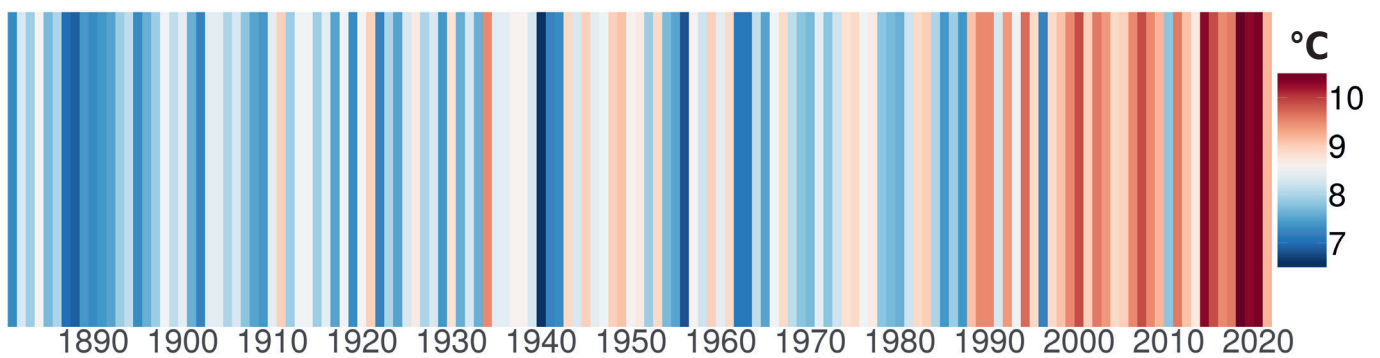




Nationaler Klimareport

Klima – Gestern, heute und in der Zukunft



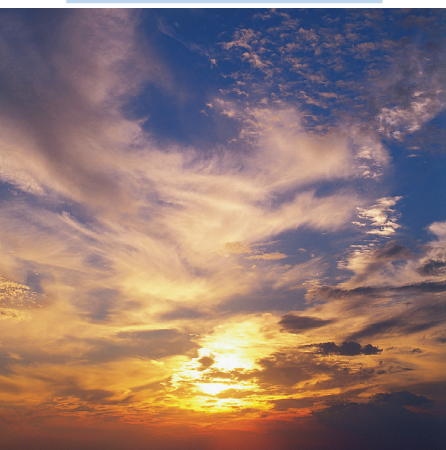


„Warming Stripes“

Die farbigen Streifen auf der Titelseite visualisieren die Durchschnittstemperaturen für Deutschland zwischen 1881 und 2021; jeder Streifen steht für ein Jahr. Die Grafik wurde von Ed Hawkins entwickelt.

(Quelle: www.climate-lab-book.ac.uk, Datenquelle: Deutscher Wetterdienst)

Inhalt



Vorwort.....	2
Internationale Zusammenarbeit.....	3
Immer in Bewegung: Wetter und Klima in Deutschland.....	4
Klima, Klimavariabilität und Extreme	6
Klimamodelle.....	8
Klimawandel und Klimaprojektionen	10
Regionale Vielfalt - Das Klima in Deutschland	14
Klimaparameter und ihre Veränderungen	
Temperatur	16
Niederschlag.....	22
Sonnenschein	28
Meeresspiegel	30
Klimawandel, Witterung und Pflanzenwachstum	34
Extremereignisse	38
Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima	44
Begriffskompass Klima	46
Literatur Meeresspiegel.....	47
Weiterführende Literatur / Weblinks	48
Präsenz in der Fläche.....	50
Impressum.....	52



Vorwort

*Liebe Leserinnen und Leser,
der vorliegende Nationale Klimareport fasst das derzeitige Wissen über das Klima in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in kurzer und prägnanter Form zusammen. Er soll Ihnen als Leserschaft die Möglichkeit geben, sich einen fundierten Überblick über die vergangene und zukünftig zu erwartende Klimaentwicklung in Deutschland zu verschaffen. Dreizehn der zwanzig wärmsten Jahre seit dem Beginn der flächendeckend verfügbaren Klimadaten im Jahr 1881 traten in Deutschland im 21. Jahrhundert auf. Das Jahr 2018 war mit einem Jahresmittel von 10,5 °C das bisher wärmste Jahr und lag damit mehr als zwei Grad über dem vieljährigen Jahresmittel der Referenzperiode 1961–1990.*

Der 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) lässt bis Ende dieses Jahrhunderts eine weitere deutliche Klimaerwärmung erwarten. Der Klimawandel stellt für jeden von uns eine bedeutende Herausforderung dar, zum Beispiel durch vermehrt auftretende Tage mit starker Wärmebelastung oder durch eine steigende Häufigkeit und Intensität von extremen Witterungsereignissen wie längeren Dürreperioden oder lokal auftretenden Starkniederschlagsereignissen. Der internationale Rahmen für den Umgang mit dem Klimawandel wurde auf der UN-Klimakonferenz COP21 im Jahr 2015 in Paris vereinbart.

Eine Voraussetzung für die Umsetzung der dort definierten Ziele ist ein detailliertes Verständnis des aktuellen Standes der Klimaentwicklung. Um die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen sind umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Der Nationale Klimareport stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Erarbeitung von nationalen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel und an seine erwarteten Folgen dar.

Tobias Fuchs

Tobias Fuchs

Mitglied des Vorstands und Leiter des Geschäftsbereiches
Klima und Umwelt des Deutschen Wetterdienstes

Internationale Zusammenarbeit

Da es sich beim Klimawandel um eine globale Herausforderung handelt, haben das Umweltschutzprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) im Jahr 1988 einen „Weltklimarat“ gegründet, das sogenannte Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hauptaufgabe dieses Zwischenstaatlichen Ausschusses ist es, wissenschaftlich belegte Fakten zum Klimawandel zusammenzutragen, die Risiken eines sich ändernden Klimas zu bewerten und Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zu formulieren. Seine Ergebnisse präsentiert das IPCC in Berichten, die in mehrjährigem Abstand vorgelegt werden.

Von Sommer 2021 bis Frühjahr 2022 wurden die drei Teilberichte des 6. Sachstandsberichtes des IPCC veröffentlicht. Die Berichte fassen den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zu den „naturwissenschaftlichen Grundlagen“ (Teilbericht 1), den „Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit“ (Teilbericht 2) sowie der „Minderung des Klimawandels“ (Teilbericht 3) zusammen. Neben dem aktuellen Zustand des Weltklimas werden auch Modellierungen seiner zukünftigen Entwicklung beschrieben. Außerdem vermitteln die Berichte wichtige Informationen hinsichtlich der damit verbundenen Risiken für Mensch und Natur und analysieren den Bedarf an Emissionsminderungen, die für die Einhaltung der Ziele des Abkommens von Paris nötig sind. Zentrale Aussage ist: **Es ist eindeutig, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, den Ozean und die Landflächen erwärmt hat.**

Auf den UN-Klimakonferenzen (COP = Conference of the Parties), welche seit 1991 in der Regel jährlich stattfinden, werden u.a. verbindliche Klimaziele oder Finanzhilfen für Entwicklungsländer beschlossen. Auch geht es in den UN-Klimakonferenzen um Regelungen zur Umsetzung der festgelegten Ziele. So wurde beispielsweise bei der COP21 im Jahr 2015 in Paris im sogenannten „Abkommen von Paris“ vereinbart, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C zu begrenzen, um die Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen. In dem 2018 veröffentlichten Sonderbericht (1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5)) des IPCC wurde die Machbarkeit der Ziele des Abkommens von Paris analysiert und als sowohl erreichbar und leistbar beschrieben.

Die Klimaforschung spielt somit weltweit eine wichtige gesellschaftliche Rolle. Sie widmet sich im Schwerpunkt nicht nur der Erarbeitung der naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels, der Konzeption von Klimamodellen und der Durchführung von globalen, regionalen und lokalen Klimasimulationen, sondern auch dem Ergründen von Auswirkungen und der Identifizierung von möglichen Maßnahmen zur Reduzierung der Erwärmung und Anpassung an den Klimawandel.



Immer in Bewegung: Wetter und Klima in Deutschland

Das Wetter mit all seinen Erscheinungen prägt unser Leben. Es beeinflusst unsere tägliche Auswahl der Kleidung, aber auch die für Wirtschaft und Gesellschaft notwendige Infrastruktur. Mit der durch den Menschen verursachten Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen und den Änderungen der Landnutzung ändern sich unser Wetter und Klima. Die folgenden Seiten geben einen Überblick über die klimatischen Verhältnisse in der Vergangenheit und über zukünftige Entwicklungen in Deutschland.



Vom kurzfristigen Wechsel zur langfristigen Änderung: Wetter und Klima im Wandel

Deutschland gehört zur warm-gemäßigten Klimazone der mittleren Breiten, im Übergangsbereich zwischen dem maritimen Klima Westeuropas und dem kontinentalen Klima in Osteuropa. Das Klima Mitteleuropas wird geprägt durch den Einfluss feuchter, gemäßigt temperierter atlantischer Luftmassen und trockener, im Sommer heißer, im Winter kalter kontinentaler Luft. Die großräumige Zirkulation bestimmt, welche Luftmasse dominiert. Dementsprechend können die Jahreszeiten in einzelnen Jahren sehr unterschiedlich ausfallen. Daraus resultiert eine große Variabilität des Klimas in Deutschland.

Durch die topografische Struktur des Landes mit seinen Mittelgebirgen, die verschiedene Landschaften

einschließen, wird das Klima stark strukturiert. Für die Temperatur sind die Abhängigkeit von der Geländehöhe und der Abstand zum Meer die dominierenden Einflüsse. Der ozeanische Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt, sorgt für relativ milde Winter und mäßig heiße Sommer.

Der Deutsche Wetterdienst beobachtet in Deutschland an vielen Orten das Wetter, teilweise seit mehr als 100 Jahren. Registriert werden Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenschein und vieles mehr. Die Beobachtungswerte variieren von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr. Neben diesen Variationen können durch die Aufzeichnungen der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes auch langfristige Änderungen erkannt werden. So ist es in Deutschland im Mittel seit 1881 um etwa 1,6 Grad wärmer geworden.

Damit verbunden nahm die Anzahl der kalten und sehr kalten Tage ab und die der warmen und sehr warmen Tage zu.

Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 zugenommen. Dieses gilt insbesondere für den Winter und das Frühjahr. In der Jahressumme sind es im Mittel 8 Prozent mehr. Kaum erkennbar hingegen sind Veränderungen der Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter.

Erfasst wird des Weiteren die Höhe des Meeresspiegels. Auch hier ist eine Änderung zu beobachten. Der Meeresspiegel ist in den letzten 177 Jahren in der Deutschen Bucht um etwa 42 cm gestiegen.

Hat der Mensch einen Einfluss auf das Klima? Mit dem Ausstoß von Treibhausgasen und der großflächigen Änderung der Landnutzung greift der Mensch in das natürliche Klimasystem der Erde ein. Ein Schwerpunktthema der weltweiten Forschung ist daher die Analyse der Folgen dieser Eingriffe.

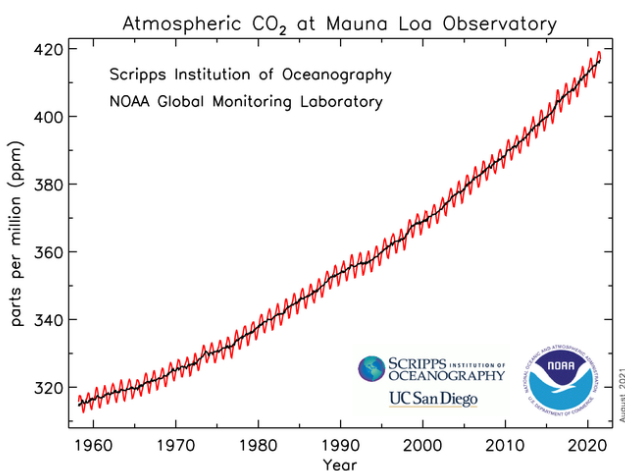
Mit Hilfe von Klimamodellen haben die Wissenschaftler die Auswirkungen auf das globale und regionale Klima auf der Basis von Szenarien berechnet. Für Deutschland ergibt sich je nach gewähltem Szenario eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 1 °C bis hin zu mehr als 4 °C in den nächsten 80 Jahren. Eine Änderung von nur 1 °C ist laut den Klimamodellen nur bei deutlicher Reduzierung der Emission von Treibhausgasen möglich. Bei weiterhin hohen oder sogar zunehmenden Treib-



hausgasemissionen ist eine Änderung von 3 bis 4 °C zu erwarten. Damit verbunden nimmt die Anzahl der kalten und sehr kalten Tage noch weiter ab, während die Zahl der warmen und sehr warmen Tage deutlich zunimmt.

Verbunden mit der Temperaturzunahme werden sehr wahrscheinlich die jährlichen Niederschlagsmengen weiter zunehmen und damit dann auch die Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter.

Ein Anstieg der Lufttemperatur geht mit einer Erhöhung der Meerwassertemperatur einher. Dadurch dehnt sich das Wasser aus und in der Folge steigt der Meeresspiegel. Dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand nach wird sich der Meeresspiegelanstieg durch verstärkte Schmelzprozesse an den Gletschern deutlich beschleunigen.



◀ Mittlere Konzentration des atmosphärischen CO₂, gemessen am Mauna Loa Observatorium (Hawaii). Die Daten bilden die weltweit längste Zeitreihe direkter Kohlendioxidmessungen ab. Dargestellt sind die Monatswerte (rote Kurve) sowie Jahresmittel (schwarze Kurve). Die Schwankungen innerhalb eines Jahres sind durch die unterschiedlichen Wachstumsperioden der Vegetation bedingt. (Quelle: NOAA)

Klima, Klimavariabilität und Extreme

Wetter, Witterung, Klima: Unter diesen drei Begriffen versteht die Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschiedenen Zeiträumen ablaufen. Das Wetter beschreibt den kurzfristigen Zustand der Atmosphäre, die Witterung eine Phase von Wochen bis mehreren Monaten und das Klima die Zeitspanne von Jahrzehnten bis hin zu geologischen Zeitaltern.

Was ist Klima?

Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert „Klima“ wissenschaftlich präzise als „Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können“. „Klima“, vom altgriechischen Wort klíma für „ich neige“ stammend, spielt auf die Konstellation der Erde im Sonnensystem an, auf die Neigung der Erdachse, den variierenden Abstand unseres Planeten zur Sonne und den damit zusammenhängenden

markanten Schwankungen der meteorologischen Bedingungen. Das Klima war in der Vergangenheit nie konstant. Aus der Erdgeschichte sind Eiszeiten und Warmzeiten bekannt.

Das Klima ist auch immer auf einen Ort bezogen. Das Klima von Helgoland ist beispielsweise ein anderes als das von München. Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden entsprechend den Vorgaben der WMO Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert.





▲ Messfeld des Deutschen Wetterdienstes in St. Peter-Ording.

Klimavariabilität

Das Klima ist als Summe von Wetter und Witterung etwas Variables. Es ist nicht ausreichend, das Klima allein mit einem Mittelwert zu beschreiben. Schon auf der Tagesskala beobachten wir eine hohe Variabilität des Wetters. Diese Variabilität zeigt sich auch bei der Witterung. Gleiches gilt für längere Zeitskalen. So sind im Winter die Temperaturen im Mittel geringer als im Sommer. Aber auch einzelne Jahreszeiten unterscheiden sich. Es gibt milde oder kalte Winter und trockene oder feuchte Sommer.

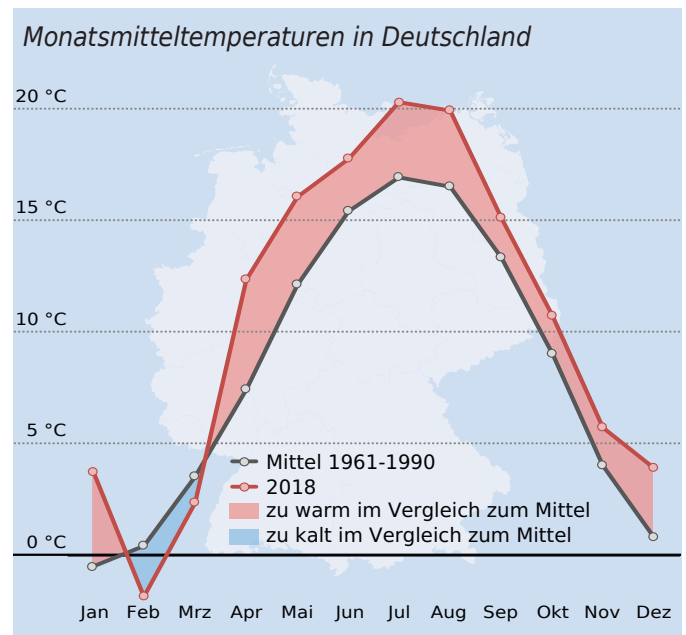
Die beschriebene Variabilität zeigt sich nicht nur bei der Temperatur. Sie gilt für alle meteorologischen Elemente (z. B. Niederschlag und Sonnenscheindauer). Auch ein sich durch den Klimawandel erwärmendes Klima weist diese Variabilität auf: Es wird nicht jedes Jahr etwas wärmer sein als das vorhergehende. Einzelne Jahre können wärmer, aber auch kälter sein als der mittlere Verlauf.

Klimatrend

Von einem Klimatrend sprechen wir, wenn innerhalb einiger Jahrzehnte verstärkt eine Veränderung, z. B. häufiger positiven Temperaturabweichungen, festzustellen ist oder vermehrt bisher beobachtete Wertebereiche zunehmend unter- bzw. überschritten werden. Die Änderungsrichtung kann durchaus kurzzeitig unterbrochen oder abgemildert sein, entscheidend ist, dass die zu beobachtende Änderungsrichtung über einen langen Zeitraum anhält. Solche langfristigen Änderungen können natürliche Ursachen haben, wie z. B. Veränderungen der Erdbahnparameter oder der Sonnenaktivität. Aber auch der Mensch greift mit seinen Aktivitäten in das Klimasystem ein.

Extremereignisse

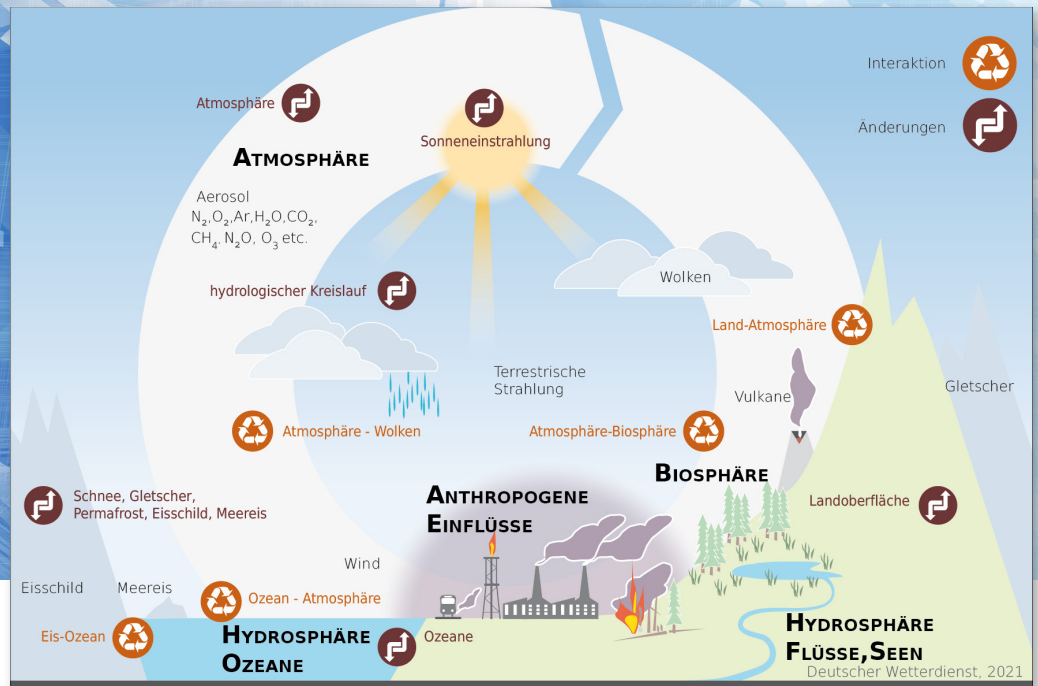
Extremereignisse sind sehr seltene Ereignisse, die stark von den mittleren Bedingungen abweichen. Ein Ereignis kann aus vielfältigen Gründen zu ei-



▲ 2018 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf den Februar und März wiesen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen auf als während der international gültigen Referenzperiode 1961-1990.

nem Extremereignis werden. Es kann ein auf einen Tag bezogenes Ereignis sein, wie eine Orkanböe, ein längerfristiges Ereignis, wie eine langanhaltende Trockenheit, oder ein für den Zeitpunkt im Jahr sehr untypisches Ereignis. So ist beispielweise eine Temperatur von 25 °C an einem Julitag nicht ungewöhnlich. 25 °C am Neujahrstag wären außergewöhnlich und somit ein Extremereignis.

Extreme gehören zum Wetter und Klima. So wie sie zum Klima der Vergangenheit gehört haben, so werden sie auch zum Klima der Zukunft gehören. Die Analyse der Intensität und der Häufigkeit des Auftretens solcher extremer Wetterereignisse ist ein wesentlicher Schwerpunkt in der aktuellen Klimaforschung.



▲ In einem Klimamodell werden die wesentlichen Prozesse und Wechselwirkungen in der Natur mit Näherungsformeln beschrieben. Einige davon sind hier dargestellt. (Quelle: DWD)

Klimamodelle

Die beobachteten Klimaschwankungen und -trends der Vergangenheit einfach in die Zukunft zu extrapolieren ist im Hinblick auf den Klimawandel nicht sinnvoll. Daher werden Klimamodelle – als computergestützte Werkzeuge zur vereinfachten Beschreibung von in der Natur ablaufenden Erscheinungen – für die Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklungen genutzt.

Die Welt als Gitter

In einem Klimamodell wird eine Vielzahl an (Teil-) Modellen zu einem großen Modell zusammengefasst. Die Teilmodelle sind in der Lage, alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre unseres Planeten Erde zu beschreiben. Eine Eins-zu-Eins-Umsetzung aller in der Realität ablaufenden Prozesse in Klimamodellen ist jedoch nicht möglich. Zum einen sind nicht alle Prozesse in der Natur hinreichend bekannt. Zum anderen erfordert dies einen extrem hohen Aufwand an Computerrechenzeit.

Für die Modellierung werden die Atmosphäre und die Ozeane der Erde mit einem dreidimensionalen

Gitternetz überzogen. Die Auflösung (Gitterpunktstand) globaler Klimamodelle ist sehr grob, damit sie innerhalb einer akzeptablen Rechenzeit über viele Jahre gerechnet werden können. Obwohl diese Modelle die grundlegende großräumige Variabilität des Klimas ausreichend beschreiben, reicht die Auflösung nicht aus, um Unterschiede in den Ausprägungen des Klimawandels einer bestimmten Region der Erde (z. B. Deutschland) detailliert darzustellen. Hierfür werden regionale Klimamodelle eingesetzt, deren Gitterpunkte ein erheblich engmaschigeres Netz bilden als diejenigen der globalen Klimamodelle. Als Antrieb nutzen regionale Klimamodelle allerdings die Ergebnisse der globalen Klimamodelle.

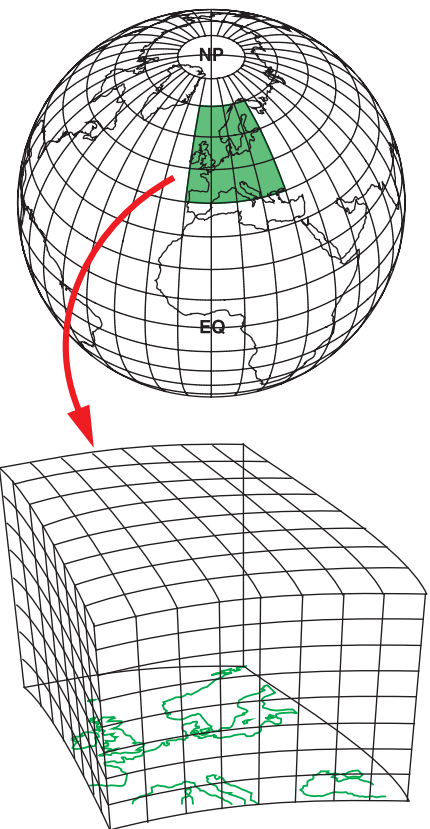
Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Gitterweite von 12,5 km und 3 km vor. Das bedeutet zum Beispiel, dass die simulierte Temperatur nur alle 12,5 km bzw. 3 km einen anderen Wert annehmen kann.

Eine belastbare Aussage ist für eine einzelne Gitterzelle nicht möglich. Es müssen immer mehrere Gitterzellen zusammengefasst werden. Üblicherweise wird dafür eine Matrix von drei mal drei Gitterzellen genutzt. Bei einer Modellauflösung von beispielsweise 12,5 km sind deshalb nur Aussagen für eine Region von 37,5 km x 37,5 km möglich.

Viele Modelle, viele Ergebnisse

Weltweit werden von einer Vielzahl von Forschungsgruppen Klimamodelle mehr oder weniger unabhängig voneinander entwickelt. Einzelne Modellkomponenten werden dadurch unterschiedlich beschrieben, was wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Ursache hierfür sind die für die Entwicklung eines Modells notwendigen vereinfachten Grundannahmen über die in der Natur ablaufenden Prozesse.

Die vorhandene Bandbreite des Ensembles (= Gruppe von Klimaprojektionen) ist ein wichtiger Hinweis auf die Güte des Verständnisses der natürlichen Prozesse. Je größer die Bandbreite ist, desto vorsichtiger sollten Aussagen zum Beispiel über beschriebene Änderungssignale formuliert werden.



