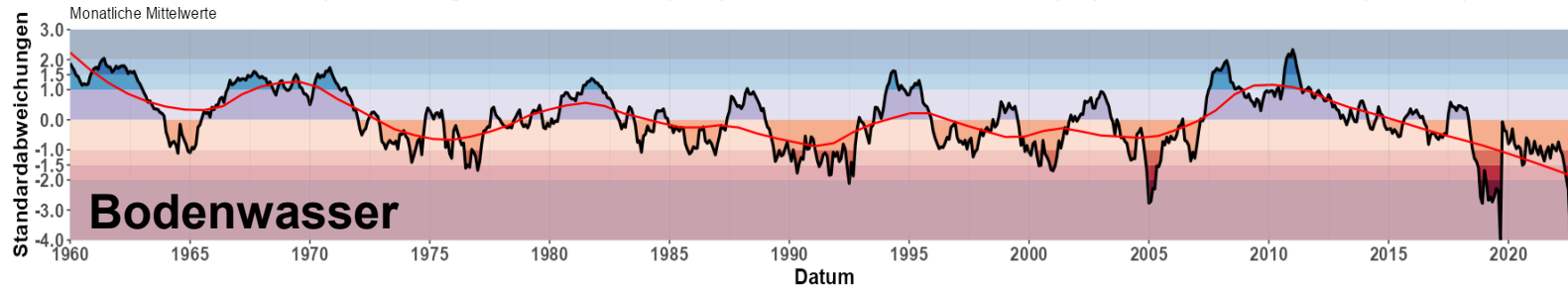
Standardisierter Index der klimatischen Wasserbilanz (SPEI6) am Standort Kloetze Kiefer (1960-2022)

Halbjährliche Mittelwerte



Standardisierter Index des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (SSMI) für für den durchwurzelten Boden (2 m) am Standort Kloetze Kiefer (1960-2022)

Monatliche Mittelwerte

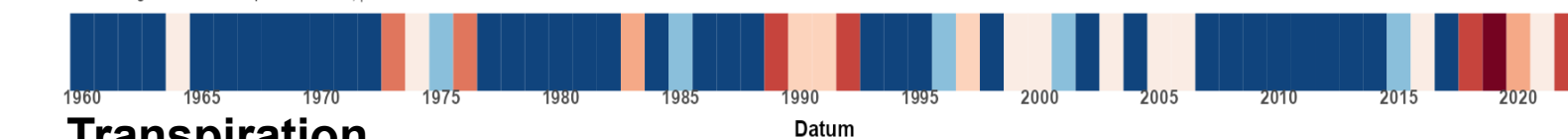


Kategorien der Feuchtigkeitsverhältnisse

- Extrem zu feucht
- Deutlich zu feucht
- Mäßig zu feucht
- Fast normal (etwas zu feucht)
- Fast normal (leichte Dürre)
- Mäßige Dürre
- Schwere Dürre
- Extreme Dürre

Anomalien der Tage mit einem Transpirationsverhältnis von unter 0.5 am Standort Kloetze Kiefer (1960-2022)

