

LfU-Infoblatt zu Klima-Faktenblättern

Grundlagen und Verwendung der Klima-Faktenblätter für Bayern

Für die Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel helfen regional differenzierte Angaben, wie sich das Klima bisher verändert hat und wie es sich in Zukunft verändern wird. Die Klima-Faktenblätter des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) stellen diese Informationen für Gesamtbayern und sieben bayerische Klimaregionen dar. Das vorliegende Infoblatt beschreibt die zugrundeliegenden Daten und Methoden. Um die Inhalte der Klima-Faktenblätter richtig interpretieren zu können, weisen wir auf die Grenzen der Methodik hin und geben Hinweise, wie die Inhalte zu lesen sind. Eine detaillierte fachliche Beschreibung der zugrundeliegenden Daten und Methoden findet sich im „LfU-Infoblatt zu Klimadaten“ [1], welches auf der LfU-Homepage frei verfügbar ist. Für weitere Fachinformationen sei auf die „Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ [2] verwiesen.

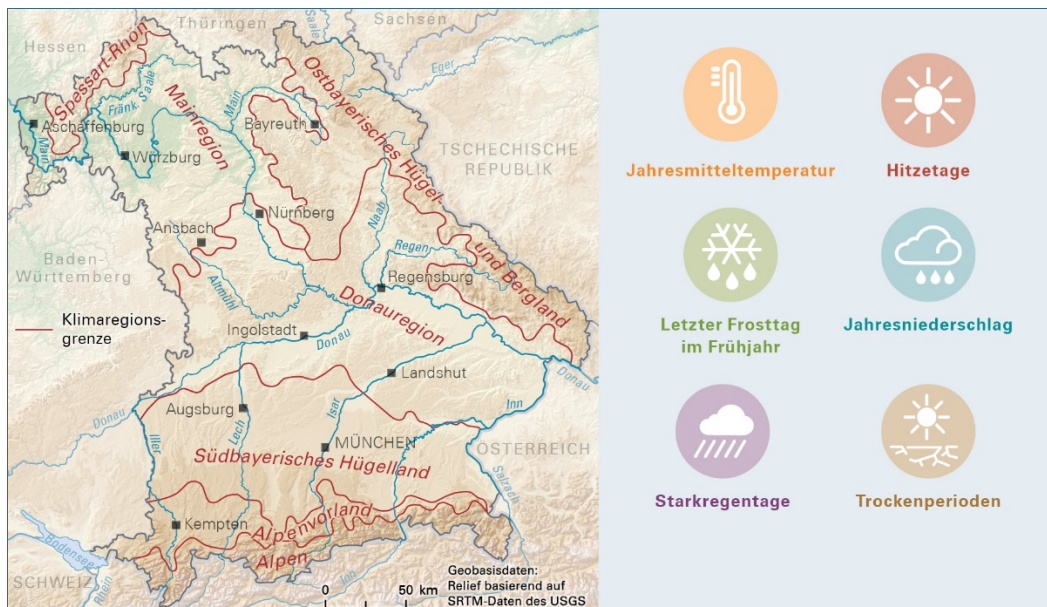


Abb. 1: Icons: Beispiele für klimatische Kennwerte, die in den Klima-Faktenblättern ausgewertet sind. Bayernkarte: Aufteilung in die Klimaregionen.

1 Zusammenfassung

Kapitel		Aussage/Hinweis
2.1	Eine Projektion ist keine Prognose	Klimasimulationen beschreiben mögliche Entwicklungen, sind aber keine Vorhersagen.
2.2	Globale und regionale Klimamodelle	Die Klima-Faktenblätter beruhen auf Simulationen regionaler Klimamodelle mit einer Auflösung von 12,5 km x 12,5 km.
2.3	Das Bayerische Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble)	Aus den verfügbaren Klimasimulationen wurden diejenigen ausgewählt, die für Bayern plausible Werte in der Vergangenheit liefern.
2.4	Aufbereitung der Daten für Bayern	Die Auflösung der Klimasimulationen wurde rechnerisch auf fünf km erhöht und eine Bias-Adjustierung durchgeführt.
2.5	Berechnung klimatischer Kennwerte	Aus den Daten der Modelle wurden anwendungsbezogene klimatische Kennwerte berechnet.
2.6	Aufteilung Bayerns in sieben Klimaregionen	Die Klima-Faktenblätter gibt es für ganz Bayern und sieben bayerische Klimaregionen.
2.7	Klima-Faktenblätter für bayerische Regionen	Angegeben ist der bisherigen Trend sowie die Ergebnisse des Bayern-Ensembles für die Zukunft.
3.1	Weshalb gibt es die Klima-Faktenblätter nur für ausgedehnte Regionen und nicht für einzelne Städte oder Gemeinden?	Die Auswertung einzelner Gitterzellen einer Klimasimulation ist fachlich nicht korrekt. Die Minimalgröße einer Region, für die Flächenmittel angegeben werden können, ist 1.500 km ² .
3.2	Weshalb werden nur Mittelwerte über 30 Jahre angegeben?	Das Klima wird immer über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren betrachtet. Die Angabe von Kennwerten für einzelne Jahre in der Zukunft ist unzulässig.
3.3	Ab wann ist eine Abweichung vom Mittelwert der Vergangenheit eine Veränderung des Klimas?	Nur Abweichungen, die über den Schwankungsbereich des Mittelwertes aus der Vergangenheit hinausgehen, werden als Klimaveränderungen interpretiert.
3.4	Aussagen zu Extremereignissen	Aussagen zu Extremereignissen (z. B. Sturzfluten) lassen die verwendeten Klimamodelle nicht zu.
3.5	Spannbreite der Klimasimulationen	Für jeden Kennwert wird das Minimum, der Median und das Maximum des Bayern-Ensembles für die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 angegeben.
3.6	Spezialfall Stadtklima	Die Klima-Faktenblätter gelten nicht für die Situation innerhalb einer Stadt.