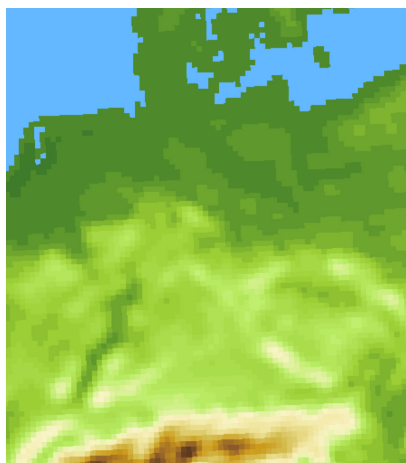
 Max-Planck-Institut für Meteorologie

▲ Beispielhafte Darstellung von Modellgitterzellen. Sie unterteilen die Atmosphäre nicht nur in der Horizontalen, sondern bilden auch in der Vertikalen eine Reihe von Schichten. (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie)

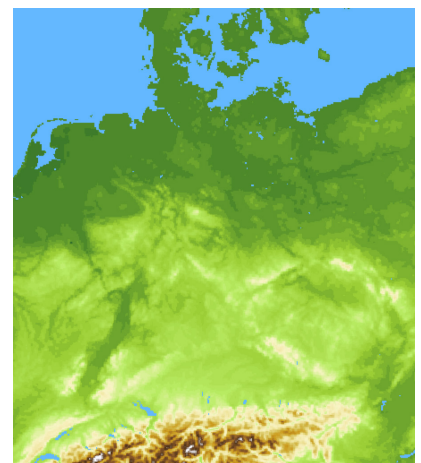
Je engmaschiger, desto genauer - hier am Beispiel des Höhenreliefs von Deutschland in unterschiedlichen Modellgitterauflösungen. Die Auswirkungen der Beschreibung einer Region auf Basis eines wesentlich dichteren Gitternetzes sind deutlich erkennbar. ▼



Globales Klimamodell (sehr grob)
1,875° (ca. 90 km)



Regionales Klimamodell (grob)
0,11° (ca. 12,5 km)



Regionales Klimamodell (fein)
0,0275° (ca. 3 km)



Klimawandel und Klimaprojektionen

Der Begriff Klimawandel beschreibt eine Änderung der vorhandenen klimatischen Verhältnisse an einem Ort oder auf der gesamten Erde. Hinsichtlich der Temperatur kann diese Änderung grundsätzlich eine Erwärmung oder eine Abkühlung sein. Der viel diskutierte Klimawandel wird nicht durch natürliche Einflüsse (Erdbahnparameter oder Variationen der Solarstrahlung) hervorgerufen. Die Aktivitäten des Menschen haben einen signifikanten Einfluss auf das globale und regionale Klima.

Klimafaktor Mensch

Der Mensch wirkt auf vielfältige Weise auf das Klima ein. Wesentlich sind zwei Bereiche:

1. Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen unter anderem große Mengen an Kohlenstoffdioxid, das direkt in die Atmosphäre entweicht.
2. Durch Abholzung, Aufforstung und Versiegelung verändert der Mensch die Landnutzung auf der regionalen und globalen Skala.

Nur unter der gemeinsamen Berücksichtigung der natürlichen Einflüsse sowie derjenigen, die auf den Menschen zurückzuführen sind, können die beobachteten Änderungen des globalen Klimas erklärt werden.

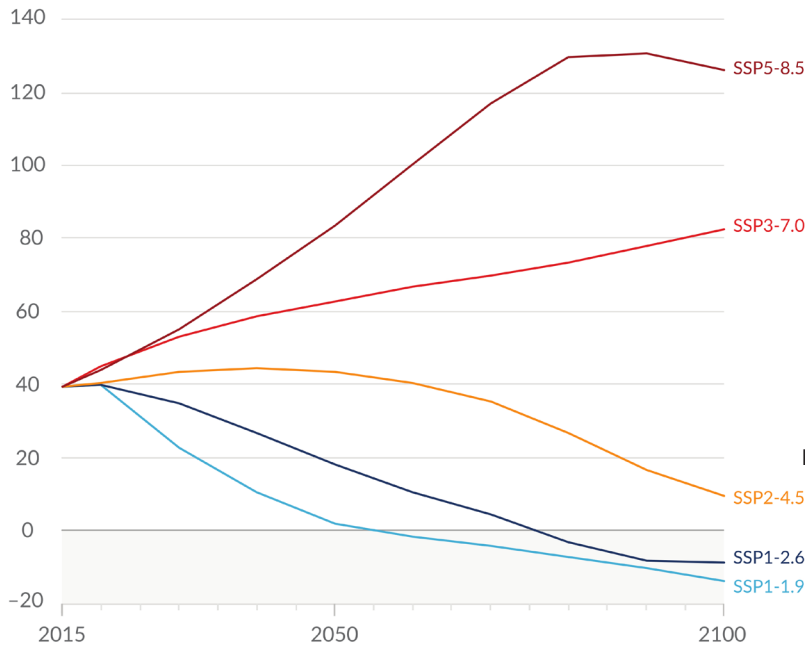
Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einflussnahme. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft Szenarien genannt. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl denkbarer Szenarien entwickelt, die einen mehr oder minder starken Einfluss des Menschen auf das Klima beschreiben. In Vorbereitung auf den 5. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurden vier repräsentative Szenarien oder „Konzentrationspfade“ (engl. Representative Concentration Pathways - RCPs) ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Szenarien, die den Verlauf von Treibhausgaskonzentrationen und den Einfluss von Aerosolen (kleinen Partikeln in der Atmosphäre wie z. B. Rußflocken) gemeinsam als Strahlungsantrieb beschreiben. Der Begriff Strahlungsantrieb ist vereinfacht als „zusätzliche/erhöhte“ Energiezufuhr für die Erde zu verstehen.

Die Szenarien werden RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 genannt. Hierbei steht die jeweilige Zahl (z. B. 8.5) für die „zusätzliche“ der Erde zur Verfügung stehende Energie von $8,5 \text{ W/m}^2$ im Jahr 2100 gegenüber der solaren Einstrahlung in den Jahren 1861-1880. Dieser Zeitraum repräsentiert den Zustand des Klimas, bevor der Mensch wesentlichen Einfluss auf die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre genommen hat (im Weiteren vorindustrielles Niveau genannt).

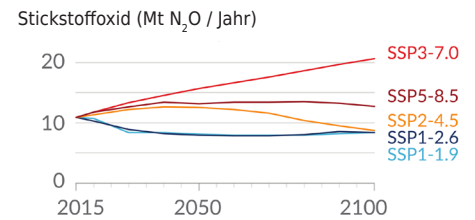
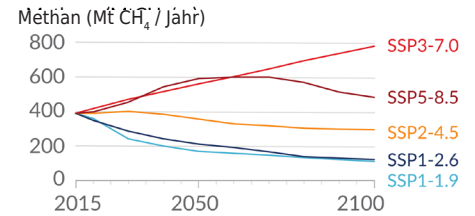
Für den 6. Sachstandsbericht wurden die vorhandenen Szenarien weiterentwickelt. Die möglichen ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklungspfade (Englisch: Shared Socioeconomic Pathways - SSP), die zu den unterschiedlichen RCP-Pfaden führen könnten, werden mit sogenannten Narrativen beschrieben. Diese Narrative beinhalten die sozioökonomischen, demographischen, technologischen, politischen, institutionellen und Lebensstil-Trends. Es werden fünf Entwicklungspfade (SSP1 bis SSP5) genutzt.



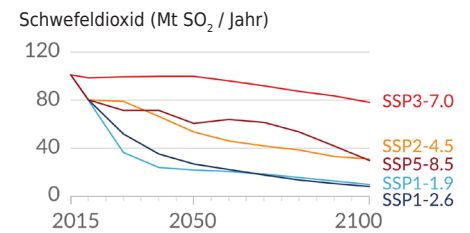
Kohlendioxid (Gt CO₂ / Jahr)



Ausgewählte Beiträge von Nicht-CO₂-Treibhausgasen



Ein Luftschadstoff- und Aerosolbeitrag

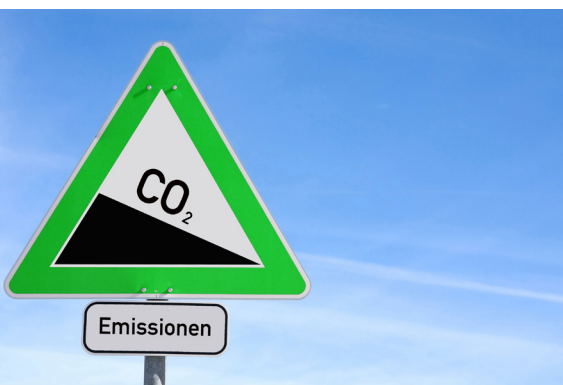


▲ Jährliche Emissionen über den Zeitraum 1950-2100. Dargestellt sind die Emissionsverläufe für Kohlendioxid (CO₂, Gt CO₂ pro Jahr) (linkes Diagramm), sowie für Methan (CH₄, Mt CH₄ pro Jahr, mittleres Diagramm) und Stickoxide (NO_x, Mt NO_x pro Jahr, rechtes Diagramm) (IPCC AR6 Technical Summary, 2021, Fig. TS.4).

Diese SSPs beschreiben einen nachhaltigen (SSP1) und mittleren (SSP2) Weg sowie einen Weg regionaler Rivalitäten (SSP3) und fossiler Entwicklung (SSP5). Die beiden Szenarienprojekte wurden so konzipiert, dass sie sich gegenseitig ergänzen. Die RCPs legen Pfade für die Treibhausgaskonzentrationen fest und damit auch das Ausmaß der Erwärmung, die bis zum Ende des Jahrhunderts eintreten könnte. Die SSPs

hingegen geben die Bühne vor, auf der Emissionsreduzierungen erreicht - oder eben nicht erreicht - werden. Ein Klimaszenario ist daher immer eine Kombination aus einem RCP und einem SSP. Beispiele für diese Kombinationen sind SSP1-1.9 oder SSP5-8.5. Dabei kann meist mehr als ein SSP zu einer Entwicklung eines RCP führen. Regionale Datensätze für die SSP+RCP-Szenarien liegen aktuell noch zu wenige vor. Daher werden in diesem Bericht die regionalen Ergebnisse auf der Basis der RCP vorgestellt.

In Kombination mit den RCPs werden im 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats fünf dieser Szenarien mit höherer Priorität betrachtet: SSP1-1.9 und SSP1-2.6 sind Szenarien, welche einen Pfad wählen, der die globale Erwärmung entsprechend des Pariser Klimaabkommens bis zum Jahr 2100 auf unter 1,5 °C bzw. 2 °C über dem vorindustriellen Niveau begrenzt. Die Szenarien SSP2-4.5 und SSP3-7.0 beschreiben unterschiedliche, moderate Emissionswege. Die stärkste Beeinflussung durch den Menschen wird durch das



SSP5-8.5 Szenario beschrieben. Hier wird davon ausgegangen, dass jeder weitere Gewinn an Lebensstandard durch die Nutzung fossiler Energieträger erreicht wird.

Das **Klimaschutz-Szenario (RCP2.6)** basiert auf Annahmen, die der 2-Grad-Obergrenze entsprechen. Ziel ist eine Welt, in der im Jahr 2100 die globale Erwärmung nicht mehr als 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau beträgt. Dafür wird ein Szenarien-Verlauf angenommen, der mit einer sehr starken und sehr schnellen Reduktion der Emission von Treibhausgasen gegenüber dem heutigen Zustand verbunden ist. Der Höchstwert des Strahlungsantriebes wird vor dem Jahr 2050 (3,0 W/m²) erreicht. Von da an sinkt er kontinuierlich auf den Wert 2,6 W/m² im Jahr 2100. Hierzu ist ein Wandel hin zu einer Welt notwendig, deren Energieversorgung nicht mehr auf der Verbrennung von fossilen Kohlenstoffvorräten basiert. Das Maximum weltweiter Emissionen von Treibhausgasen muss dafür vor dem Jahr 2020 liegen. Noch vor dem Jahr 2080 dürfen keine wesentlichen Emissionen von Treibhausgasen mehr vorhanden sein (Null-Emission).

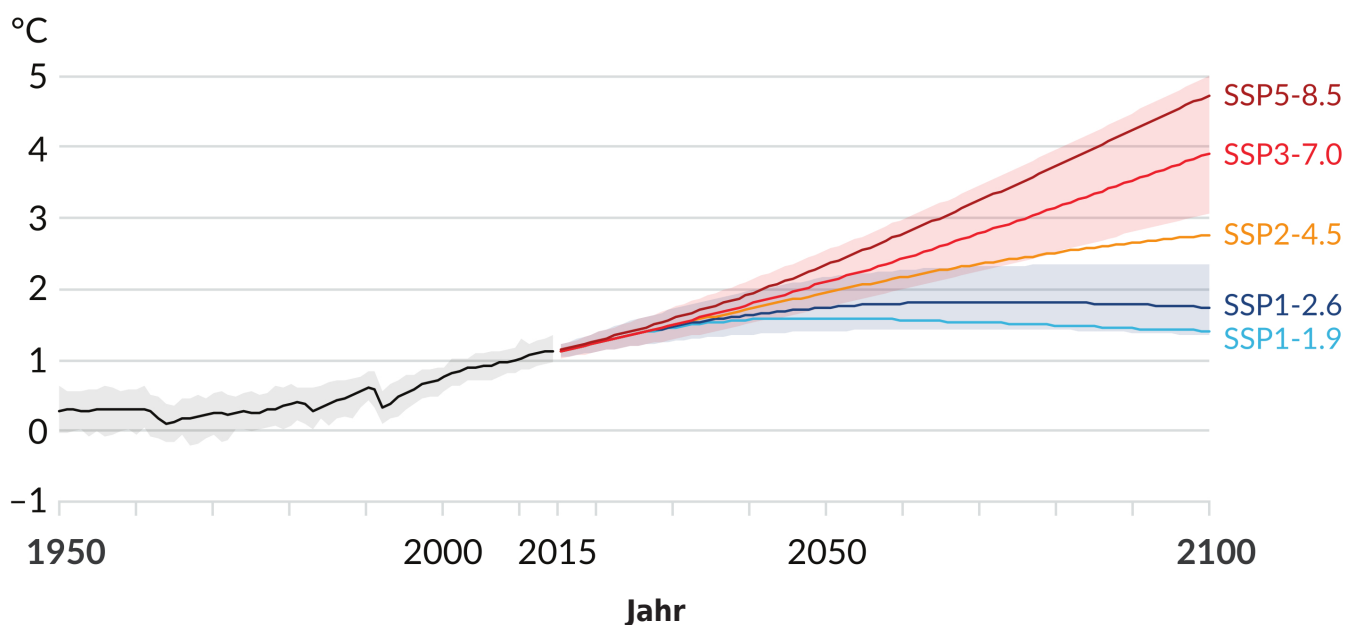
Das **Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5)** beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Der Ausstoß von Treibhausgasen wird sich gegenüber heute mit einem stetigen Anstieg des

Strahlungsantriebes bis hin zum Jahr 2100 erhöhen. Der Titel **Weiter-wie-bisher** bezieht sich dabei auf die Annahme, dass jeder Zugewinn an Lebensqualität und Lebensstandard durch die Nutzung fossiler Energiequellen erfolgt.

Zu Vergleichszwecken soll hier noch das Szenario **SRES-Szenario A1B** erwähnt werden. Es beschreibt eine Welt mit starkem ökonomischen Wachstum und einer Bevölkerungszunahme bis zur Mitte des Jahrhunderts und einem Rückgang danach. Auf diesem Szenario beruhen die Klimaprojektionen des 4. Sachstandesberichts des IPCC. Ein Großteil des in den letzten Jahren kommunizierten möglichen kommenden Klimawandels basiert auf diesem Szenario.

Was wäre wenn? - Klimaprojektionen

Wird ein globales Klimamodell dazu genutzt, den möglichen Klimawandel auf der Basis eines Szenarios zu berechnen, so erfolgt das im Rahmen einer Klimaprojektion. Eine Klimaprojektion darf nicht mit einer Vorhersage verwechselt werden. Sie ist eine „was wäre wenn“-Rechnung auf der Basis des gewählten Szenarios. Die Klimaprojektionen für die verschiedenen Szenarien helfen, die zu erwartenden Klimaveränderungen in eine Bandbreite einzuordnen. Zum Beispiel, wird untersucht, welche die minimal oder maximal zu erwartenden Änderungen sind.



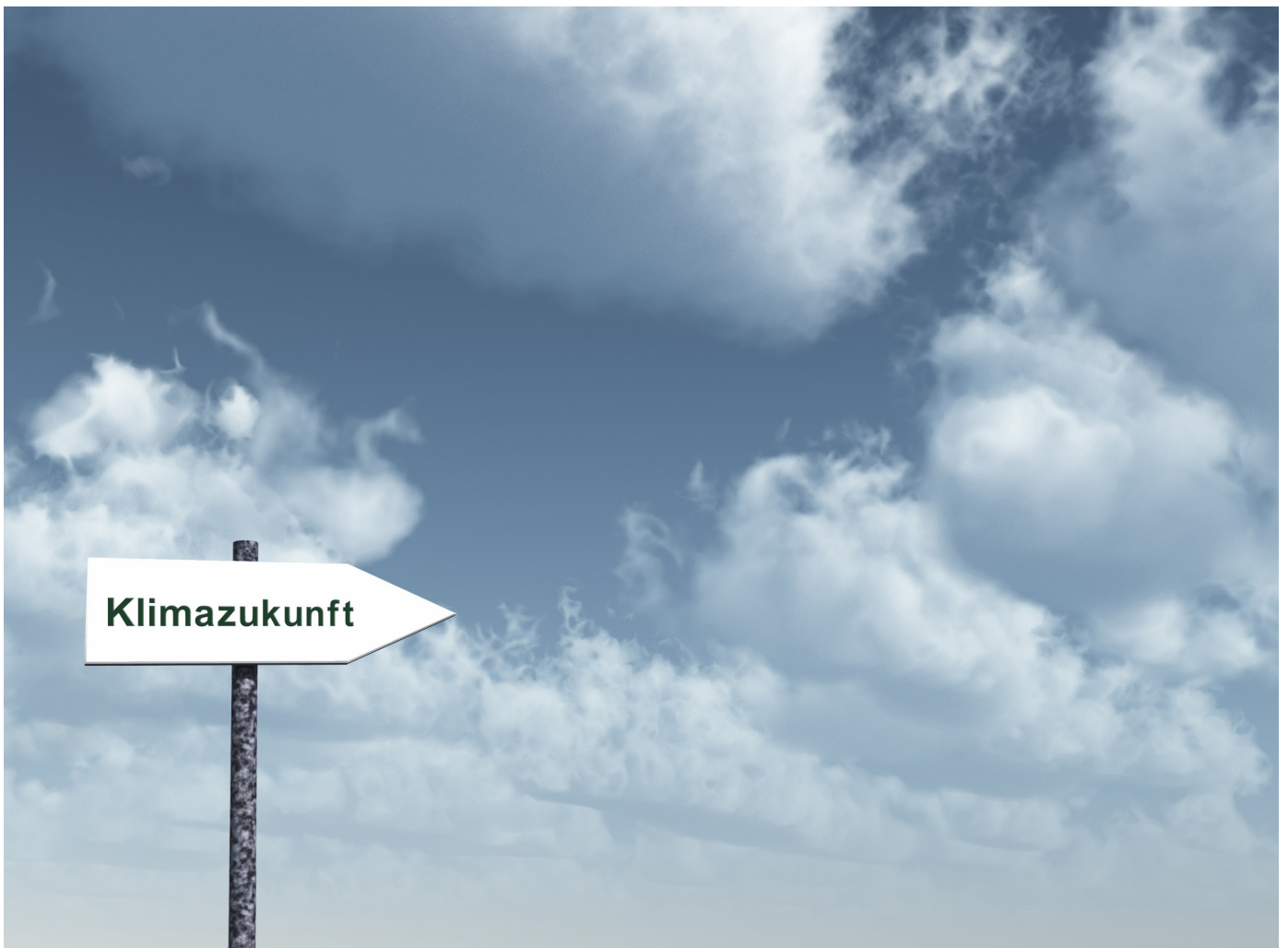
▲ Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in °C im Vergleich zu 1850-1900. Diese Änderungen wurden ermittelt durch Kombination von CMIP6-Modellsimulationen mit Beobachtungen, die auf der simulierten Erwärmung in der Vergangenheit beruhen. Änderungen im Vergleich zu 1850-1900 auf der Grundlage von 20-jährigen Mittelungszeiträumen werden berechnet, indem 0,85°C (der beobachtete Anstieg der globalen Oberflächentemperatur von 1850-1900 bis 1995-2014) zu den simulierten Veränderungen im Vergleich zu 1995-2014. Sehr wahrscheinliche Bereiche werden gezeigt für SSP1-2.6 und SSP3-7.0. (Quelle: IPCC AR6 WGI SPM.8)

Letztendlich werden die realen Veränderungen wahrscheinlich innerhalb dieser Bandbreite liegen. Alle Klimaprojektionen in der Bandbreite sind nach heutigem Wissensstand gleich wahrscheinlich.

Für diesen Bericht werden Ergebnisse von 32 Klimaprojektionen verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen. Die genutzten Regionalen Klimaprojektionen stellen das DWD-Referenz-Ensemble dar. Dieses ist die Basis für alle weiteren Auswertungen.

Um den Unterschied zwischen dem heutigen und einem zukünftigen Zustand zu berechnen, werden jeweils zwei 30-Jahres-Zeiträume genutzt. Für jeden Zeitraum wird ein mittlerer Zustand berechnet. Als Bezugszeitraum für das beobachtete Klima dienen die Jahre 1971 bis 2000 aus den Modellen. Für die Temperatur wird weiterhin ein Bezug zum frühindustriellen Zeitraum 1881-1910 dargestellt. Für die Zukunft werden zwei Zeiträume analysiert, sie werden im

Weiteren kurzfristiger und langfristiger Planungshorizont genannt. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt den mittleren Zustand der Jahre 2031 bis 2060. Die Jahre 2071 bis 2100 werden als Grundlage für den langfristigen Planungshorizont genutzt. Die zukünftigen Änderungen werden als ein mittlerer Wert und als Bandbreite angegeben. Beschrieben wird die Bandbreite über den geringsten und höchsten Änderungswert aus den vorhandenen Datensätzen.



Regionale Vielfalt – Das Klima in Deutschland

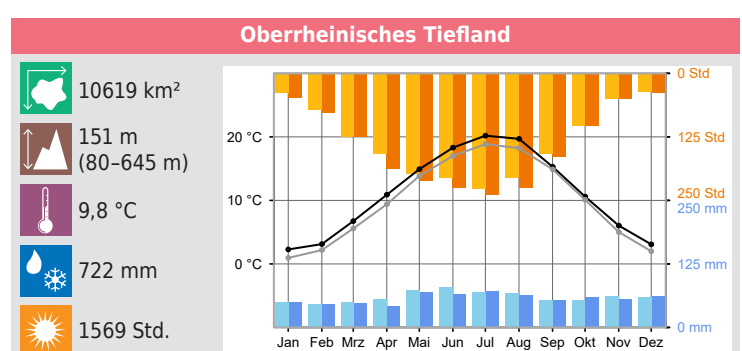
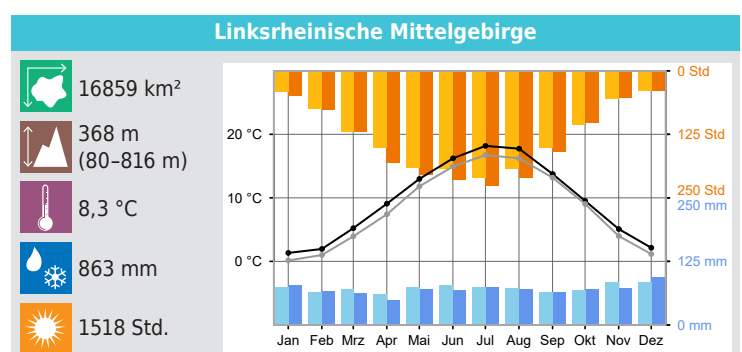
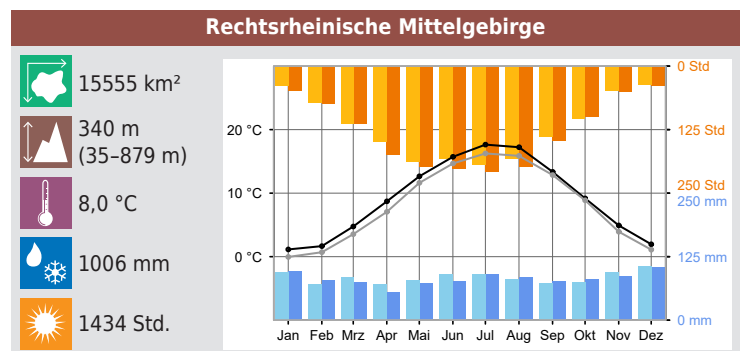
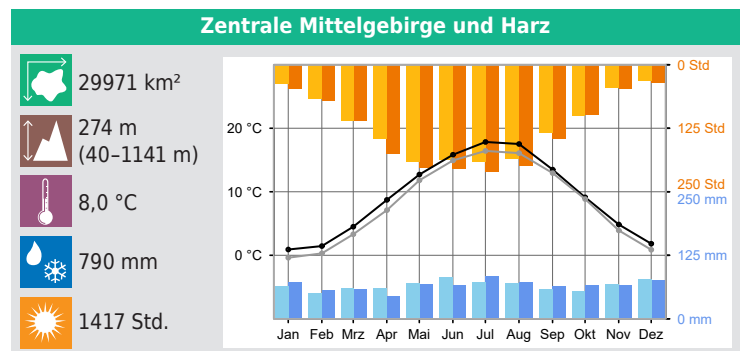
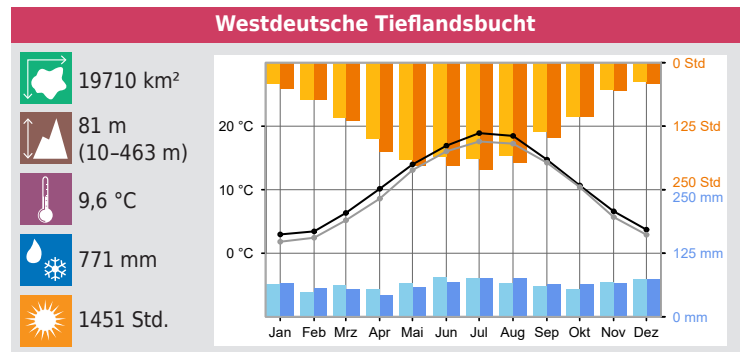
Eine Beschreibung des Klimas in Deutschland mit Hilfe von Flächenmitteln für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik ist nicht immer sinnvoll. Oft lässt sich die entsprechende Situation kleinräumig/regional besser beschreiben. Je nach Ereignis oder Thema kann die dafür notwendige regionale Einteilung sich deutlich unterscheiden und teilweise räumlich sehr eng begrenzt sein. Während für einzelne Wetterphänomene eine sehr feine Aufteilung nötig wäre, ist es auf der klimatischen Zeitskala möglich, größere Regionen zu definieren.