Mittelwert gebildet über komplette Zeitreihe,  $\mu = 12$

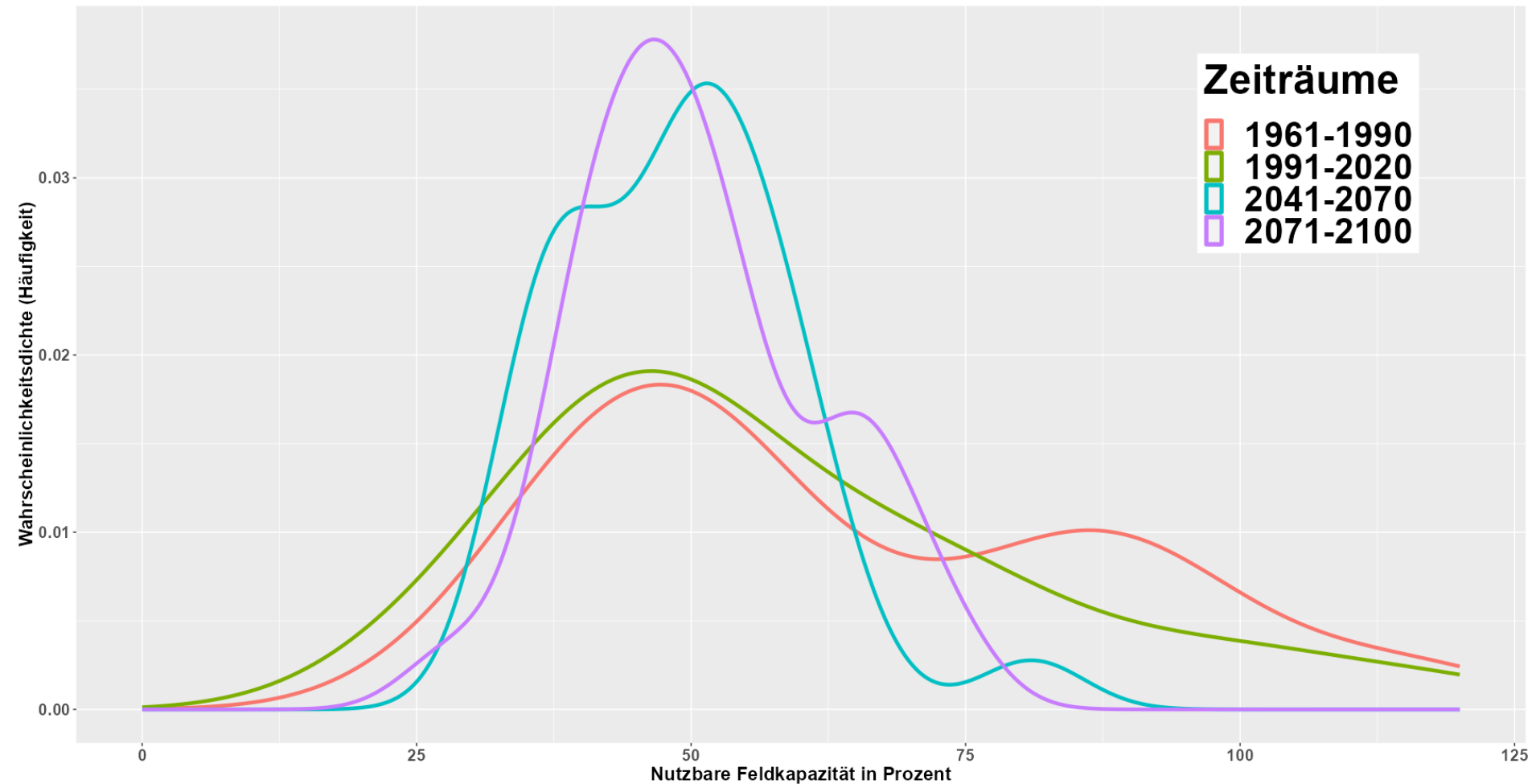


Abweichung vom Mittelwert in Tagen

- 60
- 50
- 40
- 30
- 20
- 10
- 0
- 10

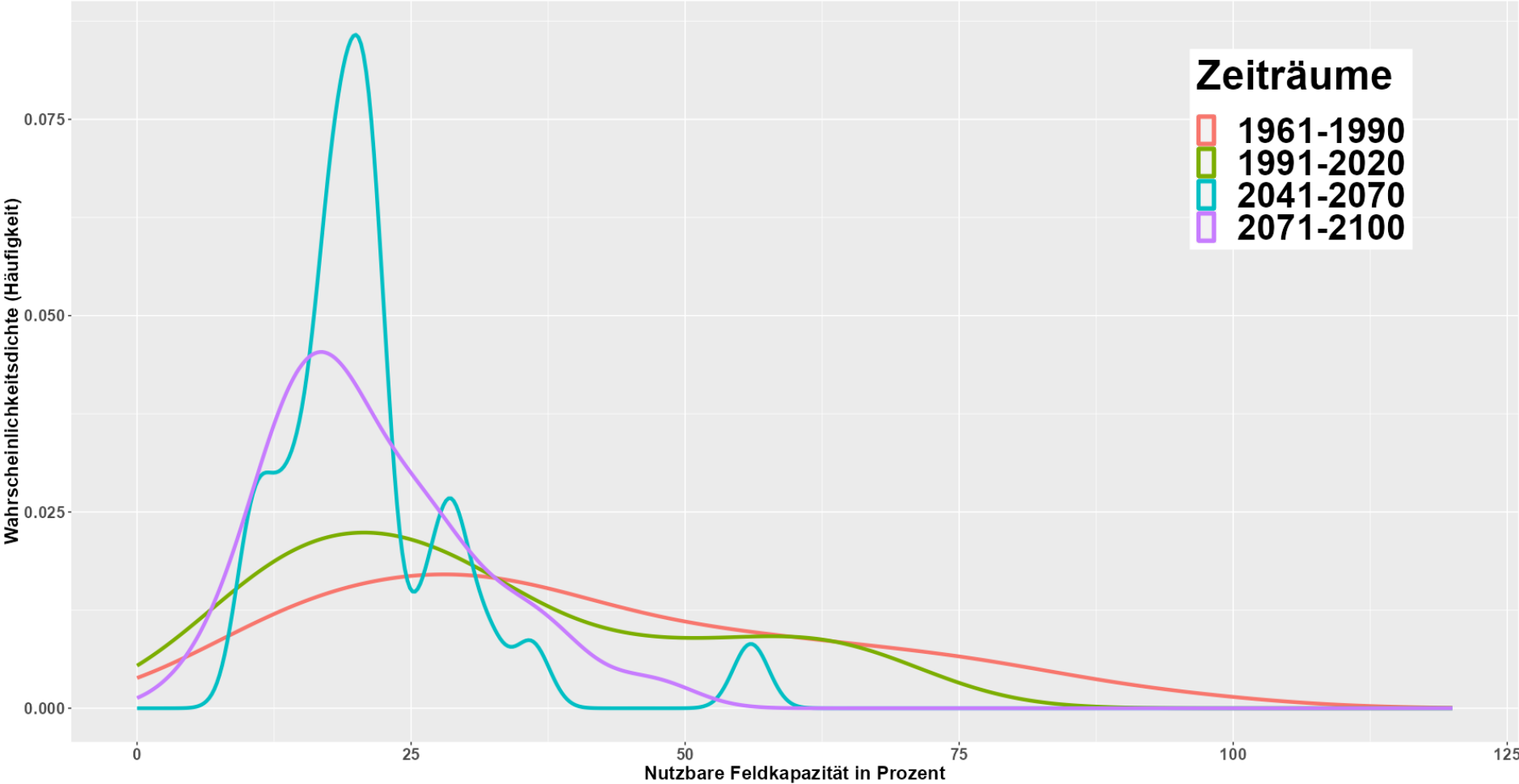
# Auffüllung Bodenwasserspeicher Vegetationsbeginn bis 2100