2 Vom Emissionsszenario zum Klima-Faktenblatt

2.1 Eine Projektion ist keine Prognose

Bei der Wettervorhersage berechnet man ausgehend vom aktuellen Zustand der Atmosphäre die Entwicklung des Wetters der nächsten Tage. In so kurzen Zeiträumen ändern sich weder die natürlichen noch die menschengemachten Rahmenbedingungen (z. B. die Menge der Treibhausgase in der Luft oder die Landnutzung). Die Simulation stellt die *wahrscheinliche* Weiterentwicklung des Wetters dar. Man spricht hierbei von einer „Prognose“.

Bei der Simulation des Klimas über mehrere Jahrzehnte kann man jedoch nicht von konstanten Rahmenbedingungen ausgehen. So ist unklar, wie sich die Menge an Treibhausgasen in der Luft in den nächsten 100 Jahren tatsächlich ändern wird, da dies maßgeblich von politischen Entscheidungen abhängt. Aus diesem Grund gibt es sogenannte Szenarien, welche unterschiedliche Entwicklungen der menschengemachten Rahmenbedingungen beschreiben. Die Klima-Faktenblätter des LfU basieren auf zwei verschiedenen Szenarien (RCP2.6 und RCP8.5), welche der Weltklimarat IPCC [3] ebenfalls verwendet. Das Szenario RCP2.6 beschreibt ein Szenario mit Klimaschutz, bei dem die globale Erwärmung auf 2,0 °C gegenüber dem vorindustriellen Klima begrenzt werden könnte. Hierfür müssten die Treibhausgasemissionen zeitnah reduziert werden und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts netto auf null sinken. Das Szenario RCP8.5 beschreibt eine Entwicklung ohne Klimaschutz mit weiterhin steigenden Treibhausgasemissionen (s. Abb. 2). Die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 stellen jeweils eine einzelne *mögliche* Entwicklung der Treibhausgasemissionen dar. In der Vergangenheit lagen die CO₂-Emissionen zuletzt in etwa auf jenen des Szenarios ohne Klimaschutz (s. Abb. 2). Für die Zukunft lässt sich daraus aber kein Schluss ziehen. Klimaschutzmaßnahmen können die Emissionen senken. In den internationalen Klimaverhandlungen wurde im Jahr 2015 mit dem Pariser Übereinkommen erstmals eine vertragliche Struktur geschaffen, welche vorsieht, die jeweiligen nationalen Klimaschutzmaßnahmen Schritt-für-Schritt zu verstärken, um die globale Erwärmung deutlich unter 2,0 °C zu begrenzen. Die Gesamtemissionen bis 2100 müssen dafür geringer ausfallen als jene des Szenarios RCP2.6 (Budget-Ansatz). Die gemessenen jährlichen Emissionen bis 2018 liegen deutlich oberhalb des Szenarios RCP2.6 (s. Abb. 2). Aufgrund der übermäßigen jährlichen Emissionen bis 2018 müssen in Zukunft die Emissionen also schneller reduziert werden als im Szenario RCP2.6 angezeigt. Nur so kann die Summe der Emissionen ausreichend begrenzt werden. Weitere Informationen zum Budget-Ansatz, zur internationalen Klimapolitik und zu den RCP Szenarien finden sich im Klima-Report Bayern 2021 (Kap. 1, 2 in [4]).

Ein Szenario beschreibt also eine *Möglichkeit*, die als Basis für politische Entscheidungen genutzt werden kann. Dieser *Möglichkeit* kann aber keine *Wahrscheinlichkeit* zugeordnet werden: Politische Prozesse können nicht berechnet werden. Um dies zu verdeutlichen, spricht man bei Simulationen des Klimas nicht von „Prognosen“, sondern von „Projektionen“.

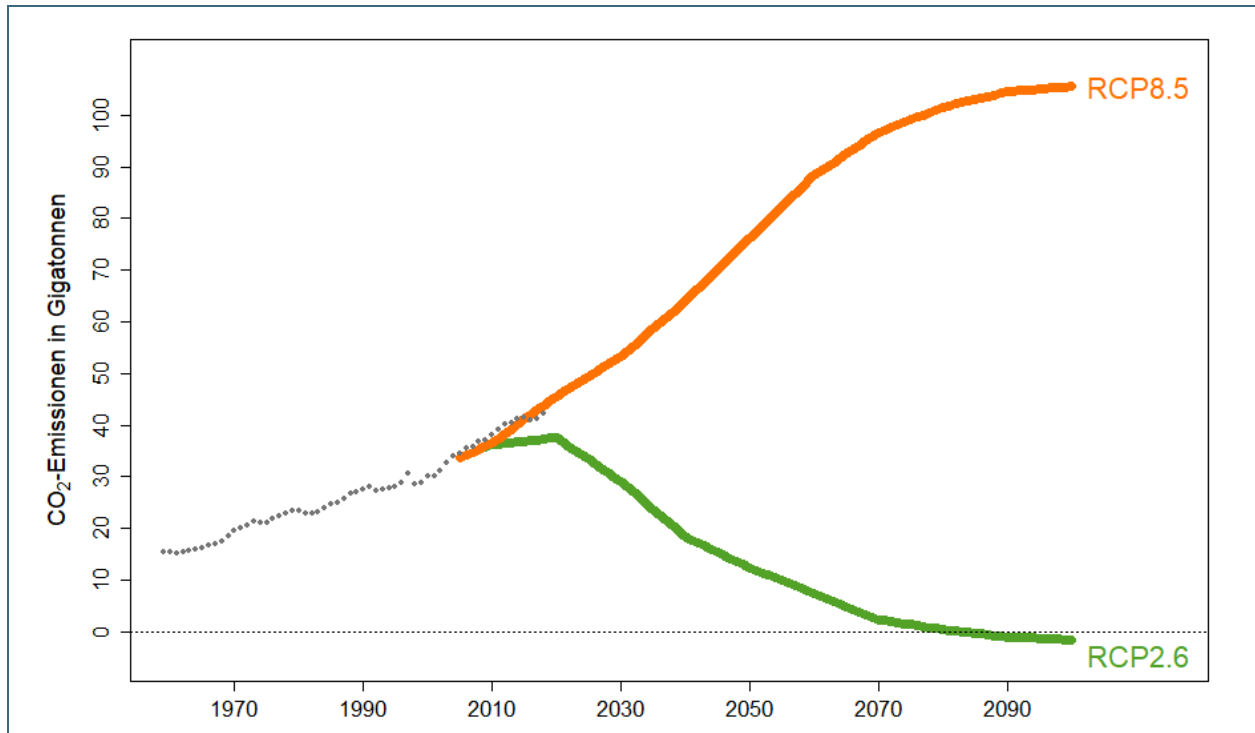


Abb. 2: Die Entwicklung der CO₂-Emissionen (Kohlenstoffdioxid) in der Vergangenheit und unter den beiden Emissionsszenarien RCP2.6 (mit Klimaschutz) und RCP8.5 (ohne Klimaschutz). Die Abbildung basiert auf Daten des Global Carbon Budget 2019 [5] und des Weltklimarates IPCC [3].

2.2 Globale und regionale Klimamodelle

Klimamodelle beschreiben die physikalisch-chemischen Vorgänge im Klimasystem Erde mittels mathematischer Gleichungen. Globale Klimamodelle umfassen den gesamten Globus und berechnen das Klima für eine relativ grobe räumliche Auflösung. Das heißt, die Gitterzellen sind meist über 100 km x 100 km groß. Deshalb können die globalen Modelle kleinräumigere Prozesse, wie zum Beispiel in Mittelgebirgen, nicht oder nur näherungsweise darstellen. Daher verfeinern regionale Klimamodelle die Daten der globalen Klimamodelle. Regionale Modelle umfassen lediglich einen Teilausschnitt der Erde (z. B. Europa), haben dafür aber eine höhere räumliche Auflösung und simulieren somit auch die kleinräumigen Unterschiede realistischer (s. Abb. 3). Für die Erstellung der Klima-Faktenblätter werden regionale Klimaprojektionsdaten aus dem EURO-CORDEX-Projekt [6] und dem ReKliEs-De-Projekt [7] mit einer Auflösung von 12,5 km verwendet.

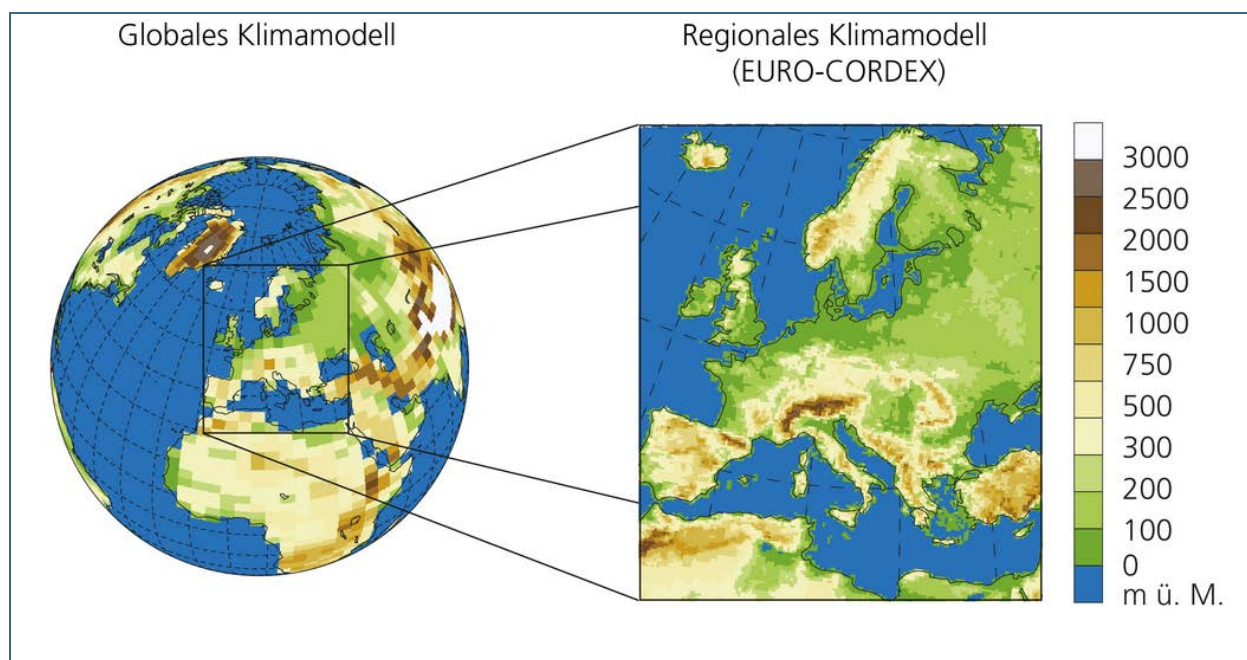


Abb. 3: Abbildung der Topographie bei verschiedenen räumlichen Auflösungen. Globale Klimamodelle haben meist eine Auflösung von mehr als 100 km x 100 km. Die regionalen Klimamodelle, welche für die Klima-Faktenblätter verwendet werden, haben eine Auflösung von 12,5 km x 12,5 km. Quelle der Abbildung: National Centre for Climate Services [8].

2.3 Das Bayerische Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble)

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Klimamodelle, die alle auf denselben physikalischen Grundgleichungen basieren, sich in den Details jedoch unterscheiden. Daher unterscheidet sich das Simulationsergebnis von Modell zu Modell, selbst wenn die Modelle mit identischen Rahmenbedingungen rechnen. Da man nicht wissen kann, welches der Modelle der tatsächlichen Entwicklung am nächsten kommt, sollten möglichst viele verschiedene Simulationen betrachtet und miteinander verglichen werden. So kann man die Spannbreite möglicher Entwicklungen abschätzen. Allerdings sind nicht alle Modelle in der Lage, das Klima einer bestimmten Region realistisch zu simulieren. Um beurteilen zu können, welche Modelle plausible Daten für ganz Bayern, inklusive der Alpenregion, liefern, führte das LfU ein Prüfverfahren [9] mit objektiven und einheitlichen Kriterien durch. Hierbei wurde das simulierte Klima für den Referenzzeitraum 1971–2000 mit Messdaten desselben Zeitraums verglichen. Es wird angenommen, dass ein Modell, welches das vergangene Klima zuverlässig simuliert, auch bei Projektionen in die Zukunft zuverlässig ist.

2.4 Aufbereitung der Daten für Bayern

Auch bei einer Auflösung der regionalen Klimamodelle von 12,5 km x 12,5 km wird komplexes Gelände (wie in den Alpen oder den Mittelgebirgen) stark geglättet: Berge werden flacher, Täler weniger tief. Aus diesem Grund erhöht man die Auflösung der Klimaprojektionsdaten in einem aufwendigen Verfahren rechnerisch auf ein 5 km x 5 km-Gitter. Dabei werden die meteorologischen Variablen (wie z. B. die Lufttemperatur) des größeren Gitters auf die Geländehöhe des feineren Gitters umgerechnet.

Ins Bayern-Ensemble wurden nur Klimamodelle aufgenommen, die die räumliche und jahreszeitliche Dynamik des Klimas in Bayern im Referenzzeitraum 1971–2000 abbilden können. Dennoch wird das vergangene Klima von den meisten Modellen nicht perfekt wiedergegeben. Beispielsweise unterschätzen manche Modelle in den Alpen ganzjährig die Temperatur. Oder der Niederschlag wird generell überschätzt. Eine solche Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Daten wird Bias genannt. Falls der Bias regelmäßigen Mustern folgt, kann man eine sogenannte Bias-Adjustierung durchführen. Diese

reduziert den Fehler, indem die Modelldaten anhand der gefundenen Muster an die Messdaten angeglichen werden. Falls die Muster nicht regelmäßig sind, kann *keine* Bias-Adjustierung durchgeführt werden. Solche Modelle wurden nicht in das Bayern-Ensemble aufgenommen. Für alle anderen nahm das LfU eine Bias-Adjustierung unter Nutzung lokaler Messdaten vor [9].

2.5 Berechnung klimatischer Kennwerte

Die verschiedenen Klimamodelle des Bayern-Ensembles liefern grundlegende meteorologische Variablen, wie z. B. die Lufttemperatur und den Niederschlag auf Tagesbasis. Für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen sind jedoch häufig klimatische Kennwerte für konkrete Anwendungen aussagekräftiger. Diese umfassen beispielsweise Kennwerte für die Wasserwirtschaft (z. B. Anzahl Starkregentage, Winterniederschlag), die Landwirtschaft (z. B. Anzahl Frosttage, Niederschlag in der Vegetationsperiode) und die Gesundheit (z. B. Anzahl Hitzetage, Anzahl Tropennächte). Diese Kennwerte werden für jede Gitterzelle (5 km x 5 km) in Bayern für alle Jahre von 1971 bis 2100 berechnet.

2.6 Aufteilung Bayerns in sieben Klimaregionen

Das Klima in Bayern ist regional sehr unterschiedlich und folgt dabei keinen Verwaltungsgrenzen, wie z. B. Regierungsbezirken. Am stärksten ist der Einfluss der Gebirge. Als grobe Faustregel gilt: In höheren Lagen nimmt die Temperatur ab und der Niederschlag zu. Zusätzliche Einflussfaktoren sind beispielsweise der Windschatten von Gebirgen oder die Entfernung zum Ozean. Für die Klima-Faktenblätter wurden deshalb sogenannte Klimaregionen ermittelt, die in sich möglichst ähnliche klimatische Bedingungen haben. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass die Regionen zusammenhängende Gebiete umfassen. Die Gliederung wurde anhand der Messwerte im Referenzzeitraum 1971–2000 vorgenommen. Dabei wurde die Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlag, sowie die Unterschiede in Temperatur und Niederschlag zwischen Sommer- und Winterhalbjahr berücksichtigt. Da die Einteilung nach einem statistischen Verfahren (s. Kapitel „Ableitung der Klimaregionen“ im Anhang) auf der Grundlage der meteorologischen Größen vorgenommen wurde, ist der Grenzverlauf der Regionen teilweise nicht in Übereinstimmung mit anderen Fachdaten. Beispielsweise fällt der Großraum Nürnberg hier in die Donauregion, obwohl er im Gewässereinzugsgebiet des Mains liegt. Wenn eine Region betrachtet werden soll, die auf oder sehr nahe an der Grenze zwischen zwei Klimaregionen liegt, sollten die Ergebnisse von beiden Regionen berücksichtigt werden.

2.7 Klima-Faktenblätter für bayerische Regionen

Um belastbare Aussagen für kleinräumige Regionen zu erhalten, müssen die Daten räumlich und zeitlich gemittelt und statistisch ausgewertet werden. Zunächst definiert man eine 30-jährige Referenzperiode in der Vergangenheit und berechnet für diese den zeitlichen Mittelwert jedes klimatischen Kennwerts pro Gitterzelle. In den Klima-Faktenblättern wird der Zeitraum 1971–2000 als Referenzperiode verwendet. Anschließend berechnet man die zeitlichen Mittelwerte für ausgesuchte 30-jährige Perioden in der Zukunft. In den Klima-Faktenblättern sind dies die „nahe“ (2021–2050), „mittlere“ (2041–2070) und „ferne Zukunft“ (2071–2100). Die Werte für die Zukunft werden dann mit den Werten der Referenzperiode verglichen. Man gibt also für die Zukunft keinen absoluten Wert an, sondern die Veränderung zur Referenzperiode. Das heißt beispielsweise, wenn es in der Referenzperiode vier Hitzetage gab und in der fernen Zukunft 26 erwartet werden, gibt man die Änderungen in der fernen Zukunft mit „+22 Tage“ an und nicht mit „26 Tage“. Aus den Werten der einzelnen Gitterzellen werden schließlich Flächenmittel für die Regionen gebildet. Da es unübersichtlich wäre, dies für jede Klimasimulation separat anzugeben, nennen die Klima-Faktenblätter den mittleren Wert (= Median) der Ergebnisse sowie die Spannbreite des Ensembles (minimale und maximale Veränderung). Genaueres hierzu finden Sie im Abschnitt „In den Klima-Faktenblättern gibt es auch Kennwerte zu Starkregen und Hitzeperioden. Dabei werden Ereignisse betrachtet, die zwar relativ selten, aber doch regelmäßig innerhalb von 30 Jahren vorkommen. Ausgesprochen extreme Ereignisse (z. B. Sturzfluten) dagegen sind darüber definiert, dass sie nur sehr selten, beispielsweise einmal in 100 Jahren auftreten. Je stärker das Ereignis, desto seltener tritt es auf. In der Statistik

sind diese beiden Werte – die Stärke und die Häufigkeit eines Ereignisses – über den Begriff „Jährlichkeit“ miteinander verknüpft. Man spricht beispielsweise von einem 100-jährlichen Ereignis, wenn im Mittel einmal in 100 Jahren ein Ereignis dieser Stärke auftritt. Ein 50-jährliches Ereignis tritt im Mittel einmal in 50 Jahren ein. Für den Blick in die Zukunft gilt auch bei Extremereignissen: Nur wenn die simulierte Veränderung über den Schwankungsbereich des Referenzklimas hinausgeht, kann man von einer Klima-Veränderung ausgehen. Das Problem ist aber, dass für seltene Extremereignisse der Schwankungsbereich im Referenzzeitraum nicht berechnet werden kann. Dies ist nur möglich, wenn im Referenzzeitraum eine ausreichende Anzahl an Einzelereignissen enthalten ist. Bei Extremereignissen, die – wenn überhaupt – nur wenige Male in einem Jahrhundert auftreten, ist dies jedoch nicht der Fall. Für eine statistisch belastbare Berechnung müssten die Zeitreihen mehrere Jahrhunderte umfassen. Daher verzichten wir in den Klima-Faktenblättern auf Aussagen zu solchen zukünftigen Extremereignissen.

Spannbreite der Klimasimulationen“ im Anhang.

Für die Klima-Faktenblätter der Vergangenheit wird der Bayerische Beobachtungsdatensatz BayObs [1] ausgewertet. Neben dem Mittelwert in der Referenzperiode 1971–2000 und der bislang bereits beobachteten Änderung des Mittelwerts wird ein Trend für den erweiterten Zeitraum seit 1951 berechnet. Dieser gibt an, wie sich die Kennwerte im Schnitt seit 1951 entwickelt haben. Der Bayerische Beobachtungsdatensatz BayObs [1] setzt sich zusammen aus dem E-OBS-Datensatz [10] für die Temperatur und dem REGNIE-Datensatz für den Niederschlag [11]. Im Alpenraum wird für die Temperatur statt der E-OBS-Daten der HYRAS3.0-Datensatz [11, 12] verwendet, da diesem eine höhere Stationsdichte zugrunde liegt. Allerdings liegen bei HYRAS3.0 nur Daten bis 2015 vor. Auf den Alpenraum begrenzte Temperatur-trends werden deshalb nur bis 2015, nicht bis 2019, angegeben. Auf die Trends für Gesamtbayern wirkt sich der Unterschied zwischen den Datensätzen nicht aus.

3 FAQs und Hinweise zur Verwendung der Klima-Faktenblätter

3.1 Weshalb gibt es die Klima-Faktenblätter nur für ausgedehnte Regionen und nicht für einzelne Städte oder Gemeinden?

Viele der physikalisch-chemischen Prozesse, die in einem Klimamodell abgebildet sind, haben eine große räumliche Ausdehnung und erstrecken sich über mehrere Gitterzellen. Der Gesamtprozess kann dabei deutlich besser simuliert werden als die kleinräumigen Variationen. Aus diesem Grund dürfen keine einzelnen Gitterzellen ausgewertet werden. Für eine belastbare Aussage werden stattdessen räumliche Mittelwerte über größere Regionen gebildet, welche mindestens neun Gitterzellen umfassen sollten (ein Quadrat von drei mal drei Gitterzellen). Bei einer räumlichen Auflösung der Klimasimulationen von 12,5 km müssen die ausgewerteten Raumeinheiten daher mindestens eine Fläche von etwa 1.500 km² haben. Aussagekräftige Werte ergeben sich jedoch nur dann, wenn das Klima innerhalb dieser Raumeinheiten möglichst einheitlich ist. Für die Klima-Faktenblätter hat das LfU daher klimatisch ähnliche Gebiete in sieben bayerischen Klimaregionen zusammengefasst. Details dazu sind im Kapitel „Die verschiedenen Klimamodelle des Bayern-Ensembles liefern grundlegende meteorologische Variablen, wie z. B. die Lufttemperatur und den Niederschlag auf Tagesbasis. Für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen sind jedoch häufig klimatische Kennwerte für konkrete Anwendungen aussagekräftiger. Diese umfassen beispielsweise Kennwerte für die Wasserwirtschaft (z. B. Anzahl Starkregentage, Winterniederschlag), die Landwirtschaft (z. B. Anzahl Frosttage, Niederschlag in der Vegetationsperiode) und die Gesundheit (z. B. Anzahl Hitzetage, Anzahl Tropennächte). Diese Kennwerte werden für jede Gitterzelle (5 km x 5 km) in Bayern für alle Jahre von 1971 bis 2100 berechnet.

Aufteilung Bayerns in sieben Klimaregionen“ und im Anhang unter „Ableitung der Klimaregionen“ zu finden.

3.2 Weshalb werden nur Mittelwerte über 30 Jahre angegeben?

Rein rechnerisch liefern die Klimamodelle tatsächlich für jeden Tag der Zukunft (aktuell bis 2100) Werte. Diese Simulationen dürfen jedoch nicht mit einer Wettervorhersage verwechselt werden. Bei einer Wettervorhersage wird ausgehend vom aktuellen Zustand – der über Messungen in die Wettervorhersagemodelle einfließt – die Entwicklung der nächsten Tage berechnet. Die Berechnungen der Klimamodelle hängen jedoch nicht vom aktuellen Zustand ab. Sie simulieren eine physikalisch sinnvolle, aber zufällige Abfolge von Wettersituationen, die unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen möglich sind. Genau wie in der Vergangenheit wird es auch in Zukunft wärmere und kältere Jahre geben, trockenere und nassere. Klimamodelle können diese Variationen abbilden, die jährliche Zuordnung ist jedoch reiner Zufall. So kann z. B. das Wetter im Jahr 2057 nicht vorhergesagt werden! Es ist allerdings möglich zu sagen, wie warm, kalt, trocken oder nass es im Durchschnitt über längere Zeiträume wird. Da das Klima als das mittlere Wetter über eine Periode von 30 Jahren definiert ist, werden in den Klima-Faktenblättern 30-jährige Mittelwerte angegeben. Dadurch sind die Werte auch direkt vergleichbar mit dem 30-jährigen Referenzzeitraum 1971–2000.

3.3 Ab wann ist eine Abweichung vom Mittelwert der Vergangenheit eine Veränderung des Klimas?

Auch ohne Klimawandel variiert das Wetter von Jahr zu Jahr. Es gibt warme und kalte, trockene und nasse, und natürlich auch durchschnittliche Jahre. Es geht also darum, entscheiden zu können, ob eine Abweichung zwischen einer zukünftigen Periode und der Referenzperiode bereits eine Klimaveränderung darstellt oder lediglich eine Variation desselben Klimas ist. Dies wird über eine statistische Auswertung von Messdaten bestimmt (s. Kapitel „Schwankungsbereiche“ im Anhang). Für jeden Kennwert wird dabei ein Schwankungsbereich bestimmt, in welchem ein 30-jähriger Mittelwert unter den Rahmenbedingungen des Referenzzeitraums 1971–2000 mit einer hohen Wahrscheinlichkeit liegen würde. Wenn sich der Median des Bayern-Ensembles in einer zukünftigen 30-jährigen Periode außerhalb des Schwankungsbereiches der Referenzperiode befindet, interpretieren wir die Abweichung als Klimaveränderung. Liegt der Median innerhalb des Schwankungsbereiches, so wird die Abweichung als eine Variation desselben Klimas betrachtet. In den Tabellen der Klima-Faktenblätter sind Abweichungen, die den Schwankungsbereich übersteigen, **fett** gedruckt. Dies gilt sowohl für die Werte in der nahen, mittleren und fernen Zukunft, als auch für den Wert der gerade zurückliegenden Periode 1990–2019.

Zusätzlich ist in den Klima-Faktenblättern der Trend (die Entwicklung) für den Zeitraum von 1951 bis 2019 angegeben. Mit statistischen Methoden (s. Kapitel „Trendberechnung und Signifikanztest“ im Anhang) kann man in einem zweiten Schritt abschätzen, ob ein gefundener Trend tatsächlich auf eine Veränderung des Klimas hinweist. Als „sehr belastbar“ (Kennzeichnung: **) werden Ergebnisse eingestuft, bei denen die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers höchstens 1 % beträgt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Trend gefunden wurde, obwohl sich das Klima nicht geändert hat, ist hier sehr gering. Beispiel hierfür ist der Anstieg der mittleren Jahrestemperatur, der eindeutig und auch statistisch sehr belastbar ist. Beträgt die Wahrscheinlichkeit einer falschen Schlussfolgerung maximal 10 %, so wird das Ergebnis als „belastbar“ (Kennzeichnung: *) eingestuft. Dies ist bei einigen Kennwerten des Niederschlags der Fall. Die Veränderung des Niederschlags ist gegenüber seiner Variabilität wesentlich geringer als bei der Temperatur. Viele Trends von Kennwerten des Niederschlags sind „nicht belastbar“, das heißt, die Wahrscheinlichkeit einer Fehlinterpretation des Trendwertes liegt bei über 10 %.

3.4 Aussagen zu Extremereignissen

In den Klima-Faktenblättern gibt es auch Kennwerte zu Starkregen und Hitzeperioden. Dabei werden Ereignisse betrachtet, die zwar relativ selten, aber doch regelmäßig innerhalb von 30 Jahren vorkommen. Ausgesprochen extreme Ereignisse (z. B. Sturzfluten) dagegen sind darüber definiert, dass sie nur sehr selten, beispielsweise einmal in 100 Jahren auftreten. Je stärker das Ereignis, desto seltener tritt es auf. In der Statistik sind diese beiden Werte – die Stärke und die Häufigkeit eines Ereignisses – über den Begriff „Jährlichkeit“ miteinander verknüpft. Man spricht beispielsweise von einem 100-jährlichen Ereignis,

wenn im Mittel einmal in 100 Jahren ein Ereignis dieser Stärke auftritt. Ein 50-jährliches Ereignis tritt im Mittel einmal in 50 Jahren ein. Für den Blick in die Zukunft gilt auch bei Extremereignissen: Nur wenn die simulierte Veränderung über den Schwankungsbereich des Referenzklimas hinausgeht, kann man von einer Klimaveränderung ausgehen. Das Problem ist aber, dass für seltene Extremereignisse der Schwankungsbereich im Referenzzeitraum nicht berechnet werden kann. Dies ist nur möglich, wenn im Referenzzeitraum eine ausreichende Anzahl an Einzelereignissen enthalten ist. Bei Extremereignissen, die – wenn überhaupt – nur wenige Male in einem Jahrhundert auftreten, ist dies jedoch nicht der Fall. Für eine statistisch belastbare Berechnung müssten die Zeitreihen mehrere Jahrhunderte umfassen. Daher verzichten wir in den Klima-Faktenblättern auf Aussagen zu solchen zukünftigen Extremereignissen.

3.5 Spannweite der Klimasimulationen

Für die Klima-Faktenblätter wurden alle zwölf RCP8.5-Projektionen und alle acht RCP2.6-Projektionen des Bayern-Ensembles ausgewertet. Das dazwischenliegende Emissionsszenario RCP4.5 wurde nicht betrachtet. Jede Klimasimulation beschreibt eine mögliche Entwicklung. Wir wissen jedoch nicht, welche der simulierten Entwicklungen am wahrscheinlichsten eintreten wird. Daher müssen immer alle Klimasimulationen zusammen betrachtet werden. In den Klima-Faktenblättern geben wir für jeden Kennwert den mittleren Wert (Median) sowie die gesamte Spannweite (Minimum und Maximum der Ergebnisse) des Bayern-Ensembles für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 an (s. Abb. 4).

Welcher Wert (Minimum, Median, Maximum) aus welchem Emissionsszenario (RCP2.6, RCP8.5) betrachtet werden sollte, hängt von der Fragestellung und der gewünschten Sicherheit einer Anpassungsmaßnahme ab.

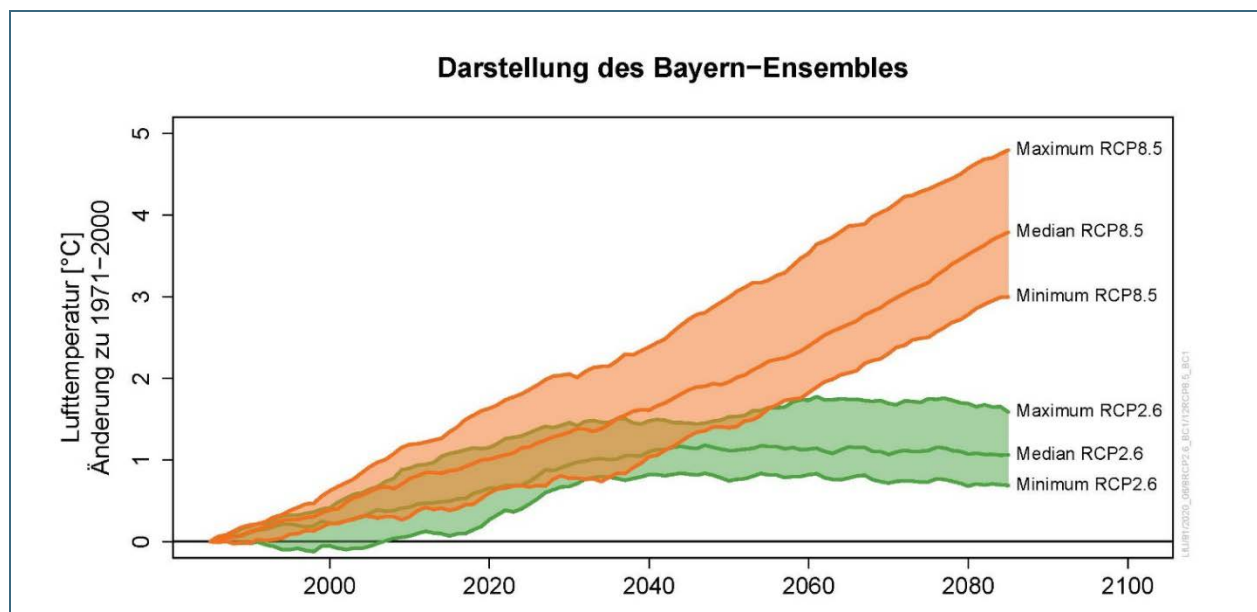


Abb. 4: Ergebnisse des Bayern-Ensembles am Beispiel der Lufttemperatur in Bayern. Die orangen und grünen Linien stellen jeweils das gleitende 30-jährige Mittel für Median, Minimum und Maximum dar. Es sind keine Ergebnisse für einzelne Jahre. Ein Beispiel: der Wert, der für das Jahr 2035 eingezeichnet ist, ist der zeitliche Mittelwert der Einzelergebnisse der Jahre 2021–2050. Der Wert für das Jahr 2036 entspricht dem zeitlichen Mittel über die Jahre 2022–2051 usw. Der Wert im Jahr 1985 zeigt also den Mittelwert der Referenzperiode 1971–2000. Dieser dient als Ausgangspunkt, daher beginnen alle Linien im Jahr 1985 bei einer Änderung von 0°C.

Um die gesamte Information der Klimasimulationen darzustellen, wird – für die beiden Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 separat – sowohl der Wert mit der geringsten Änderung (= Minimum) als auch der Wert mit der größten Änderung (= Maximum) angegeben. Als mittleren Wert geben wir den Median des jeweiligen Ensembles an. Dieser entspricht dem Wert, der genau in der Mitte der Klimasimulationen liegt – die Hälfte der Klimasimulationen liefert Werte, die über dem Median liegen, die andere Hälfte der Klimasimulationen liefert Werte, die unter dem Median liegen.

3.6 Spezialfall Stadtklima

Die Situation in Städten, insbesondere Großstädten, kann mit den hier verwendeten Klimamodellen nur ungenügend beschrieben werden. Dies liegt daran, dass die Temperatur in Städten nicht allein vom Wetter abhängt, sondern stark durch die Bebauung beeinflusst wird. Insbesondere nachts ist die Temperatur in der Stadt häufig um mehrere Grad höher als im Umland. Es gibt daher spezielle Stadtklimamodelle, die für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen in Städten verwendet werden sollten. Sie haben eine sehr hohe räumliche Auflösung und sind daher in der Lage, einzelne Gebäude, Straßen und Parks abzubilden. Die Klima-Faktenblätter decken diese Größenordnung jedoch nicht ab.

4 Zitierung und Bezug der Klima-Faktenblätter

Die Klima-Faktenblätter, das LfU-Infoblatt zu Klima-Faktenblättern, sowie das LfU-Infoblatt zu Klimadaten können über die Webseite des LfU bezogen werden:

<http://internet.lfu.bybn.de/klima/klimawandel/klimafaktenblaetter/index.htm>

Die Klima-Faktenblätter dürfen lediglich komplett und mit dem vorliegenden „LfU-Infoblatt zu Klima-Faktenblättern“ weitergegeben werden. Werden die Klima-Faktenblätter oder Auszüge davon in eigenen Publikationen oder Vorträgen verwendet, so müssen sie folgendermaßen zitiert werden:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2021): Klima-Faktenblätter [Klimaregion] – Klima der Vergangenheit und Zukunft, Infoblatt – Augsburg.

Das „LfU-Infoblatt zu Klima-Faktenblättern“ kann auch separat zitiert werden:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2021): LfU-Infoblatt zu Klima-Faktenblättern – Grundlagen und Verwendung der Klima-Faktenblätter für Bayern, Infoblatt – Augsburg: 12 S.