Die hier verwendete Einteilung fasst vorhandene naturräumliche und landschaftliche Abgrenzungen zu zwölf Regionen zusammen. Die Regionen sollen den Übergang vom maritimen zum kontinentalen Einfluss einerseits und die durch das Relief vorhandenen Strukturen andererseits differenzieren.

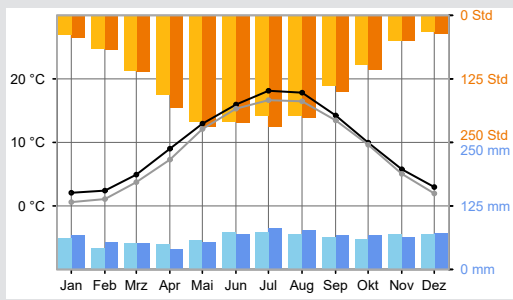
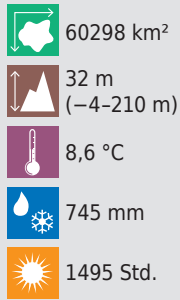
In der Deutschlandkarte ist diese regionale Aufteilung dargestellt. Die zugehörigen Klimadiagramme zeigen die Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der international gültigen Referenzperiode für den Klimawandel 1961–1990 und der Referenzperiode für Aussagen zum aktuellen Klima 1991–2020. Die Zahlenwerte links neben jeder Abbildung beziehen sich auf 1961–1990. Auch für das gesamte Bundesgebiet sind die entsprechenden Daten abgebildet.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Veränderungen des Klimas in der Vergangenheit und die möglichen Entwicklungen in der Zukunft für Deutschland aufgezeigt. Unterscheiden sich eine oder mehrere Regionen deutlich, so werden diese explizit angegeben.

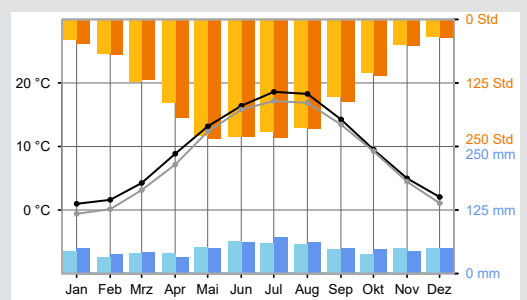
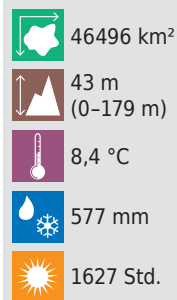
Gebiet	
	Fläche
	Mittlere Höhe (minimale-maximale Höhe)
	Jahresmitteltemperatur
	Jährliche Niederschlagssumme
	Jährliche Sonnenscheindauer
Diagramme	
Monatsmitteltemperatur	● 1961-1990 ● 1991-2020
Monatliche Niederschlagssumme	● 1961-1990 ● 1991-2020
Monatliche Sonnenscheindauer	● 1961-1990 ● 1991-2020



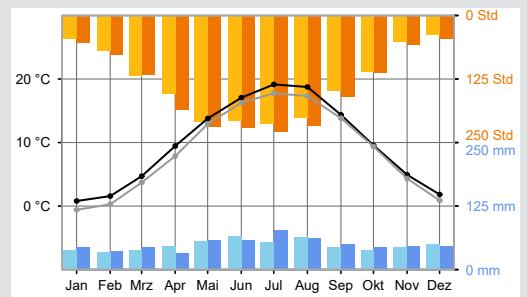
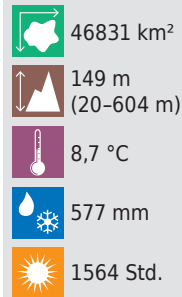
Nordwestdeutsches Tiefland



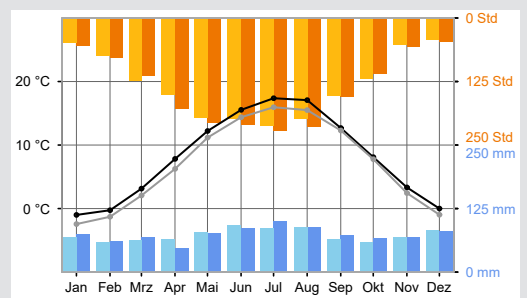
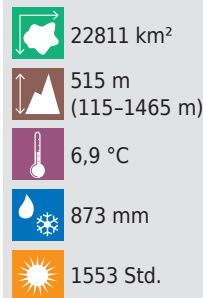
Nordostdeutsches Tiefland



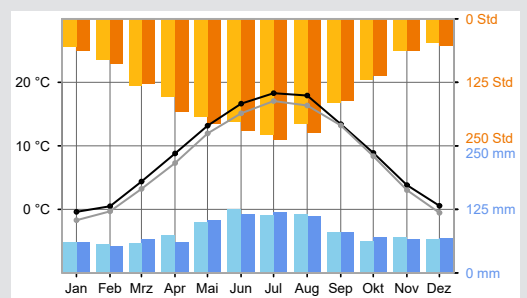
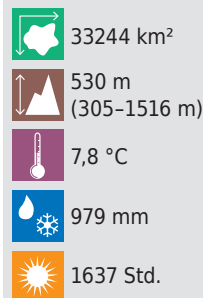
Ostdeutsche Becken und Hügel



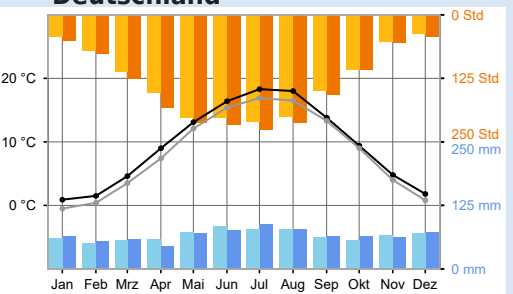
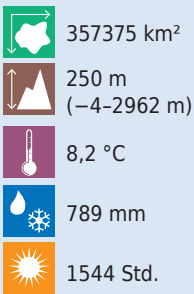
Östliche Mittelgebirge



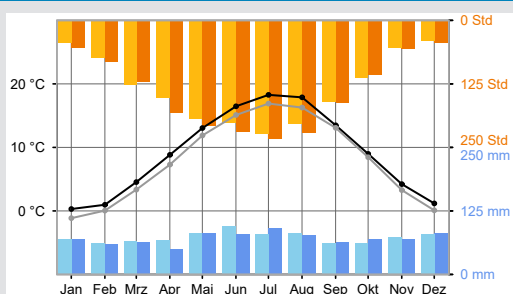
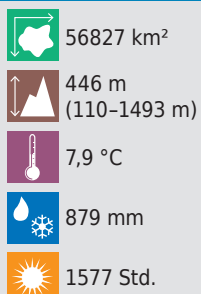
Alpenvorland



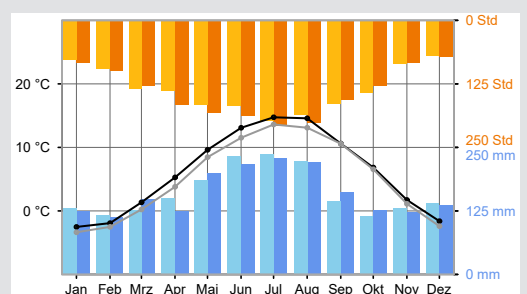
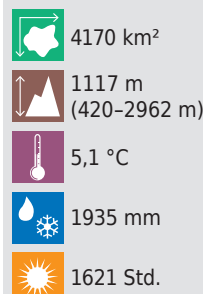
Deutschland



Südwestdeutsche Mittelgebirge



Alpen





Temperatur

Temperatur

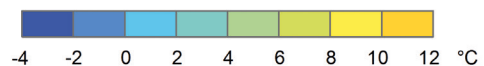
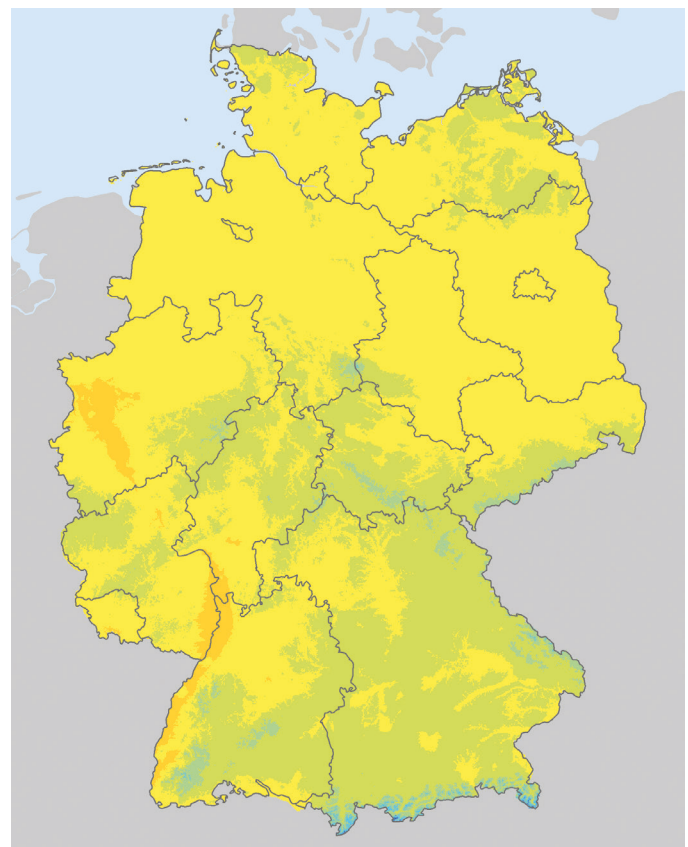
Die Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland beträgt für die Referenzperiode 1961–1990 8,2 °C. Während in den deutschen Mittelgebirgsräumen und im Alpenvorland aufgrund der höheren Lage die Durchschnittstemperaturen etwas niedriger liegen (6,9 bis 8,0 °C) und die Alpen nur 5,1 °C erreichen, treten insbesondere im Oberrheinischen Tiefland (9,8 °C) und in der Westdeutschen Tieflandsbucht (9,6 °C) deutlich höhere Durchschnittswerte auf.

Veränderungen der Lufttemperatur seit 1881

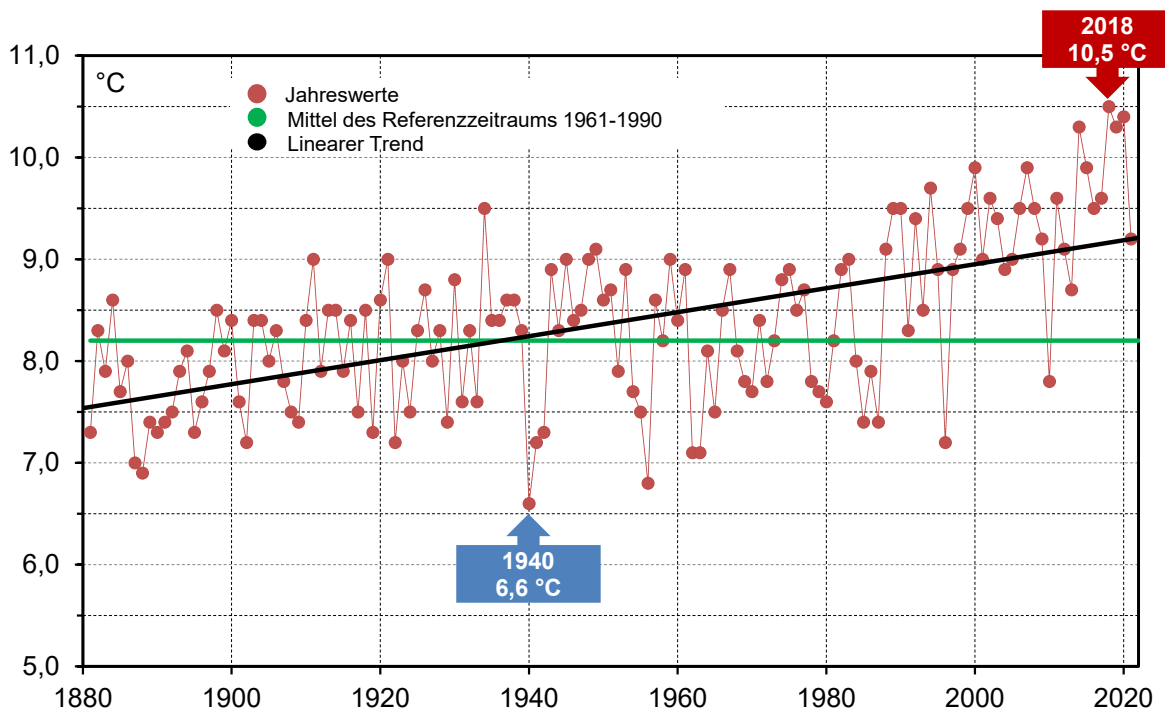
Von 1881 bis 2021 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur für Deutschland um 1,6 °C angestiegen. Auch der vieljährige Mittelwert ist mittlerweile von 8,2 °C in der Referenzperiode (1961-1990) auf 9,3 °C im aktuelleren 30-Jahres-Zeitraum (1991-2020) gestiegen.

Der auch global zu beobachtende Trend der Erwärmung der Atmosphäre ist überlagert durch die natürliche Variabilität des Klimasystems, durch die es auch immer wieder Zeiträume gibt, in denen der Temperaturanstieg stagniert, oder sogar Phasen, in denen die Temperatur kurzfristig zurückgegangen ist. Bei den Rückgängen handelt es sich um die Folge periodischer Schwankungen, die eng an die Zirkulation der Ozeane gekoppelt sind. Die periodischen Schwankungen überlagern den Einfluss der externen Klimaantriebe. Zu denen gehören beispielsweise die natürlichen Faktoren wie Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität.

Der Zeitraum 1910 bis 1950 und insbesondere der Zeitraum seit der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre sind geprägt von steigenden Temperaturen, während diese dazwischen weitestgehend auf demselben Niveau verharren. Auch zum Ende des 19. Jahrhunderts blieb die Jahresmitteltemperatur im Wesentlichen konstant. Die stärksten Änderungen seit 1881 finden sich in der Westdeutschen Tieflandsbucht, dem Linksrheinischen Mittelgebirge und im Oberrheinischen Tiefland mit 1,7 °C; im Nordostdeutschen Tiefland ist der Anstieg mit 1,2 °C am geringsten.



▲ Jahresmitteltemperaturen in Deutschland im Referenzzeitraum 1961–1990 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).



▲ Es ist wärmer geworden in Deutschland: Jahresmittel der Temperatur (Mittelwerte der Rasterfelder von Deutschland aus Stationsmessungen in 2 m Höhe) von 1881-2021.

2018 wurde das bisher wärmste Jahr seit 1881 in Deutschland beobachtet. Dreizehn der zwanzig wärmsten Jahre liegen im 21. Jahrhundert.

Jahreszeitliche Unterschiede

Der vieljährige Mittelwert der Lufttemperatur für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) liegt mit 0,3 °C für ganz Deutschland knapp über dem Gefrierpunkt. Dabei findet sich aber eine starke räumliche Differenzierung: Es gibt negative Werte bzw. Werte knapp um den Nullpunkt für die Alpen, das Alpenvorland und die Mittelgebirgsregionen. Die höchsten Mittelwerte werden mit ca. 1,7 bis 2,4 °C im Oberrheinischen Tiefland und in der Westdeutschen Tieflandsbucht gemessen. Relativ mild ist es auch im Nordwestdeutschen Tiefland mit 1,2 °C. In den Sommermonaten

sind dagegen die regionalen Unterschiede in den mittleren Temperaturen, außer in den Alpen, nicht so ausgeprägt: Bei einer mittleren Temperatur von 16,3 °C für ganz Deutschland finden sich mit 18,0 °C im Oberrheingraben und 17,1 °C in der Ostdeutschen Beckenlandschaft die höchsten Mittelwerte für die Monate Juni, Juli und August, während die Mittelgebirgsräume um die 16 °C erreichen.


Veränderung von Kenntagen

Die Anzahl Heißer Tage (Tagesmaximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C) ist, über ganz Deutschland gemittelt, seit den 1950er-Jahren von etwa drei Tagen im Jahr auf derzeit durchschnittlich zehn Tage im Jahr angestiegen. Die mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum der Lufttemperatur < 0 °C) hat im gleichen Zeitraum von 28 Tagen



Die zehn wärmsten Jahre in Deutschland seit 1881

2018	10,5 °C
2020	10,4 °C
2014	10,3 °C
2019	10,3 °C
2000	9,9 °C
2007	9,9 °C
2015	9,9 °C
1994	9,7 °C
2002	9,6 °C
2011	9,6 °C



auf 16 Tage abgenommen. In den wärmsten Regionen Deutschlands finden sich auch die meisten Hitzeperioden. Im Zeitraum 1961–1990 lag die mittlere Anzahl von Heißen Tagen im Oberrheinischen Tiefland, in der Westdeutschen Tieflandsbucht und in den Ostdeutschen Becken und Hügeln bei sechs bis neun Tagen im Jahr.

1991–2020 sind diese Ereignisse inzwischen auf durchschnittlich zwölf, am Oberrheinischen Tiefland sogar auf 16 Tage pro Jahr angestiegen. Im Alpenvorland und in den Alpen ist mittlerweile mit neun bzw. vier Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen. Dies entspricht

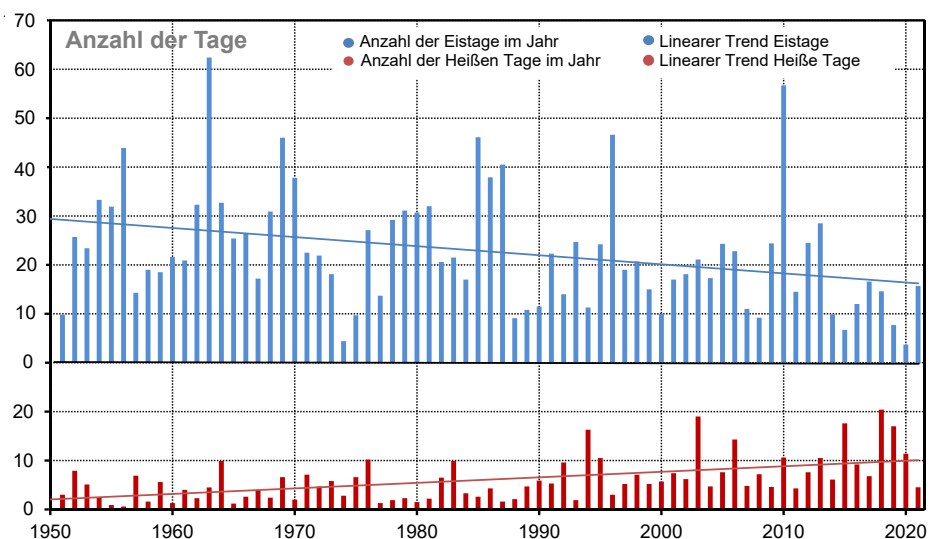
mehr als dem Doppelten (Alpenvorland) bzw. mehr als dem Fünffachen (Alpen) im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990.

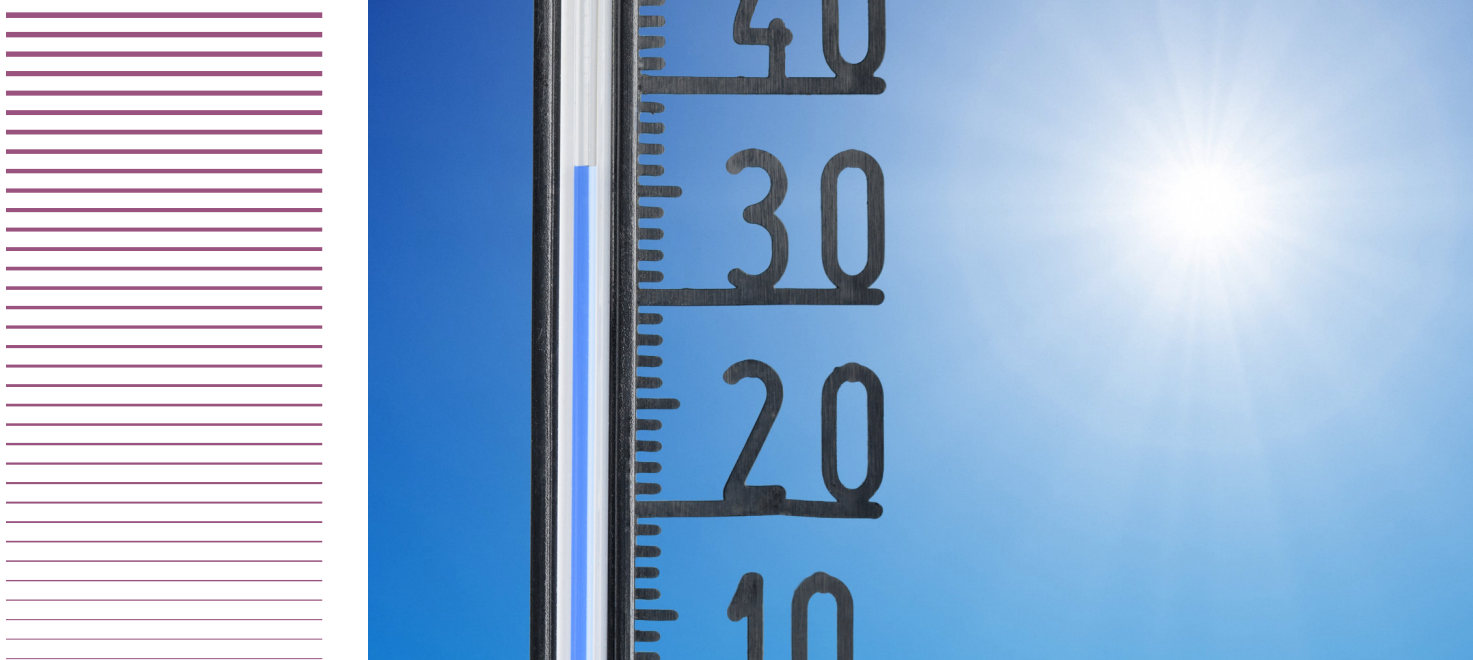
Die höchste Anzahl an Eistagen ist in den Alpen und in den Östlichen Mittelgebirgen zu erwarten. Hier klettert im Mittel an 42 (in den Alpen an 56) Tagen pro Jahr die Temperatur nicht über die Nullgradgrenze (Referenzperiode 1961–1990). Relativ mild ist es wiederum im Oberrheinischen Tiefland und in der Westdeutschen Tieflandsbucht mit im Mittel weniger als 16 Eistagen pro Jahr. Im Nordwest- und Nordostdeutschen Tiefland ist mit 20 bzw. 26 Eistagen pro Jahr zu rechnen. Beim Vergleich der Mittelwerte für die Zeiträume 1961–1990 und 1991–2020 ergeben sich die geringsten Veränderungen für die Alpen. Die größten Veränderungen sind in der Westdeutschen Tieflandsbucht zu beobachten, in der sich die Anzahl der Eistage um 40 Prozent verringert hat.

Zukunft

Im Rahmen der Pariser Klimaschutzkonferenz COP21 wurde im Aktionsplan das Ziel definiert, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C zu begrenzen. Die Zahl bezieht sich auf einen vorindustri-

Die Zahl der Eistage nimmt in Deutschland ab, Heiße Tage treten häufiger auf. Die Darstellung zeigt die Jahreswerte für Deutschland von 1951–2021 sowie den entsprechenden linearen Trend.





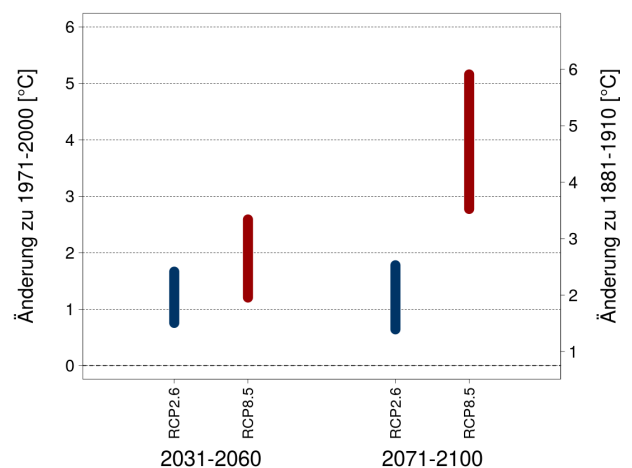
ellen Zustand. In Deutschland gibt es flächendeckende Aufzeichnungen seit 1881. Daher wurde ein frühindustrieller Zeitraum 1881 bis 1910 definiert.

Alle nachfolgenden Angaben beziehen sich auf den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die Temperaturänderung zwischen dem frühindustriellen Zeitraum und dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 beträgt 0,8 °C. Um einen Bezug zum Pariser Klimaabkommen auf der lokalen Skala zu erhalten, muss zu den Änderungswerten der Jahreswerte 0,8 °C addiert werden.

Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Deutschland ist zu erwarten. Für den kurzfristigen Planungshorizont (2031-2060) beträgt dieser Anstieg etwa 1,1 bzw. 1,9 °C im Mittel (Median der Ensemble der beiden Szenarien). Der Unterschied zwischen den durch die Klimaprojektionen (**Klimaschutz-Szenario** und **Weiter-wie-Bisher-Szenario**) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 0,8 und 2,6 °C. Die Erwärmung ist in Süddeutschland etwas stärker ausgeprägt.

Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem **Klimaschutz-Szenario** ist eine Erhöhung um 1,1 °C zu erwarten. Erreicht wird die Stabilisierung auf dem Niveau des kurzfristigen Planungshorizontes durch die sehr starke Reduktion der Treibhausgasemissionen innerhalb der Szenariendefinition. Die Änderung im Vergleich zum frühindustriellen Zustand beträgt 1,9 °C. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden. Unter den Bedingungen des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** beträgt die Erwärmung etwa 3,9 °C im Mittel. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,8 und 5,2 °C. Die Erwärmung ist in den südlichen Regionen stärker ausgeprägt.

Die vorliegenden Ergebnisse des Weiter-wie-bisher-Szenarios entsprechen in etwa den Ergebnissen der vorhandenen Klimaprojektionen auf der Basis des SRES-Szenarios A1B.



▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresmitteltemperatur von Deutschland. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2031-2060) und langfristigen (2071-2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971-2000 (linke Achse) und zum frühindustriellen Zeitraum 1881-1910 (rechte Achse). Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, blau) denen des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, rot) gegenübergestellt. Die dargestellten Balken zeigen die Spannweite zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Bandbreite wird aus den DWD-Referenz-Ensembles ermittelt (11 Klimaprojektionen für RCP2.6, 21 für RCP8.5).

Jahreszeitliche Mittelwerte der Temperatur und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	1991-2020	2031-2060 (RCP2.6)	2031-2060 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	7,7 °C	8,1 °C	8,9 °C	+0,9 °C	+1,5 °C	+0,9 °C	+3,3 °C
Sommer	16,3 °C	16,6 °C	17,6 °C	+1,1 °C	+1,9 °C	+1,1 °C	+3,9 °C
Herbst	8,8 °C	8,7 °C	9,3 °C	+1,4 °C	+2,2 °C	+1,3 °C	+4,1 °C
Winter	0,3 °C	0,8 °C	1,4 °C	+1,2 °C	+2,1 °C	+1,2 °C	+3,9 °C
Jahr	8,2 °C	8,6 °C	9,3 °C	+1,1 °C	+1,9 °C	+1,1 °C	+3,9 °C

Regionale Unterschiede

Insbesondere in den Alpen liegen die projizierten Erwärmungsraten sowohl bei dem **Klimaschutz-Szenario** als auch bei dem **Weiter-wie-bisher-Szenario** noch über den für Gesamtdeutschland projizierten Änderungen. Hier beträgt die Änderung für den kurzfristigen Planungshorizont zwischen +1,2 °C (**Klimaschutz-Szenario**) und +2,1 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971-2000. Für den langfristigen Planungshorizont werden mittlere Erwärmungsraten zwischen 1,1 °C (**Klimaschutz-Szenario**) und 4,5 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) projiziert.

In der Küstenregion des Nordwest- und Nordost-deutschen Tieflandes liegen die für den langfristigen Planungshorizont projizierten Änderungen etwas unter den mittleren Werten. Hier werden Erwärmungsraten zwischen 1,1 °C (**Klimaschutz-Szenario**) und 3,7 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) projiziert.

Jahreszeitliche Unterschiede

Die Erwärmung ist in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Frühjahrs, wo sie geringer ausfällt. Mit der Temperaturzunahme geht eine markante Zunahme der Temperaturextreme einher. Mit tiefen Temperaturen verbundene Extreme nehmen stark ab und mit Wärme verbundene Extreme nehmen stark zu. Dadurch steigt die Häufigkeit von Hitzewellen.

In allen Jahreszeiten ist die Erwärmung in den Alpen und im Alpenvorland stärker ausgeprägt als in Gesamtdeutschland. Besonders deutlich liegt die Erwärmung für den langfristigen Planungshorizont im Winter mit im Mittel 4,0 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) über den für Gesamtdeutschland projizierten Erwärmungsraten von im Mittel 3,9 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**).

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Ungebrochener Trend der Erwärmung in Deutschland
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,6 °C seit 1881
- Änderung der Extreme: Mehr Heiße Tage, weniger Eistage

Kurzfristiger Planungshorizont

- Deutschlandweite mittlere Erwärmung um im Mittel 1,1 bis 1,9 °C

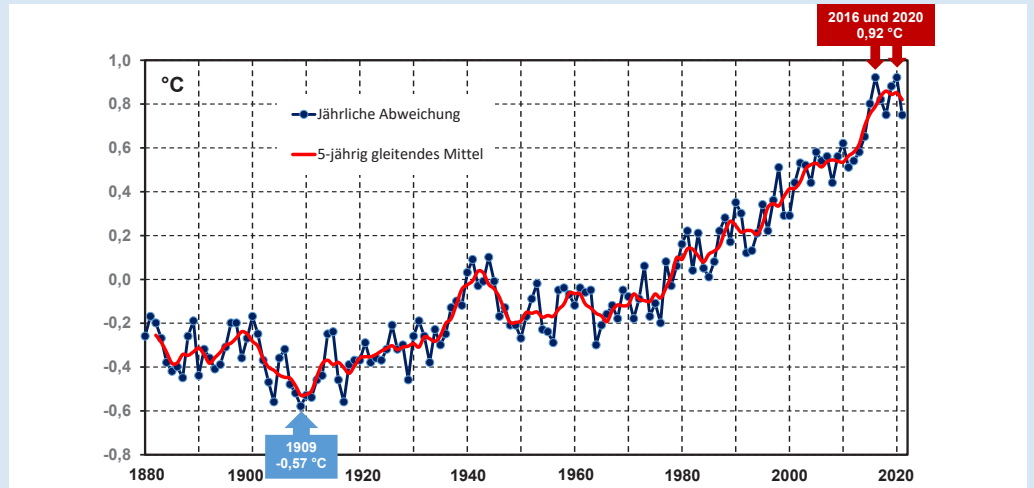
Langfristiger Planungshorizont

- Beim Klimaschutz-Szenario Stabilisierung auf eine Erwärmung von 1,1 °C
- Beim Weiter-wie-bisher-Szenario deutschlandweite mittlere Erwärmung um im Mittel 3,9 °C

Stärkere Erwärmung in den Alpen und im Alpenvorland.

Globale Temperaturentwicklung

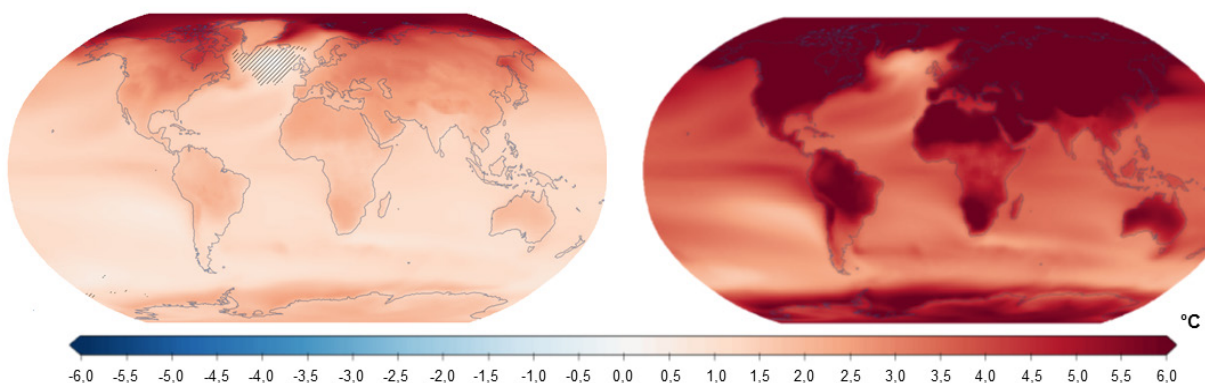
2016 und 2020 waren global die wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen. Die Jahre folgten damit dem langfristigen Trend der globalen Erwärmung. 16 der 17 wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen sind seit 2001 gemessen worden. Die globale Mitteltemperatur der Jahre 2016 und 2020 lag 1,1 °C über der mittleren Temperatur der vorindustriellen Zeit. Die beobachtete Erwärmung der letzten Jahrzehnte war über den Landmassen höher als über den Ozeanen.



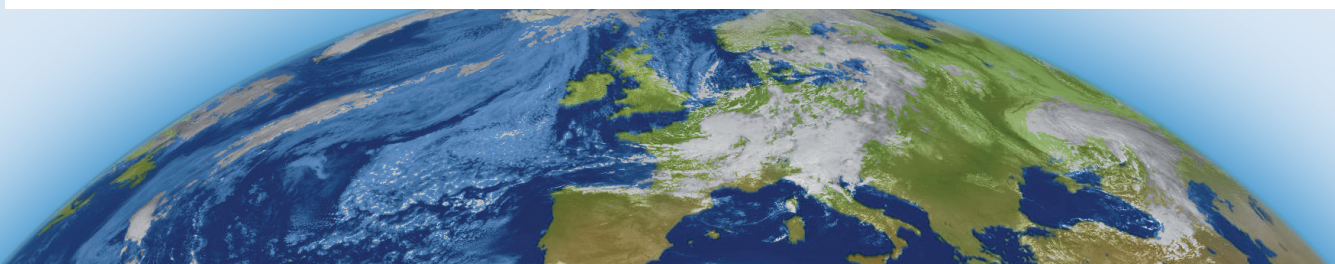
▲ Verlauf der globalen Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1880 bis 2021. Dargestellt ist der Unterschied zum Referenzzeitraum 1961–1990. (Quelle der Daten: NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS))

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen einen weiteren Anstieg der globalen Mitteltemperatur. Auf der Basis des **SSP1-2.6-Szenarios** wird zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung von 2 °C gegenüber dem Zeitraum vorindustriellen Zeitraum (1850-1990) berechnet. Für das **SSP5-8.5** ergibt sich eine mittlere Erwärmung von 4,8 °C.

Die Erwärmung ist regional sehr unterschiedlich. Die höchsten Erwärmungsraten treten über den Kontinenten und an den beiden Polkappen auf. Ein Verlauf entsprechend dem Szenario SSP1-2.6 hält das COP21-Ziel ein. Dagegen verfehlt ein Verlauf entsprechend dem SSP5-8.5 die COP21-Ziele deutlich.



▲ Mittlere Temperaturänderung für den Zeitraum 2081–2100 auf der Basis des SSP1-2.6 (links) und des SSP5-8.5 (rechts) Szenarios. Dargestellt ist der Unterschied zum Zeitraum 1961–1990. Die Schraffur zeigt Regionen, in denen der Änderungswert kleiner ist als die natürliche Klimavariabilität. (Quelle: <https://interactive-atlas.ipcc.ch>)





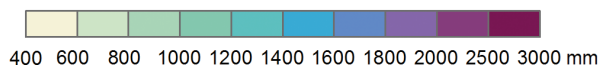
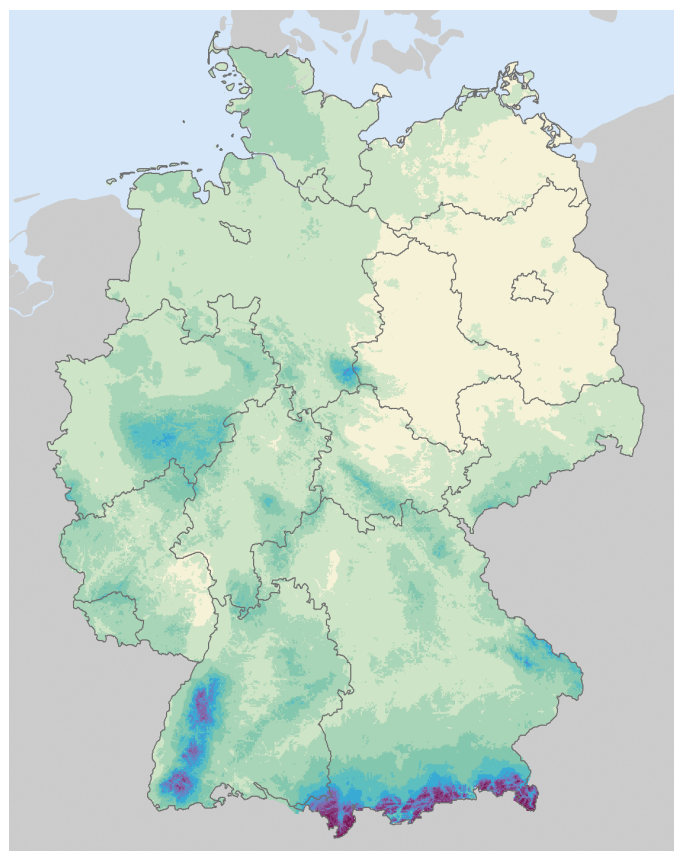
Niederschlag

Niederschlag

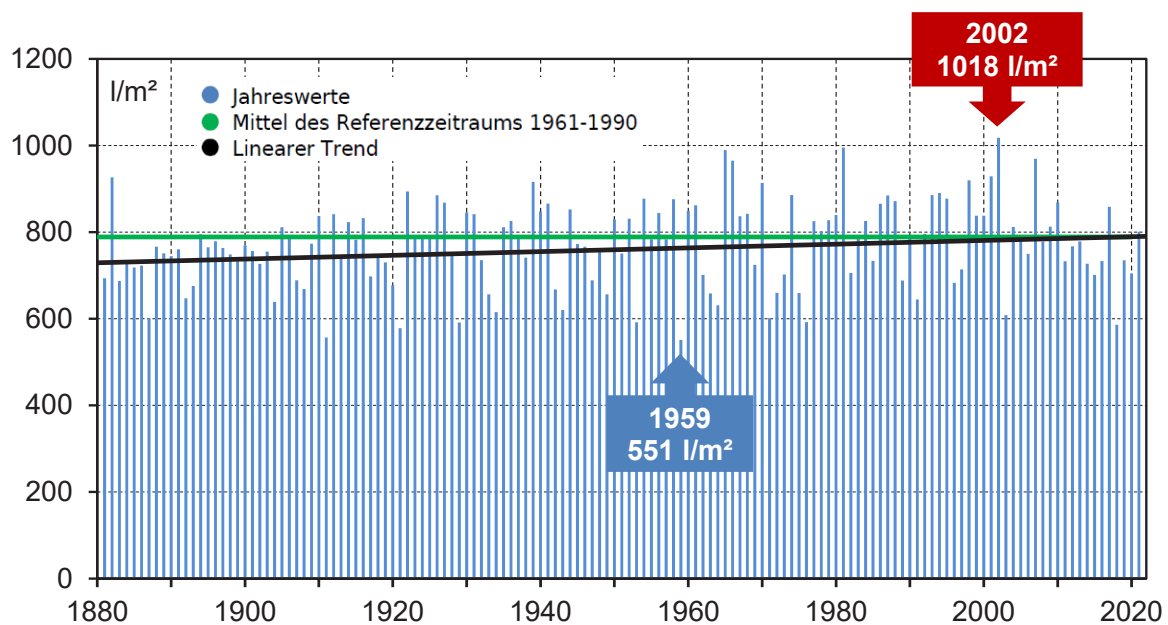
Das Niederschlagsverhalten in Deutschland im Übergangsbereich vom atlantisch zum kontinental geprägten gemäßigten Klima Mitteleuropas wird bestimmt von einem mit größer werdender Nordseeferne abnehmenden Feuchteangebot und einer mit zunehmender Höhe über Meeresniveau steigenden Niederschlagsneigung. In den vergangenen hundert Jahren wurde ein Anstieg der mittleren Niederschlagshöhe beobachtet. Auch in der Zukunft ist mit einer leichten Zunahme des Jahresniederschlags zu rechnen.

Das Niederschlagsaufkommen in Deutschland

In Deutschland fallen im Durchschnitt 789 Liter pro Quadratmeter (l/m^2) Niederschlag pro Jahr. In den nordöstlichen und zentralen Teilen Deutschlands sind verbreitet mittlere jährliche Niederschlagshöhen von unter $600 l/m^2$, in den höheren Lagen der Alpen und des Schwarzwaldes von über $1500 l/m^2$ normal. In den Tieflandbereichen ist die mittlere Niederschlagshöhe in Nordseennähe am größten. Sie nimmt in Richtung Südosten mit zunehmender Kontinentalität ab. In den Mittelgebirgen und den Alpen nimmt die mittlere Niederschlagshöhe mit steigender Höhe über dem Meeresniveau zu. Die Ausrichtung der Höhenzüge sowie weitere orografische Gegebenheiten modifizieren das Niederschlagsverhalten zusätzlich. Im Durchschnitt (Mittel Referenzzeitraum 1961–1990) sind im Nordostdeutschen Tiefland und in den Ostdeutschen Becken und Hügeln mit $577 l/m^2$ die geringsten und in den Alpen mit $1935 l/m^2$ die größten Jahresniederschlagshöhen zu verzeichnen. Diese Niederschlagsmengen und deren räumliche Verteilung haben sich im aktuellsten 30jährigen Zeitraum kaum verändert. In Einzeljahren und kleinräumig kann die Niederschlagshöhe deutlich niedriger oder auch deutlich reichlicher ausfallen. So wurden mit $209 l/m^2$ im Jahr 1911 (Aseleben, Sachsen-Anhalt) und mit $3503 l/m^2$ im Jahr 1970 (Balderschwang, Bayern) die geringsten bzw. höchsten Niederschläge seit Beginn der Aufzeichnungen an einer Station in Deutschland gemessen.



▲ Jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland im Referenzzeitraum 1961–1990 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).



▲ Es ist nasser geworden in Deutschland: Zeitreihe der Jahresniederschlagshöhen (Flächenmittel aus Stationsmessungen) von 1881 bis 2021.

Veränderungen in der Jahresniederschlagshöhe seit 1881

Der Niederschlag ist eine sehr veränderliche Größe in Raum und Zeit. Das über ganz Deutschland gemittelt nasseste Jahr seit 1881 war das Jahr 2002 mit einer Niederschlagshöhe von 1018 l/m², das trockenste das Jahr 1959 mit 551 l/m². Unter teils starken Schwankungen von Jahr zu Jahr oder von Jahrzehnt zu Jahrzehnt nahm die deutschlandweite jährliche Niederschlagshöhe seit 1881 um 63 l/m² und knapp 8 relativ zur Referenzperiode 1961-1990 zu. Diese Zunahme erfolgte ungleichförmig. Von den 1880er-Jahren bis zu den 1920er-Jahren nahm die Niederschlagshöhe zunächst stärker zu, während sie seitdem bis heute nur langsam weiter zugenommen hat. Dieser weitere Anstieg ist aber von kurzfristigen Schwankungen überlagert, so dass es in den 1940er- und 1970er-Jahren etwas trockener war, während die 1960er- und 1980er-Jahre sowie die Phase um die Jahrtausendwende herum vergleichsweise nass ausfielen und die letzten 10 Jahre (2011-2020) etwas unterdurchschnittlich waren.

Jahreszeitliche Unterschiede

Im Mittel sind in Deutschland seit 1881 über alle Beobachtungsjahre die hydrologischen Sommerhalbjahre (Mai bis Oktober) in Deutschland etwas niederschlagsreicher als die Winterhalbjahre. Etwa 57 % des Jahresniederschlags fällt im Sommerhalbjahr, etwa 43 % im Winterhalbjahr. In einigen Regionen dominiert der Niederschlag des Sommerhalbjahres noch stärker, zum Beispiel im Alpenvorland (63 %). In anderen Regionen fällt die Dominanz des Sommerhalbjahres weit weniger deutlich aus, zum Beispiel im Rechtsrheinischen Mittelgebirge (51 %). Betrachtet man nur die drei Sommermonate Juni, Juli und August, so steht dem trockensten Sommer mit 124 l/m² im Jahr 1911 der nasseste Sommer mit 358 l/m² im Jahr 1882 gegenüber. Normal sind 239 l/m² (Mittel 1961-1990). Von 1881 bis heute hat der sommerliche Niederschlag leicht abgenommen. In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst zeichnet sich im gleichen Zeitraum eine Niederschlagszunahme ab, welche im Frühling deutlicher ausgeprägt ist als im Herbst.



Hervorstechend ist jedoch vor allem die Entwicklung in den drei Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar). Die Winterniederschläge haben seit dem Winter 1881/82 bis heute um 48 l/m² bzw. 26 % relativ zu 1961-1990 zugenommen. Damit lässt sich die Zunahme der mittleren Jahresniederschlagshöhe zum größten Teil durch die Zunahme der Winterniederschläge erklären. Ungeachtet dieses winterlichen Gesamttrends treten auch zu dieser Jahreszeit deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren auf.

Dem niederschlagsärmsten Winter mit 69 l/m^2 im Jahr 1890/91 steht der niederschlagsreichste Winter mit 304 l/m^2 im Jahr 1947/48 gegenüber. Normal sind 181 l/m^2 (Mittel 1961–1990).

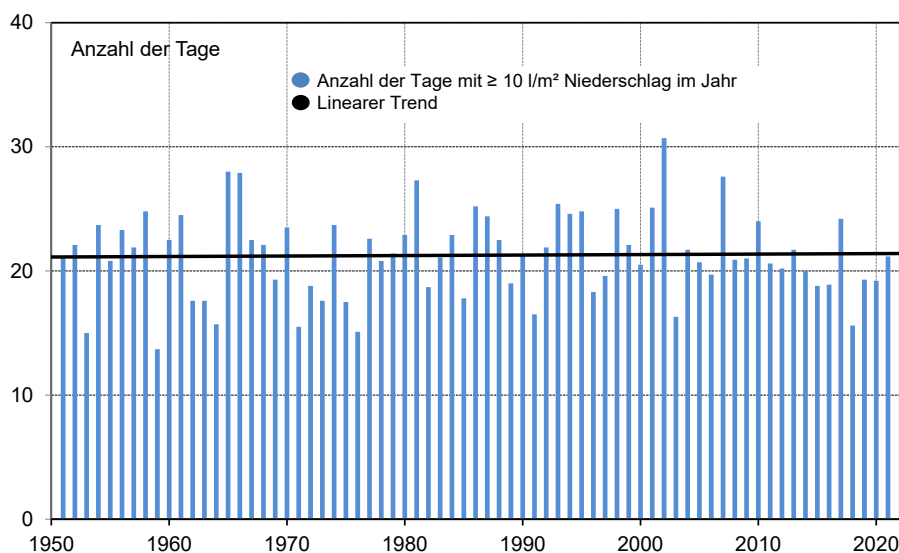
Die Alpen sind in allen Jahreszeiten die nasseste Region. Bei den trockensten Regionen gibt es hingegen Unterschiede zwischen den Jahreszeiten: Das Nordostdeutsche Tiefland weist im Frühling und Sommer mit 132 l/m^2 bzw. 182 l/m^2 (Mittel 1961–1990) die niedrigsten Werte auf, während die Südostdeutschen Becken und Hügel im Herbst mit 128 l/m^2 und im Winter mit 123 l/m^2 trockener sind. Der stärkste Jahrestrend relativ zu 1961–1990 findet sich im Nordwestdeutschen Tiefland mit $+13 \%$, wobei der Hauptanstieg wie schon in Gesamtdeutschland mit $+33 \%$ im Winter zu finden ist. Auch für die jahreszeitlichen Unterschiede lassen sich mit dem neuen vieljährigen Mittel 1991–2020 keine wesentlichen Veränderungen beobachten.

Veränderung von Kenntagen

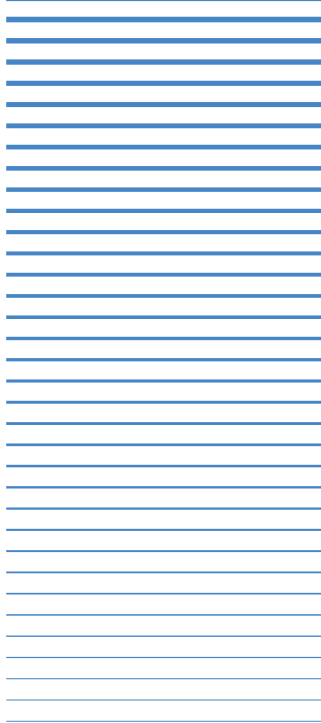
In Bezug auf besondere Niederschlagsereignisse gibt es zwei zu betrachtende Seiten: ein Zuviel und ein Zuwenig. Wird die Anzahl der Tage von mindestens 10 l/m^2 Niederschlag ausgezählt, so werden bei gleichzeitig großen jährlichen Schwankungen im Mittel über ganz Deutschland 21 Tage beobachtet. Diese Zahl hat sich in den letzten 70 Jahren kaum verändert. Es ist jedoch ein klares Nord-Süd- und West-Ost-Gefälle in der Häufigkeit zu beobachten, mit den wenigsten Ereignissen im Nordosten (Mittel weniger als 13 Tage) und den

meisten in Süddeutschland mit mehr als 27 Tagen. Für Niederschlagsmengen von mehr als 20 l/m^2 pro Tag ist keine Änderung der Anzahl seit den 1950er-Jahren festzustellen. Die Variabilität der Anzahl der Niederschlagsereignisse von mehr als 20 l/m^2 pro Tag ist von Jahr zu Jahr sehr hoch und insgesamt ist die Anzahl der Ereignisse mit 5 Tagen pro Jahr im Mittel über ganz Deutschland relativ selten. Auch hier findet sich ein starker Nord-Süd-Gradient.

Neben der Frage nach der Veränderung der Häufigkeit dieser Ereignisse ist insbesondere im Sommer auch von großer Bedeutung, inwieweit die Erwärmung mit einer zusätzlichen Austrocknung einhergeht. Eine extreme Austrocknung kann massive ökonomische Folgen haben, z. B. für die Binnenschifffahrt und die Landwirtschaft. Zur Erfassung von Trockenperioden wird die Häufigkeit von Episoden mit mindestens zehn aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag betrachtet. Aber wie schon bei den Niederschlagsereignissen von mehr als 20 l/m^2 pro Tag ist auch hier aufgrund der Seltenheit der Ereignisse (durchschnittlich 1,3 Fälle pro Sommer in Deutschland) keine statistisch gesicherte Veränderung seit den 1950er-Jahren zu beobachten. Hinzu kommen ausgeprägte natürliche Schwankungen mit abwechselnden Phasen stärkerer und geringerer Trockenheit, wie sie in ähnlicher Form auch bei den Niederschlagsereignissen zu finden sind. Bei den beschriebenen Niederschlags- und Trockenheitsereignissen sind aufgrund der hohen Variabilität und deren Seltenheit keine Veränderun-



Mittlere Anzahl der Tage mit 10 mm und mehr Niederschlag (Flächenmittel aus Stationsmessungen) von 1951 bis 2021.



gen zwischen den vieljährigen Mitteln 1961-1990 und 1991-2020 zu erkennen.