Modellierte Auffüllung des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers im Wurzelraum (2 m) zum Vegetationsbeginn  
1960-2020 Klimaantrieb Beobachtungsdaten, 2041-2100 Klimaantrieb Klimaszenario RCP 8.5 Kernensembel



# Mittlere Auffüllung Bodenwasserspeicher Vegetationsperiode bis 2100

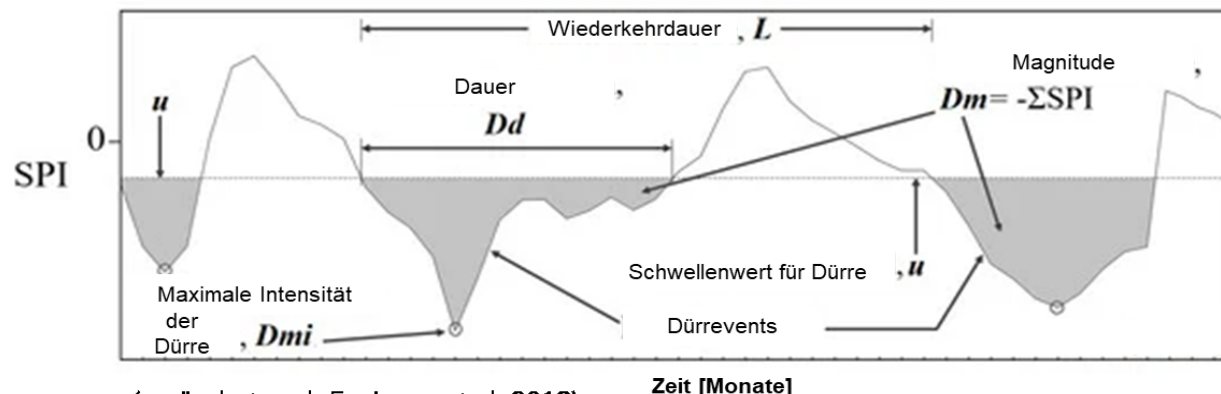
Modellierte mittlere Auffüllung des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers im Wurzelraum (2 m) in der Vegetationsperiode 1960-2020 Klimaantrieb Beobachtungsdaten, 2041-2100 Klimaantrieb Klimaszenario RCP 8.5 Kernensembel





# Wie untersucht man Dürren?

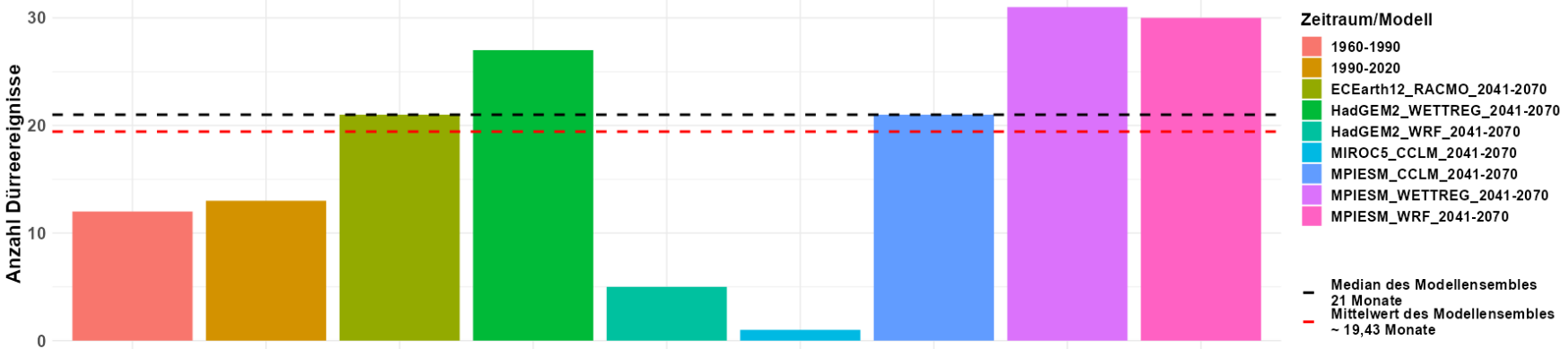
- Dürreereignisse zeichnen sich durch mehrere Merkmale aus (s. Abbildung)
  - Fläche (nicht in Abbildung), Anzahl, Intensität (**Dmi**, Abweichung vom Mittelwert in Standardabweichungen), Dauer (**Dd**, in Monaten), Magnitude (**Dm**, Summe der Intensität über die Dauer eines Dürreereignisses) und Wiederkehrdauer (**L**, in Monaten)
  - Jedes Merkmal kann die Umwelt auf sehr unterschiedliche Weise beeinflussen, Beispiele:
    - Schwere Dürren, selbst von kurzer Dauer, haben i.d.R. katastrophale Auswirkungen auf die Landwirtschaft während der Wachstumsphase der Pflanzen
    - Milde und moderate Dürren mit langer Dauer haben i.d.R. dagegen verheerende Folgen für Ökosysteme und Wasserversorgung.
    - Variabilität der Wiederkehrdauer wirkt sich i.d.R. auf Widerstandsfähigkeit und Erholung von Ökosystemen unter Dürrebedingungen aus



