



Photo: NASA

Klima und Wasserhaushalt

Johannes Sutmöller & Isabella Smekal

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 Hessen
- Fazit und Ausblick

Klima in der Vergangenheit



Historie

Zukunft

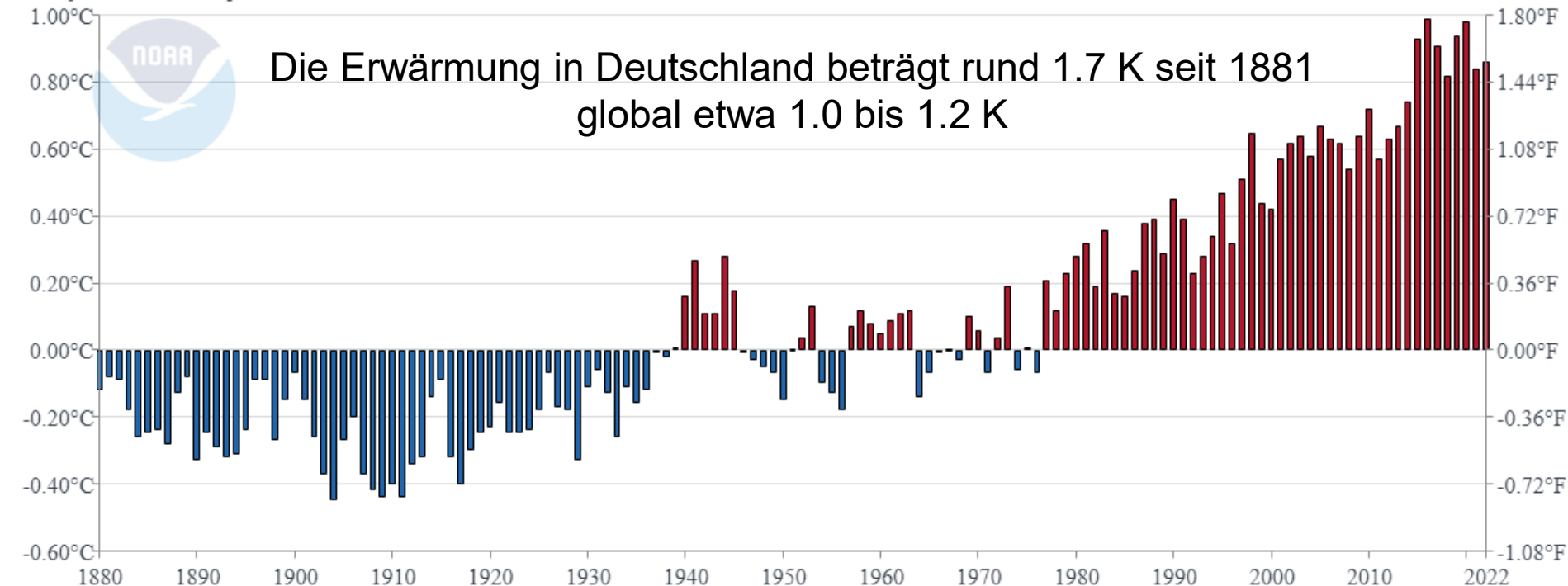
Foto: Bernd Ahrends

Klima - Vergangenheit

Abweichung der global gemittelten Erdoberflächentemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts

Global Land and Ocean

January-December Temperature Anomalies

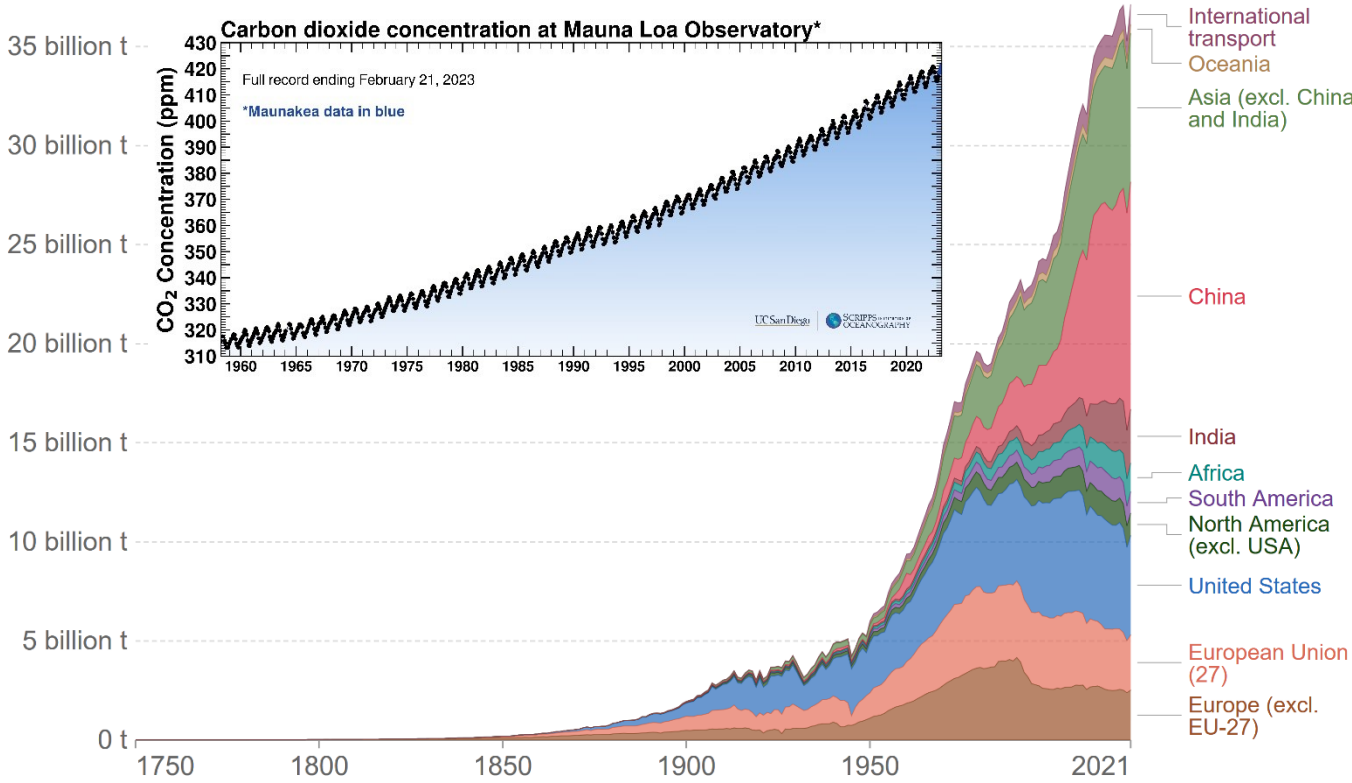


NOAA National Centers for Environmental information, Climate at a Glance: Global Time Series, published September 2022, retrieved on October 13, 2022 from <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>

Emission - Vergangenheit

Annual CO₂ emissions by world region

This measures fossil fuel and industry emissions¹. 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 (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ 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 Vergangenheit



Historie

Zukunft

Foto: Bernd Ahrends

(Emissions)-Klimaszenarien

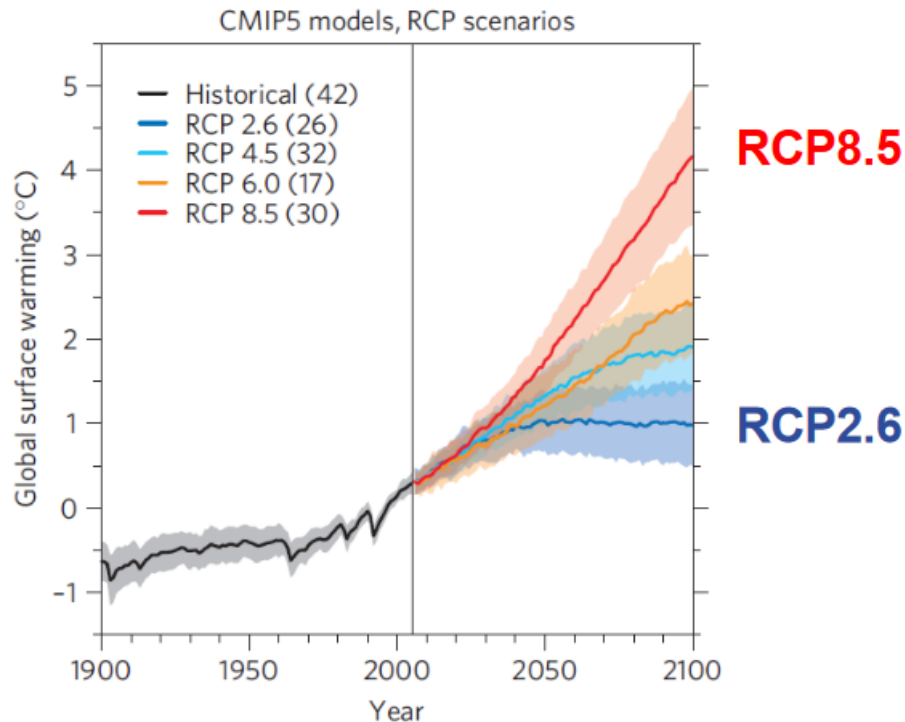


Abbildung aus Knutti and Sedlacek (2013): Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change (3)

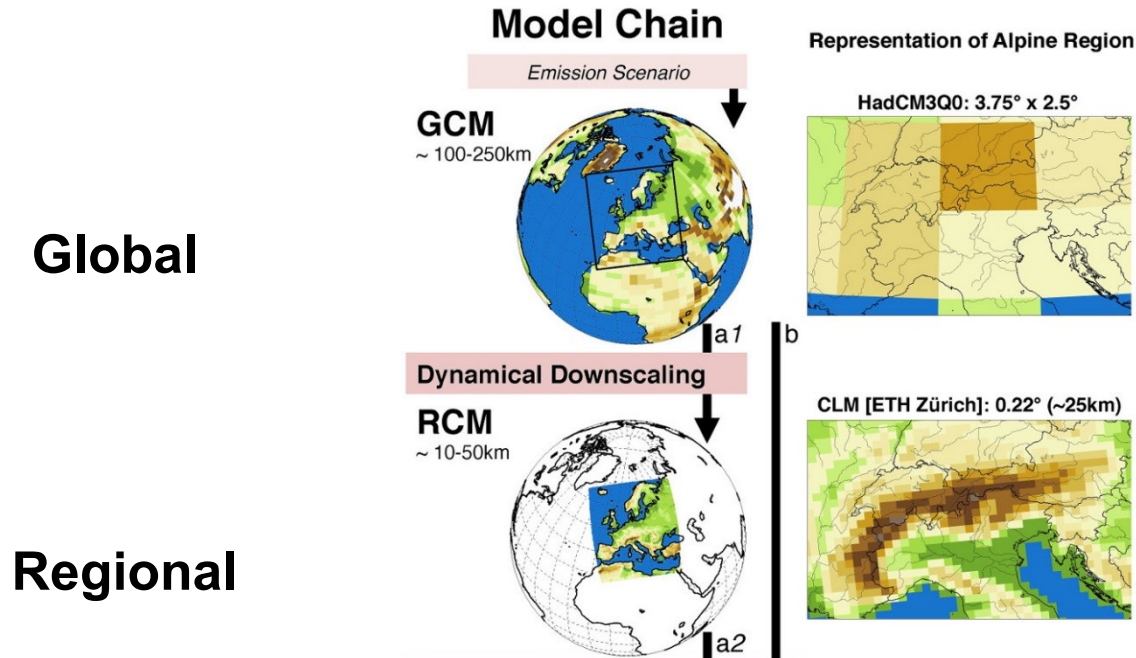
Herausforderungen

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



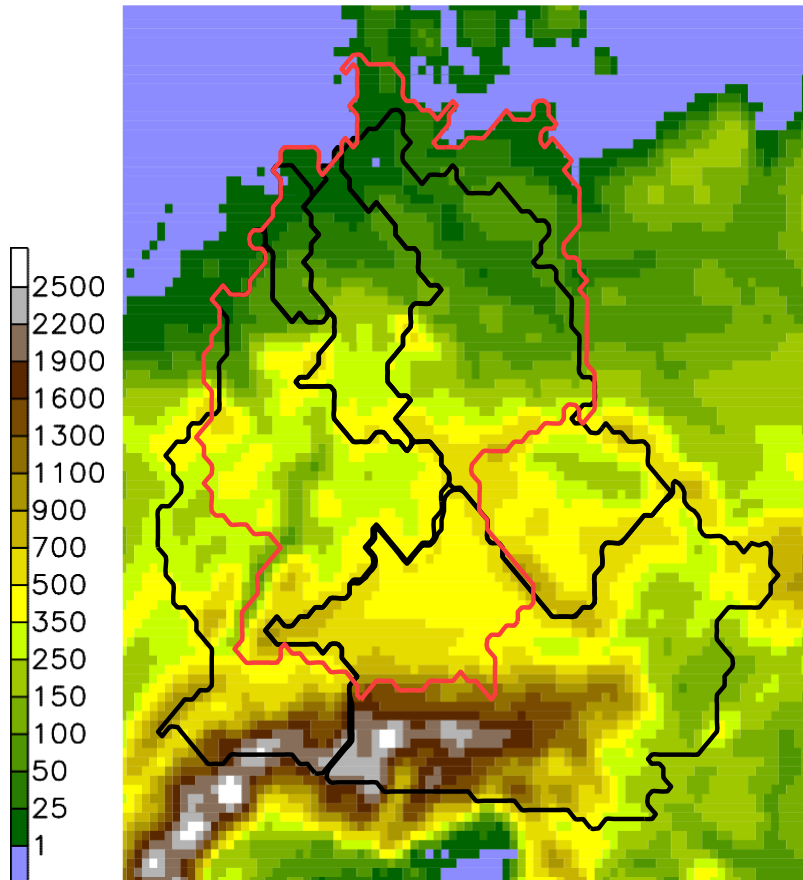
Umsetzung in die Praxis?