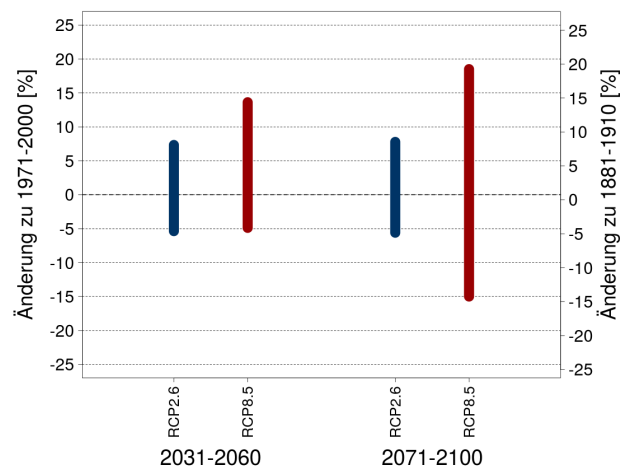
Zukunft

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2031-2060) ist für Deutschland nicht zu erwarten. Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags im Mittel um 5 %. Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen -5 % und +14 % Änderung. Sie ist in allen Teilen des Bundesgebietes in etwa gleich stark ausgeprägt. Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass eine modellierte Änderung unterhalb von 10 % nicht von der natürlichen Klimavariabilität unterschieden werden kann. Diese Schwelle gilt auch für alle nachfolgenden Werte.

Regionale Unterschiede

Für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) ist für Deutschland beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +8 % zu rechnen. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen -15 % und +19 %. Die Änderung wird in allen Teilen des Bundesgebietes in etwa gleich stark ausgeprägt sein.

Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 20 mm pro Tag ist für alle Regionen sowohl für den kurzfristigen Planungshorizont als auch für den langfristigen Planungshorizont mit einer Zunahme zu rechnen. Allein in der Alpenregion projizieren manche Modelle eine Abnahme dieser Tage. Ein weniger ausgeprägter Anstieg wird für die Tage mit Niederschlag von 30 mm und mehr projiziert.



▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresniederschlagssumme von Deutschland. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2031-2060) und langfristigen (2071-2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971-2000 (linke Achse) und zum frühindustriellen Zeitraum 1881-1910 (rechte Achse). Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, blau) denen des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, rot) gegenübergestellt. Die dargestellten Balken zeigen die Spannweite zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Bandbreite wird aus den DWD-Referenz-Ensembles ermittelt (11 Klimaprojektionen für RCP2.6, 21 für RCP8.5).

Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Spannweite innerhalb des Ensembles teilweise sehr groß, so dass die Resultate nur wenig belastbar sind. Regionale Unterschiede bezüglich der Änderung der mittleren Jahressumme der Niederschlagshöhe sind wenig ausgeprägt.

Jahreszeitliche Mittelwerte der Niederschlagshöhe und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	1991-2020	2031-2060 (RCP2.6)	2031-2060 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	186 mm	176 mm	171 mm	+7 %	+9 %	+4 %	+17 %
Sommer	239 mm	231 mm	240 mm	-1 %	0 %	-2 %	-6 %
Herbst	183 mm	188 mm	190 mm	+2 %	+4 %	-1 %	+4 %
Winter	181 mm	181 mm	189 mm	+6 %	+14 %	-1 %	+17 %
Jahr	789 mm	774 mm	790 mm	+5 %	+6 %	+3 %	+8 %

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2031–2060 werden unter Verwendung der genannten RCP-Szenarien für den Winter mittlere Zunahmen der Niederschlagsmenge um +10 % berechnet. Für den Sommer ist eine belastbare Richtungsangabe nicht möglich. Die Spannweite der Ergebnisse liegt im Bereich von geringen Zunahmen bis hin zu einem leichten Rückgang. In den Übergangsjahreszeiten zeigen sich für diesen Planungshorizont Zunahmen der mittleren Niederschlagssumme von +3 % (Herbst) bzw. +8 % (Frühjahr).

Im Frühjahr und im Herbst kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) +1 bis +14 % betragen, wohingegen die Änderung im Winter bis zu +17 % betragen kann. Für den Sommer werden in diesem Planungshorizont Abnahmen zwischen -2 % im **Klimaschutz-Szenario** (± 0 %) bis hin zu einer Abnahme der Niederschlagshöhe im **Weiter-wie-bisher Szenario** (-6 %) berechnet. Die Spannweite für den Sommer liegt im **Weiter-wie-bisher-Szenario** zwischen einer Zunahme um +12 % und einer Abnahme um -60 %. In den einzelnen Regionen ist ebenso der Sommer mit großen Spannweiten in den Ergebnissen gekennzeichnet, so dass hier die Ergebnisse nur wenig belastbar erscheinen.

Die vorliegenden Ergebnisse des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** unterscheiden sich von denen der bisher genutzten Klimaprojektionen auf der Basis des SRES Szenarios A1B. Das **Weiter-wie-bisher-Szenario**

zeigt nicht mehr die im SRES-Szenario A1B beschriebenen hohen Rückgänge der Sommerniederschläge beim langfristigen Planungshorizont.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Zunahme der Jahresniederschlagshöhe um 8 % seit 1881
- Niederschlagsanstieg im Frühling, Herbst und Winter, aber nicht im Sommer

Kurzfristiger Planungshorizont

- Keine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags (+5 %)

Langfristiger Planungshorizont

- Für Deutschland ist mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +6 % zu rechnen

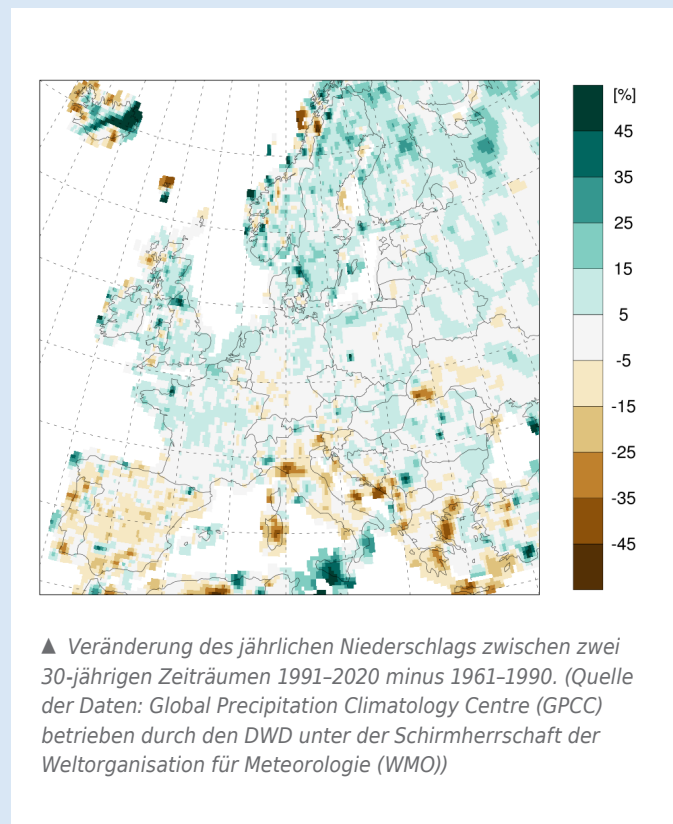
Für beide Planungshorizonte werden jeweils für die Wintermonate Zunahmen der Niederschlagsmenge und für den Sommer eine Spanne von keiner Änderung hin zu Abnahmen im langfristigen Planungshorizont simuliert.

Globale Niederschlagsentwicklung

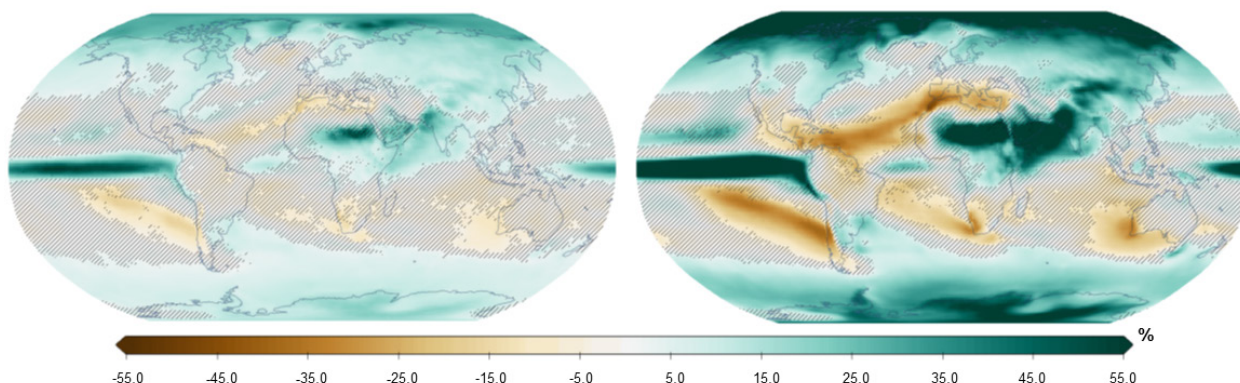
Der globale Niederschlag hat eine sehr große räumliche und zeitliche Variabilität, die durch viele natürliche Schwankungen, z. B. durch Zirkulationsmuster wie ENSO und die Nordatlantische Oszillation, geprägt ist.

Die Niederschläge über Europa haben im letzten Jahrhundert um 6–8 % zugenommen, dabei findet sich eine deutliche Zweiteilung. Die Zunahme zeigt sich mit 10–40 % hauptsächlich in Nordeuropa, während die Niederschläge im Mittelmeerraum und in Teilen Südosteuropas um bis zu 30 % abgenommen haben. Wie schon in Deutschland treten regional unterschiedliche Trends auf. Nord- und Westeuropa ist durch ein Ansteigen der Niederschlagsmengen, vor allem in den Wintermonaten (20–40 %), geprägt. In Südeuropa zeigt sich hingegen ganzjährig eine Abnahme der Niederschläge. Deutliche Niederschlagsabnahmen werden im Sommer aber auch in Mitteleuropa beobachtet.

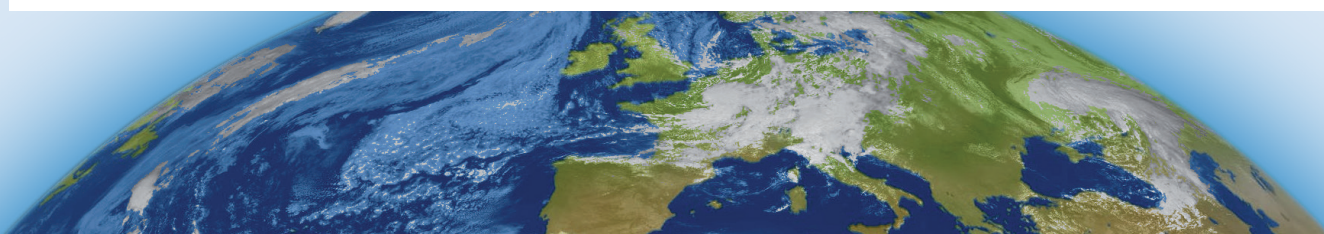
Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen, dass die Änderung der Niederschläge weitgehend nach dem Muster verlaufen, dass es in trockeneren Regionen trockener und in feuchteren Regionen feuchter wird. Die zu erwartenden Veränderungen auf Basis des **SSP1-2.6 Szenarios** werden zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Zeitraum 1961–1990 jedoch nur sehr moderat ausfallen, insbesondere über Europa. Im **SSP5-8.5 Szenario** werden die Signale deutlicher,



wobei sich, wie bei den Beobachtungen, bei den Jahreswerten wieder ein deutliches Nord-Süd-Gefälle über Europa zeigt. Im Sommer ist hingegen für ganz Europa eine Abnahme der Niederschläge wahrscheinlich.



▲ Mittlere Niederschlagsänderung für den Zeitraum 2081–2100 auf der Basis des SSP1-2.6 (links) und des SSP5-8.5 (rechts) Szenarios. Dargestellt ist der Unterschied zum Zeitraum 1961–1990. Die Schraffur zeigt Regionen, in denen der gezeigte Änderungswert kleiner als die natürliche Klimavariabilität ist. (Quelle: <https://interactive-atlas.ipcc.ch>)





Sonnenschein

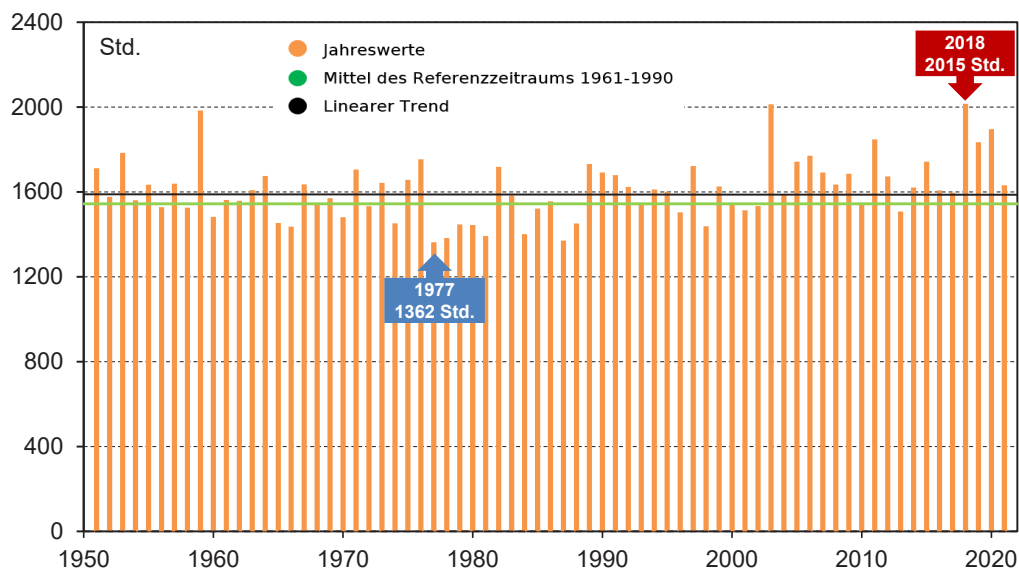
In Deutschland scheint im Durchschnitt 254 Minuten pro Tag die Sonne, das entspricht 1544 Stunden im Jahr. Am meisten scheint die Sonne in Süddeutschland und in Nordostdeutschland mit bis zu 280 Minuten am Tag, an der Ostseeküste können über 300 Minuten erreicht werden. Im zentralen Mittelgebirge und im Harz ist die Tagessonnenscheindauer am geringsten, hier werden im langjährigen Mittel nur 230 Minuten pro Tag gemessen.

Vergangenheit und Gegenwart

Aus der Darstellung der Jahressummen bis 2021 lassen sich grob drei Zeitabschnitte unterschiedlicher Sonnenscheindauer identifizieren: Von 1951 bis 1976 eine Phase höherer Jahreswerte, anschließend bis etwa zum Ende der 1980er-Jahre vermehrt geringere Jahressummen und dann wieder zunehmend. Zwischen etwa 1950 und 1980 gab es weltweit eine Phase zurückgehender Sonneneinstrahlung, die u. a. einer verstärkten Luftverschmutzung zugeschrieben wird. Verbunden mit den Erfolgen der Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft nahm danach die den Boden erreichende Sonneneinstrahlung wieder zu.

Entwicklung des Sonnenscheins seit 1951

Im Zeitraum von 1951 bis 2021 ist die mittlere Tagesonnenscheindauer leicht gestiegen. Dies resultiert zum größeren Teil aus mehr Sonnenschein in den Frühlings- und Sommermonaten.



Jahressummen der Sonnenscheindauer (Flächenmittel aus Stationsmessungen) in Deutschland von 1951-2021.



Zukunft

Die Sonnenscheindauer wird in den Klimamodellen nicht direkt berechnet, sondern indirekt aus der kurzwelligen Strahlung abgeleitet. Die Strahlung ist verbunden mit den Bewölkungsverhältnissen, eine der großen Herausforderungen der Klimamodellierung. Die Bandbreite der modellierten Werte ist daher zwischen den Modellen sehr groß. Dieses führt dazu, dass die Ergebnisse weniger aussagekräftig sind als beispielsweise die Ergebnisse der Temperaturänderungen.

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2031–2060 wird deutschlandweit ein Rückgang der Tagessonnenscheindauer um wenige Minuten projiziert. Dieser Rückgang macht sich beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** besonders im Winter und Frühjahr bemerkbar, wohingegen im Sommer und im Herbst mit keinen Änderungen zu rechnen ist. Diese Änderungen werden deutschlandweit gleichförmig projiziert.

Für den langfristigen Planungshorizont 2071–2100 wird eine Verstärkung dieser Änderungen erwartet. Im Jahresmittel ist mit einer minimalen Abnahme der mittleren Tagessonnenscheindauer zu rechnen. Dieser Rückgang macht sich besonders im Frühjahr und im Winter bemerkbar. Im Herbst treten wahrscheinlich keine Änderungen der Sonnenscheindauer auf. Im **Weiter-wie-bisher-Szenario** werden im Sommer durch einzelne Projektionen auch Zunahmen der mittleren Tagessonnenscheindauer von bis zu einer Stunde projiziert.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Durchschnittlich 254 Minuten Sonnenschein pro Tag
- Leichter Anstieg der Sonnenscheindauer in Deutschland seit 1951
- Viel Sonne im Süden und äußersten Nordosten, häufiger bedeckt in der Mitte

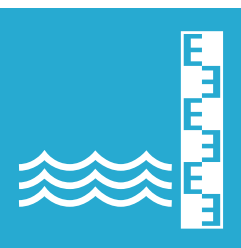
Kurzfristiger Planungshorizont

- Deutschlandweit minimaler Rückgang der Sonnenscheindauer möglich

Langfristiger Planungshorizont

- Verstärkung vorgenannter Tendenzen

Für beide Planungshorizonte jeweils ausgeprägter Rückgang im Winter und im Frühjahr (nur RCP8.5).



Meeresspiegel

Meeresspiegel

Beitrag des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Seit dem Beginn regelmäßiger Pegelaufzeichnungen stieg der mittlere Meeresspiegel an den deutschen Küsten um etwa 1 bis 4 cm pro Dekade. Neuere Untersuchungen zur Erwärmung der Meere und zu den Schmelzraten der Eisschilde in der Antarktis und Grönland zeigen, dass sich der globale Meeresspiegelanstieg weiter beschleunigen wird, so dass auch an den deutschen Küsten erhöhte Anstiegsraten zu erwarten sind.

Der Meeresspiegel – globale, regionale und lokale Beiträge

Für langfristige Planungen in Küstenregionen ist die Kenntnis des mittleren Meeresspiegels und dessen Änderungsrate von großer Bedeutung. Jedoch setzt sich diese aus verschiedenen Komponenten zusammen, deren Beiträge sich mit dem Klimawandel ebenfalls verändern. Der globale Meeresspiegelanstieg resultiert hauptsächlich aus:

- a) dem Volumenzuwachs des Meeres infolge der mit der Erwärmung einhergehenden Dichteabnahme des Meerwassers
- b) dem Massenzuwachs infolge der Schmelzwasserzufuhr von Gletschern und Eisschilden
- c) der Verringerung der terrestrischen Wasserspeicherung.

Regionale Abweichungen vom mittleren globalen Meeresspiegel kommen durch das jeweilige Regionalklima und durch die Umverteilung von Masse durch Ozeanströmungen zustande. Änderungen in der Zirkulation bedingen also Änderungen im Meeresspiegel. Darüber

hinaus werden regionale Abweichungen durch zunehmend relevante Änderungen des Gravitationsfelds bei voranschreitendem Masseverlust der grönländischen und antarktischen Eisschilde verursacht. Auf lokaler Skala wirken zudem Landhebungen bzw. Landsenkungen, die natürliche und auch anthropogene Ursachen haben können.

Alle oben genannten Einflussgrößen ergeben gemeinsam den lokalen Meeresspiegel an einem Pegelort. Dieser wird als relativer Meeresspiegel bezeichnet, da der Messpegel keinen festen (absoluten) Bezugspunkt darstellt, sondern morphologischen Höhenänderungen unterliegen kann.

Beobachtete Meeresspiegeländerungen an der deutschen Küste

Deutsche Bucht: Am Pegel Cuxhaven wurden Wasserstände seit 1843 zunächst als Scheitelwerte (höchste und niedrigste Wasserstände in einer Tidephase) aufgezeichnet; seit 1918 werden stündliche Werte registriert. Für weitere Pegelstandorte an der deutschen Nordseeküste liegen Was-





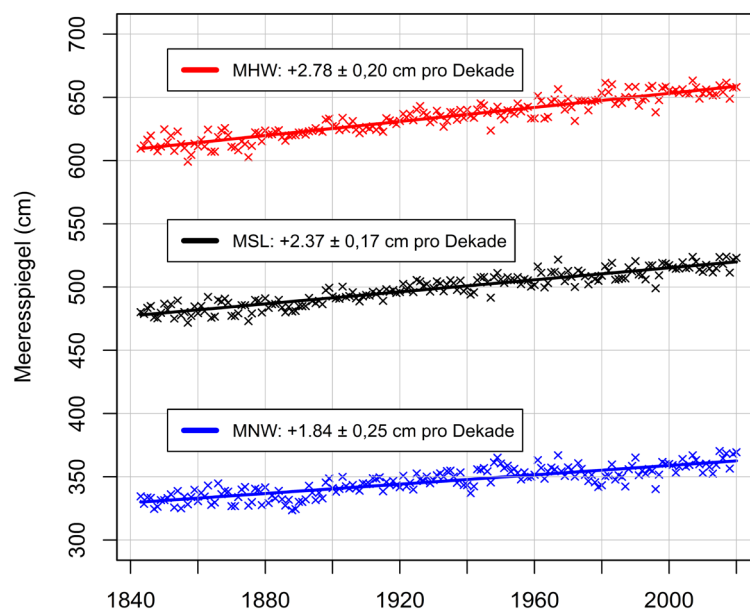
serstandsmessungen seit den 1930er Jahren vor. Aufgrund seiner zentralen Lage und der ungewöhnlichen Länge der Messreihe von über 170 Jahren wird der relative Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht exemplarisch für den Pegel Cuxhaven veranschaulicht.

Die zeitliche Entwicklung unterliegt hier - wie auch an anderen Pegelorten in der Deutschen Bucht - einer deutlichen dekadischen Variabilität: Dem grundsätzlichen Anstieg sind wechselnde Phasen stärkeren Anstiegs und schwächeren Sinkens überlagert. Der relative Meeresspiegel am Pegel Cuxhaven stieg um 2,37 cm/Dekade oder 0,42 m über den Gesamtzeitraum von 1843-2020. Für die letzte Zeitspanne 1970-2020 ergibt sich ein praktisch identischer Trend von +2,49 ($\pm 0,97$) cm/Dekade, der leicht über dem mittleren globalen Meeresspiegelanstieg von +2,33 ($\pm 0,79$) cm/Dekade für 1971-2018 liegt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Trends der Hoch- und Niedrigwasserscheitel um rund 1 cm/Dekade, wobei das Hochwasser stärker ansteigt als das Niedrigwasser. Daraus resultiert eine Erhöhung des Tidenhubs um 0,17 m über den Gesamtzeitraum. An der schleswig-holsteinischen Nordseeküste steigt der mittlere absolute Meeresspiegel von 1900-2015

um 1,86 cm/Dekade an. Dieser Wert erhöht sich für den Zeitraum 1993-2015 aber schon auf 3,21 cm/Dekade.

Südwestliche Ostsee: Auch die Zeitreihen der Ostseepegel sind durch starke dekadische Meeresspiegelschwankungen geprägt. Im Gegensatz zur Nordsee treten hier nur sehr kleine Gezeitenamplituden auf, da diese in den dänischen Belten gedämpft werden. Darüber hinaus wird die langzeitliche Entwicklung des relativen Meeresspiegels in weiten Teilen der Ostsee infolge des Abschmelzens des fennoskandischen Eisschildes von nacheiszeitlichen Landhebungen (GIA) dominiert. Diese Landhebungen finden allerdings hauptsächlich in der nördlichen und nicht in der südwestlichen Ostsee statt.

An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste steigt der Meeresspiegel absolut um etwa 1,57 cm/Dekade im Zeitraum 1900-2015 an, beschleunigt sich aber auf 2,40 cm/Dekade in den Jahren 1993-2015. Außer in der südwestlichen Ostsee sinkt in allen anderen Küstenregionen der relative Meeresspiegel jedoch aufgrund der oben beschriebenen noch stattfindenden nacheiszeitlichen Landhebung.



Mittlerer relativer Meeresspiegel (MSL), ► Hochwasser- (MHW) und Niedrigwasserscheitel (MLW) am Pegel Cuxhaven als Jahresmittel für 1843-2020. Trendangaben in cm/Dekade mit 95% Konfidenzintervall. (Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie; Rohdaten: WSA Cuxhaven)



Zukünftige Änderungen des mittleren globalen Meeresspiegels

Im aktuellen 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats von 2021 wird der mittlere globale Meeresspiegelanstieg bis Ende des 21. Jahrhunderts aus Projektionen mit verschiedenen Treibhausgaszenarien angegeben. Im **Szenario SSP1-2.6** ergibt sich bis 2100 ein Anstieg um 0,44 m (wahrscheinlicher Bereich, definiert als zentrale 66 % um den Median: 0,32–0,62 m) gegenüber dem Niveau von 1995–2014. Mit 0,77 m (0,63–1,02 m) liegt der Anstieg im **Szenario SSP5-8.5** fast doppelt so hoch. Die Anstiegsrate im Jahr 2100 ist mit 1,2 cm/Jahr (0,9–1,8 cm/Jahr) sogar 2,5-mal so hoch wie im **SSP1-2.6**. Im Sonderbericht Ozean und Kryosphäre des Weltklimarats von 2019 (SROCC, 2019) lagen die projizierten Werte im **Szenario SSP5-8.5** sogar noch etwas höher, da dort die „extremere“ Studien stärker gewichtet wurden. Generell wird im AR6 konstatiert, dass es oftmals nicht die Frage ist, „ob“, sondern nur noch „wann“ ein gewisser Wert überschritten wird.