5 Literaturverzeichnis und Internetseiten

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2020): LfU-Infoblatt zu Klimadaten – Beobachtungsdaten, Klimaprojektionsensemble und Klimakennwerte für Bayern, Infoblatt – Augsburg: 12 S.
- [2] Linke, C. et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen.
- [3] IPCC (2013): Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1395–1445
- [4] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2021): Klima-Report Bayern 2021. – München: 196 S.
- [5] Friedlingstein, P. et al. (2019): Global Carbon Budget 2019, Earth Syst. Sci. Data, 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- [6] EURO-CORDEX: <https://euro-cordex.net/index.php.en> (Abgerufen am 25.03.2021)
- [7] ReKliEs-De: <http://reklies.hlnug.de/home/> (Abgerufen am 25.03.2021)
- [8] National Centre for Climate Services: [Klimaszenarien verstehen \(admin.ch\)](#) (Abgerufen am 25.03.2021)

- [9] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung, UmweltSpezial – Augsburg: 55 S.
- [10] Cornes, R. et al. (2018): An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi: 10.1029/2017JD028200
- [11] Rauthe, M. et al. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a highresolution gridded daily data set (HYRAS), *Vol. 22(3)*, p 235–256, DOI:10.1127/09412948/2013/0436
- [12] Frick, C. et al. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity, *Meteorologische Zeitschrift*, 23. doi:10.1127/0941-2948/2014/0560

6 Anhang

6.1 Ableitung der Klimaregionen

Die Einteilung Bayerns in sieben Klimaregionen basiert auf dem Bayerischen Beobachtungsdatensatz BayObs [1] und erfolgte anhand der 30-jährigen Mittelwerte bestimmter Kenngrößen des Referenzzeitraums 1971–2000. Als Kenngrößen wurden die Jahresmitteltemperatur, die Jahressumme des Niederschlags, ein Kontinentalitätsindikator, sowie ein Indikator zur Saisonalität des Niederschlags betrachtet und jeweils zunächst standardisiert.

Der Kontinentalitätsindikator ergibt sich aus den Monatsmitteltemperaturen im Juli und Januar:

$$T_{\text{Juli}} - T_{\text{Jan}}$$

Zur Berechnung des Indikators zur Saisonalität des Niederschlags wird die Niederschlagssumme von Mai bis August ($N_{\text{Mai-Aug}}$) in Bezug gesetzt zur Niederschlagssumme von November bis Februar ($N_{\text{Nov-Feb}}$):

$$(N_{\text{Mai-Aug}} - N_{\text{Nov-Feb}}) / (N_{\text{Mai-Aug}} + N_{\text{Nov-Feb}})$$

Mittels Clusteranalyse wurden dann sieben bayerische Gebiete ermittelt, die sich hinsichtlich dieser Kenngrößen unterscheiden. Bei der Grenzziehung zwischen den Gebieten wurde neben der Clustereinteilung noch darauf geachtet, dass die Gebiete zusammenhängend sind.

6.2 Schwankungsbereiche

Die Abgrenzung zwischen Schwankungen innerhalb desselben Klimas und Veränderungen, die durch einen Wandel des Klimas hervorgerufen werden, ist äußerst komplex. Ein ganzes Forschungsgebiet, die Attributionstheorie, beschäftigt sich mit der Frage, welchen Anteil der Klimawandel an beobachteten und simulierten Veränderungen hat.

In den Klima-Faktenblättern kann diese Fragestellung lediglich als grobe Näherung behandelt werden. Ziel ist es dabei, den möglichen Wertebereich unter unverändertem Klima für alle Kennwerte abzuschätzen. Basierend auf den Messdaten (Datensatz BayObs) wird für den Referenzzeitraum 1971–2000 das 95 %-Konfidenzintervall für die 30-jährigen Mittelwerte aller klimatischen Kennwerte berechnet. Dies bedeutet, dass ein beliebiger 30-jähriger Mittelwert unter dem Klima der Referenzperiode mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb dieses Konfidenzintervalls liegt. Unter der Annahme, dass das 95 %-Konfidenzintervall der Messdaten in der Referenzperiode repräsentativ ist für das Klima unter den Rahmenbedingungen der Referenzperiode, können damit auch die 30-jährigen Mittelwerte in der Zukunft eingeordnet werden. Liegt der Median des Bayern-Ensembles des jeweiligen Emissionsszenarios innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls, so interpretieren wir dies als Schwankung innerhalb desselben Klimas. Verlässt der Median diesen Bereich, so interpretieren wir dies als Klimaveränderung.

6.3 Trendberechnung und Signifikanztest

Für die Bayerischen Beobachtungsdaten BayObs [1] wurde mit linearer Regression der Trend für die Jahre 1951 bis 2019 berechnet. Zur Abschätzung der Belastbarkeit des Trends wurde ein Signifikanztest nach der Methode von Mann-Kendall verwendet. Die Nullhypothese lautet: „Es liegt kein Trend vor.“ Übersetzt auf Klimadaten: „Es gibt keine Klimaänderung in den Daten.“

Die Signifikanz (Belastbarkeit) des Ergebnisses wird über den p-Wert bestimmt. Bei einem „hochsignifikanten“ Trend beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei dem Trendwert um einen Zufall handelt, nur höchstens 1 %. Diese Trends sind überaus belastbar. Bei einem „signifikanten“ Trend beträgt die sogenannte Fehlerwahrscheinlichkeit maximal 10 %. Bei „nicht signifikanten“ Trends ist die Variabilität zwischen den Einzeljahren so groß, dass die Wahrscheinlichkeit für ein zufälliges Zustandekommen des

Trendwerts größer als 10 % ist. Diese Trendwerte dürfen nicht als Veränderungen des Klimas interpretiert werden.

Kennzeichnung in den Klima-Faktenblättern:

- ** Das Ergebnis ist hochsignifikant (sehr belastbar).
Die Fehlerwahrscheinlichkeit beträgt maximal 1 % (p-Wert $\leq 0,01$).
- * Das Ergebnis ist signifikant (belastbar).
Die Fehlerwahrscheinlichkeit beträgt maximal 10 % (p-Wert $\leq 0,10$).

Kein Stern: Das Ergebnis ist nicht signifikant (nicht belastbar).

6.4 Danksagung

Der E-OBS Datensatz wird im EU-FP6 Projekt UERRA (<http://www.uerra.eu>) unter Mitwirkung des Copernicus Climate Change Service und den datenliefernden Partnern des ECA&D Projektes (<https://www.ecad.eu>) bereitgestellt und fortgeschrieben.

Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Telefon: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Konzept/Text:

LfU: Dr. Frank Bäse, Rebekka Eichstädt, Dr. Michael Joneck, Dr. Katrin Zink

StMUV, Holger Komischke

Bildnachweis:

Alle Abbildungen LfU außer
Abb. 8: National Centre for Climate Services

Stand:

April 2021

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.