Klimaszenarien – Global -> Regional



Schweizer Klimaszenarien CH2018 (2018)

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



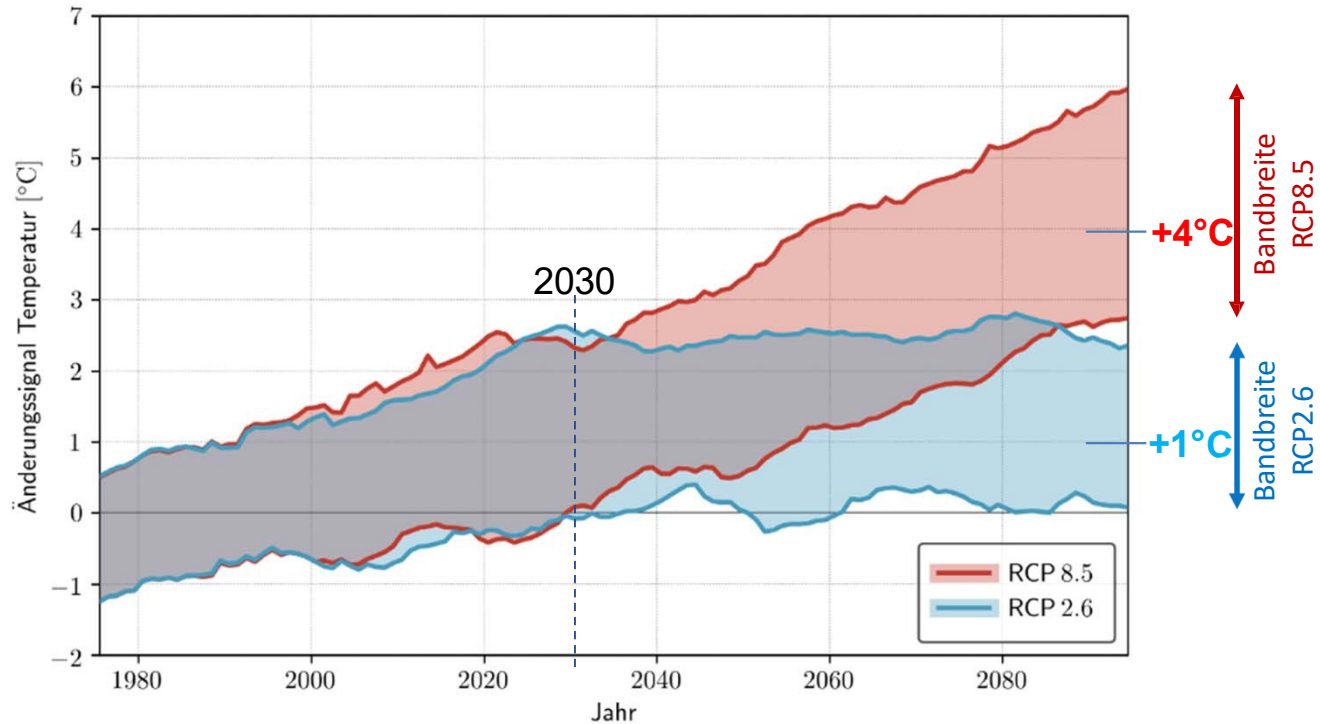
Für Deutschland und die
Einzugsgebiete großer,
nach Deutschland
entwässernder Flüsse

*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

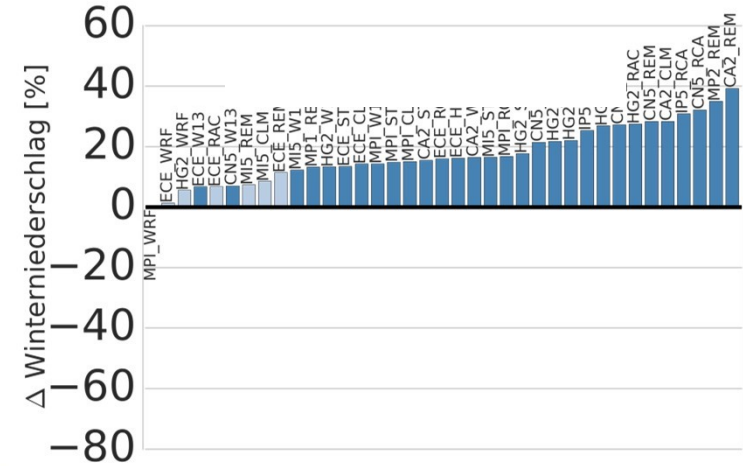
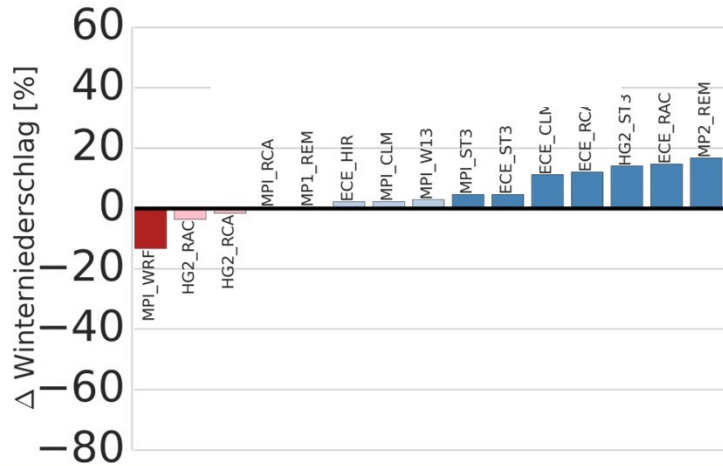
RCP2.6

rcp26, Deutschland

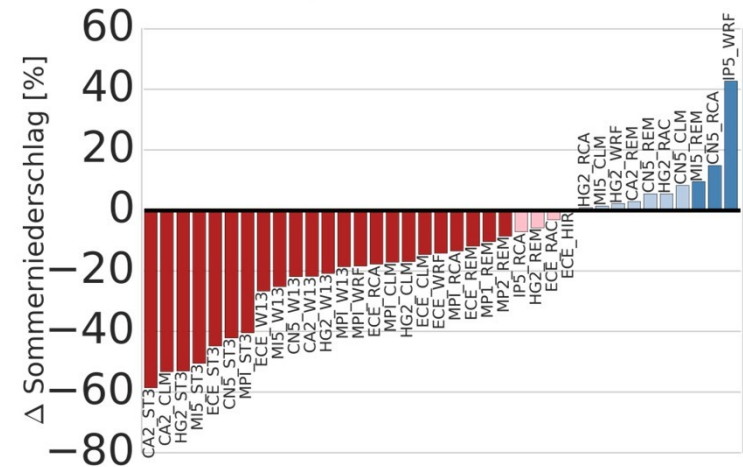
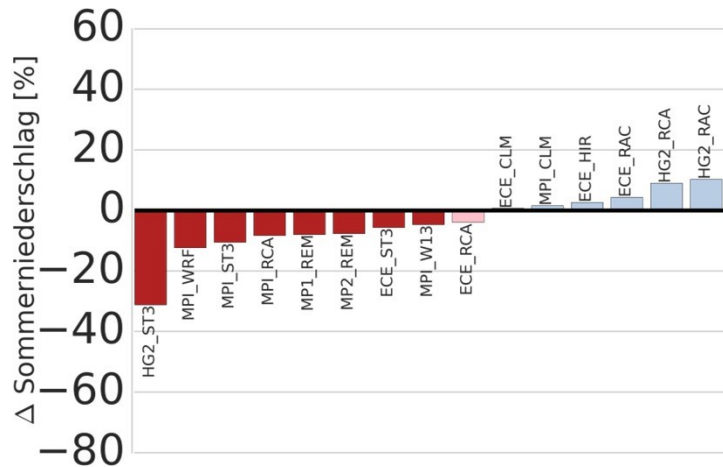
RCP8.5

rcp85, Deutschland

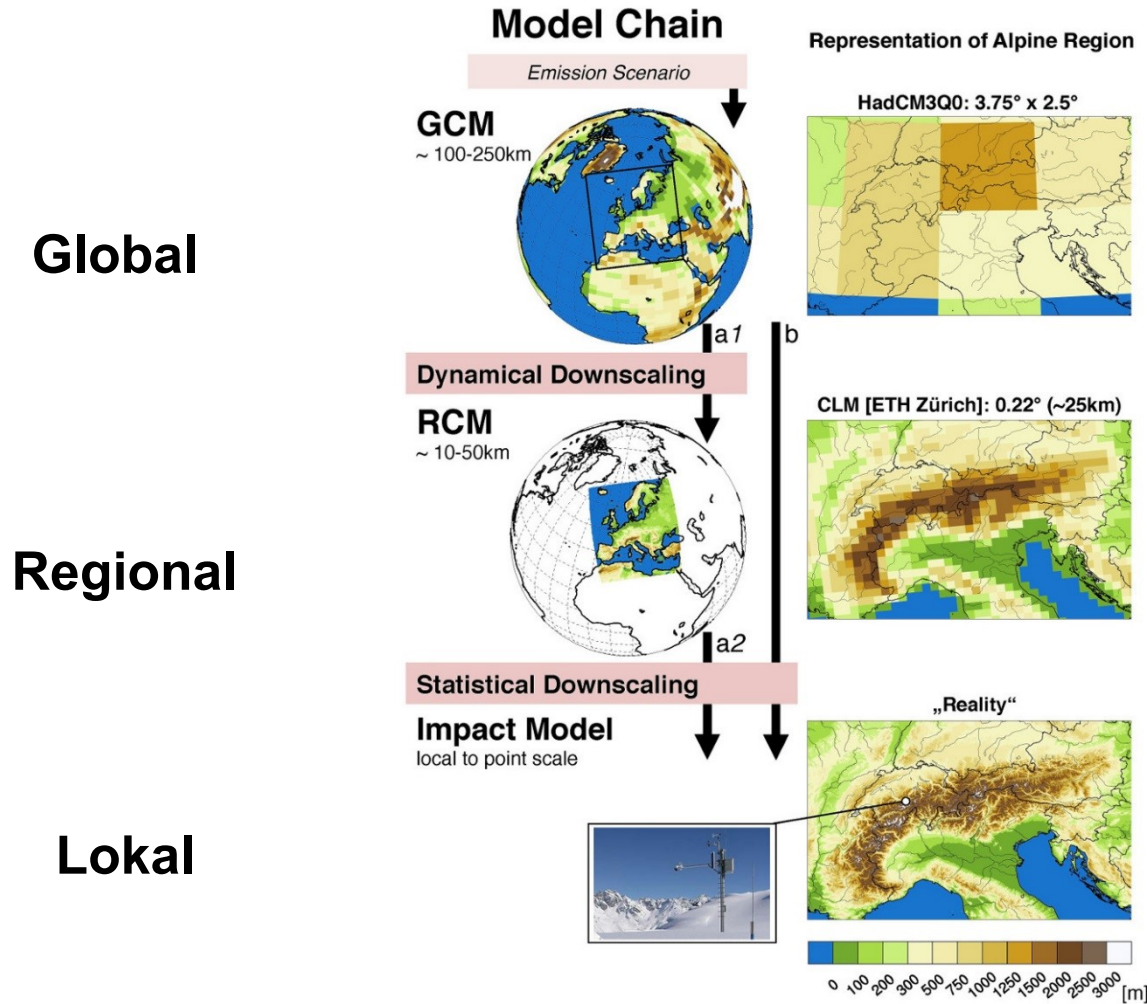
Winter (DJF)



Sommer (JJA)

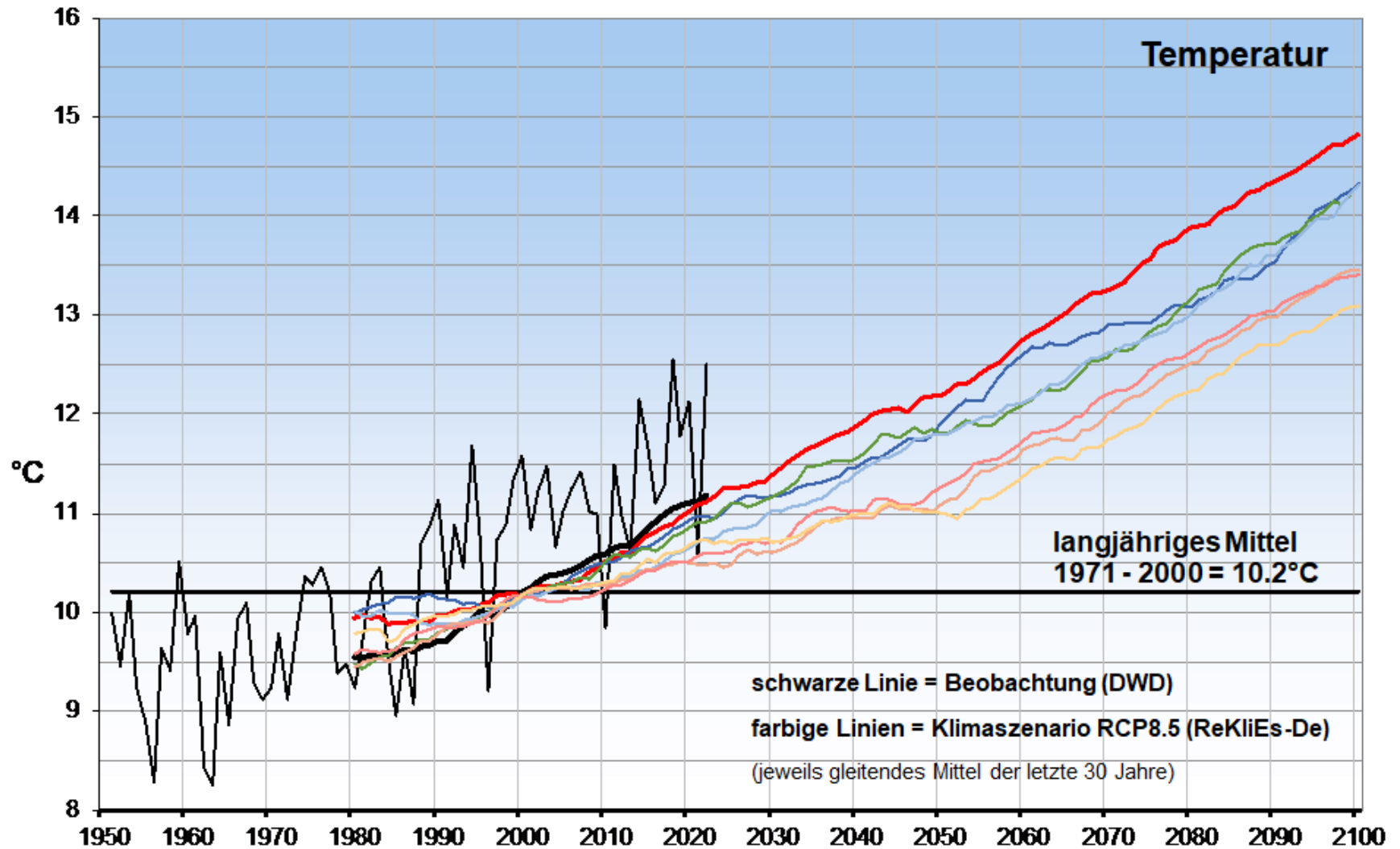


Klimaszenarien – Global -> Regional -> Lokal

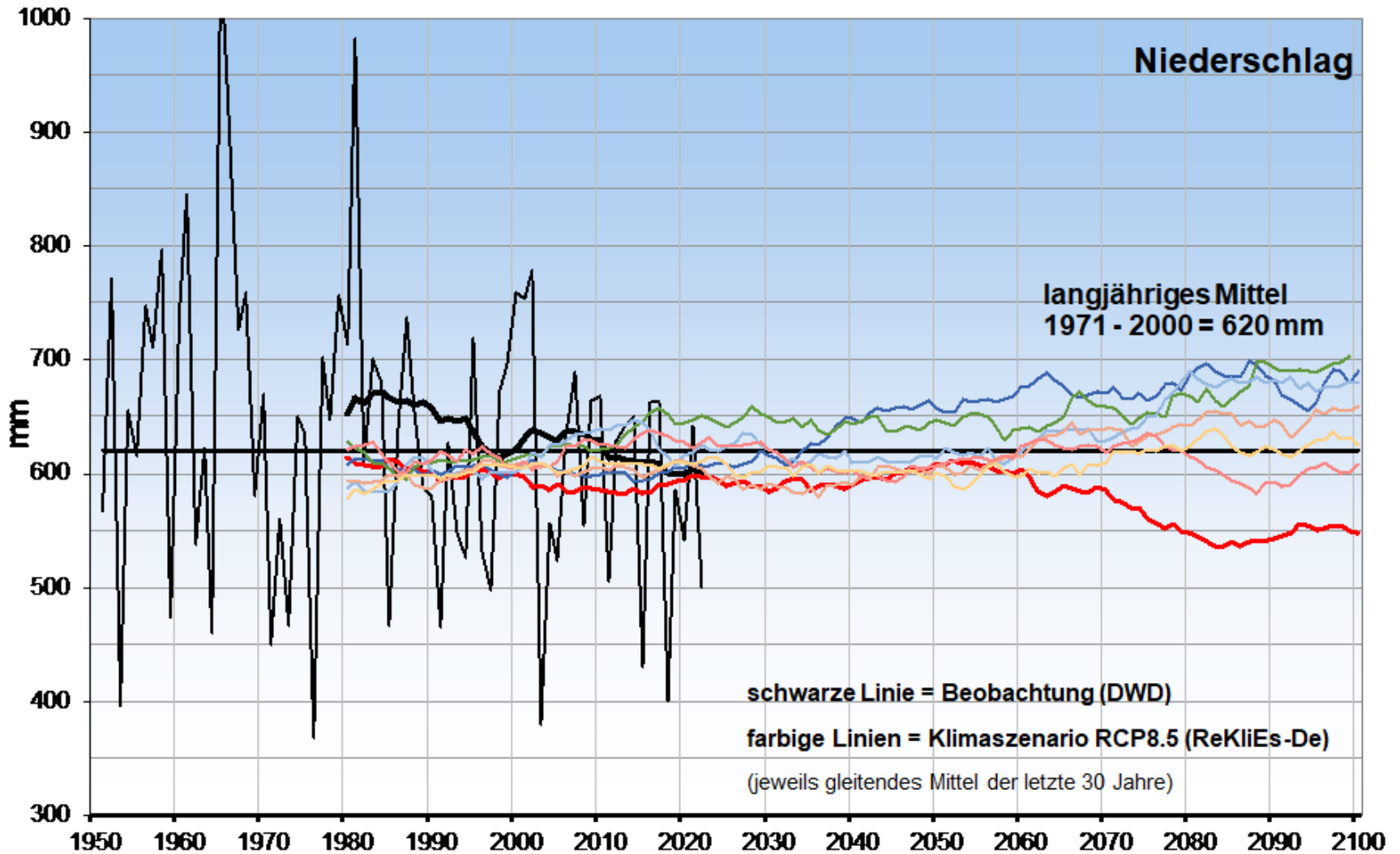


Schweizer Klimaszenarien CH2018 (2018)

Klimaszenarien – Downscaling (Bsp. Frankfurt/Fh)



Klimaszenarien – Downscaling (Bsp. Frankfurt/Fh)



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



Foto: NW-FVA

Wasserhaushalt - Standortwasserbilanz

Klimatische Wasserbilanz

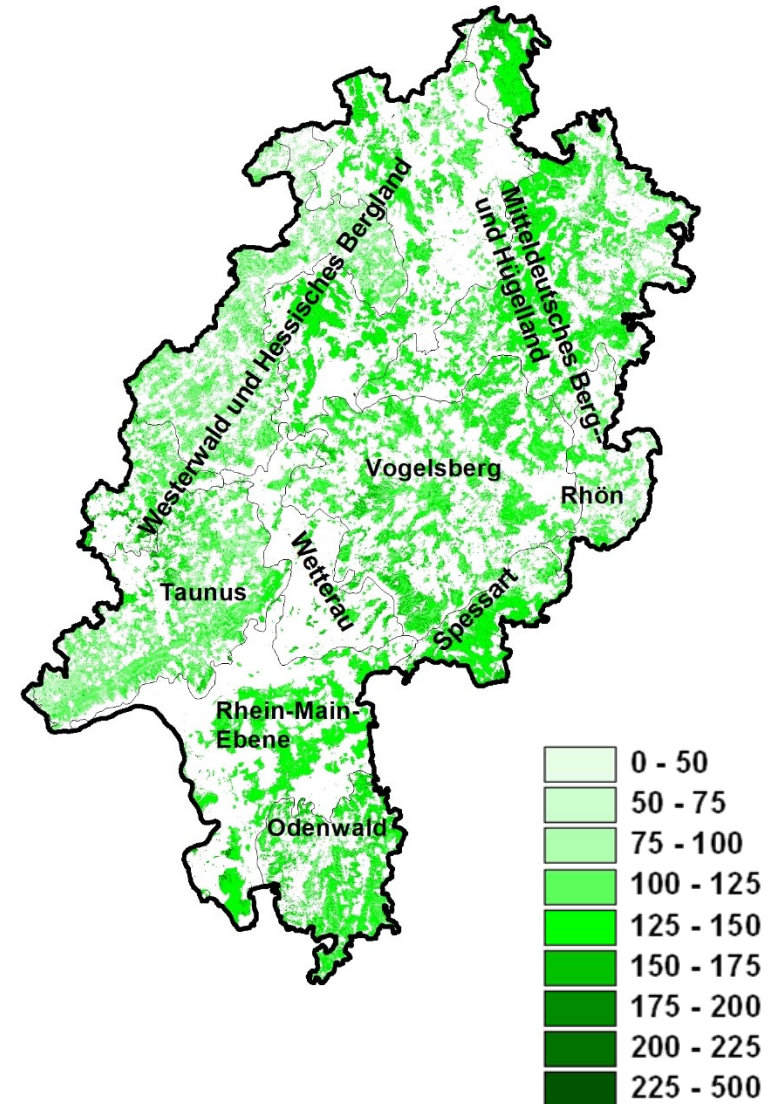
Summe aus Niederschlag und potenzieller
Grasreferenzverdunstung (FAO-Norm)
(hier: für die forstliche Vegetationsperiode berechnet)

Nutzbare Feldkapazität (nFK)

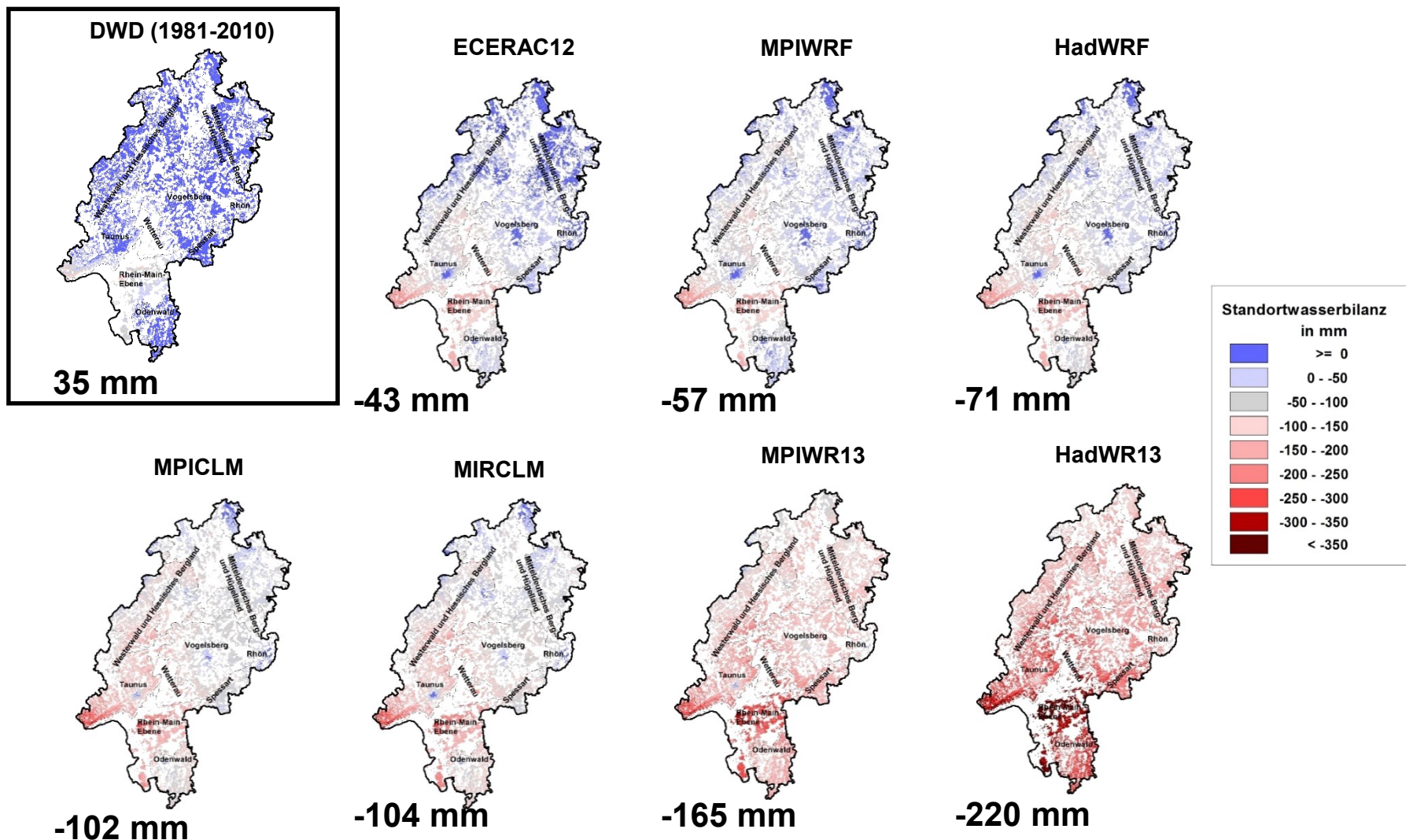
Wassergehalt zwischen pF-Werten 1,8 und 4,2
(Feldkapazität und permanenter Welkepunkt);
Bodenkarten, forstliche Standortskartierung

Standortwasserbilanz

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



Standortwasserbilanz (mm) in der VegPer. in Hessen – Kernensembel (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

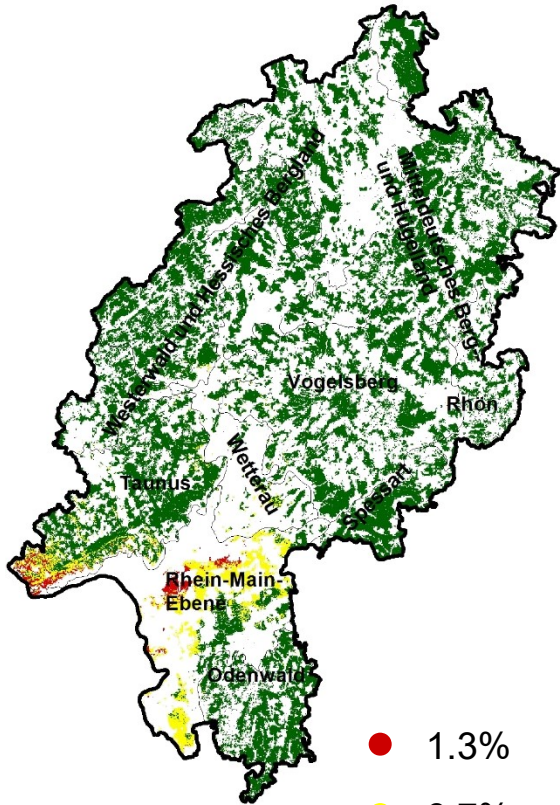
- Roteiche
- Ahornarten
- Esche
- Hainbuche
- Linde
- Europ. Lärche
- Küstentanne

- Sandbirke
- Schwarzkiefer

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

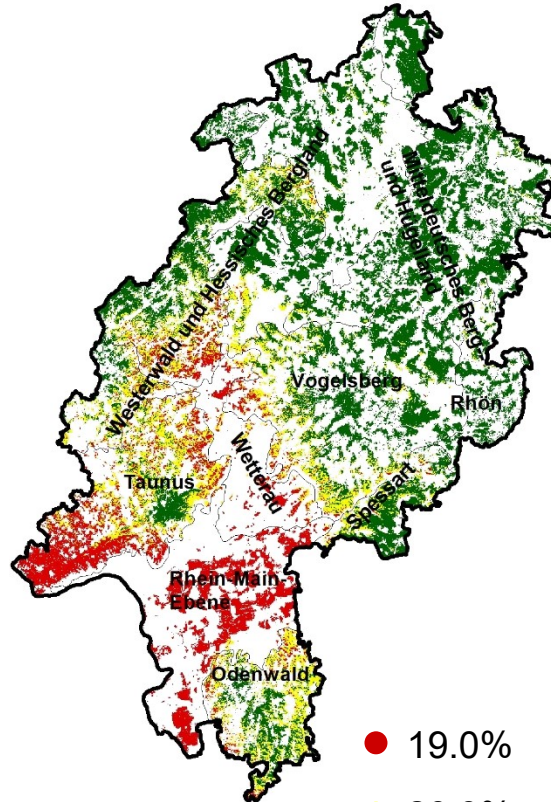
Risikoabschätzung Buche

DWD (1981-2010)



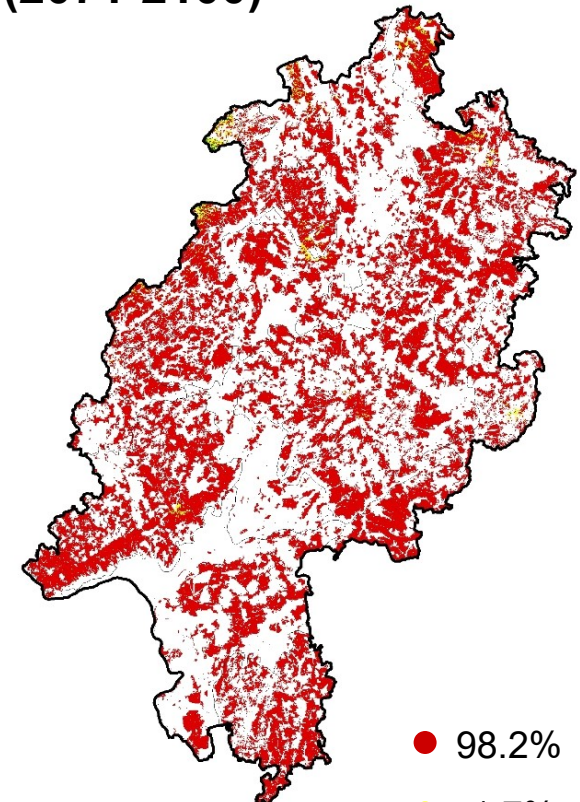
● 1.3%
● 6.7%
● 92.0%

ECEARTH_RACMO
(2071-2100)



● 19.0%
● 20.9%
● 60.1%

HadGEM2_WETTREG2013
(2071-2100)



● 98.2%
● 1.7%
● 0.1%

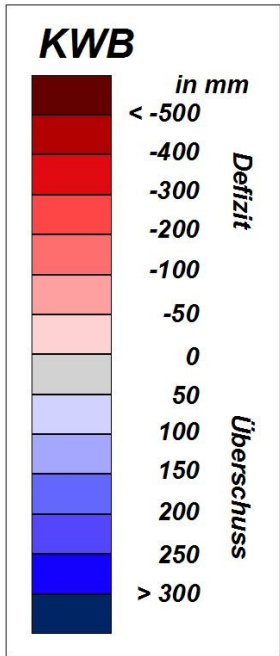
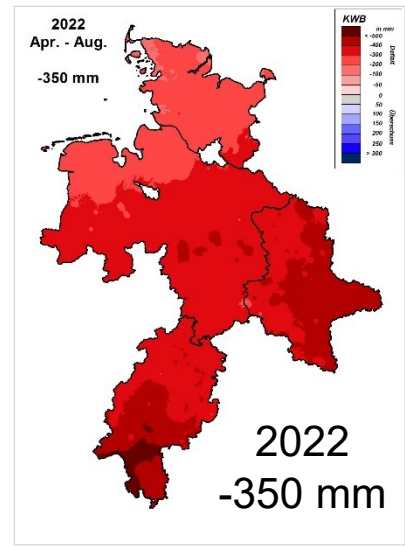
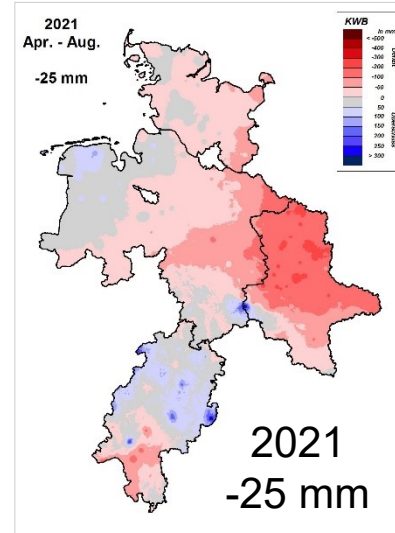
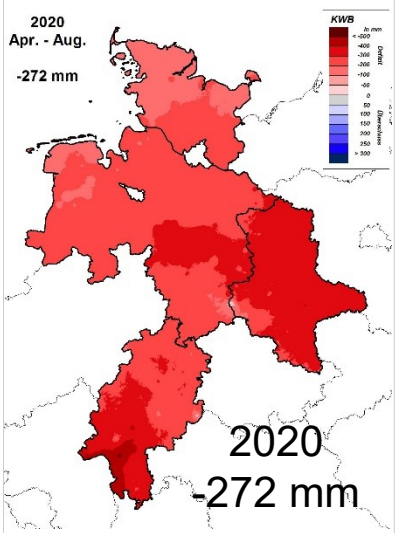
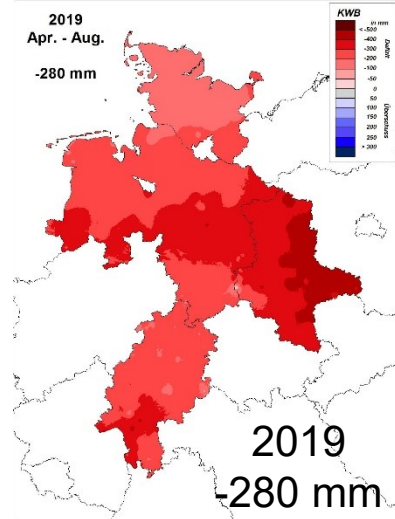
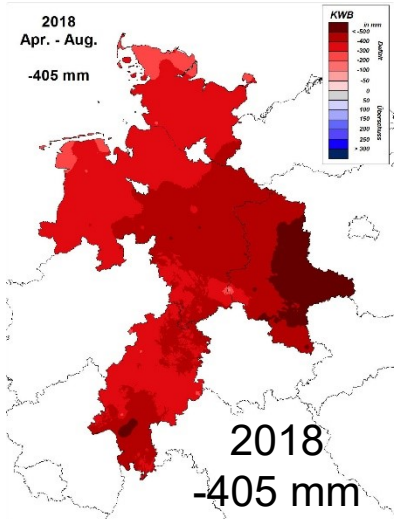
Datengrundlage: DWD-Messdaten; Klimaszenario RCP8.5

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



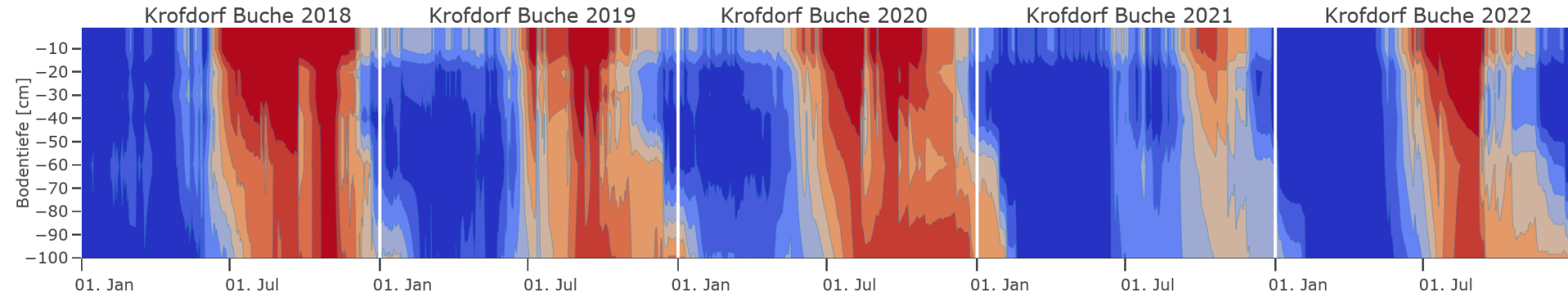
Foto: NW-FVA

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

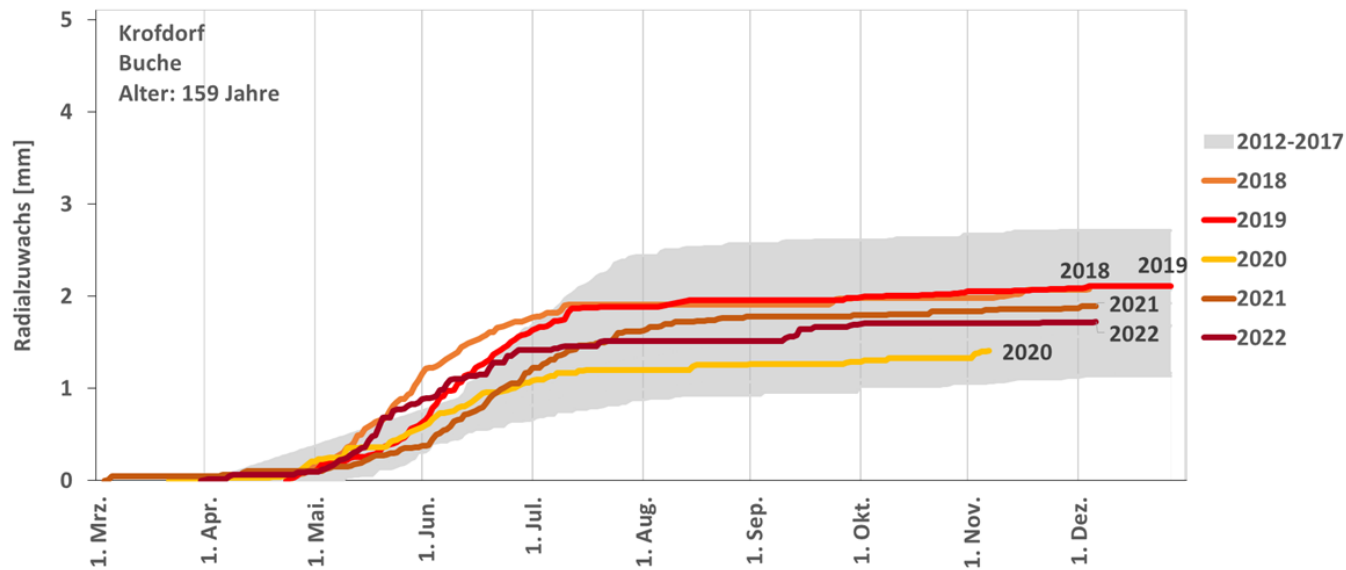
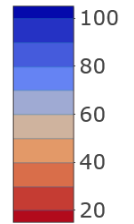


KWB-Mittel 1981 – 2010:
-100 mm

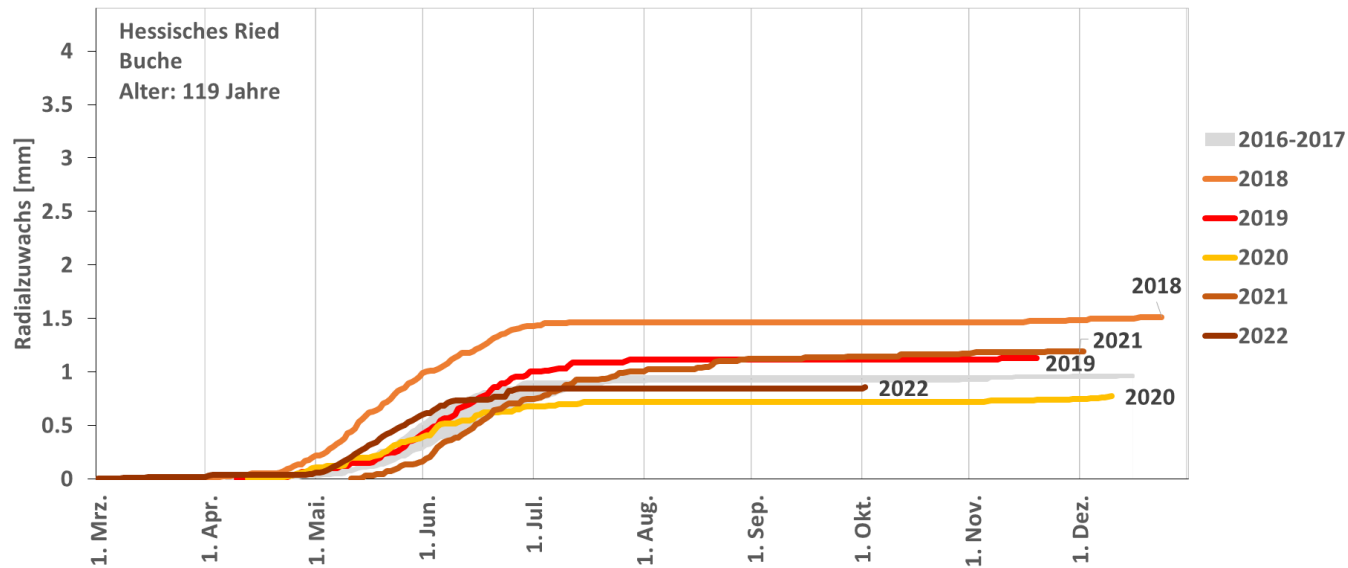
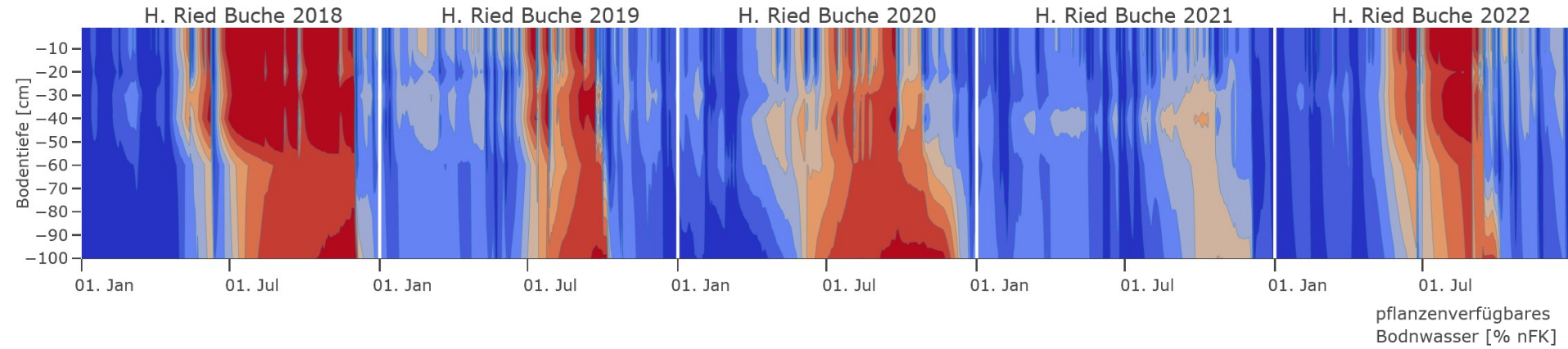
Bodenwassergehalte und Zuwachs 2018 bis 2022 - Krofdorf



pflanzenverfügbares Bodnwasser [% nFK]