Der Weltklimarat wies bereits in seinem 5. Sachstandsbericht darauf hin, dass die Abschätzungen der Beiträge der Eisschilde äußerst unsicher sind, da relevante eisdynamische Prozesse bislang nicht hinreichend verstanden oder in globalen Klimamodellen nicht explizit modellierbar sind. Der Wissensstand hinsichtlich der komplexen Wechselwirkung zwischen Ozean und insbesondere dem inhärent instabilen westantarktischen Meereis hat sich inzwischen verbessert, jedoch sind die Eisschildprozesse und der aus diesen resultierende Meeresspiegelanstieg weiterhin mit den größten Unsicherheiten behaftet.

Im AR6 wurde der Beitrag der Antarktis zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg neu abgeschätzt. Auf Basis von SSP5-8.5 Projektionen mit prozessbasierten Eisschildmodellen ergibt sich der Antarktisbeitrag bis 2100 (relativ zu 1995–2014) im Median zu 0,12 m (0,03–0,34 m).

Einen Antarktisbeitrag von über 1 m – und damit jenseits des 66 % Bereichs – liefert eine Modellstudie, die bislang kaum beachtete – aber rheologisch plausible – destabilisierende Prozesse berücksichtigt. Ferner ergeben probabilistische Abschätzungen auf Basis von Structured Expert Elicitation für den Antarktisbeitrag einen doppelt so hohen Median (0,21 m) wie die modellbasierten Schätzungen und zeigen darüber hinaus, dass ein Gesamtanstieg des mittleren globalen Meeresspiegels um 2 m bis 2100 nicht auszuschließen ist.

Die Schmelzraten der Eisschilde und Landgletscher haben sich Beobachtungen zufolge in letzter Zeit deutlich erhöht, so dass die Schmelzwasserbeiträge die erwärmungsbedingte Volumenzunahme des Ozeans inzwischen übertreffen und zum Hauptantrieb des globalen Meeresspiegelanstiegs geworden sind. Tiefe Unsicherheit besteht hinsichtlich der Entwicklung des Meeresspiegels in den kommenden Jahrhunderten. Sie hängt entscheidend davon ab, ob bzw. in welchem Ausmaß es zu einer Destabilisierung der Eisschilde kommt. Wie einige wenige Modellsimulationen zeigen, könnte der Meeresspiegel bei unverminderten Emissionen (SSP5-8.5) bis 2300 um über 5 m ansteigen, während der Meeresspie-

gelande auch im Szenario mit hohem Klimaschutz (SSP1-2.6) möglicherweise erst bei 3 m stabilisiert werden kann.

Der relative Meeresspiegelanstieg in Nord- und Ostsee bis zum Ende des 21. Jahrhunderts lässt sich für das SSP1-2.6 und SSP5-8.5 Szenario dem Assessment der European Environmental Agency entnehmen. Für die Deutsche Bucht und die südwestliche Ostsee belaufen sich die Anstiege im Median auf 0,2-0,4 m (SSP1-2.6) bzw. 0,6-0,8 m (SSP5-8.5).

Das Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) bietet zudem unter <https://sealevelrise.brgm.fr> eine interaktive Webanwendung, mit der sich auch für die deutschen Gewässer Projektionen des Gesamtanstiegs des Meeresspiegels oder einzelne Komponenten sehr detailliert visualisieren lassen.

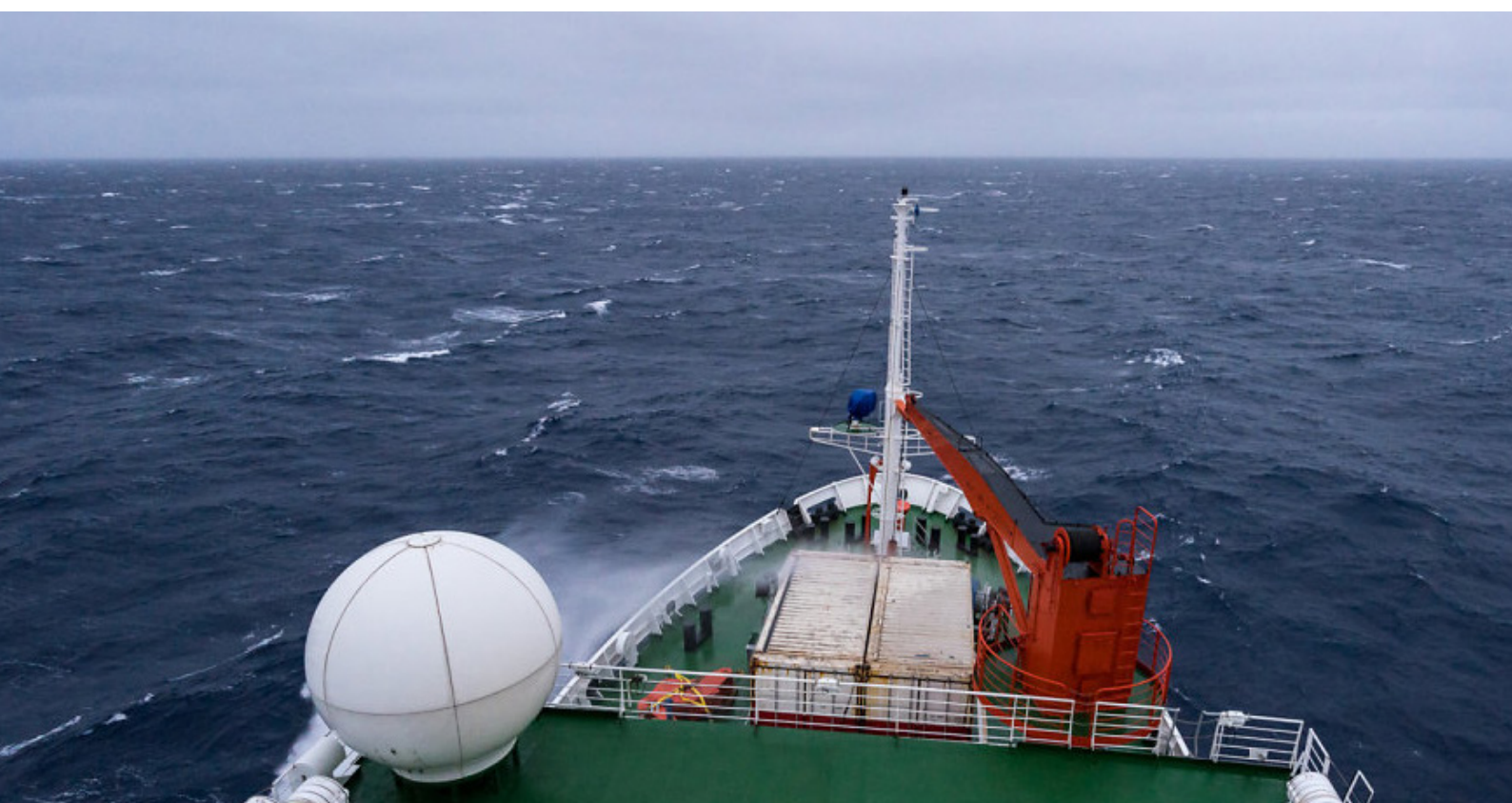
KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Seit Mitte des 19. Jahrhundert ist der Meeresspiegel an den deutschen Küsten um 0,2 m (Travemünde) bis 0,42 m (Cuxhaven) gestiegen.

Zukunft

- Der mittlere globale Meeresspiegel steigt beschleunigt weiter an.
- Bis 2100 wird bei unverminderten Emissionen ein wahrscheinlicher Anstieg um 0,6 - 1,0 m erwartet.
- Der Beitrag der Eisschilde ist höchst unsicher, so dass ein Anstieg um bis zu 2 m nicht auszuschließen ist.
- Für die deutschen Küsten werden ähnliche Anstiege erwartet wie im globalen Mittel.





Klimawandel, Witterung und Pflanzenwachstum

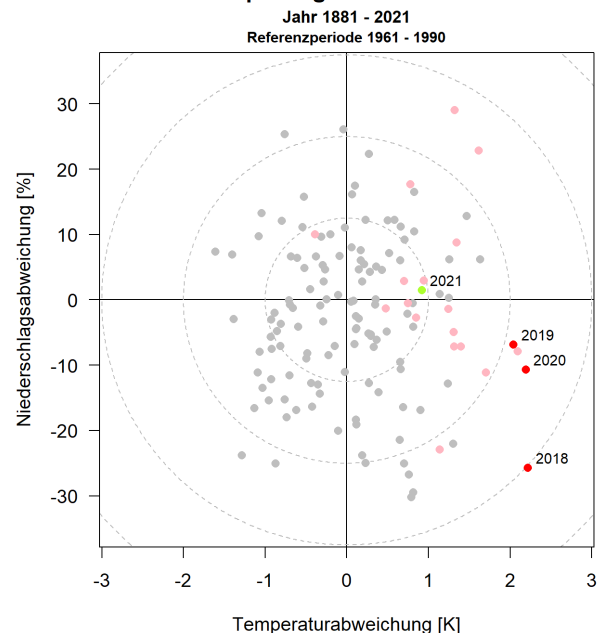
Die Agrarmeteorologie befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre. Aus dem Verständnis der dabei ablaufenden physikalischen Prozesse lässt sich der Einfluss von Wetter und Klima auf die Landwirtschaft erklären und vorhersagen.

Die Pflanzenentwicklung und damit auch die Erträge in der Land- und Forstwirtschaft hängen maßgeblich vom Zusammenspiel zwischen Temperatur und Niederschlag ab. In einem Thermopluviogramm (Abbildung rechts) lässt sich die Kombination dieser beiden Klimafaktoren darstellen. Das Zentrum des Diagramms entspricht dem vieljährigen Mittelwert der Jahresdurchschnittstemperatur bzw. der mittleren Jahressumme des Niederschlags, jeweils bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-90. Jeder Punkt stellt ein einzelnes Jahr dar, und zwar die grauen Punkte die Jahre von 1881 bis 2000 und die roten Punkte die letzten 20 Jahre. Die zu nassen Jahre befinden sich in der oberen Hälfte des Diagramms und die zu trockenen in der unteren. Entsprechend liegen die zu kalten Jahre in der linken Diagrammhälfte und die zu warmen in der rechten. Während die Datenpunkte, die die Jahre vor der letzten Jahrtausendwende repräsentieren, gleichmäßig um die Mitte verteilt sind, gab es nach dem Jahr 2000 fast nur noch zu warme Jahre, die jedoch keinen Trend hinsichtlich des Niederschlags zeigten. Sowohl zu nasse als auch zu trockene Jahre kamen vor, und lediglich in den letzten drei Jahren (dunkelrote Punkte) fiel dreimal nacheinander zu wenig Niederschlag. Das Jahr 2018 fällt in dieser Darstellung als das extremste seit Beginn der Messreihe auf.

Verdunstung & Bodenfeuchte

Bei höheren Temperaturen steigt auch die Verdunstung, sofern der Temperaturanstieg nicht mit sehr viel feuchterer Luft und/oder verringerter Strahlung verknüpft ist. Wenn sich gleichzeitig die Niederschläge im Mittel kaum verändern, führt das bei unveränderter Landnutzung zu einer schnelleren Austrocknung der Böden während der Vegetationsperiode. In der Abbildung auf der folgenden Seite ist die mit dem DWD-Modell AMBAV berechnete Bodenfeuchte unter Winterweizen für die Monate April bis Juni dargestellt. Dieser Zeitraum entspricht der Hauptwachstumsperiode der meisten anderen hierzulande

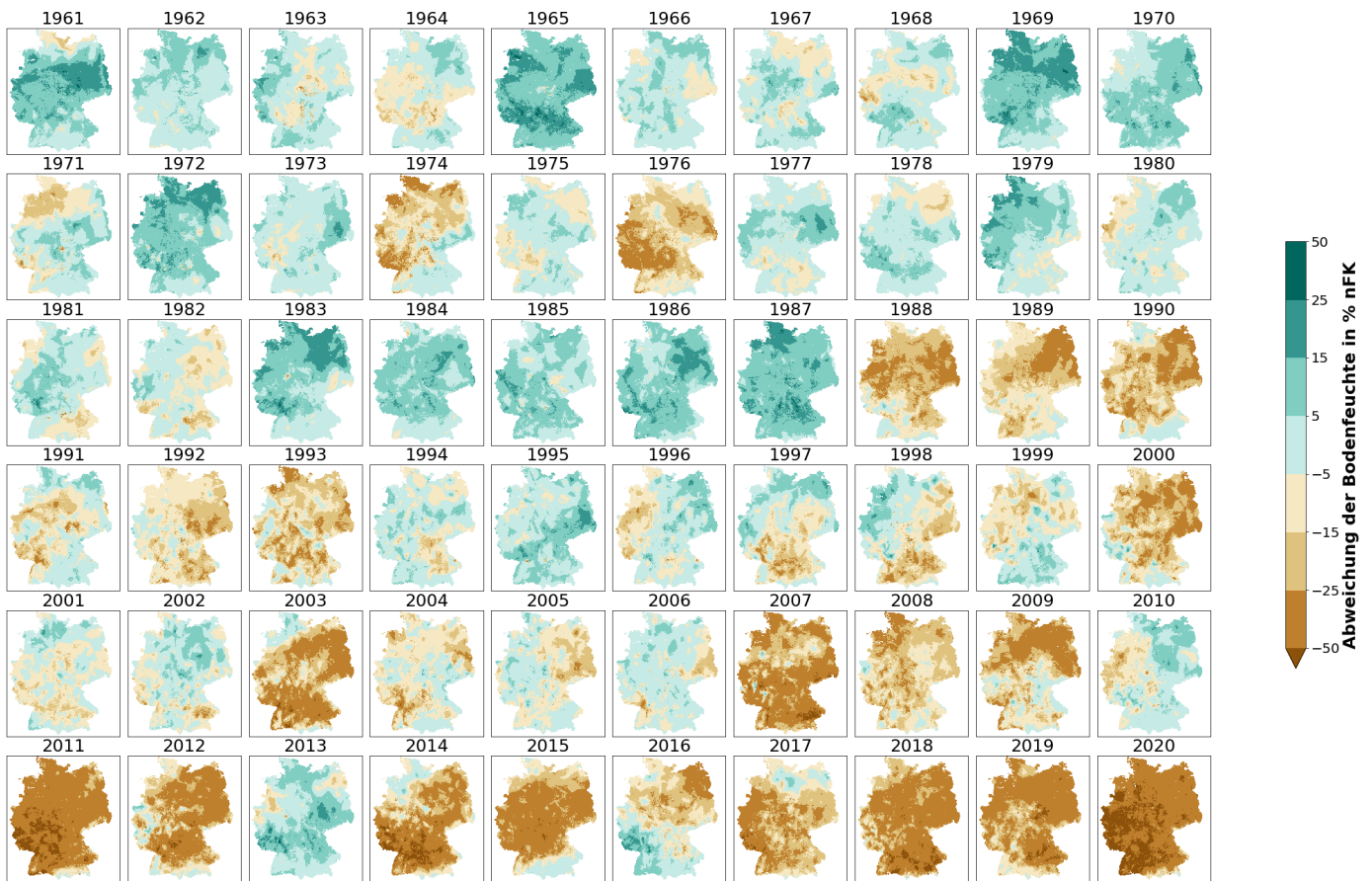
Thermopluviogramm Deutschland



▲ Abweichungen der Jahresmitteltemperatur und der Jahresniederschlagssumme vom Mittelwert der Referenzperiode 1961-1990. Die grauen Punkte symbolisieren die Jahre vor der letzten Jahrtausendwende und die roten Punkte die letzten 21 Jahre.

angebauten Getreidearten. Die Zahlen beziehen sich auf die Schicht von 0 – 60 cm Tiefe. Eine überdurchschnittliche Bodenfeuchte, bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-90, ist an den blauen Farbtönen zu erkennen und eine unterdurchschnittliche an den braunen. Während sich Jahre mit feuchten und trockenen Böden im Frühjahr bis etwa zum Jahr 2000 in unregelmäßiger Folge abwechselten, dominieren seitdem die zu trockenen Situationen, insbesondere im vergangenen Jahrzehnt. Allerdings war nicht in jedem Jahr ganz Deutschland von der Frühjahrstrockenheit betroffen, sondern es gab deutliche regionale Unterschiede.

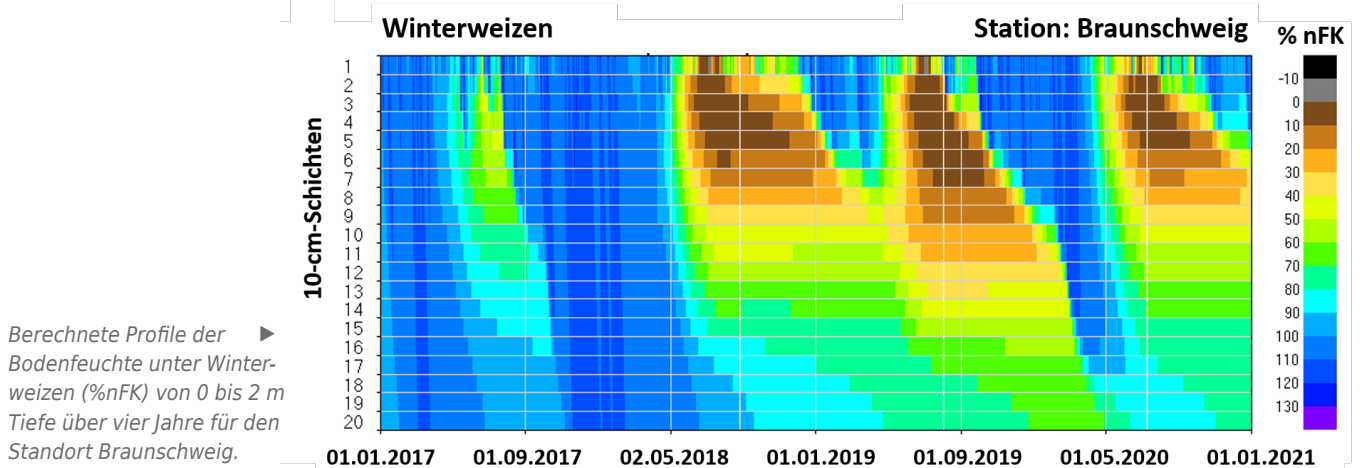
Nimmt man den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchteentwicklung in verschiedenen Tiefen genauer unter



▲ Relative Abweichung der Bodenfeuchte unter Winterweizen in der Schicht von 0-60 cm Tiefe, ausgedrückt in Prozent nutzbarer Feldkapazität, in den Monaten April bis Juni, vom vieljährigen Mittelwert.

die Lupe, wird die in den letzten drei Jahren beobachtete Ausnahmesituation deutlich. Die Abbildung unten zeigt beispielhaft den Bodenwassergehalt, ausgedrückt als Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK), für ein Weizenfeld in Braunschweig. Die Berechnungen mit dem AMBAV-Modell wurden in 10-cm Schichten bis in eine Tiefe von 2 m durchgeführt. Normalerweise wird der gesamte Wurzelraum durch die Winterniederschläge bis zum Beginn des Frühjahrs wieder auf > 100% nFK aufgefüllt, so wie zuletzt im Winter 2017/18. Nach dem sehr

trockenen und heißen Sommer 2018 und dem darauffolgenden, nur durchschnittlich feuchten Winter blieb im Frühjahr 2019 ein Wasserdefizit in den tieferen Bodenschichten bestehen, so dass die Austrocknung im Sommer 2019 zeitweise noch stärker als im Jahr zuvor war, obwohl es mehr regnete. Dieser sogenannte „carry-over-Effekt“ setzte 2019 in vielen Regionen besonders stark den Wäldern zu, die dadurch mehr als im trocken-heißen Vorjahr litten. Und selbst im darauffolgenden Winter blieb im hier gezeigten Beispiel immer noch ein (geringes) Defizit in der Tiefe bestehen.



Berechnete Profile der Bodenfeuchte unter Winterweizen (%nFK) von 0 bis 2 m Tiefe über vier Jahre für den Standort Braunschweig.

Witterung & Pflanzenentwicklung

Temperaturänderungen wirken sich nicht nur auf die Verdunstung und die Bodenfeuchte aus, sondern auch direkt auf die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen. Der Beginn der Blüthenfaltung bei laubabwerfenden Bäumen und Sträuchern hängt von einem Zusammenspiel von „chilling“ und „forcing“ Prozessen ab, d.h. einer Stimulation durch die Abfolge von kalten und warmen Temperaturen. Auch bei immergrünen Bäumen setzt das neuerliche Einsetzen der Photosynthese im Frühjahr die Überschreitung einer Mindesttemperatur voraus, und Ähnliches gilt für den Wachstumsbeginn der Gräser.

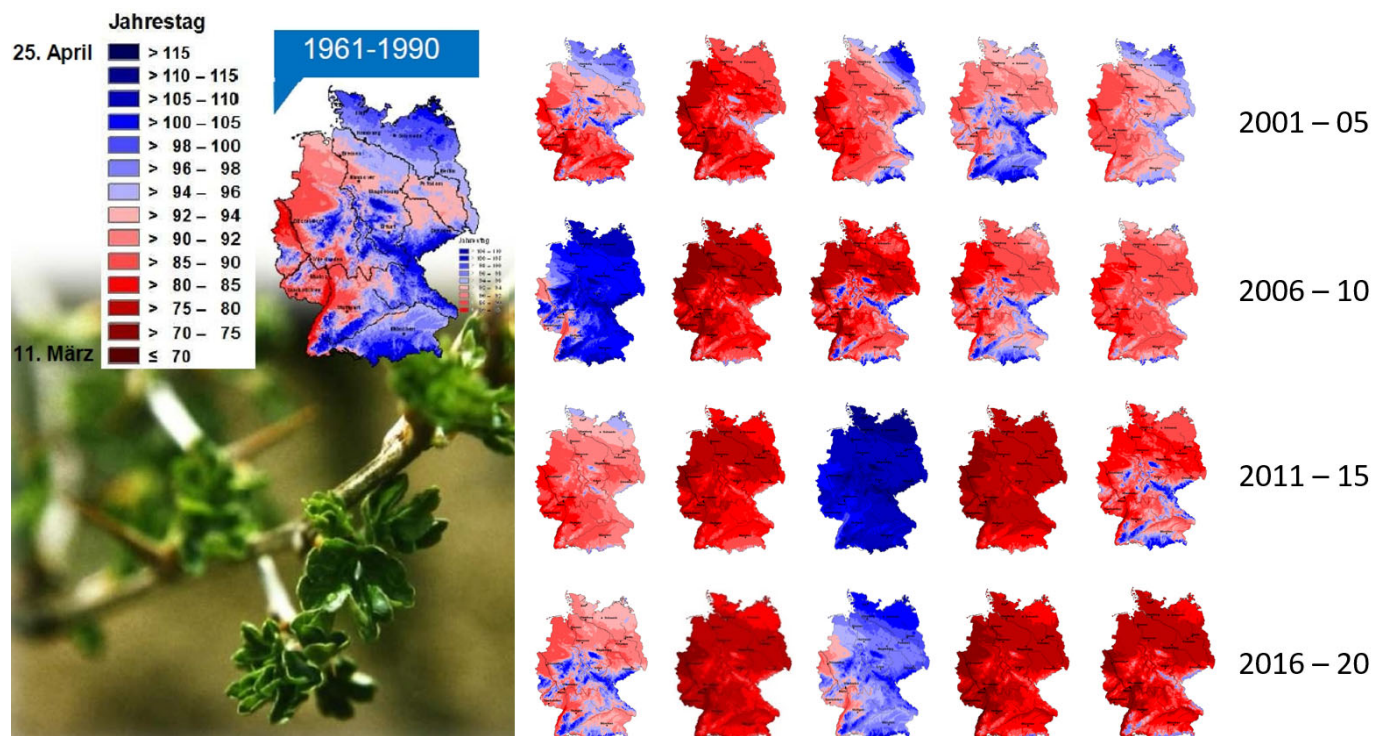
Der Vegetationsbeginn bzw. das Ergrünen wird in der Agrarmeteorologie gerne durch den Blattaustrieb der Stachelbeere (*Ribes uva-crispa*) definiert, der sich nicht nur einfach beobachten, sondern auch zuverlässig mit einem Temperatursummenmodell berechnen lässt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse einer solchen Berechnung, einmal für die Referenzperiode 1961-90 und dann einzeln für die letzten 20 Jahre. Rote Farben symbolisieren einen frühen Austrieb und blaue Farben einen späten. Während der Blattaustrieb im vieljährigen Mittel von West nach Ost und von Süd nach Nord (mit Ausnahme der Mittelgebirge) voranschreitet, kann er in einzelnen Jahren nicht nur insgesamt verfrüht oder

verspätet auftreten, sondern auch von dem erwähnten regionalen Muster abweichen.

Anhand der Einzelbilder für die Jahre 2001-20 ist zwar insgesamt ein Trend zur Verfrühtung zu erkennen, jedoch gibt es immer wieder einzelne Jahre, in denen die Vegetationsperiode erst spät begann, wie z.B. 2006, 2013 oder sogar 2018, das Jahr mit dem nachfolgenden heißen Sommer. Umgekehrt hat es in den Jahren mit besonders frühem Blattaustrieb oft Spätfrostschäden gegeben (z.B. in 2017 und 2020), denn trotz der allgemeinen Klimaerwärmung kann es hierzulande auch im April und Mai weiterhin zu Kaltluftvorstößen mit Minusgraden kommen, unter denen oft der Obstbau am stärksten leidet.

Vegetationsperiode & Phänologie

Die Wissenschaft, die sich mit der Entwicklung der Pflanzen beschäftigt, ist die Phänologie (griechisch: „Lehre von den Erscheinungen“). In der Phänologie wird das Jahr in zehn Jahreszeiten eingeteilt, indem Frühling, Sommer und Herbst noch einmal in je drei Abschnitte unterteilt werden. Jede dieser phänologischen Jahreszeiten wird durch Ergrünen, Blühen, Fruchten oder Vergilben bestimmter Zeigerpflanzen definiert. Oft stellt man die Abfolge der Jahreszeiten in Form einer sogenannten phänologischen Uhr dar. Eine solche „Doppeluhr“, mit den vieljährigen Mitteln



▲ Vegetationsbeginn, hier definiert als Zeitpunkt des Blattaustriebs der Stachelbeere, im Referenzzeitraum 1961-1990 (links oben) und einzeln für die letzten 20 Jahre.