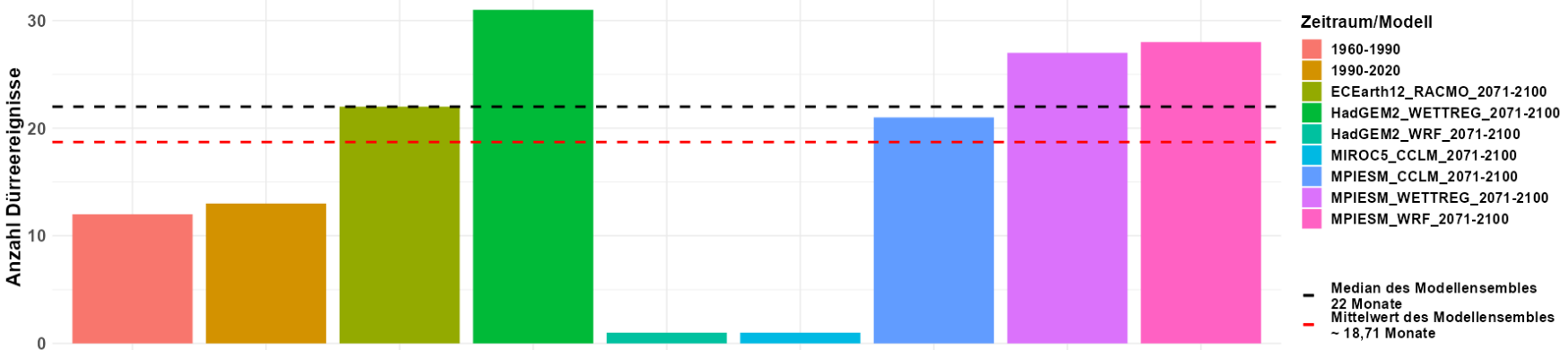
(verändert nach Espinosa et al. 2019)

# Dürrecharakteristiken Klimanormalperioden vs. Zukunft

Vergleich der Anzahl an Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2041-2070  
 Daten für Zeitraum 2041-2070 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5

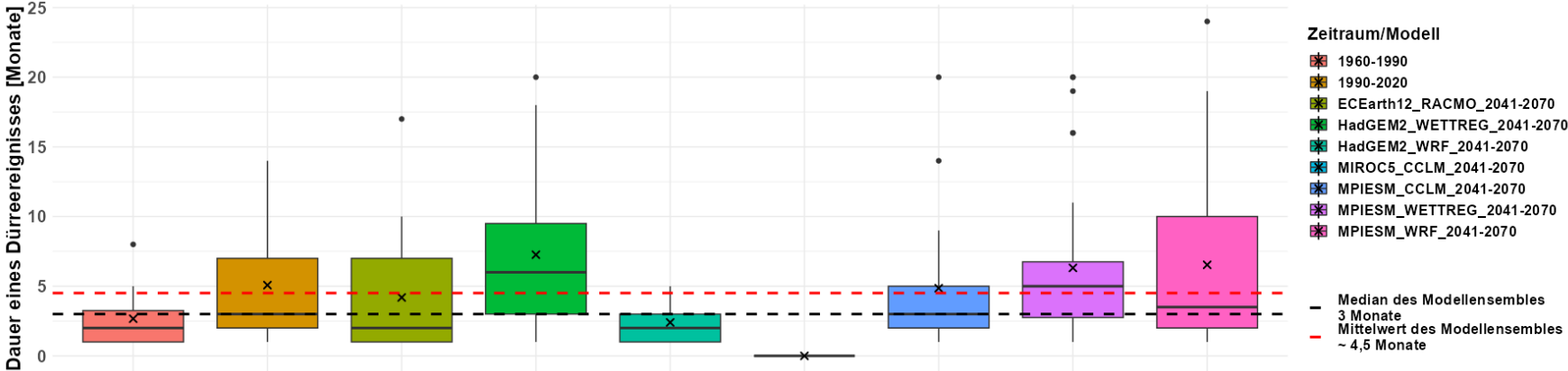


Vergleich der Anzahl an Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2071-2100  
 Daten für Zeitraum 2071-2100 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5

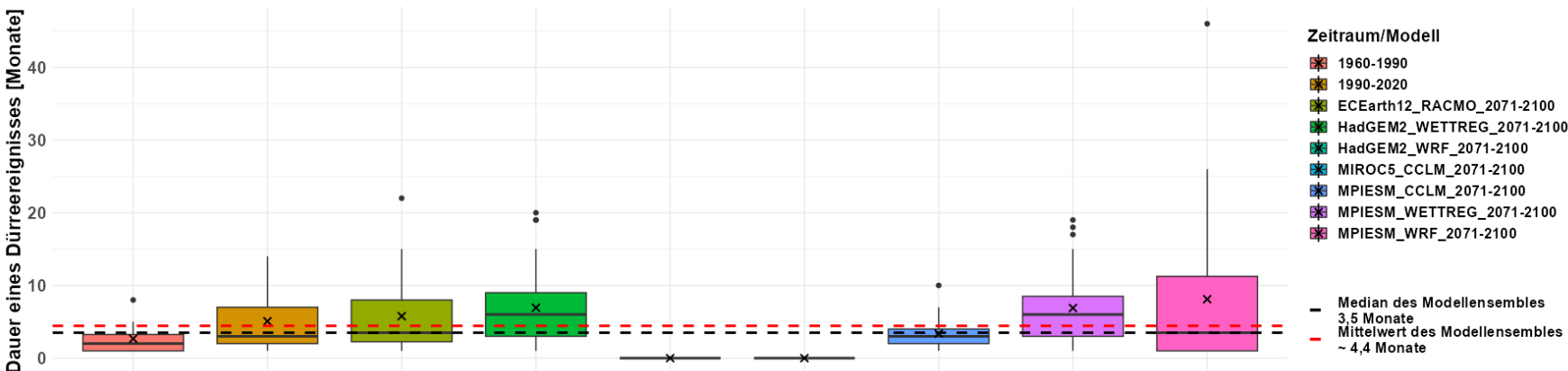


# Dürrecharakteristiken Klimanormalperioden vs. Zukunft

Vergleich der Dauer von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2041-2070  
 Daten für Zeitraum 2041-2070 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKlIEs-De-Kernensembel RCP 8.5

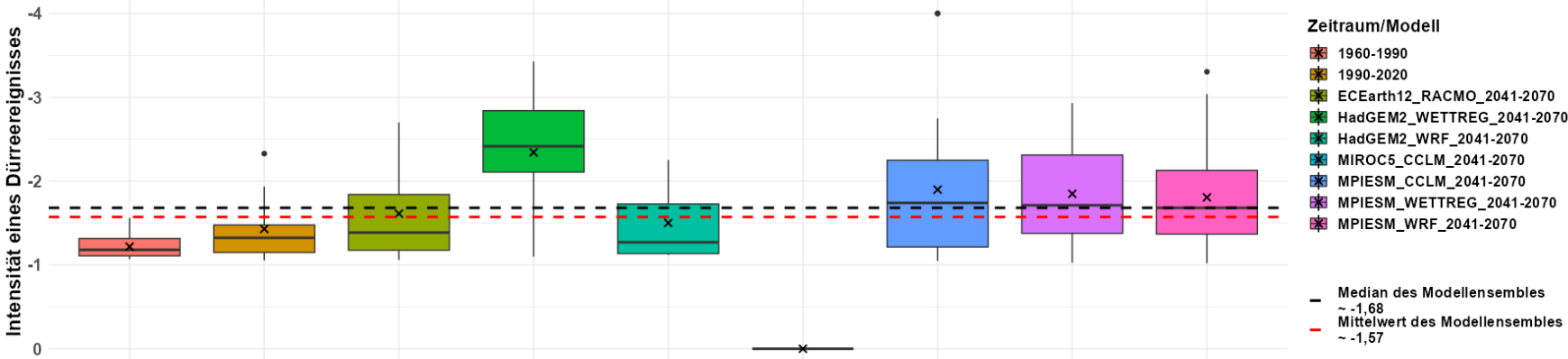


Vergleich der Dauer von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2071-2100  
 Daten für Zeitraum 2071-2100 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKlIEs-De-Kernensembel RCP 8.5

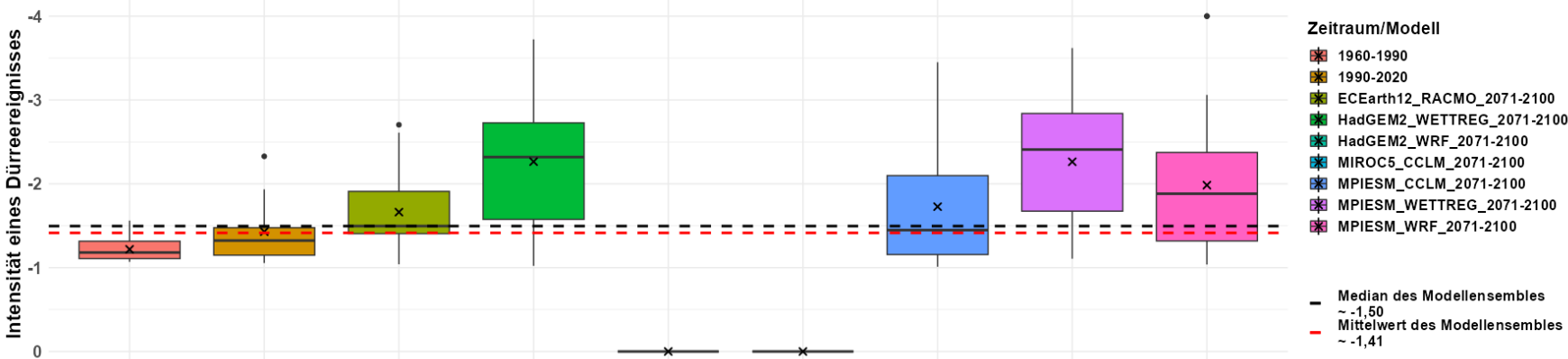


# Dürrecharakteristiken Klimanormalperioden vs. Zukunft

Vergleich der Intensität von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2041-2070  
 Daten für Zeitraum 2041-2070 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5

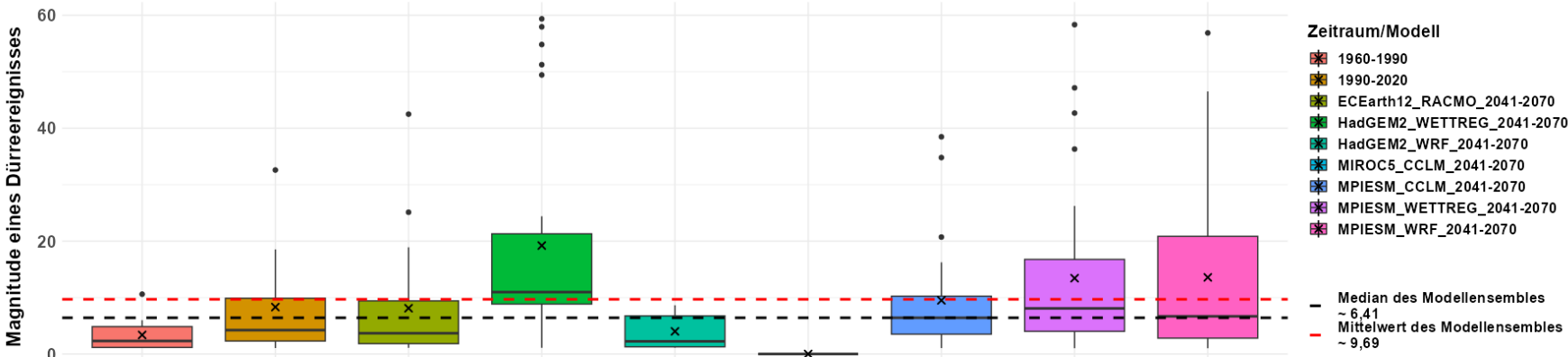


Vergleich der Intensität von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2071-2100  
 Daten für Zeitraum 2071-2100 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5

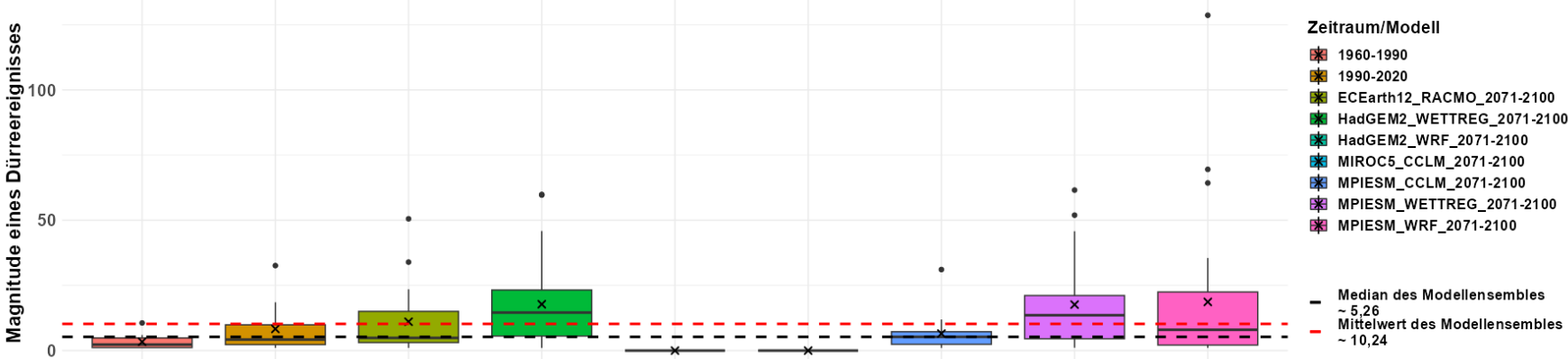


# Dürrecharakteristiken Klimanormalperioden vs. Zukunft

Vergleich der Magnitude von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2041-2070  
 Daten für Zeitraum 2041-2070 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensembel RCP 8.5



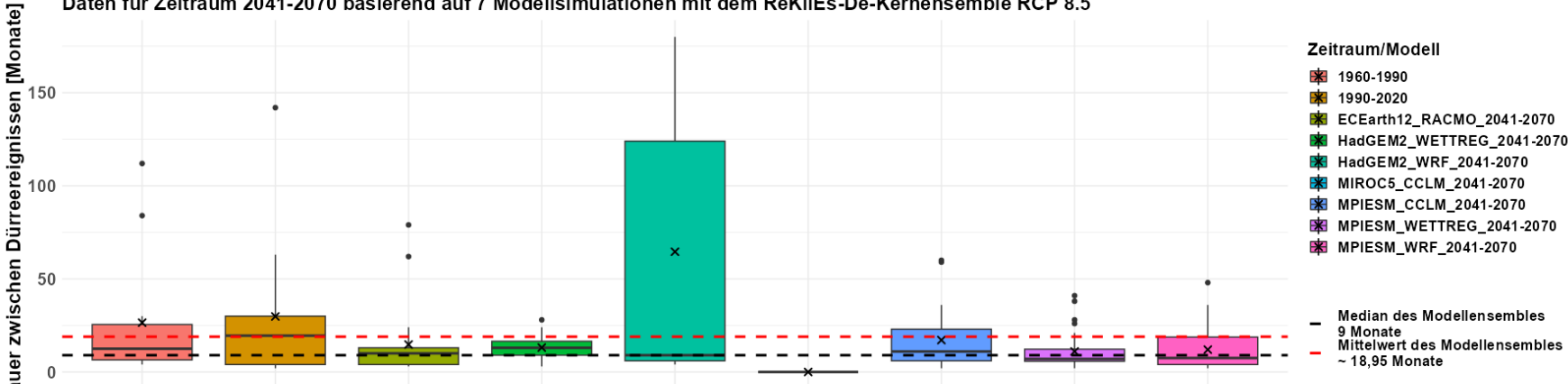
Vergleich der Magnitude von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2071-2100  
 Daten für Zeitraum 2071-2100 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensembel RCP 8.5



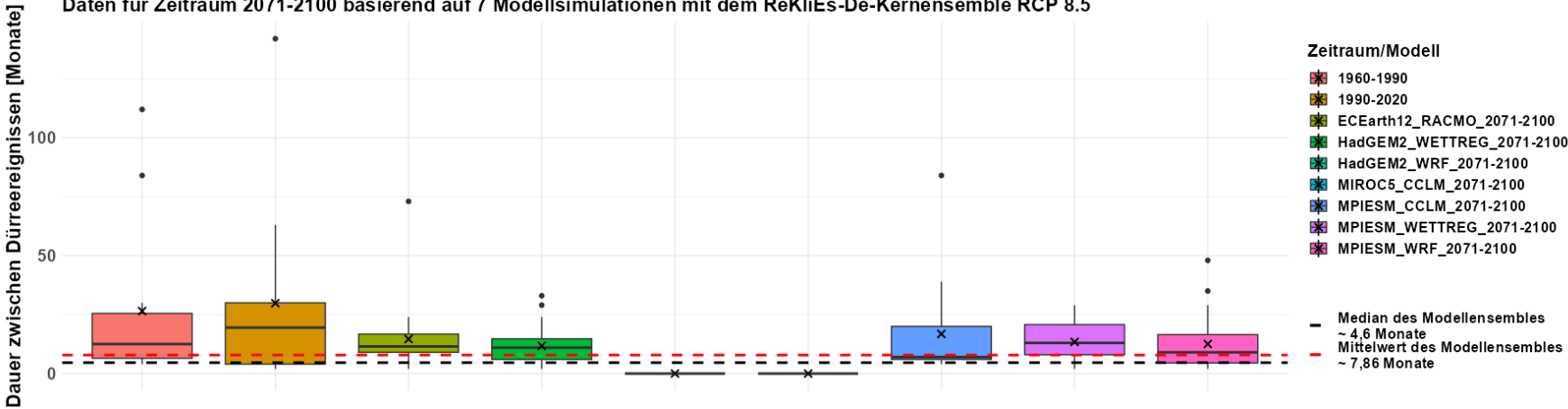


# Dürrecharakteristiken Klimanormalperioden vs. Zukunft

Vergleich der Dauer zwischen Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2041-2070  
 Daten für Zeitraum 2041-2070 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5



Vergleich der Dauer von Dürreereignissen zwischen den Betrachtungszeiträumen 1960-1990, 1990-2020, 2071-2100  
 Daten für Zeitraum 2071-2100 basierend auf 7 Modellsimulationen mit dem ReKliEs-De-Kernensemble RCP 8.5



# Zusammenfassung Dürrecharakteristiken

- **Anzahl**
  - 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100  
12                      13                      21                      22
- **Dauer (in Monaten)**
  - 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100  
2                      3                      3                      3,5
- **Intensität**
  - 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100  
-1,18                      -1,32                      -1,68                      -1,59
- **Magnitude**
  - 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100  
2,30                      4,26                      6,41                      5,26
- **Dauer zwischen Dürreereignissen (in Monaten)**
  - 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100  
12,5                      19,5                      9                      4,6

Wichtig: Es handelt sich hierbei um Medianwerte, gebildet aus den 7 Klimäläufen des ReKliEs-De-Kernensemble, d.h. abweichende Werte innerhalb der Spannbreite wie sie den Boxplots zu entnehmen sind, liegen ebenso im Bereich des Wahrscheinlichen und sind unter Annahme der Modell-Gleichwertigkeit nicht auszuschließen!

# Interpretation Dürrecharakteristiken Standort Klötze Kiefer

- Die Modellierungen der zukünftigen Dürreereignisse projizieren signifikante Änderungen für die Zeiträume 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zu den Referenzzeiträumen 1961-1990 und 1991-2020. Eine **erhebliche Zunahme der Häufigkeit von Dürreereignissen** wird erwartet. Bei Betrachtung der projizierten **Dauer** solcher Ereignisse wird eine **Stagnation mit potenzieller geringfügiger Zunahme** erwartet. Die **Intensität und Magnitude** von Dürreereignissen zeigen in den Modellen einen **moderaten Anstieg**. Hervorzuheben ist **die deutliche Verkürzung der Wiederkehrdauer** zwischen einzelnen Dürreereignissen in den späteren Zeiträumen, was auf eine **erhöhte Frequenz von Dürreereignissen** hinweist.

# Interpretation Dürrecharakteristiken Standort Klötze Kiefer

- Es ist zu bemerken, dass die projizierten Änderungen für die Zeiträume 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zum früheren Referenzzeitraum 1961-1990 extremer ausfallen als im Vergleich zum jüngeren Referenzzeitraum 1991-2020. Dies lässt sich durch einen bereits stattgefundenen Wandel erklären, der im Zeitraum 1991-2020 bereits extreme Dürresituationen, ähnlich denen, die für die Zukunft erwartet werden, einschließt. Exemplarisch dafür stehen die rezenten Dürrejahre, auch wenn das besonders extreme Dürrejahr 2022 im letzten Referenzzeitraum noch nicht berücksichtigt ist. Daraus lässt sich schließen, dass zukünftige Dürreereignisse eher den Dürreereignissen der rezenten Jahre als den weiter zurückliegenden Dürrejahren ähneln werden.

# Fazit

---

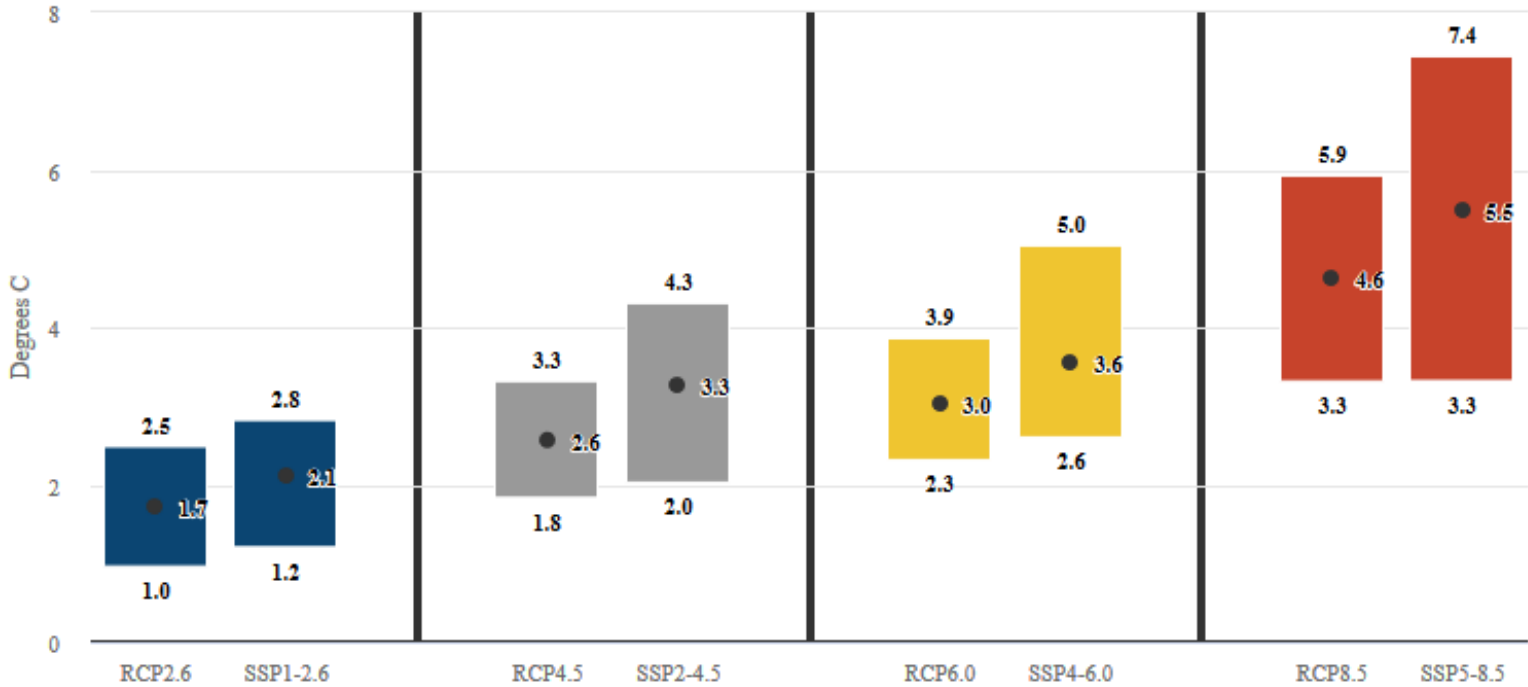
- Der Klimawandel ist Realität und wird sich weiter verstärken
- Die Klimamodelle sind robust, eine weitere Erwärmung ist sehr wahrscheinlich
- Eine Zunahme von Extremereignissen (Dürren, Starkregen) ist wahrscheinlich
- Die Anpassung an zu erwartende und bereits beobachtete Auswirkungen des Klimawandels ist auch unter Unsicherheiten unerlässlich
- Je stärker die Erwärmung ist, um so schwieriger (oder unmöglicher) wird die Anpassung



# Vergleich der globalen Erwärmung in CMIP5 und CMIP6 Modellen

## Comparing CMIP5 and CMIP6 scenarios

For currently available runs, from 1880-1900 to 2090-2100.



CMIP5 and CMIP6 warming between 1880-1900 and 2090-2100 for RCP scenarios and their new analogues. The range reflects the lowest and highest warming among models for each scenario, while the labeled dot show the multi-model mean. Chart by Carbon Brief using [Highcharts](#).

Quelle: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

Photo: NASA

Johannes.Sutmoeller@nw-fva.de  
Alexander.Ney@nw-fva.de