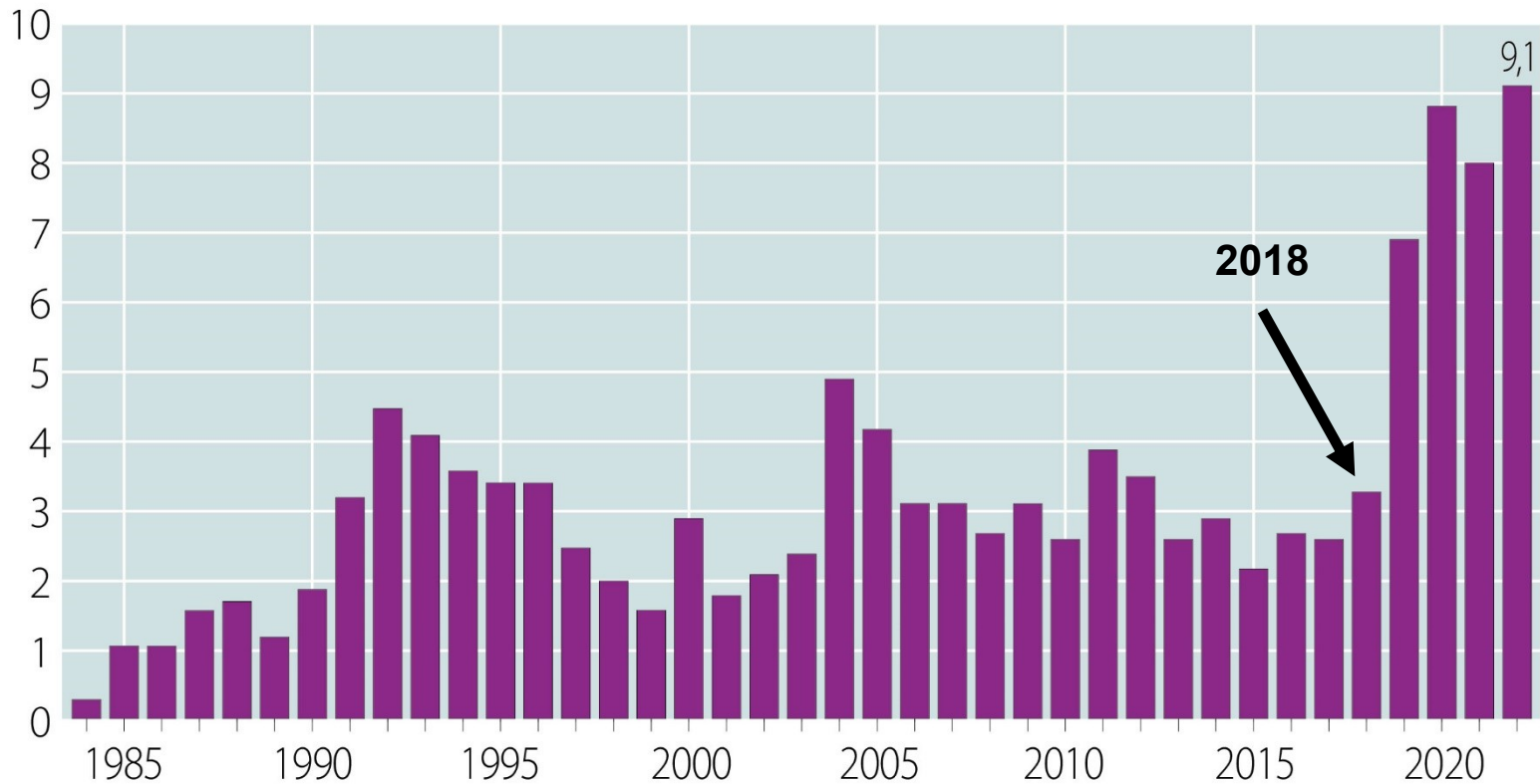


Bodenwassergehalte und Zuwachs 2018 bis 2022 – Hess.Ried

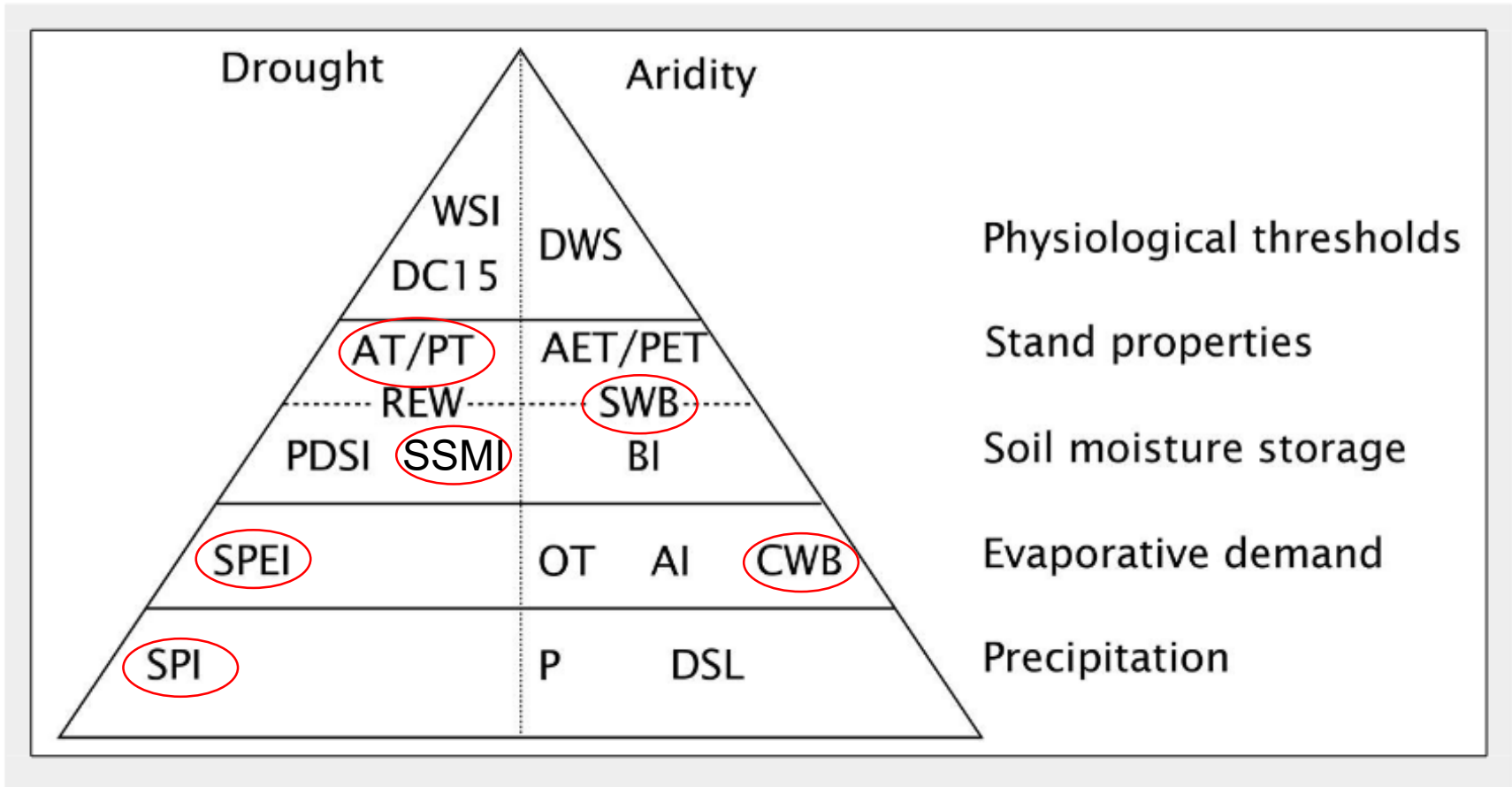


Waldzustand in Hessen

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



Indikatoren zur Trockenstresserkennung



Speich et al. (2021)

Projekt Witterungsextreme Hessen

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 ReKliEs-De Klimäläufen bis 2100

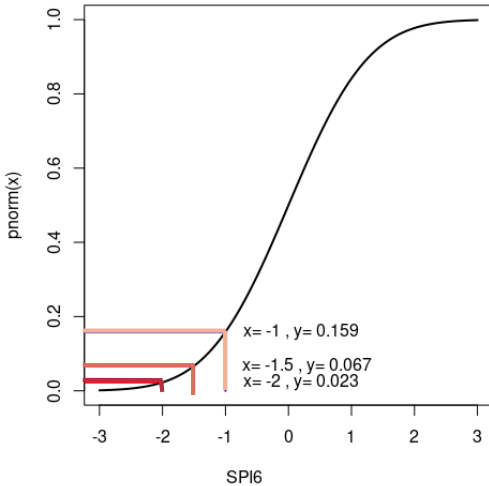
→ Auswertung der Klimaprojektionen für das Szenario RCP 8.5

c) **Vergleich mit Reaktionsmustern der Hauptbaumarten**

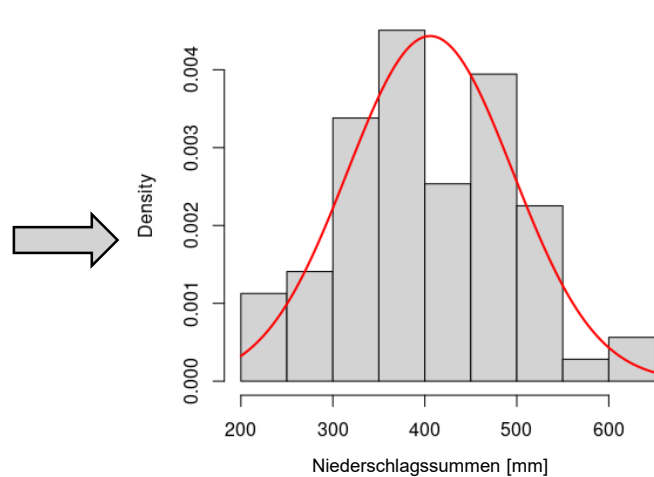
→ Wirkungsanalyse auf die Vitalität und Mortalität der Hauptbaumarten

Berechnung von Dürreindizes

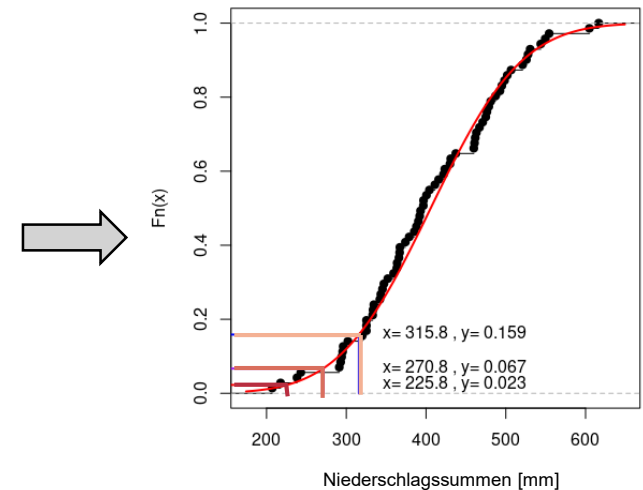
CDF (0,1)-Normal



Vegetationszeit Mai bis Oktober (1950-2020)



CDF Normal



Klassifizierung Wertebereich

Extrem zu feucht	> 2
Deutlich zu feucht	1.5 bis 2
Mäßig zu feucht	1 bis 1.5
Normalbereich	0 bis 1
Normalbereich	-1 bis 0
Mäßige Dürre	-1.5 bis -1
Schwere Dürre	-2 bis -1.5
Extreme Dürre	< -2

Index

SPI Standardized Precipitation Index -4 bis 4
SPEI Standardized Precipitation Evapotranspiration Index -4 bis 4
SSMI Standardized Soil Moisture Index -4 bis 4
Transpirationsverhältnis 0 bis 1

Input

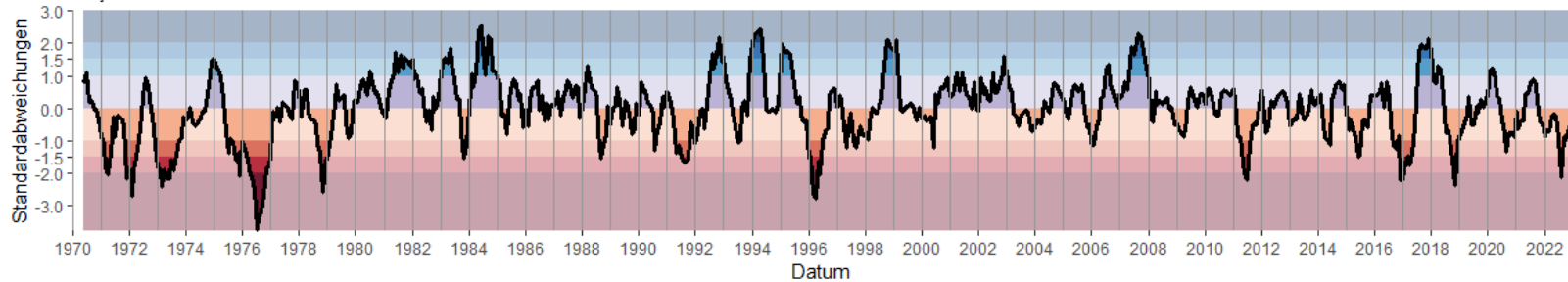
Niederschlag
Klimatische Wasserbilanz (= Niederschlag - Verdunstung)
Bodenfeuchtemodellierungen bis 200 cm Tiefe
Aktuelle Transpiration Potentielle Transpiration (Modellierungen)

nach DWD

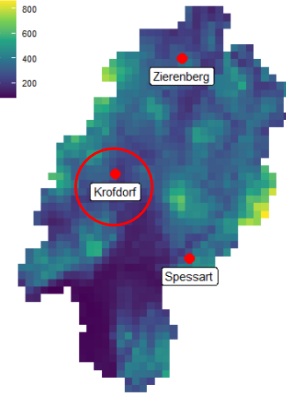
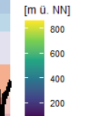
Krofdorf

Standardized Precipitation Index (SPI6)

Halbjährliche Mittelwerte

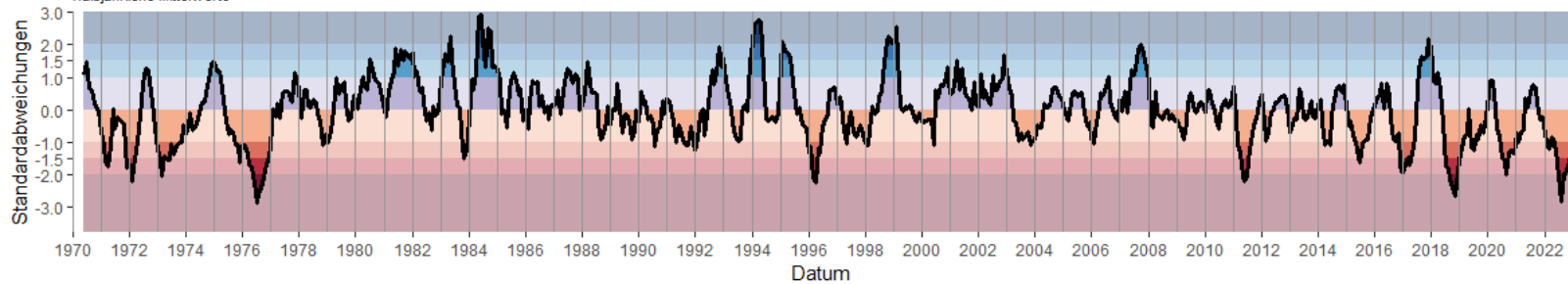


Stationen



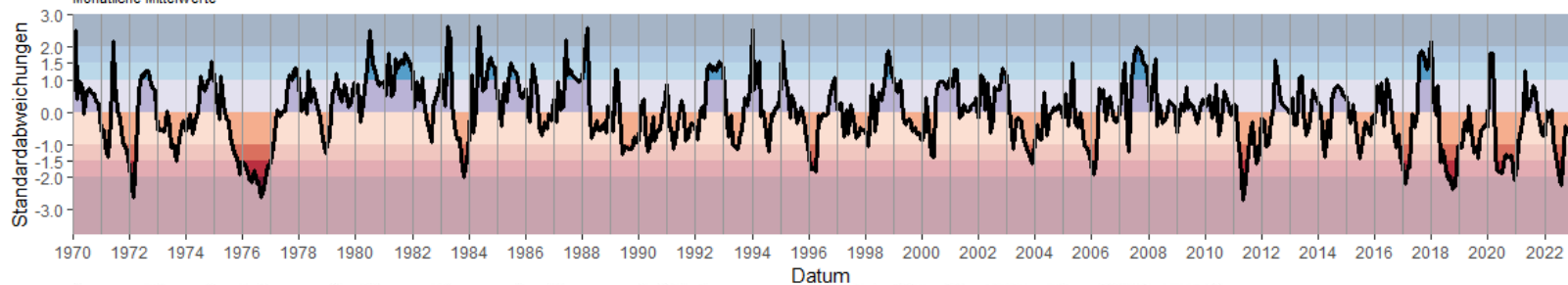
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI6)

Halbjährliche Mittelwerte



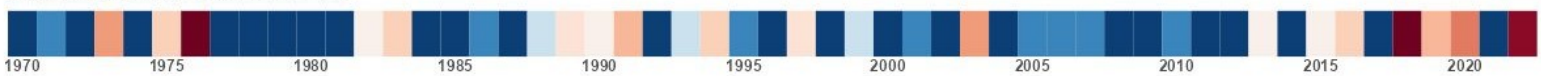
Standardized Soil Moisture Index (SSMI) für 0-200 cm Boden

Monatliche Mittelwerte

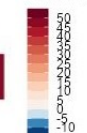


Anomalien der Tage mit einem Transpirationsverhältnis von unter 0.8 (Krofdorf Buche, 1970-2022)

Mittelwert gebildet über komplette Zeitreihe, $\mu = 11.4$



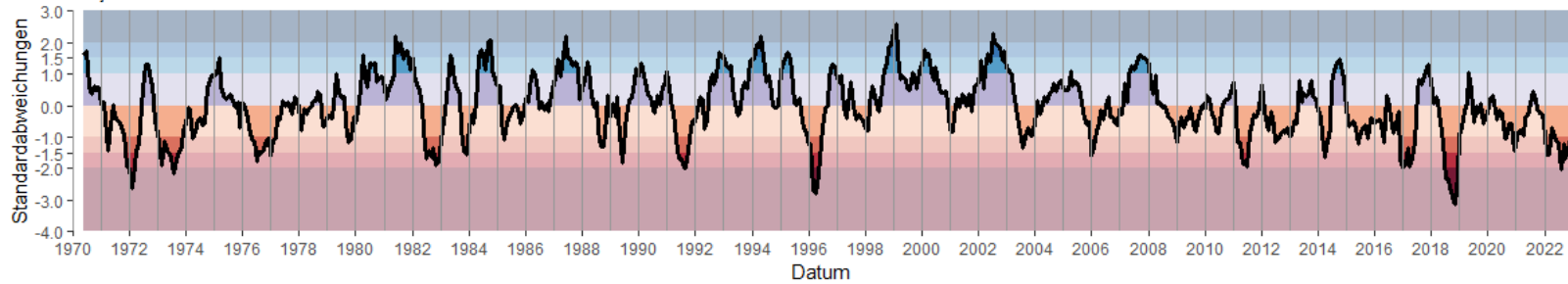
Abweichung vom Mittelwert in Tagen



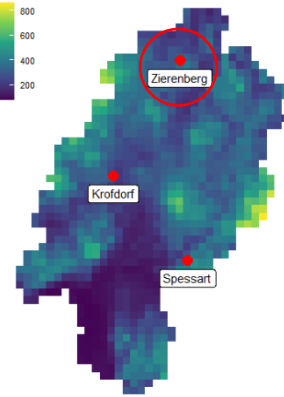
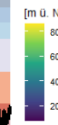
Zierenberg

Standardized Precipitation Index (SPI6)

Halbjährliche Mittelwerte

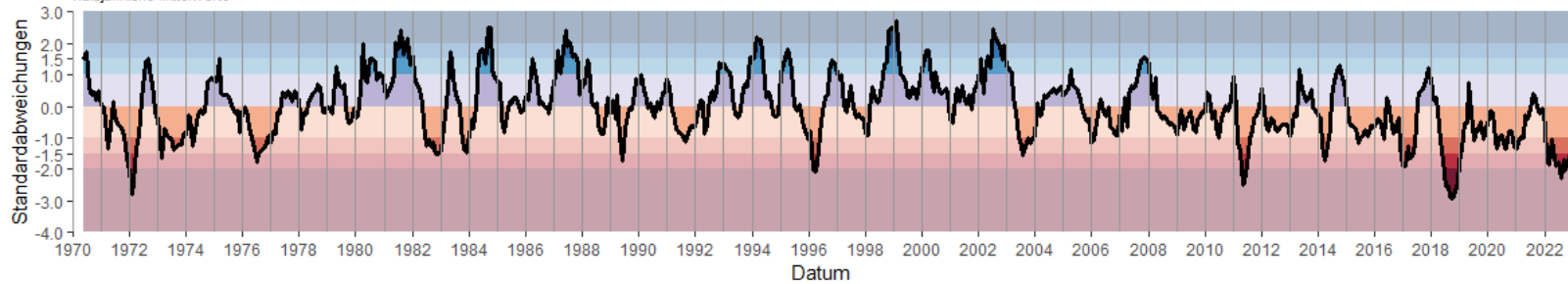


Stationen



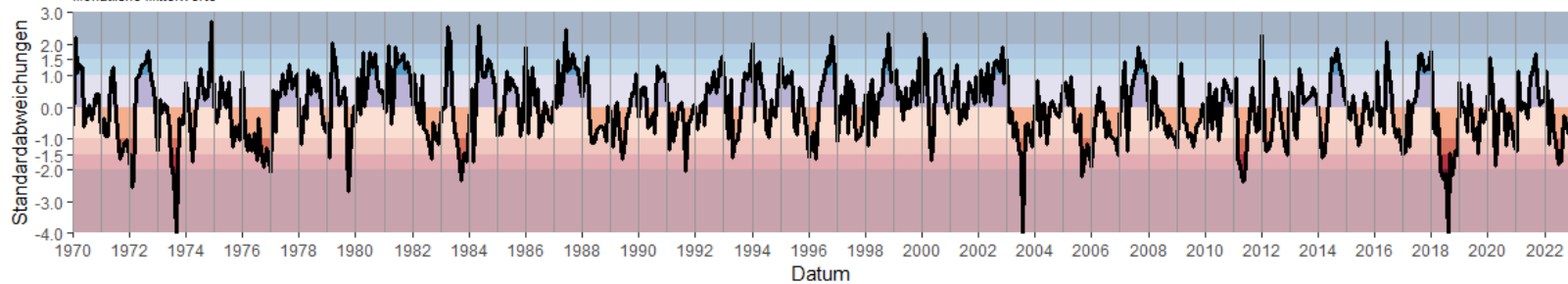
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI6)

Halbjährliche Mittelwerte



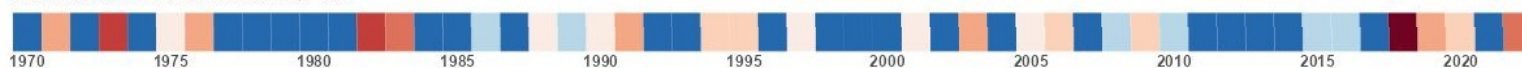
Standardized Soil Moisture Index (SSMI) für 0-200 cm Boden

Monatliche Mittelwerte

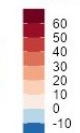


Anomalien der Tage mit einem Transpirationsverhältnis von unter 0.8 (Zierenberg Buche, 1970-2022)

Mittelwert gebildet über komplette Zeitreihe, $\mu = 17.5$



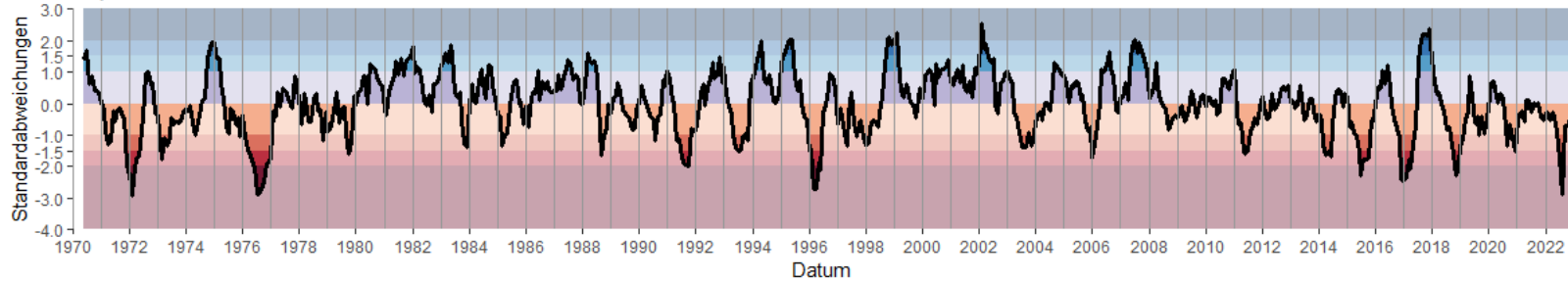
Abweichung vom Mittelwert in Tagen



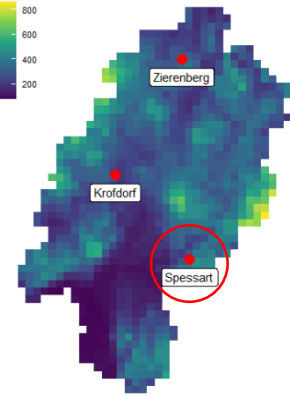
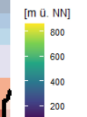
Spessart

Standardized Precipitation Index (SPI6)

Halbjährliche Mittelwerte

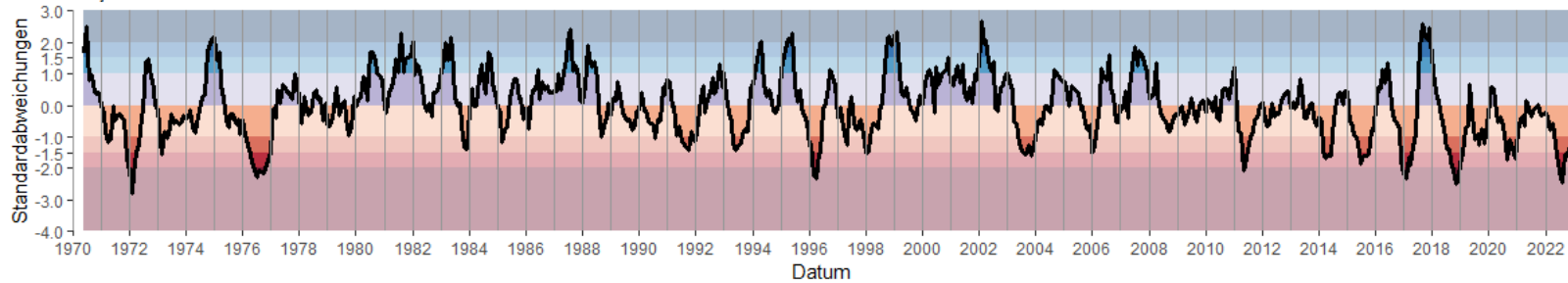


Stationen



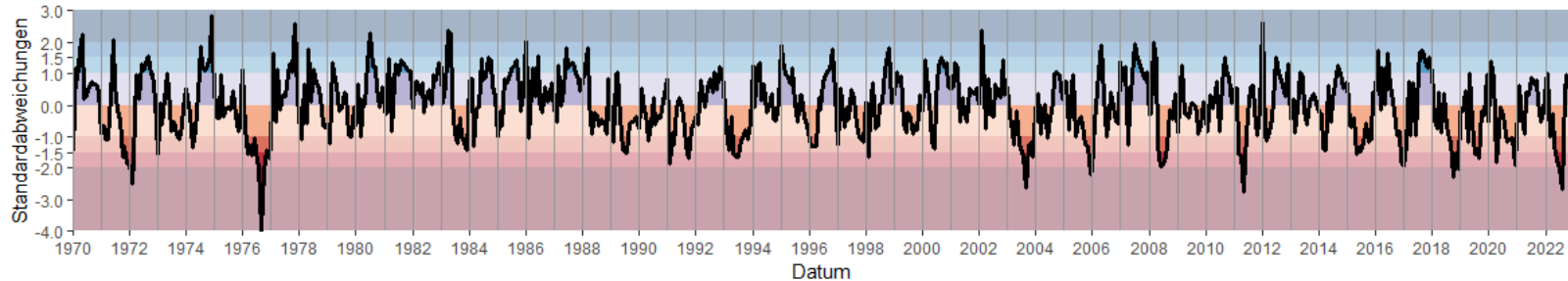
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI6)

Halbjährliche Mittelwerte



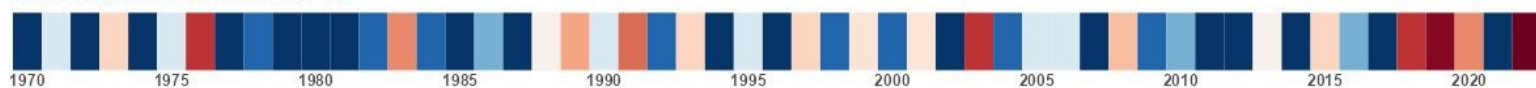
Standardized Soil Moisture Index (SSMI) für 0-200 cm Boden

Monatliche Mittelwerte



Anomalien der Tage mit einem Transpirationsverhältnis von unter 0.8 (Spessart Buche, 1970-2022)

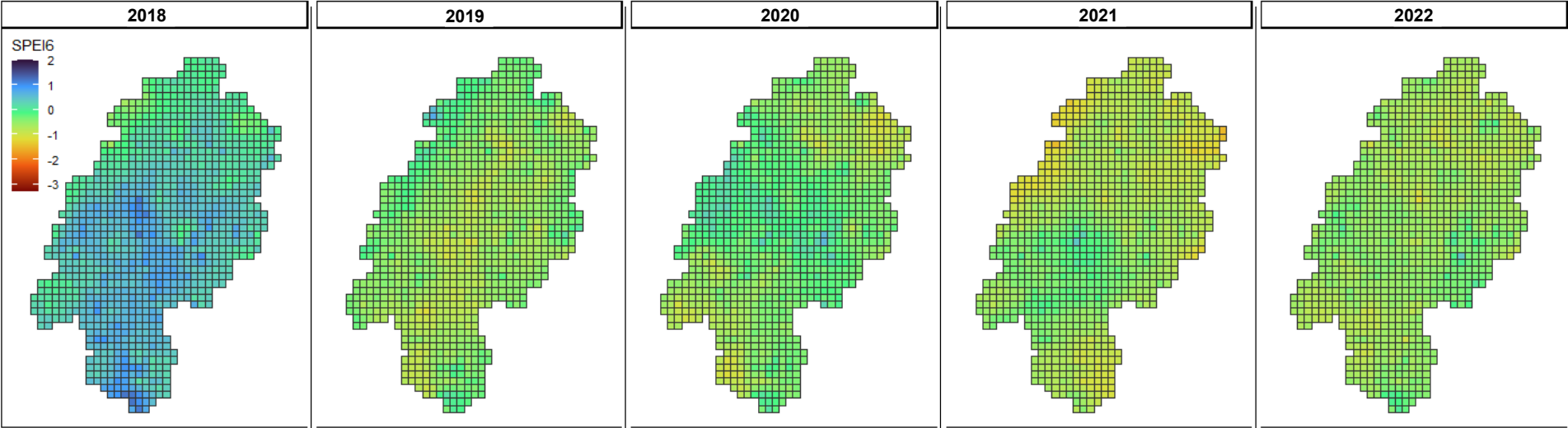
Mittelwert gebildet über komplette Zeitreihe, $\mu = 15.7$



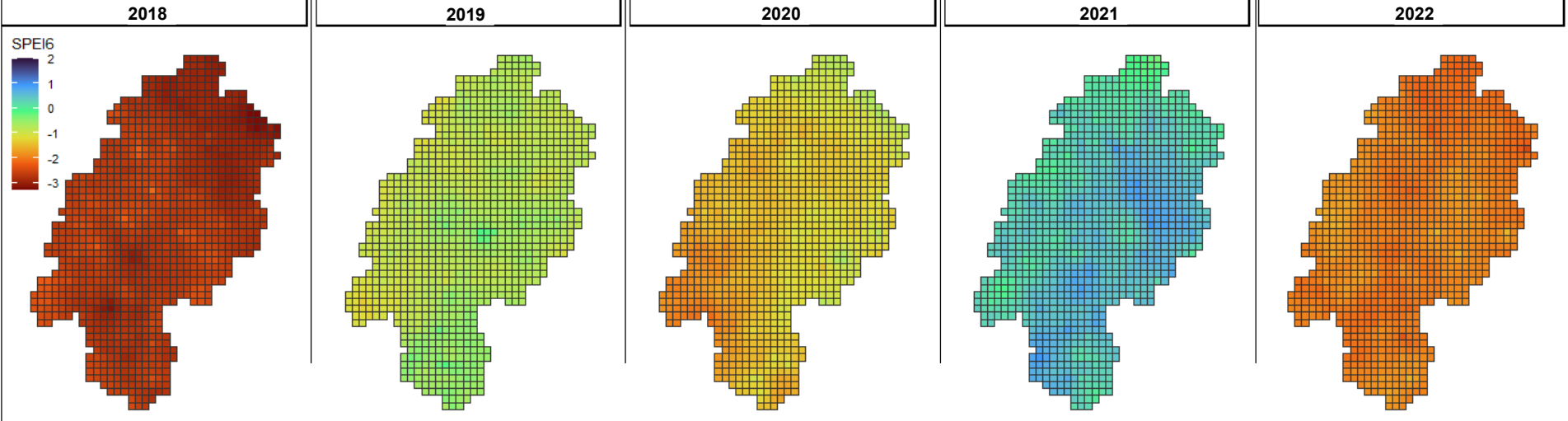
Abweichung vom Mittelwert in Tagen



SPEI in der Vegetationsruhe (Berechnet aus der KWB-Summe Nov. - Apr.)



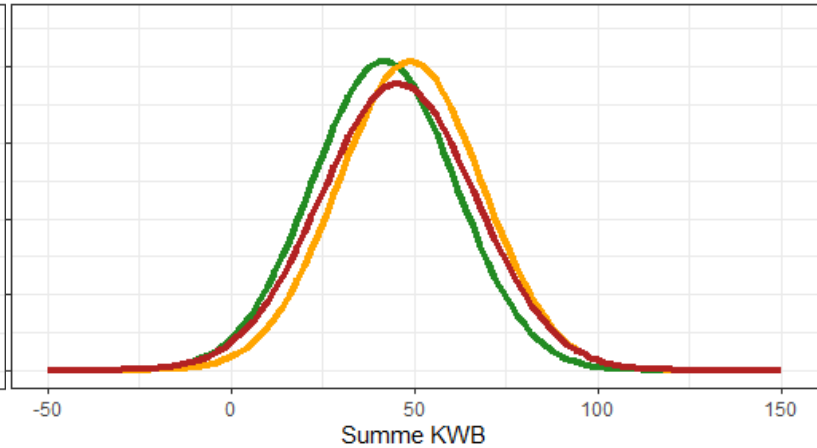
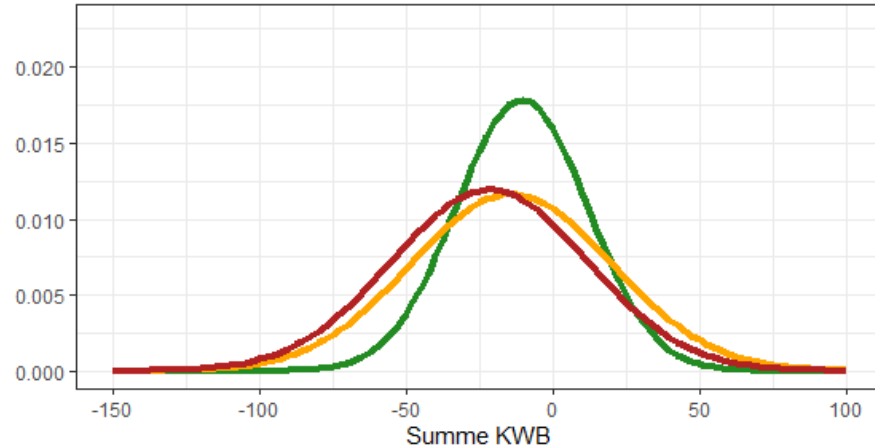
SPEI in der Vegetationszeit (Berechnet aus der KWB-Summe Mai - Okt.)



KWB bis 2100 Hessen

EC-RAC Hessen 1951-2100
Vegetationszeit Mai-Okt.

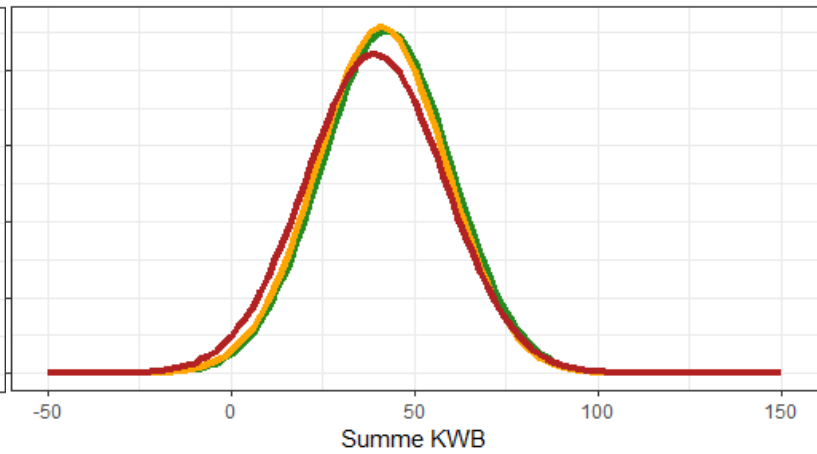
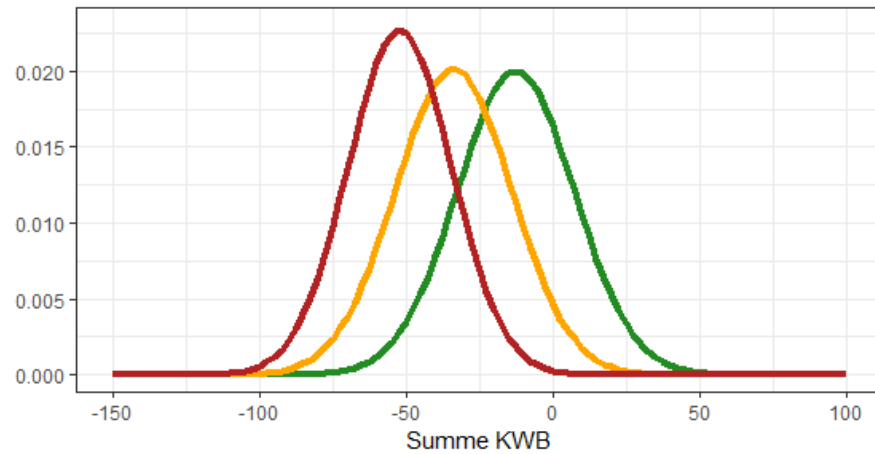
EC-RAC Hessen 1951-2100
Vegetationsruhe Nov.-Apr.



Zeitraum
— 1951-2019
— 2020-2059
— 2060-2100

HAD-WR13 Hessen 1951-2100
Vegetationszeit Mai-Okt.

HAD-WR13 Hessen 1951-2100
Vegetationsruhe Nov.-Apr.



Zeitraum
— 1951-2019
— 2020-2059
— 2060-2100

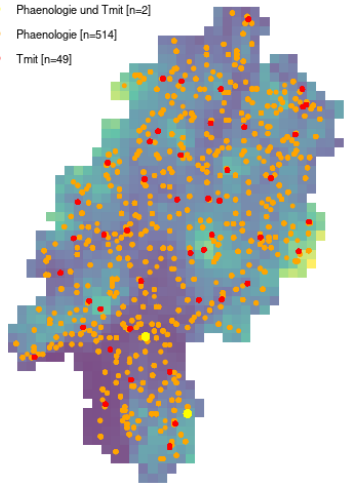
Zukünftiges Spätfrostrisiko Stieleichen

Beobachtete Phänologie Daten 1950-2020

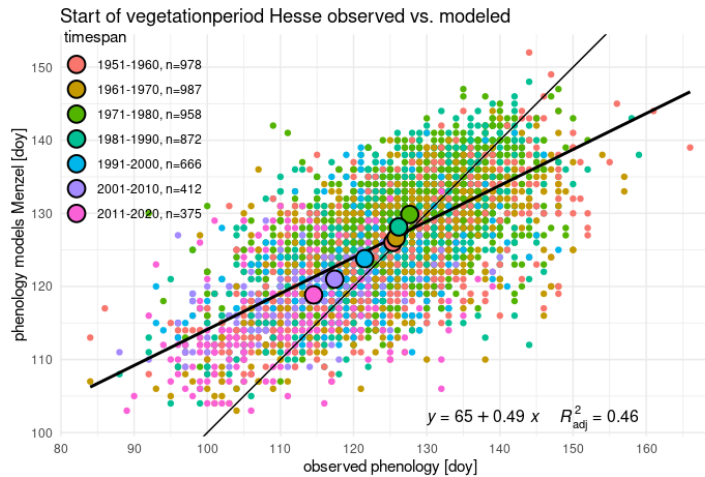
DWD Stationen Hessen

Stationen

- Phaenologie und Tmit [n=2]
- Phaenologie [n=514]
- Tmit [n=49]



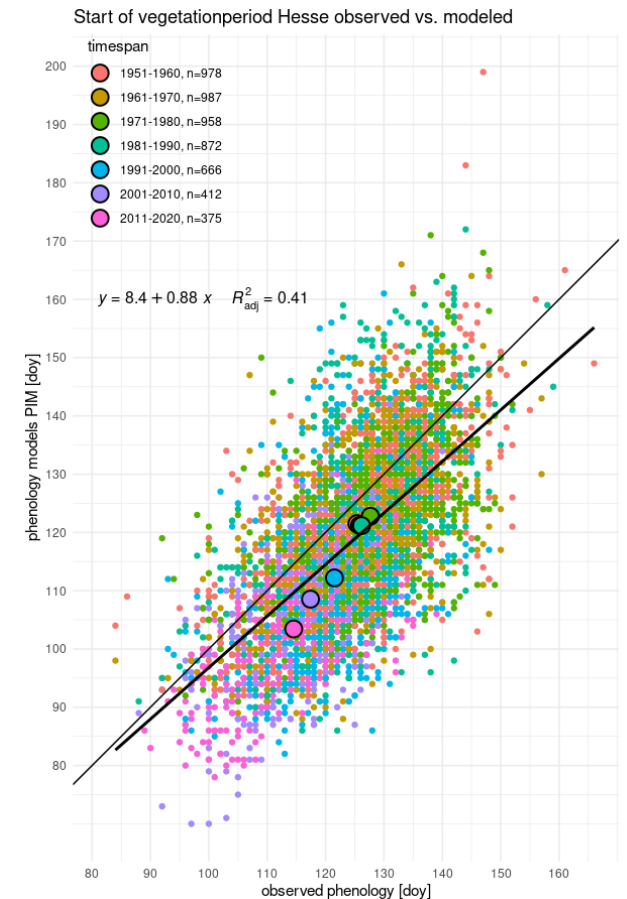
Methode 1: Temperatursummenmodell (Menzel 1997)



Ab den 1990ern zunehmende Abweichungen der Modelle von den beobachteten Daten

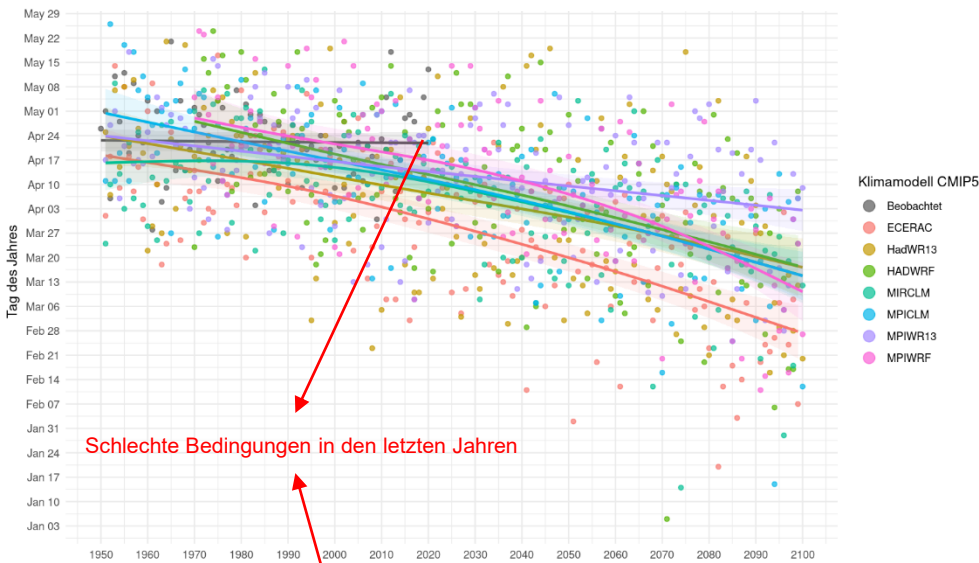
- **Menzel:**
Modellierter Vegetationsbeginn später als Beobachtungen
- **Schaber & Badeck:**
Modellierter Vegetationsbeginn früher als Beobachtungen

Methode 2: Promoter-Inhibitor-Modell (Schaber & Badeck 2003)



Zukünftiges Spätfrostrisiko Stieleichen

Letzter Frost Hessen 1951-2100

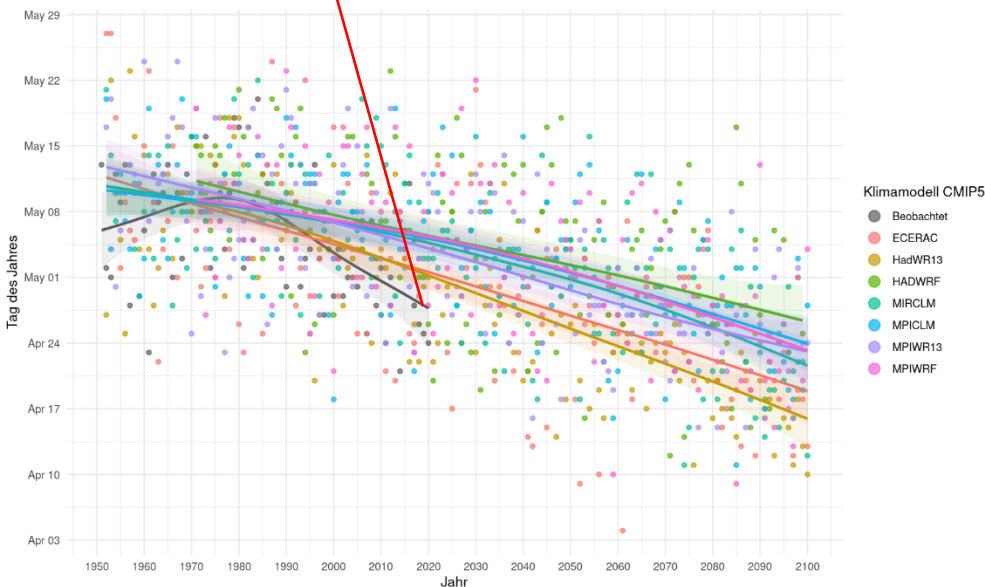


Verschiebung des letzten Frühjahresfrostes von Mitte/Ende April (1951) auf Mitte/Ende März (2100)

→ **Vorverlegung des letzten Frühjahresfrostes um ca. einen Monat**

Ganze Spannweite 2100:
Ende Februar (**ECERAC**)
Anfang April (**MPI-WR13**)

Vegetationsbeginn quercus robur nach Menzel 1951-2100



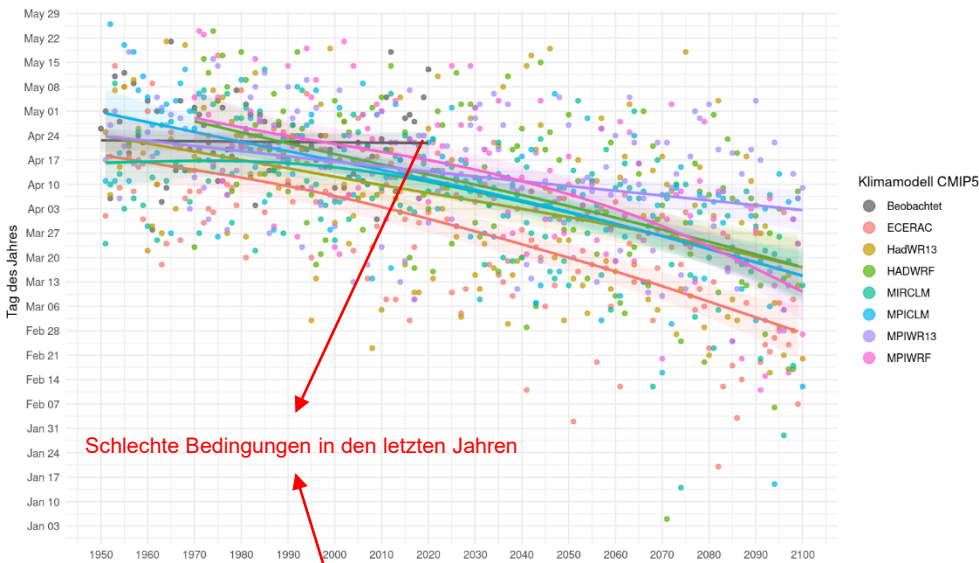
Verschiebung des Vegetationsbeginn nach Menzel von Anfang/Mitte Mai (1951) auf Mitte/Ende April

→ **Vorverlegung des Vegetationsbeginns um ca. 3 Wochen**

Ganze Spannweite 2100:
Mitte April (**HAD-WR13**)
Ende April (**HAD-WRF**)

Zukünftiges Spätfrostrisiko Stieleichen

Letzter Frost Hessen 1951-2100

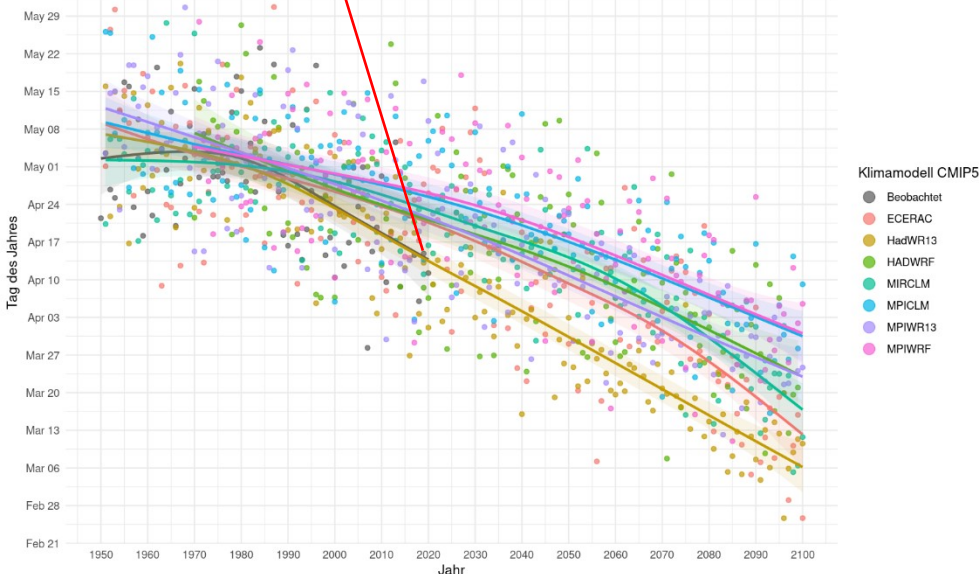


Verschiebung des letzten Frühjahresfrostes von Mitte/Ende April (1951) auf Mitte/Ende März (2100)

→ **Vorverlegung des letzten Frühjahresfrostes um ca. einen Monat**

Ganze Spannweite 2100:
Ende Februar (**ECERAC**)
Anfang April (**MPI-WR13**)

Vegetationsbeginn quercus robur nach Schaber & Badeck



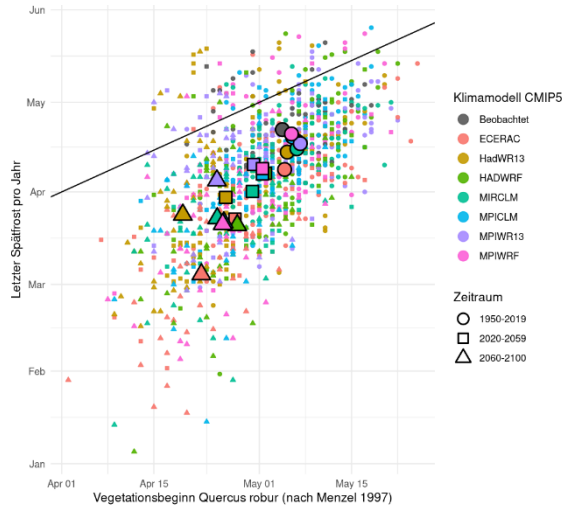
Verschiebung des Vegetationsbeginn nach Schaber & Badeck von Anfang/Mitte Mai (1951) auf Mitte/Ende März

→ **Vorverlegung des Vegetationsbeginns um ca. 6-8 Wochen**

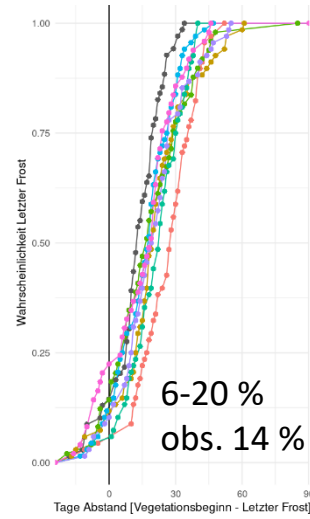
Ganze Spannweite 2100:
Anfang März (**HAD-WR13**)
Anfang April (**MPI-WRF**)

Zukünftiges Spätfrostisiko Stieleichen (Methode 1 Ergebnisse)

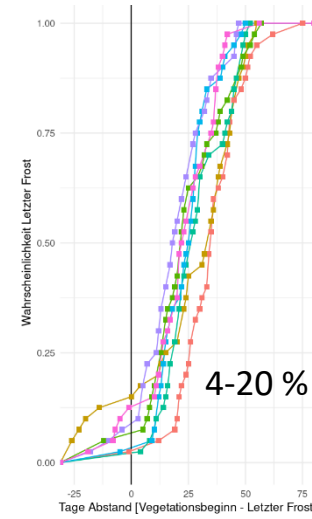
Vegetationsbeginn vs. letzter Frost
Flächen **unter** 400 m ü. NN (ca. 80 % Hessen)



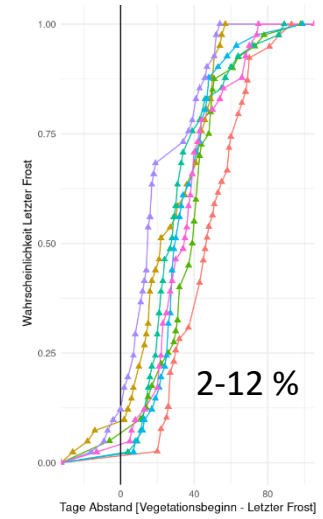
1950-2019



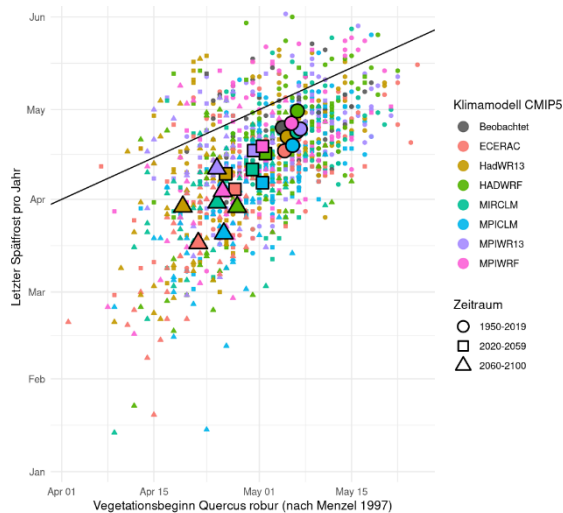
2020-2059



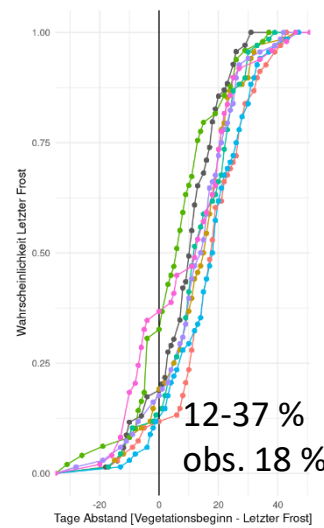
2060-2100



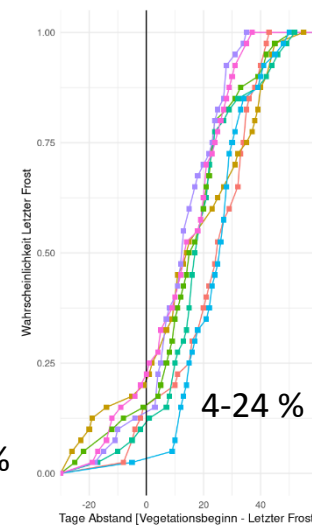
Vegetationsbeginn vs. letzter Frost
Flächen **über** 400 m ü. NN (ca. 20 % Hessen)



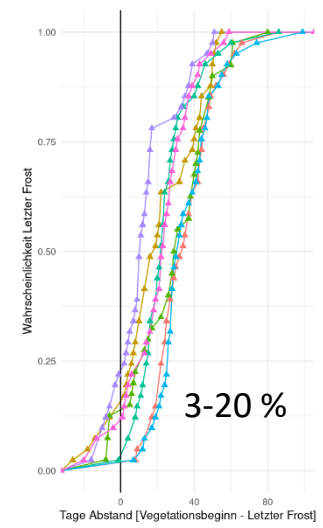
1950-2019



2020-2059

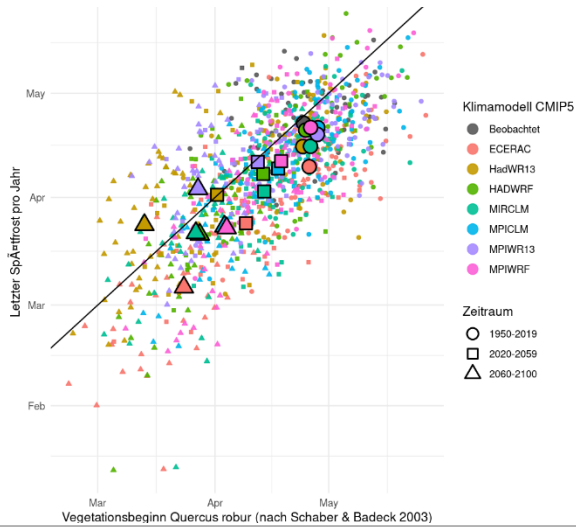


2060-2100

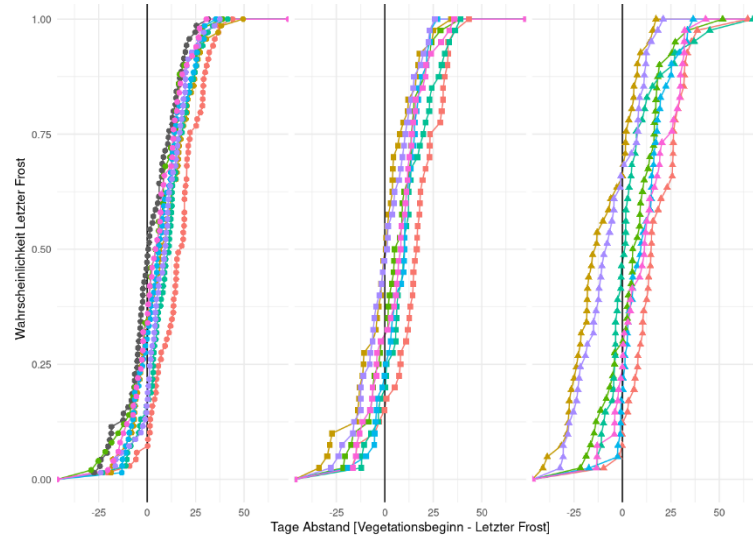


Zukünftiges Spätfrostrisiko Stieleichen (Methode 2 Ergebnisse)

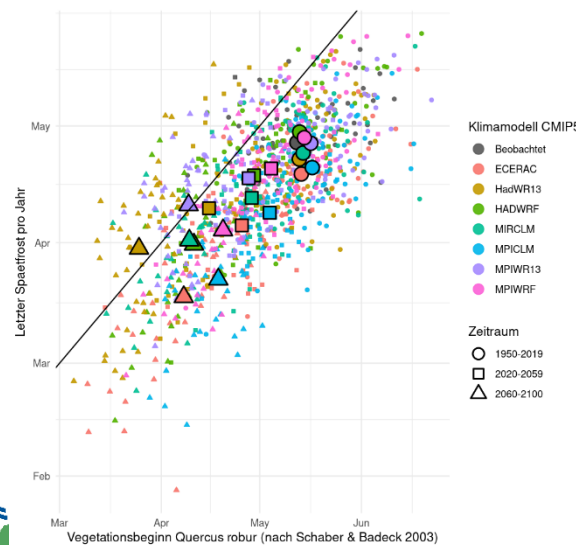
Vegetationsbeginn vs. letzter Frost
Flächen **unter** 400 m ü. NN (ca. 80 % Hessen)



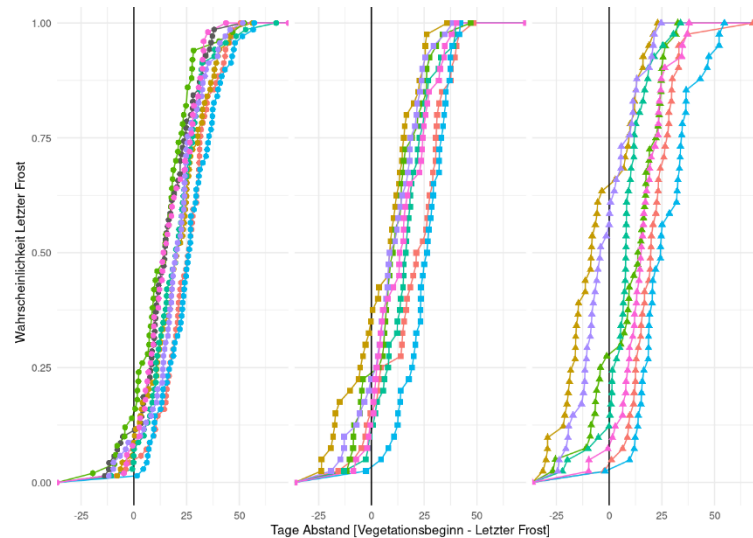
1950-2019 2020-2059 2060-2100



Vegetationsbeginn vs. letzter Frost
Flächen **über** 400 m ü. NN (ca. 20 % Hessen)



1950-2019 2020-2059 2060-2100



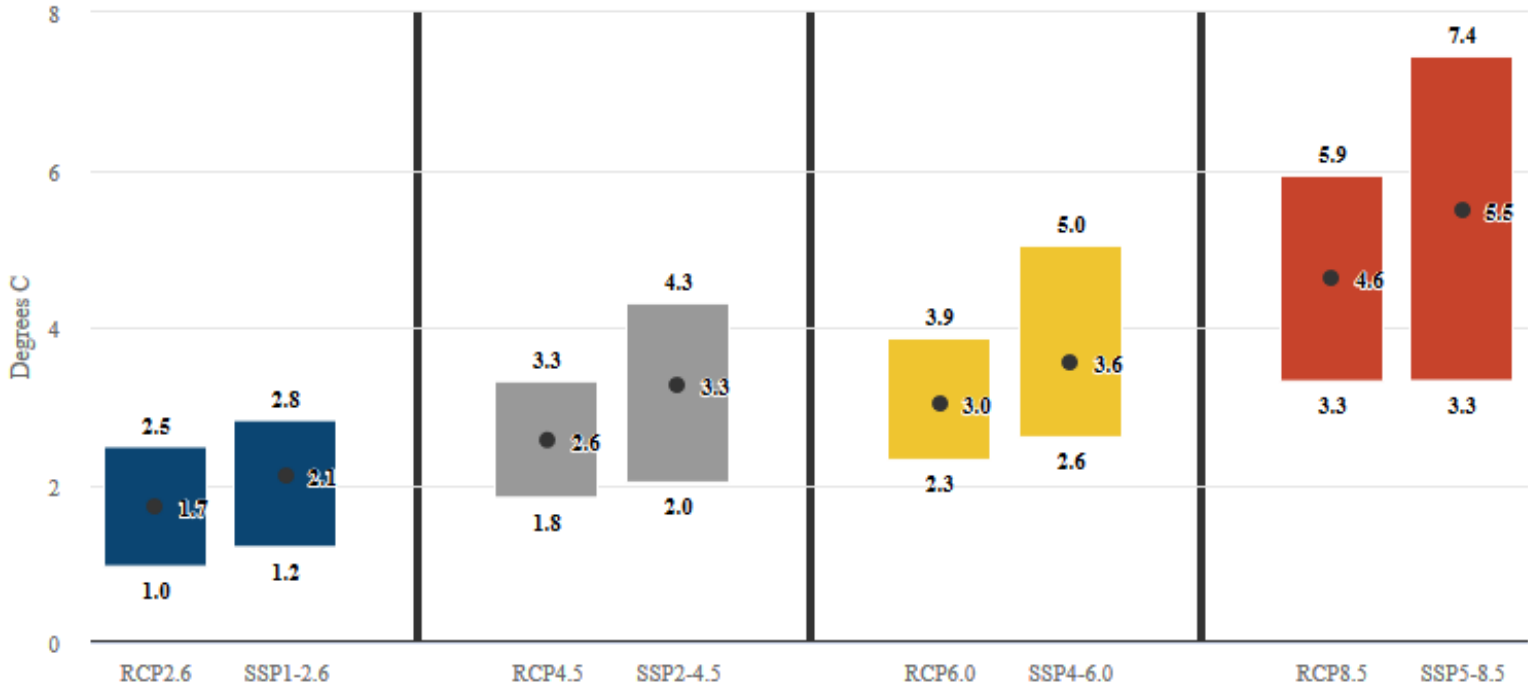
Fazit

- 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
Isabella.Smekal@nw-fva.de