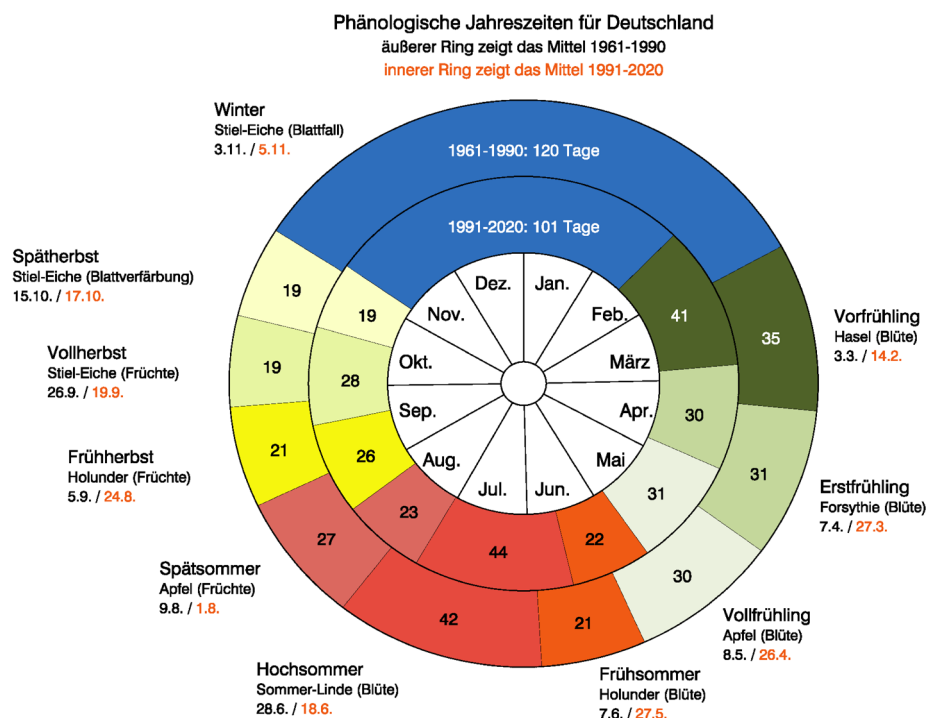
der Perioden 1961-90 (außen) und 1991-2020 (innen) zeigt die Abbildung unten.

Der Vorfrühling beginnt mit dem Erblühen der Haselsträucher (*Corylus avellana*). Während dies, gemittelt über ganz Deutschland, von 1961-90 etwa Anfang März eintrat, lag der Blühbeginn in den vergangenen 30 Jahren im Mittel bereits zweieinhalb Wochen früher. Die Forsythienblüte (*Forsythia x intermedia*), die den Beginn des Erstfrühlings anzeigt, trat früher gegen Ende der ersten Aprilwoche ein und in den letzten 30 Jahren bereits anderthalb Wochen früher. Ziemlich genau einen Monat später begannen und beginnen im Mittel die Apfelbäume (*Malus domestica*) zu blühen. Damit beginnt der Vollfrühling, der wiederum etwa einen Monat andauert, bevor mit dem Beginn der Holunderblüte (*Sambucus nigra*) der Frühsommer einsetzt. Während dies im Zeitraum von 1961-1990 meist am Ende der ersten Juniwoche der Fall war, blüht der Holunder nun bereits um den 27. Mai herum. Die Blüte der Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*) zeigt in der Regel rund drei Wochen später den Beginn des Hochsommers an, der durchschnittlich etwa sechs Wochen lang währt, nämlich bis die frühen Apfelsorten reif werden. Dieser Zeitpunkt lag in den vergangenen 30 Jahren im Mittel um den 2. August und damit eine Woche früher als in der Referenzperiode von 1961-1990. Die ersten reifen Holunderbeeren finden sich inzwischen sogar rund zwei Wochen früher als im genannten Referenzzeitraum und werden nun meist schon um

den 24. August beobachtet. Damit beginnt der Frühherbst, der wiederum vom Vollherbst abgelöst wird, sobald sich die Früchte der Steieleiche (*Quercus robur*) zeigen. Dies war früher gegen Ende September der Fall und heute im Mittel am 19. September.

Das Ende der Vegetationsperiode wird in aller Regel weniger durch die Temperatur als vielmehr durch die Tageslänge gesteuert. Dadurch bleiben der Eintritt des Spätherbstes, der durch die Blattverfärbung der Stieleiche angezeigt wird, und der Zeitpunkt des Winterbeginns relativ konstant, so dass sich durch den früheren Beginn des Frühlings die Vegetationsperiode verlängert. Dabei ändert sich die Dauer der Hauptwachstumsperiode vom Erstfrühling bis zum Hochsommer kaum. Stattdessen wird der Spätsommer schneller durchlaufen, so dass Früh- und Vollherbst früher beginnen und länger anhalten. Während sich in der Landwirtschaft dementsprechend die Termine für Aussaat und Ernte meist gleichermaßen verschieben, kann beispielsweise der Gemüseanbau von der insgesamt längeren Vegetationsperiode profitieren, da mit ihr auch die Zeitspanne des möglichen Freilandanbaus zunimmt.

Phänologische Doppeluhr zur Veranschaulichung der Eintrittszeitpunkte der zehn phänologischen Jahreszeiten im Vergleich zwischen den Referenzzeiträumen 1961-1990 (äußerer Ring) und 1991-2020 (innerer Ring).





Extremereignisse

Jeder erinnert sich daran. Ein verheerendes Sturmereignis, extreme Hitze oder ein katastrophales Hochwasser. Extremereignisse verursachen oft menschliches Leid und richten große Zerstörungen an. Wie hat sich die Häufigkeit von Extremen in der Vergangenheit entwickelt und welche Veränderungen sind in Zukunft zu erwarten?

Extrem = selten

Extremereignisse sind sehr selten auftretende Ereignisse. Sie sind gekennzeichnet durch stark vom üblichen Zustand abweichende Verhältnisse. Es gab sie in der Vergangenheit und es wird sie auch in der Zukunft geben. Bekannte Beispiele aus der entfernten Vergangenheit sind das Magdalenen-Hochwasser im Jahr 1342, das zahlreiche Flüsse in Mitteleuropa betraf, oder 1816, das Jahr ohne Sommer nach dem Ausbruch des Vulkans Tambora.

Auch in der nahen Vergangenheit haben wir Extremereignisse beobachten können. Das sind beispielsweise die Hochwasser in den Jahren 2002, 2013 und 2021, alle drei ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, das Hitzeereignis im August 2003 oder die Stürme Lothar (1999) und Kyrill (2007).

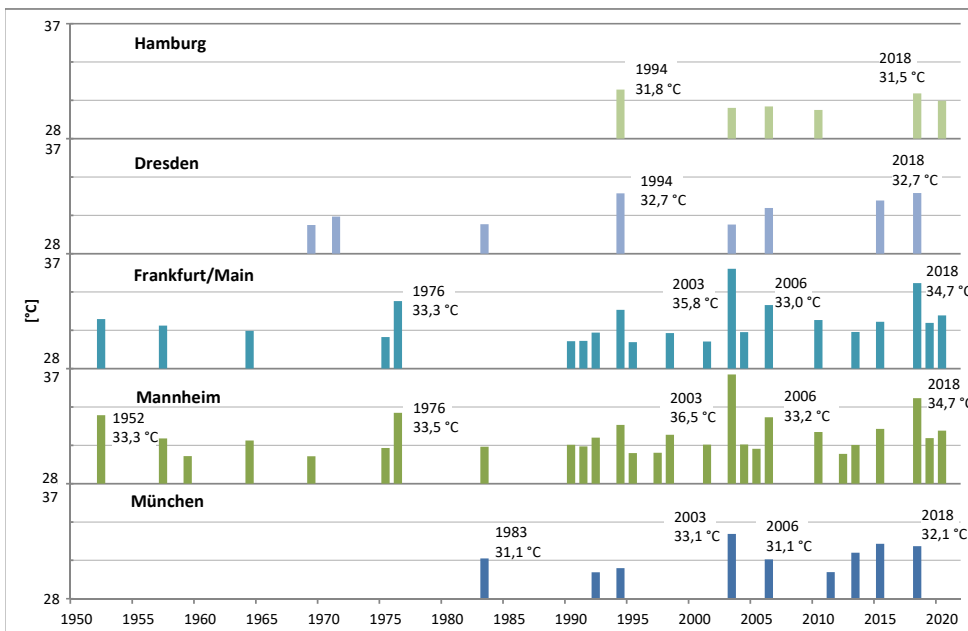
Damit steht berechtigterweise eine Frage im Raum: *Was kommt mit dem Klimawandel noch alles?* Da Extreme definitionsgemäß sehr seltene Ereignisse sind, sind statistische Analysen weniger belastbar. Häufig wird ein Wiederkehrzeitraum von einmal in 100 Jahren betrachtet (das Jahrhundertereignis). Die vorhandenen Messreihen sind kaum länger. Somit ist die statistische Erfassung eines Ereignisses auf dieser Skala nicht einfach.

Temperatur

Die mittlere Temperatur hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. In der Folge sind auch mehr Tage mit sehr hohen Temperaturen und Hitzeperioden aufgetreten. Beispiel ist der Sommer 2019 mit zwei starken Hitzewellen. Während der Juli-Hitzewelle haben 13 Stationen den bisherigen Hitzerekord aus dem Jahr 2015 (40,3 °C Kitzingen) übertroffen.

Um extreme Temperaturereignisse wie z. B. den Hitzesommer 2019 klimatologisch richtig bewerten zu können, ist es sinnvoll, solche Ereignisse in möglichst langen Zeitreihen statistisch einzuordnen. Hierfür werden klimatologische Kennwerte verwendet, mit denen die Andauer, Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen beschrieben werden können. Für fünf deutsche Städte wurde die Häufigkeit einer mindestens einmal jährlich auftretenden 14-tägigen Hitzeperiode mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C für den Zeitraum 1950–2020 analysiert. Die mittleren Temperaturmaxima dieser Perioden sind ein Maß für die Intensität der jeweiligen Hitzewellen.

Für die untersuchten Städte ist ein Süd-Nord-Gefälle in der Häufigkeit und in der Intensität der Hitzeperioden zu erkennen.



◀ Darstellung des Mittelwertes der wärmsten 14-tägigen Periode je Jahr. Ausgewertet wurden die Tagesmaxima der Temperatur. Erreicht der Wert mindestens 30 °C, so wird ein Balken gezeichnet. Die Höhe des Balkens gibt den berechneten 14-Tages-Mittelwert an.

Allgemein liegen in den nördlicher gelegenen Städten die höchsten mittleren Tagesmaxima der Hitzeperioden unter 33 °C, dieser Wert wird in den südlichen Großstädten des Öfteren überschritten. München hat weniger Ereignisse als für den Süden typisch, da die Station relativ hoch liegt (515 m ü. NHN).

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass solche extremen Hitzewellen seit den 1990er-Jahren häufiger auftreten; in Hamburg fanden sich zum Beispiel im Zeitraum 1950–1993 nie solche Ereignisse, seit 1994 gab es inzwischen sechs extreme Hitzewellen.

Attributionsanalysen zeigen, je nach Lage in der von der Hitzewelle betroffenen Region liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Hitzewelle wie der im Jahr 2019 zwischen 10 und 30 Jahren (heutiges Klima). Ohne Klimawandel läge die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine vergleichbare Hitzewelle in Deutschland bei einmal in einigen Dutzend Jahren bis hin zu wenigen Jahrhunderten. Eine vergleichbare Hitzewelle wäre ohne Klimawandel 1,5 bis 3,0 °C kühler verlaufen.

Niederschlag

Von extremen Niederschlagsereignissen spricht man, wenn große Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit fallen. Starkregenereignisse sind intensive Niederschläge, meist nur von kurzer Dauer, die insbesondere durch lokale konvektive Ereignisse ausgelöst werden. Vor Starkregen warnt der Deutsche Wetterdienst, wenn mehr als 15 mm in einer Stunde oder 20 mm in sechs Stunden zu erwarten sind. Dauert ein Ereignis mit großen Niederschlagsmengen mehrere Stunden oder Tage an, spricht man auch von Dauerregen.

Extreme Niederschlagsmengen in Deutschland

Menge	Ort	Dauer	Datum
126 mm	Füssen (Ostallgäu)	8 Min.	25.05.1920
245 mm	Münster (LANUV)	2 Std.	28.07.2014
353 mm	Zinnwald-Georgenfeld	24 Std.	12.08.2002
779 mm	Aschau-Stein	1 Monat	Juli 1954

▲ Beispiele für in Deutschland erfasste, sehr extreme Niederschlagsmengen. Die genannten Niederschlagshöhen treten seltener als einmal in 100 Jahren auf.

Für die Planung und Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Bauwerke werden statistische Auswertungen zu extremen Niederschlagsereignissen genutzt. Hier wird allgemein von Starkniederschlag gesprochen, wenn die Niederschlagshöhe einer bestimmten Zeiteinheit im statistischen Mittel am betrachteten Ort nur einmal im Jahr oder seltener auftritt. Einen regionalen Überblick über langjährige statistische Starkniederschlagshöhen in Deutschland gibt KOSTRA-DWD. Dieser stationsbasierte Datensatz gilt für jede Dauerstufe (ausgewählter Zeitabschnitt

Wiederkehrintervalle von Niederschlagsmengen

D	5 Min.	15 Min.	30 Min.	1 Std.	3 Std.	6 Std.	24 Std.	72 Std.
T = 1 a	5	10	13	16	21	25	36	60
T = 10 a	11	19	26	33	41	48	64	98
T = 100 a	16	28	38	50	61	70	92	136

▲ Auflistung von durchschnittlichen Starkniederschlagshöhen (in mm) je Dauerstufe (D), die nach KOSTRA-DWD-2010R im statistischen Mittel einmal in 1, 10 und 100 Jahren in Deutschland auftreten (Wiederkehrintervall T).

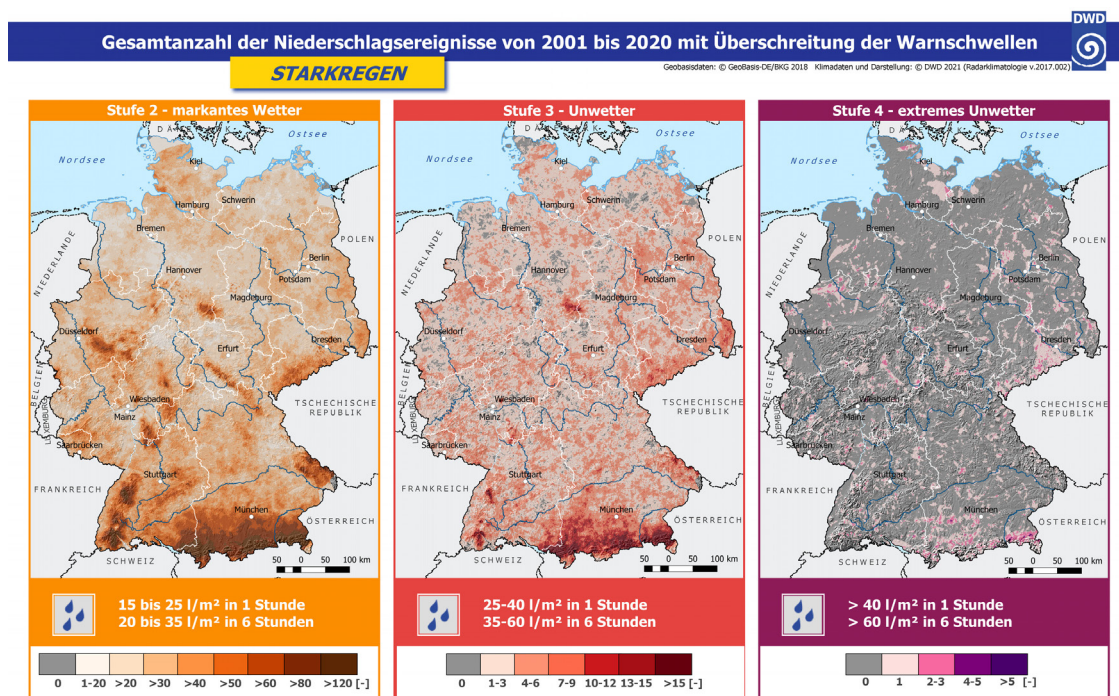
mit Niederschlag einschließlich Unterbrechungen, unabhängig von Beginn und Ende der natürlichen Niederschlagsereignisse) zwischen $D = 5$ Minuten und $D = 72$ Stunden und referenziert derzeit den Zeitraum 1951 bis 2010. So können die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2010R in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall (von $T = 1$ a bis $T = 100$ a) ermittelt werden. Dabei ist das Wiederkehrintervall die mittlere Zeitspanne (in Jahren), in der die Niederschlagsmenge einmal erreicht oder überschritten wird.

Erkenntnisse über die Veränderung von Starkniederschlägen in der Vergangenheit in Deutschland basieren bisher vor allem auf Tagesmessungen. Eine nähere Differenzierung des Niederschlagsgeschehens im Verlaufe eines Tages (z. B. kurzes kräftiges Gewitter oder anhaltender Regen) ist damit jedoch nicht möglich. In der Regel beginnen die Auswertungen mit dem Jahr 1951. Seitdem verlief die Starkniederschlagsentwicklung regional und je nach Jahreszeit unterschiedlich. Während die Häufigkeit hoher täglicher Regenmengen vor allem im Winterhalbjahr (November bis April) eher anstieg, ist im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) keine genaue Tendenz zu erkennen. Außerdem scheinen sich auch die einzelnen Anteile am Gesamtniederschlag zunehmend auf nur wenige niederschlagsreiche Tage zu konzentrieren.

Die Datenbasis für die Analyse von Niederschlägen mit Andauern unterhalb von 24 Stunden ist deutlich eingeschränkter, da nur wenige lange und zeitlich hochaufgelöste Messreihen für Deutschland zur



Verfügung stehen. Radarbasierte Niederschlagsdaten liegen flächendeckend für Deutschland erst seit Mitte des Jahres 2000 vor. Aufgrund der geringen Länge der Zeitreihen lassen sich aktuell noch keine aussagekräftigen Ergebnisse zu potenziellen Klimatrends ermitteln, da diese durch kurz- und mittelfristige Variationen bedingt sein können. Nichtsdestotrotz ist die radarbasierte Niederschlagsklimatologie gerade in Bezug auf die Untersuchung lokal begrenzt auftretender Starkniederschlagsereignisse von großem



▲ Deutschlandweite Verteilung der Starkregenereignisse in Abhängigkeit von der Warnstufe. Extreme Niederschlagsereignisse treten in ganz Deutschland auf.

Wert, da die Repräsentativität ortsgebundener Stationsdaten vor allem bei Andauern unterhalb 24 h sehr variabel und somit unsicher sein kann. Erst die radarbasierte Niederschlagsklimatologie ermöglicht nicht nur die Beobachtung der Niederschlagsintensität, sondern darüber hinaus die Analyse charakteristischer Eigenschaften wie der Größe und Andauer eines Extremereignisses.

Die radarbasierte Niederschlagsklimatologie zeigt u. a. eine deutschlandweite Verteilung markanter Starkniederschläge, die größtenteils die Topografie widerspiegelt (Warnstufe 2). Demgegenüber treten die selteneren Starkniederschläge kurzer Andauern (konvektive Ereignisse) im Unwetterbereich gleichverteilter über Deutschland auf, so dass auch deutschlandweit von einer bestehenden Starkregengefährdung auszugehen ist (Warnstufen 3 und 4).

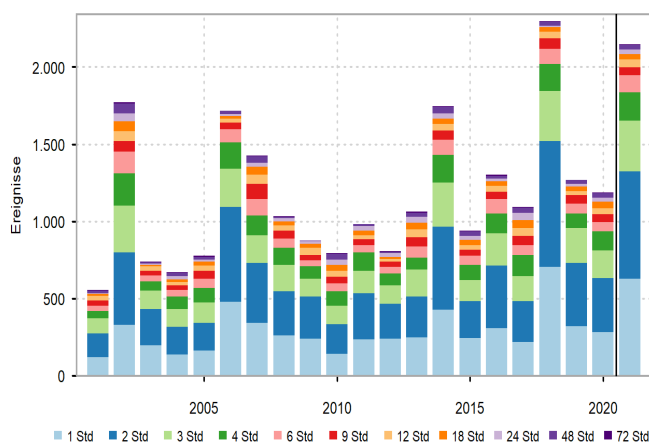
Jährliche Statistiken des Zeitraums 2001 bis 2020 zeigen starke Schwankungen in der Anzahl sowie der Flächenausdehnung extremer Niederschlagsereignisse. Es fällt in der Abbildung aber auf, dass Jahre mit weniger als 800 Starkregenereignissen pro Jahr eher zu Beginn des Untersuchungszeitraums aufgetreten sind und diese Zahl seit 2013 nicht mehr unterschritten wurde. Die Ergebnisse deuten somit auf eine leichte Zunahme der Extremereignisse innerhalb der letzten 20 Jahre hin, wobei die Kürze der bislang vorliegenden Zeitreihe noch keine Rückschlüsse auf einen generellen klimatologischen Trend erlaubt.

Analysen der Eigenschaften extremer Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2012 in Abhängigkeit von der Temperatur deuten darauf hin, dass im Rahmen der klimawandelbedingten Temperaturzunahme mit einer Intensivierung extremer Nieder-

schlagsereignisse zu rechnen ist. Die Extrema der kurzlebigen Konvektionszellen werden demnach mit steigenden Temperaturen deutlich großflächiger, leicht intensiver und bilden einen höheren Gesamtniederschlag aus. Mit steigender Temperatur nimmt der Anteil konvektiver Niederschläge auf Kosten stratiformer Niederschlagsfelder zu, was sich in einer Reduzierung der charakteristischen Ereignisgröße und -andauer mit steigender Temperatur zeigt. Der ereignisbezogene Starkregenindex als Maß für die Extremität eines Niederschlagsereignisses nimmt sowohl für konvektive als auch für stratiforme Niederschlagsereignisse mit der Temperatur zu. Aus der Kürze des



Niederschlagsereignisse pro Jahr



▲ *Jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland für verschiedene charakteristische Dauerstufen. Datenbasis für die Jahre 2001 bis 2020 ist der klimatologisch aufbereitete Datensatz RADKLIM_V2017.002. Die (vorläufigen) Daten für 2021 basieren auf den Echtzeitanalysen aus RADOLAN.*

Untersuchungszeitraumes ergibt sich derzeit noch ein erheblicher Vorbehalt für die Repräsentativität dieser Ergebnisse. Sie stehen aber im Einklang mit dem bestehenden Prozessverständnis zum Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Niederschlagsgeschehen. Den Hintergrund bildet die durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschriebene Zunahme der Aufnahmekapazität der Atmosphäre für Wasserdampf im Zuge der globalen Erwärmung. Diese ermöglicht eine Intensivierung der Niederschlagsbildung generell und insbesondere bei konvektiven Ereignissen.

Hagel

Hagelereignisse sind lokale und seltene Ereignisse, welche hohe Schäden an der Infrastruktur und Verluste in der Landwirtschaft verursachen können. Durch die meist geringe Ausdehnung der Hagelereignisse und die nur punktuelle Beobachtung konnten in der



Vergangenheit nicht alle Ereignisse erfasst werden. Um diese Informationslücke zu schließen, werden die seit 2001 vorliegenden Radardaten genutzt. Die Ergebnisse zeigen eine höhere Anzahl an Tagen mit Hagel je Jahr im Süden als im Norden. Auf Basis der vorhandenen Beobachtungsdaten ist es nicht möglich, Entwicklungstendenzen für die Änderung der Anzahl an Hagelereignissen zu bestimmen. Alternativ ist die Nutzung von Daten, die indirekt auf Hagelfall schließen lassen, möglich. Dies sind Konvektionsparameter, die das Potential für die Gewitter- und Hagelbildung beschreiben. Statistische Analysen der hagelrelevanten Konvektionsparameter zeigen für die vergangenen 20-30 Jahre eine leichte Zunahme des Potentials.

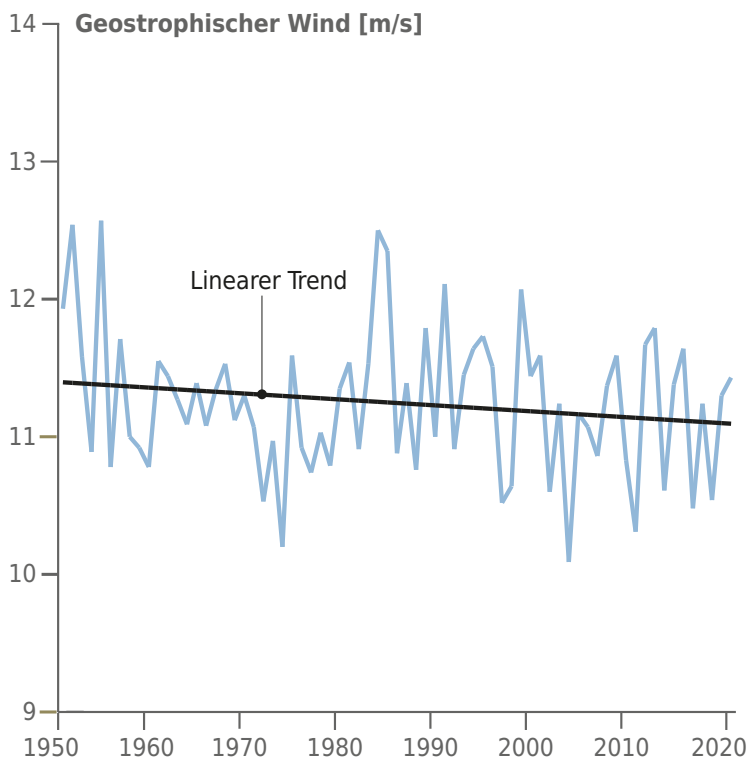
Die räumliche Auflösung der aktuell genutzten regionalen Klimamodelle ist nicht ausreichend, um Hagel direkt zu modellieren. Hagel wird nur grob über Parametrisierungen abgeschätzt. Somit sind keine Aussagen zu zukünftigen Tendenzen möglich. Analysen des Konvektionspotentials zeigen für den kurzfristigen Planungshorizont keine einheitliche Tendenz auf.

Wind

Markante Sturmereignisse wie „Christian“ oder „Xaver“ im Jahr 2013 oder „Friederike“ im Jahr 2018 beleben regelmäßig die Diskussion über mögliche Änderungen der Häufigkeit von Stürmen oder generell über Langzeittrends der Windgeschwindigkeit. Die Antwort darauf ist schwierig. Das liegt einerseits daran, dass die Messung der Windgeschwindigkeit nicht trivial ist. Um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten, wird der Wind, abweichend von allen anderen meteorologischen Größen, standardmäßig in 10 m Höhe über Grund gemessen. Trotzdem reagiert

die gemessene Windgeschwindigkeit empfindlich auf Änderungen in der Umgebung der Messstation (z.B. wachsende Bäume) oder auf Änderungen des Messortes. Damit weisen fast alle Windzeitreihen Inhomogenitäten auf. Des Weiteren sind die zur Verfügung stehenden Zeitreihen meist nur einige Jahrzehnte lang, zu kurz, um Langzeittrends über zum Beispiel 100 Jahre bestimmen zu können. Die besonders interessierenden Stürme oder Orkane sind seltene Ereignisse und damit nur mit möglichst langen Zeitreihen statistisch zu bewerten. Eine Möglichkeit, trotzdem Aussagen über die Entwicklung der Windgeschwindigkeit und des Auftretens von Stürmen in den letzten etwa 100 Jahren abzuleiten, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes. Dieser beruht auf Luftdruckdifferenzen und ist eng mit dem „wahren“ Wind gekoppelt. Die Messung des Luftdrucks ist bereits seit dem Ende des 18. Jahrhunderts mit hoher Qualität möglich. Betrachtet man den geostrophischen Wind, der aus den Luftdruckdaten von Hamburg, Emden und





◀ Jahresmittel des geostrophischen Windes, berechnet aus den bodennahen Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List. Dargestellt ist der Zeitraum 1950 bis 2020. Die schwarze Linie zeigt den linearen Trend – eine leichte Abnahme.

List auf Sylt für die Deutsche Bucht berechnet wurde, zeigen sich Abschnitte mit Längen von zehn Jahren bis wenigen Jahrzehnten mit höherer oder niedrigerer Windgeschwindigkeit (sog. multidekadische Schwankungen). Für die gesamte Zeitreihe ist nur ein schwacher, abfallender Trend erkennbar, der jedoch deutlich kleiner ist als die Schwankungen von Jahr zu Jahr und somit statistisch nicht signifikant ist.

Ein ähnliches Bild liefern die Ergebnisse von Klimamodellprojektionen. Auch hier zeigen sich sowohl für die Vergangenheit als auch für die Zukunft die multidekadischen Schwankungen ohne Langzeit-

trend. Dies gilt ebenfalls für Stürme, auch bei ihnen ist für die Zukunft keine deutliche Änderung erkennbar.

Tornados

Tornados sind kleinräumige rotierende Luftmassen unter einer konvektiven Wolke, die mit dem Boden in Kontakt sind. Je nach ihrer Stärke können sie sehr hohe Schäden verursachen. In den letzten Jahrzehnten werden mehr Tornados gemeldet als früher. Doch viele schwache Tornados, die nur geringe Schäden verursachen, werden wahrscheinlich auch heute noch nicht gemeldet. Seit dem Jahr 2000 werden in Deutschland in der Regel zwischen 20 und 40 Tornados über Land pro Jahr nachgewiesen. Starke Tornados mit einer Intensität von mindestens F2 auf der Fujita-Skala, die von F0 bis F5 reicht, sind deutlich seltener. Im Durchschnitt rechnen Meteorologen mit zwei bis drei Fällen pro Jahr. Ob die Zahl der Tornados in Deutschland in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, lässt sich aus diesen Meldungen nicht ableiten, da die Meldeeffizienz tendenziell zunimmt.

▼ Schäden durch einen Tornado in Affing (Bayern) am 13.5.2015.



Die verfügbaren regionalen Klimaprojektionen liefern keine direkten Informationen über Tornados. Klar ist, dass der fortschreitende Klimawandel zu einem höheren konvektiven Energiepotenzial in der Atmosphäre führt. Inwieweit dies zu einer Zunahme der Tornadoaktivität führt, ist aber noch ungewiss, da andere Faktoren, die weiterer Forschung bedürfen, dem entgegenwirken können.



Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima

Klimaveränderungen basieren auf komplexen Zusammenhängen. Sie erstrecken sich über lange Zeiträume und können regional unterschiedlich ausgeprägt sein. Der Klimawandel ist daher mit der üblichen Wahrnehmung für einen Menschen schwer erfassbar. Die nationale und internationale Forschungsgemeinschaft sieht die Erforschung des Klimasystems und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Gesellschaft als ein zentrales Thema.

Mit der Erkenntnis, dass die vermehrte Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern wird, wurde bereits vor mehr als 50 Jahren der Grundstein der modernen Klimaforschung gelegt. In den letzten Jahren konnte der Zusammenhang zwischen der beobachteten Erwärmung der Erdatmosphäre und den Aktivitäten der Menschheit klar belegt werden. Dies verstärkt die Notwendigkeit zur weiteren Erforschung des Klimasystems, um die Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klimasystem bewerten zu können. Dazu hat die Forschungsgemeinschaft für die nächsten Jahre drei wesentliche Ziele formuliert:

1. Eine Vertiefung des Systemverständnisses der komplexen Zusammenhänge im Klimasystem
2. Die Bewertung und der Umgang mit den durch den Klimawandel verursachten Risiken und Chancen
3. Die Rolle der Klimaforschung in der Gesellschaft

Vertiefung des Systemverständnisses zum Klimageschehen

Die Funktionsweise des Klimasystems der Erde ist in seinen groben Zusammenhängen prinzipiell verstanden. Seine Komplexität erfordert jedoch zukünftig noch enorme Forschungsanstrengungen, um bei noch unvollständig verstandenen Prozessen weiterhin Fortschritte im Verständnis zu erzielen. Auch bezüglich der Wechselwirkungen zwischen den Klimasystemkomponenten bestehen noch Verständnislücken, die durch kontinuierliche Forschung vermindert werden.

In Zusammenarbeit vieler Klimawissenschaftler:innen auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene

wurden in den letzten Jahren viele Themengebiete systematisch analysiert und vorhandene Lücken identifiziert. Auf Basis dieser Analysen wurden sechs Themengebiete herausgearbeitet, die von besonderem Interesse sind:

1. Bestimmung und Reduzierung von Unsicherheiten in Klimavorhersagen und Klimaprojektionen
2. Verlängerung der Wettervorhersage und Verbindung zur subsaisonalen Klimavorhersage
3. Abrupte Klimaänderungen
4. Wasserkreislauf in einer wärmeren Welt
5. Luftqualität und Klimawandel
6. Treibhausgas-Kreisläufe im Klimasystem

Zur Unterstützung dieser Herausforderungen sind neben Forschungsinitiativen auch dauerhafte Aktivitäten notwendig. So können in Forschungsinitiativen beispielsweise die Basis für langfristige Strategien im Bereich des Ausbaus regionaler und globaler Beobachtungssysteme gelegt und vielerlei Hypothesen durch Modelle überprüft werden. Daneben muss die langfristige und systematische Erfassung der relevanten Prozesse sichergestellt werden. Hierfür ist eine zuverlässige Überwachung der anthropogenen Veränderungen und der natürlichen Variabilität notwendig.

Bewertung und Umgang mit Risiken und Chancen

Der zeitliche und räumliche Versatz zwischen den Ursachen und den Folgen des Klimawandels führt zu einer besonderen Herausforderung aller Akteur:innen. Die Frage nach Nutzen und Schaden durch den Klimawandel und die daraus zu entwickelnden Handlungsoptionen müssen als Gemeinschaftsaufgabe vieler

Wissenschaftsbereiche interdisziplinär auf regionaler und globaler Ebene bearbeitet werden.

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels treffen weltweit auf unterschiedlich geprägte wirtschaftliche, soziale und kulturelle Gegebenheiten. Auch der Umgang mit Risiken unterscheidet sich durch die verschiedenen kulturellen Hintergründe teilweise deutlich. Die Aufgabe der Forschung besteht in der Analyse möglicher Herangehensweisen und der Entwicklung von regional spezifischen Handlungsoptionen.

Erforschung des Zusammenspiels Klimawandel und Gesellschaft

Eine wichtige Frage der Zukunft ist die zukünftige Position der Wissenschaftler:innen und der Forschungsinstitutionen in der Gesellschaft. Dabei steht die Frage

nach deren Aufgabe und den damit verbundenen Grenzen im Vordergrund. Welche Aufgaben hat beispielsweise eine Klimaforscher:in? Wo hört die Verantwortlichkeit auf? Welchen Einfluss sollte die Wissenschaft auf die Politik nehmen? Ist die IPCC-Philosophie („... politikrelevant, aber nicht Politik vorschreibend ...“) übertragbar auch auf andere Bereiche?

Eine große und dauerhafte Herausforderung einer jeden Wissenschaftsrichtung ist die regelmäßige Analyse der Wissensgenerierung. Auf welchen Annahmen basieren die aktuellen Erkenntnisse? Wo besteht Konsens und wo Dissens?

Aber auch die Frage, ob die vorhandenen institutionellen Strukturen der Klimaforschung sinnvoll sind. Sind die einzelnen Themenfelder ausreichend miteinander vernetzt?

KLIMAVORHERSAGEN FÜR DIE NÄCHSTEN MONATE BIS JAHRE



Wie wird die Witterung der nächsten Wochen, Monate und Jahre? Klimavorhersagen können schon heute die Grundlage für Entscheidungen liefern. In einigen Regionen in der Welt funktionieren die Klimavorhersagen auch heute bereits gut, in anderen Regionen ist der Forschungsbedarf jedoch noch höher.

Klimavorhersagen geben eine Prognose darüber ab, mit welcher Wahrscheinlichkeit die kommenden Monate bis Jahre wärmer / kälter oder auch trockener / feuchter als im langzeitlichen Mittel werden. Dem zugrunde liegen Klimavorhersagen für die kommenden Monate (Stichwort: saisonale Klimavorhersagen) und Jahre (Stichwort: dekadische Klimavorhersagen). Die Kombination mit Nachhersagen aus der Vergangenheit erlaubt eine umfassende statistische Bewertung der Prognosen und die Ableitung von Trendaussagen auf Basis einer Klimatologie. Damit unterscheidet sich die Klimavorhersage grundlegend von der Wettervorhersage, welche Aussagen über detailliertes Wettergeschehen der nächsten Stunden bis Tage trifft.

Bei einer Klimavorhersage über einen Zeitraum von mehreren Monaten bis zu 10 Jahren sind zudem alle Bestandteile des Klimasystems zu berücksichtigen: nicht nur die untere Schicht der Atmosphäre (die Troposphäre, bis circa 9-16 km Höhe), sondern auch höhere Luftschichten, der Boden sowie der Ozean und das Meereis. Für die Klimavorhersage wird ein mit all diesen Komponenten gekoppeltes Klimamodell genutzt.

Für eine robuste statistische Abschätzung der Qualität und Verlässlichkeit der Klimavorhersagen werden eine Vielzahl an historischen und aktuellen Klimavorhersagen gerechnet, die zu jedem Prognosestart mit leicht variierenden Bedingungen gestartet werden. Die so entstehende Lösungsvielfalt, auch Ensemble genannt, dient zugleich dazu, die Unsicherheiten, welche durch die Nichtlinearität des Klimasystems bedingt sind, zu bewerten.

Saisonale Klimavorhersagen werden aktuell unter anderem durch den Deutschen Wetterdienst berechnet und monatlich analysiert. Mit den Ergebnissen sind beispielsweise El Niño-Vorhersagen möglich. Auf der Webseite www.dwd.de/klimavorhersagen werden die Klimavorhersagen des Deutschen Wetterdienst veröffentlicht.

Begriffskompass Klima

Bezugszeitraum/Bezugsperiode

Angaben über eine Änderung der zukünftigen mittleren klimatischen Verhältnisse werden immer in Relation zu einer Bezugsperiode getätigt. Im dem hier vorliegenden Bericht werden Aussagen zu möglichen zukünftigen Änderungen auf den Zeitraum der Jahre 1971 bis 2000 bezogen. Die Aussagen beschreiben immer die mittleren Verhältnisse über eine Zeitspanne von 30 Jahren.

Frühindustrieller Zeitraum

Der Zeitraum 1881 bis 1910 wird als frühindustrieller Zeitraum definiert. Die Definition erfolgt in Anlehnung an die Definition eines vorindustriellen Zeitraumes durch das Pariser Klimakonferenz COP21.

Kenntage

Ein Kenntag ist ein Tag, an dem ein definierter Schwellenwert eines klimatischen Parameters erreicht beziehungsweise über- oder unterschritten wird (z. B. Sommertag als Tag mit Temperaturmaximum ≥ 25 °C) oder ein Tag, an dem ein definiertes meteorologisches Phänomen auftrat (z. B. Gewittertag als Tag, an dem ein Gewitter auftrat).

Klimaprojektion

Eine Klimaprojektion ist die Beschreibung eines möglichen und plausiblen künftigen Zustandes des Klimasystems nebst der zeitlichen Entwicklungslinie, die dorthin führt. Klimaprojektionen werden üblicherweise mit einem Klimamodell auf der Basis eines Szenarios erstellt.

Klimavorhersage

Vorhersagen leiten aus dem vergangenen und aktuellen Zustand des Klimasystems Aussagen über dessen zukünftigen Zustand ab. Traditionell beinhaltet eine Wettervorhersage die Entwicklung der nächsten ein bis zehn Tage. Die Klimavorhersage, ein aktueller Forschungsgegenstand, ist die Abschätzung der Entwicklung über diesen Zeithorizont hinaus für Zeitskalen von mehreren Monaten bis einer Dekade.

Planungshorizonte

In diesem Bericht wird zwischen einem kurzfristigen und langfristigen Planungshorizont unterschieden. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt das Zeitfenster der Jahre 2021 bis 2050, der langfristige das Zeitfenster der Jahre 2071 bis 2100. Auf diese Zeiträume bezogene Aussagen erfolgen immer in Relation zur Bezugsperiode 1971 bis 2000.



Referenzzeitraum/Referenzperiode

Angaben über eine Änderung der beobachteten mittleren klimatischen Verhältnisse werden immer in Relation zu einem Referenzzeitraum getätigt. In diesem Klimareport werden Aussagen über die Vergangenheit auf den Zeitraum der Jahre 1961 bis 1990 bezogen. Dieser Zeitraum entspricht der WMO-Referenzperiode für die langfristige Klimaüberwachung. Die Aussagen beschreiben immer die mittleren Verhältnisse über eine Zeitspanne von 30 Jahren.

Spannbreite

Für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklungen wird eine Gruppe von Klimaprojektionen (Ensemble) genutzt. Mit der Spannbreite wird der Bereich zwischen dem Modellergebnis mit der geringsten und größten Änderung beschrieben.

Szenarien

Ein Szenario ist eine Beschreibung einer möglichen Zukunft auf Grund von Annahmen. Eine Möglichkeit ist der Aufbau einer in sich schlüssigen Kette von Annahmen bezüglich der politischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen in der Zukunft und daraus abgeleiteten Veränderungen der Treibhausgasemissionen.

Literatur Meeresspiegel

DeConto, R. and D. Pollard, 2016: Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531, 591-597, doi:10.1038/nature17145

EEA, 2019: European Environmental Agency, Global and European sea-level rise, Indicator Assessment, CSI047, CLIM 012. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/sea-level-rise-6/assessment>

IPCC, 2013: *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, 1535 pp.

IPCC, 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a changing climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)] In press

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang,

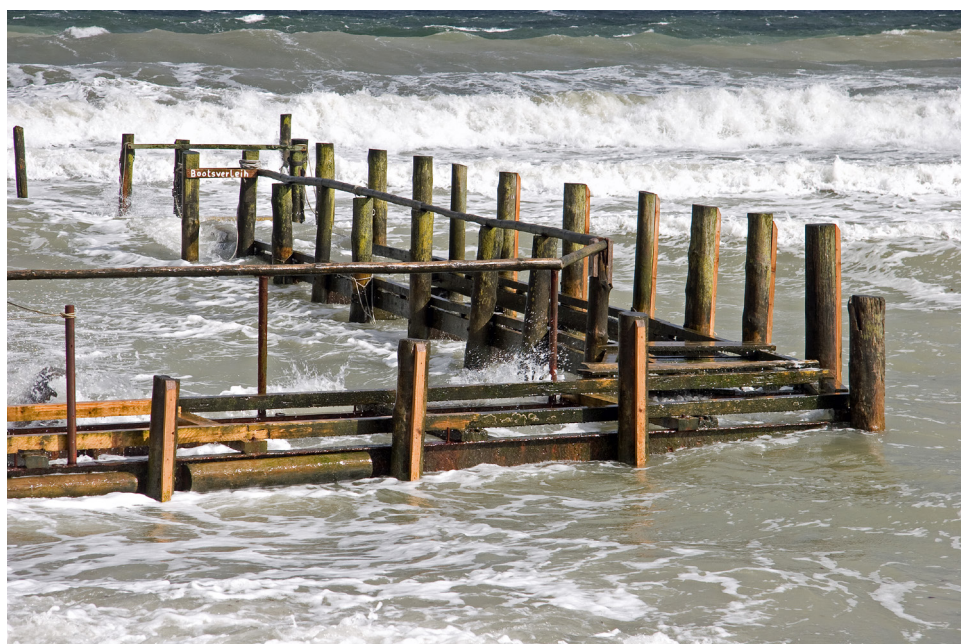
K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Kelln, J., S. Dangendorf und J. Jensen, 2019: AMSeL Ostsee A, Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee, Abschlussbericht, WBL 280 D, BMBF 03KIS114

Kelln, J., S. Dangendorf und J. Jensen, 2019: MSL_ absolut A, Räumlich-zeitliche Meeresspiegel-Rekonstruktionen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste, Abschlussbericht, WBL 286 D, BMBF 03KIS116

Nowicki, S. M. J., A. Payne, E. Larour, H. Seroussi, H. Goelzer, W. Lipscomb, J. Gregory, A. Abe-Ouchi and A. Shepherd, 2016: Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 4521-4545, doi:10.5194/gmd-9-4521-2016

Vestøl, O., J. Ågren, H. Steffen, H. Kierulf and L. Tarasov, 2019: NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *J. Geod.* 93, 1759-1779, doi:10.1007/s00190-019-01280-8.



Weiterführende Literatur / Weblinks

Daten und Informationen zum Klimawandel



Klimadaten Deutschland

www.dwd.de/klimadaten



Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringsbericht-2019>



Auswertungen zur Klimaentwicklung in Deutschland

www.dwd.de/zeitreihen



Deutscher Klimaatlas

www.dwd.de/klimaatlas



Fakten zum Klimawandel

www.dwd.de/klimadaten



SkepticalScience

<https://skepticalscience.com/translation.php?lang=6>



Das Deutsche Klimavorsorgeportal

www.klivportal.de



Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland und Europa (ReKliES-De)

<https://reklies.hlnug.de/home/>



Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

www.kliwa.de



BMVI Expertennetzwerk

www.bmvi-expertennetzwerk.de



Besondere Ereignisse

www.dwd.de/witterungsereignisse



Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>

IPCC - Sonderberichte



Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre (SROCC)

<https://www.de-ipcc.de/252.php>



Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5)

<https://www.de-ipcc.de/256.php>



Sonderbericht über Klimawandel und Landsysteme (SRCCL)

<https://www.de-ipcc.de/254.php>

Sachstandsberichte des IPCC



Naturwissenschaftliche Grundlagen

<https://www.de-ipcc.de/350.php>



Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit

<https://www.de-ipcc.de/354.php>



Minderung des Klimawandels

<https://www.de-ipcc.de/355.php>

Phänologie



Informationen zur Phänologie

www.dwd.de/phaenologie

Klimavorhersagen



Klimavorhersagen

www.dwd.de/klimavorhersagen

KOSTRA-DWD



Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD

www.dwd.de/kostra

Attribution



Informationen zur Attribution

www.dwd.de/attribution



Präsenz in der Fläche

Unsere Ansprechpartner und Beratungsstellen

Deutscher Wetterdienst Klima- und Umweltberatung

Deutschland überregional:

Zentrales Klimabüro
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
☎ 0 69 / 80 62 - 29 12
✉ klima.offenbach@dwd.de

Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Ausland und Weltmeere:

Regionales Klimabüro Hamburg
Postfach 30 11 90
20304 Hamburg
☎ 0 69 / 80 62 - 60 22
✉ klima.hamburg@dwd.de

Berlin, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen:

Regionales Klimabüro Potsdam
Postfach 60 05 52
14405 Potsdam
☎ 0 69 / 80 62 - 54 44
✉ klima.potsdam@dwd.de

Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

Regionales Klimabüro Essen
Wallneyer Straße 10
45133 Essen
☎ 0 69 / 80 62 - 68 88
✉ klima.essen@dwd.de

Bayern

Regionales Klimabüro München
Postfach 20 06 20
80006 München
☎ 0 69 / 80 62 - 92 25
✉ klima.muenchen@dwd.de

Baden-Württemberg

Regionales Klimabüro Freiburg
Stefan-Meier-Straße 4
79104 Freiburg
☎ 0 69 / 80 62 - 96 03
✉ klima.freiburg@dwd.de



Agrarmeteorologie



Agrarmeteorologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
☎ 0 69 / 80 62 - 23 01
✉ lw.offenbach@dwd.de

Zentrum für Agrarmeteorologische
Forschung
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
☎ 05 31 / 2 52 05 - 39
✉ lw.braunschweig@dwd.de

Außenstelle
Weihenstephan
Alte Akademie Nr. 16
Weihenstephaner Berg
85354 Freising
☎ 0 81 61 / 5 37 69 - 0
✉ lw.weihenstephan@dwd.de

Hydrometeorologie



Hydrometeorologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
☎ 0 69 / 80 62 - 29 80
✉ hydromet@dwd.de

Außenstelle Berlin-Buch
Lindenberger Weg 24
13125 Berlin
☎ 0 69 / 80 62 - 55 70
✉ hydromet.be@dwd.de

Medizin- Meteorologie



Zentrum für Medizin-
Meteorologische
Forschung
Stefan-Meier-Straße 4
79104 Freiburg
☎ 0 69 / 80 62 - 96 30
✉ mm.freiburg@dwd.de

Deutscher Klimadienst (DKD)



DKD Geschäftsstelle
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
✉ gs.dkd@dwd.de

DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“



DAS-Basisdienst
„Klima und Wasser“
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
☎ 0 69 / 80 62 - 24 00
✉ das-basisdienst@dwd.de

Impressum

Die Erstellung des Nationalen Klimareports erfolgte auf Anregung und in enger Kooperation mit dem Bundesländer-Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“.

Autoren

Dr. Andreas Becker, Dr. Thomas Deutschländer, Karsten Friedrich, Dr. Barbara Früh, Mathias Herbst, Dr. Kerstin Jochumsen*, Thomas Junghänel, Dr. Birgit Klein*, Dr. Frank Kreienkamp, Thomas Leppelt, Nora Leps, Peter Löwe*, Jens Möller*, Dr. Monika Rauthe, Stefan Rösner, Ludwig Schenk*, Thomas Schmidt, Miriam Tivig, Dr. Andreas Walter, Dr. Tanja Winterath, Dr. Markus Ziese

* Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Redaktion

Dr. Frank Kreienkamp

Online-Ausgabe

Dieses Heft liegt als digitales Dokument auf unserer Internetseite www.dwd.de/nationalerklimateport. Hier finden Sie auch Links zu Hintergrundmaterial und ähnlichen Produkten des Deutschen Wetterdienstes.

Die Online-Ausgabe unterliegt der Lizenz



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Zitierhinweis

DWD (2022): Nationaler Klimareport; 6. überarbeitete Auflage, Deutscher Wetterdienst, Deutschland, 53 Seiten.

ISBN 978-3-88148-536-4 (Print)

ISBN 978-3-88148-537-1 (Online)

Gestaltung und Satz

Elke Roßkamp, Oda Thiessen-Thom

Druck

Bundesministerium für Digitales und Verkehr
Hausdruckerei

Bildnachweis

DWD, außer:

Creative Collection: Um, 1o, 18, 20, 26l

Feuerwehr Gerolstein: 40

Fotolia.com: 5 (Gina Sanders), 10o (Paul Paladin), 19 (gradt), 51mr

MEV-Verlag: 1u, 17l

Panthermedia.net: U1 (Clemens Humeniuk), Ur (Wolfgang Filser), 1m (Hans Eder), 4 (Dario Sabljak), 6 (kwest) 10u (Orlando Rosu), 11 (Hendrik Fuchs), 17r (Daniel Loretto), 23 (Peter Kaschuba), 25 (bestshot70), 26ml (Oliver C. Bellido), 26mr (Gabi Faltenbacher), 26r (Tyler Olson), 29o (Roland Schmock), 30 (Ines Weiland-Weiser), 31 (Roland Schmock), 37 (Ingo Gronostay), 38 (Bernd Leitner), 41 (Ingo Gronostay), 42o (Daniel Loretto), 46 (Rilo Naumann), 47 (Detlef Schneider)

Piqs: 51l, Pixabay: 51ml

(l: links; m: mitte; o: oben; r: rechts, u: unten;
U: Umschlag)



Deutscher Wetterdienst

Abt. Klima- und Umweltberatung

Zentrales Klimabüro

Frankfurter Straße 135

63067 Offenbach

Tel: +49 (0) 69 / 8062 - 2912

Fax: +49 (0) 69 / 8062 - 2993

E-Mail: klima.offenbach@dwd.de

Über www.dwd.de gelangen Sie
auch zu unseren Auftritten in:

