

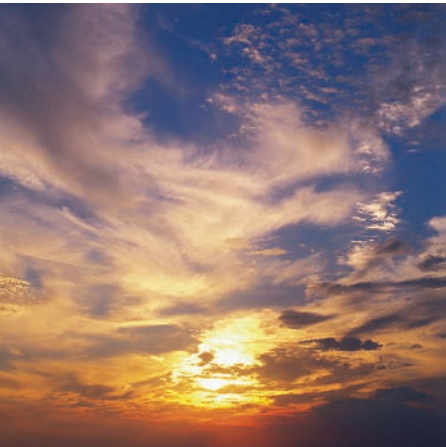


Nationaler Klimareport

Klima – Gestern, heute und in der Zukunft



Inhalt



Vorwort.....	2
Weltklimakonferenz COP23	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	12
Klimaparameter und ihre Veränderungen	
Temperatur	14
Niederschlag	20
Sonnenschein.....	26
Meeresspiegel.....	28
Phänologie	30
Extremereignisse	32
Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima	38
Begriffskompass Klima.....	40
Impressum	42



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Das Jahr 2016 brachte den dritten globalen Temperaturrekord in Folge. In Deutschland betrug die mittlere Temperatur 9,5 °C, ein Plus von 1,3 Grad verglichen mit dem Mittel des Referenzzeitraumes 1961–1990. Den Temperaturrekord in Deutschland hält das Jahr 2014 mit 10,3 °C. Diese Werte stellen dabei sehr wahrscheinlich nur die bisherigen Höhepunkte einer fortlaufenden Entwicklung dar. Der 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) lässt für den weiteren Verlauf dieses Jahrhunderts eine weitere deutliche Klimaerwärmung erwarten.

Der Klimawandel stellt für nahezu jeden von uns eine große Herausforderung dar. Sei es beispielsweise für Sie in Form vermehrt auftretender Tage mit Hitzebelastung oder für den Landwirt in Form häufiger vorkommender extremer Witterungsereignisse.

Der internationale Rahmen für den Umgang mit dem Klimawandel wurde auf der Weltklimakonferenz COP21 in Paris festgelegt. Hier wurden Ziele definiert, die nun umgesetzt werden müssen. Eine Voraussetzung für die Umsetzung dieser Ziele ist ein detailliertes Verständnis des aktuellen Standes.

*Der **Nationale Klimareport** fasst das bekannte Wissen über das Klima von gestern, heute und morgen in Deutschland kurz und knapp zusammen. Er soll Ihnen als Leser die Möglichkeit geben, sich einen fundierten Überblick zum Klimawandel zu verschaffen. Der Nationale Klimareport stellt damit für Sie eine wesentliche Wissensgrundlage für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel bereit.*

Dr. Paul Becker

Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes

Die internationale Zusammenarbeit zum Schutz und zur Erforschung des Klimas

Im November 2017 wird in Bonn die von den Vereinten Nationen organisierte 23. Vertragsstaatenkonferenz (englisch: 23rd Conference of the Parties – COP23) der UN Klimarahmenkonvention (UNFCCC) unter der Präsidentschaft der Fidschi-Inseln stattfinden. Diese, wie auch die vorangegangene Weltklimakonferenz in Marrakesch im Jahr 2016, wird sich mit den Umsetzungen der von der Pariser Klimaschutzkonferenz (COP21) im Dezember 2015 vereinbarten Anstrengungen zum Schutz des Klimas befassen. Während der COP21 gelang ein entscheidender Durchbruch, indem sich 195 Länder erstmals auf ein allgemeines, rechtsverbindliches weltweites Klimaschutzübereinkommen geeinigt haben. Es umfasst einen globalen Aktionsplan, der die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, begrenzen soll, um die Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen. Durch den derzeit angekündigten Ausstieg der USA aus diesem internationalen Abkommen werden die Ergebnisse der COP23 mit großer Spannung erwartet.

Die wissenschaftliche Basis des Paris-Abkommens stellte der im Jahr 2013/2014 erschienene Fünfte Sachstandsbericht des Weltklimarates (englisch: Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) dar. Der IPCC wurde vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) gegründet und ist sowohl ein zwischenstaatlicher Ausschuss als auch ein wissenschaftliches Gremium. Er forscht nicht selbst, sondern trägt die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zahlreicher Experten zusammen. Der Bericht des IPCC beschreibt mögliche Entwicklungen des Klimas auf der Erde und deren Auswirkungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und verdeutlicht, dass ohne Reduktion der Emission von Treibhausgasen das Klima der Erde und in der Folge deren Erscheinungsbild sich sehr wahrscheinlich wesentlich von dem heutigen unterscheiden wird.

Die Klimaforschung spielt weltweit, in Europa und in Deutschland 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.

Auf internationaler Ebene finden zurzeit die Vorbereitungen zum Sechsten Sachstandsbericht des IPCC statt, der bis zum Jahr 2022 veröffentlicht werden soll. Die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse auf der Grundlage von Klimasimulationen werden darin Berücksichtigung finden.



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 in den letzten 136 Jahren etwa 1,4 Grad wärmer gewor-

den. 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 in den letzten 136 Jahren zugenommen. Dieses gilt insbesondere für den Winter und das Frühjahr. In der Jahressumme sind es im Mittel 9 Prozent mehr. Veränderungen der Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter sind kaum erkennbar.

Erfasst wird des Weiteren die Höhe des Meeresspiegels. Auch hier ist eine Änderung zu beobachten. Der Meeresspiegel ist in den letzten 100 Jahren um etwa 20 cm in der Deutschen Bucht und um etwa 14 cm an der deutschen Ostseeküste 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.

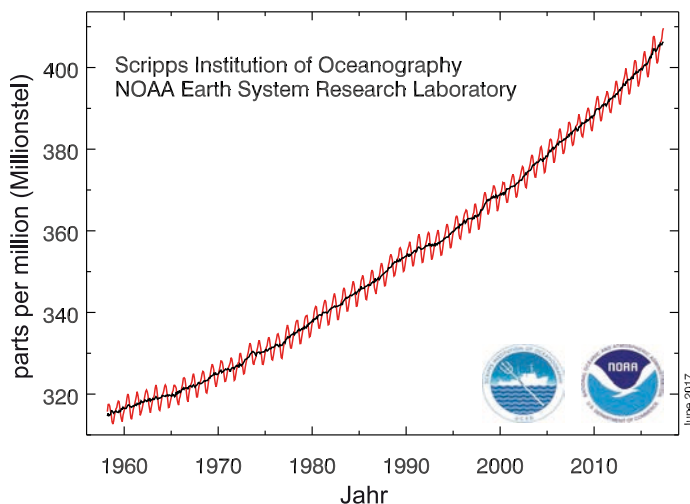
Mit Hilfe von Klimamodellen haben die Wissenschaftler die Auswirkungen auf das globale und regionale Klima auf der Basis von Szenarien berechnet. Für Deutschland ergibt sich je nach gewähltem Szenario eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 1 °C bis hin zu mehr als 4 °C in den nächsten 100 Jahren. Eine Änderung von nur 1 °C ist laut den Klimamodellen nur bei deutlicher Reduktion der Emission von Treibhausgasen möglich. Bei weiterem



Wirtschaftswachstum und weiterhin hohen Treibhausgasemissionen 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 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 Reihe direkter Kohlendioxidmessungen. 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

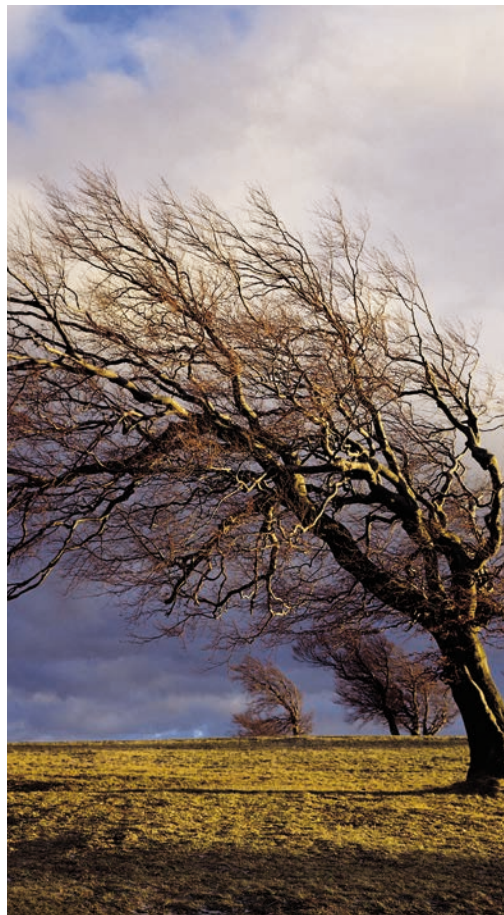
Wetter, Witterung, Klima: Unter diesen drei Begriffen versteht die Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschiedenen langen Zeiträumen ablaufen. Das Wetter beschreibt den kurzfristigen Zustand der Atmosphäre, die Witterung eine Phase von Wochen bis mehreren Monaten und das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

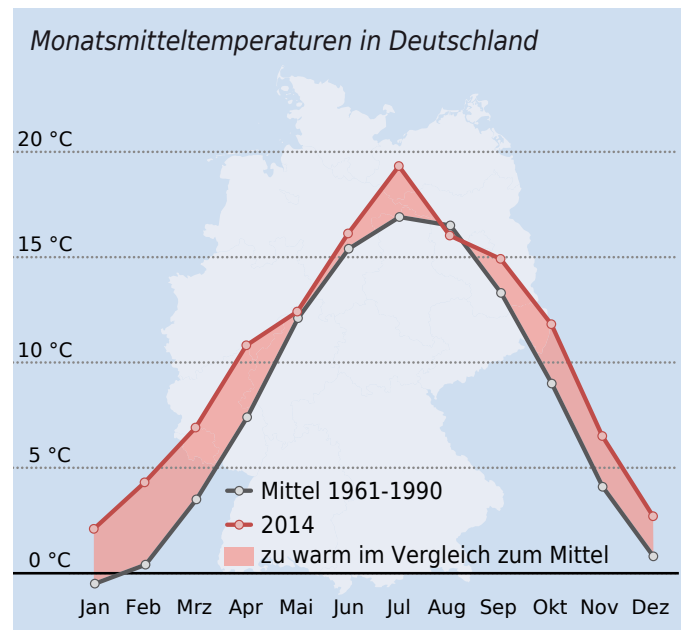
Die beschriebene Variabilität zeigt sich nicht nur bei der Temperatur. Sie gilt für alle meteorologischen Elemente (z. B. Niederschlag und Sonnenscheindauer). Auch ein sich durch den Klimawandel erwärmendes Klima weist diese Variabilität auf: Es wird nicht jedes Jahr etwas wärmer sein als das vorhergehende. 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. zu häufigeren positiven Temperaturabweichungen, festzustellen ist oder vermehrt bisher beobachtete Schwankungsbreiten betragsmäßig zunehmend 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

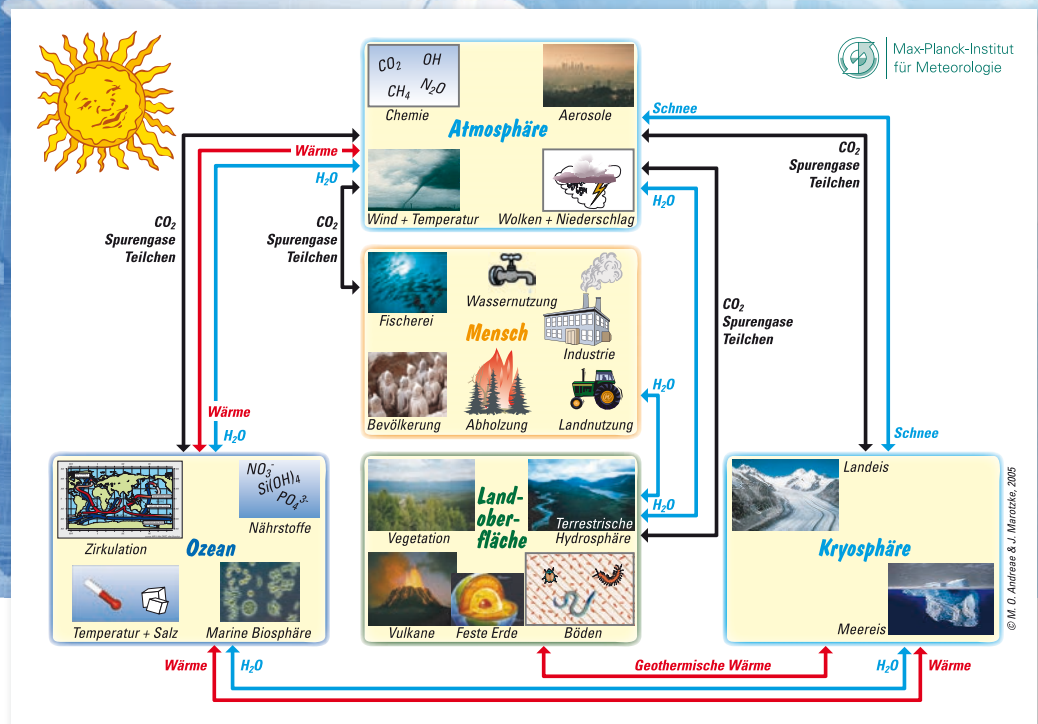
Extremereignisse sind sehr seltene Ereignisse, die stark von den mittleren Bedingungen abweichen.



▲ 2014 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf den August wiesen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen auf als während der international gültigen Referenzperiode 1961-1990.

Ein Ereignis kann aus vielfältigen Gründen zu einem 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: Max-Planck-Institut für Meteorologie)

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 (Gitterpunkt- abstand) 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. Sie gehen von den Ergebnissen der globalen Klimamodelle aus.

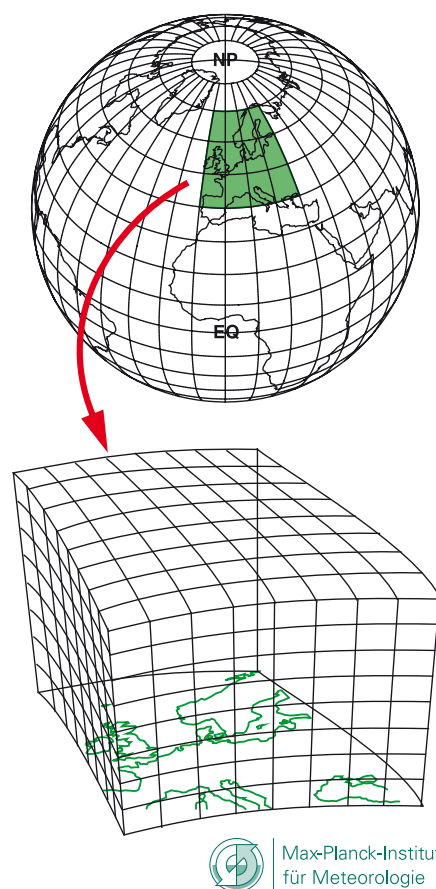
Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Gitterweite von 50 und 12,5 km vor. Das bedeutet zum Beispiel, dass die simulierte Temperatur nur alle 12,5 km einen anderen Wert annehmen kann.

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 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 gegenüber den in der Natur ablaufenden Prozessen.

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

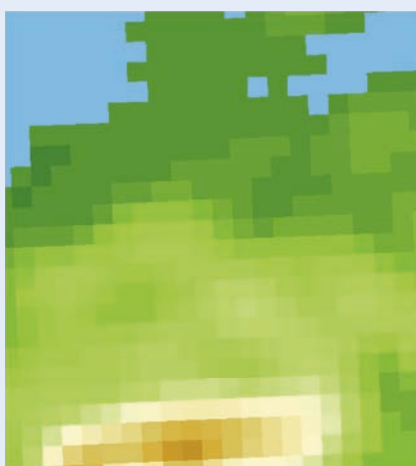


▲ Beispielhafte Darstellung von Modellgitterzellen. Sie unterteilen die Atmosphäre nicht nur in der Horizontalen, sondern bilden auch in der Vertikalen eine Reihe von Schichten. (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie)

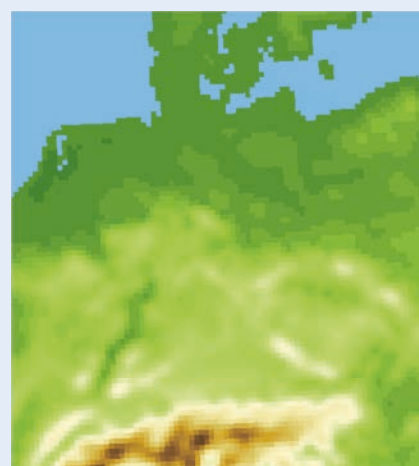
Je engmaschiger, desto genauer - hier am Beispiel des Höhenreliefs von Deutschland in unterschiedlichen Modellgitterauflösungen. Die Auswirkungen der Beschreibung einer Region auf Basis eines wesentlich dichteren Gitternetzes sind deutlich erkennbar. ▼



Globales Klimamodell (sehr grob)
1,875° (ca. 200 km)



Regionales Klimamodell (grob)
0,44° (ca. 50 km)



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



Klimawandel und Klimaprojektionen

Der Begriff Klimawandel beschreibt eine Änderung der vorhandenen klimatischen Verhältnisse an einem Ort oder auf der gesamten Erde. Hinsichtlich des Parameters 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 Kohlendioxid, 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.

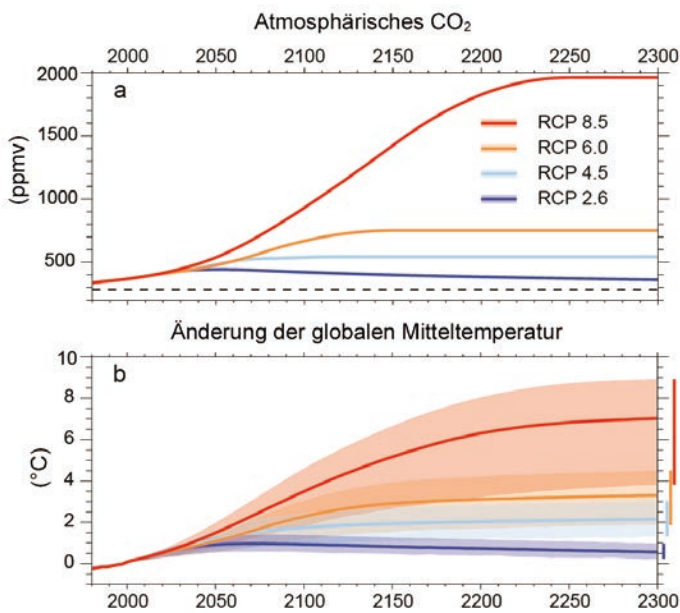
Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einflussnahme. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft Szenarien genannt. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl 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 Aerosol (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 bezeichnen.

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). Die Entwicklung sozio-ökonomischer Faktoren, z. B. der Bevölkerung, der Energienutzung oder die Emissionen von Treibhausgasen werden nicht modelliert. Sie können aber indirekt den RCPs zugeordnet werden.

Wie entwickelt sich unsere Emissions-Zukunft?

In diesem Report werden Ergebnisse von Simulationsrechnungen auf der Basis eines **Klimaschutz-Szenarios** (RCP2.6) und des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** (RCP8.5) gezeigt.





▲ Entwicklung des atmosphärischen Kohlendioxids und der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2300 für die verschiedenen Emissions-Szenarien. (Quelle: http://www.climatechange2013.org/images/figures/WGI_AR5_Fig12-42.jpg, verändert)

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 Jahr 1860 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 ($3,0 \text{ W/m}^2$) erreicht. Von da an sinkt er kontinuierlich auf den Wert $2,6 \text{ W/m}^2$ 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).

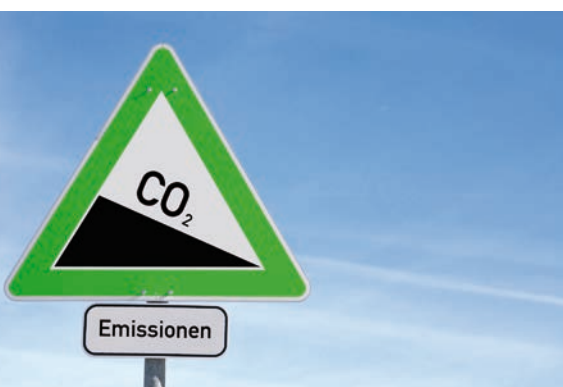
Das **Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5)** beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Der Ausstoß von Treibhausgasen wird sich gegenüber heute mit einem stetigen Anstieg des Strahlungsantriebes bis hin zum Jahr 2100 erhöhen.

Zu Vergleichszwecken wird ein weiteres Szenario im Text erwähnt, das **SRES-Szenario A1B**. 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, welches sind die minimal zu erwartenden Änderungen, welches die maximalen? Letztendlich werden die realen Veränderungen wahrscheinlich innerhalb dieser Bandbreite liegen.

Für diesen Bericht werden Ergebnisse von 54 Klimaprojektionen verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen. 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 Zukunft werden zwei Zeiträume analysiert, sie werden im Weiteren kurzfristiger und langfristiger Planungshorizont genannt. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt den mittleren Zustand der Jahre 2021 bis 2050. 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

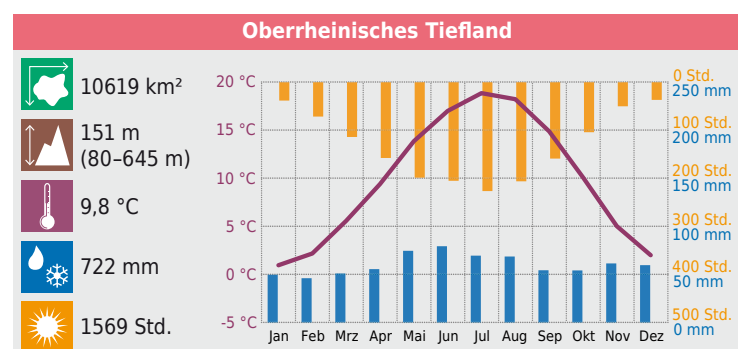
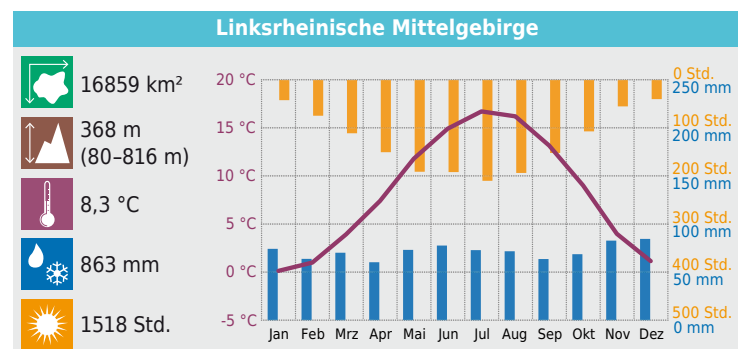
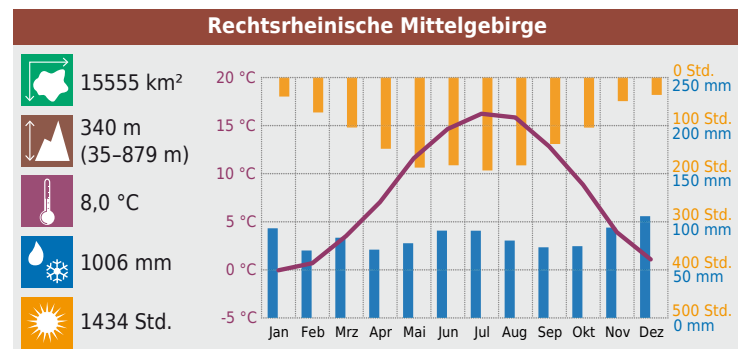
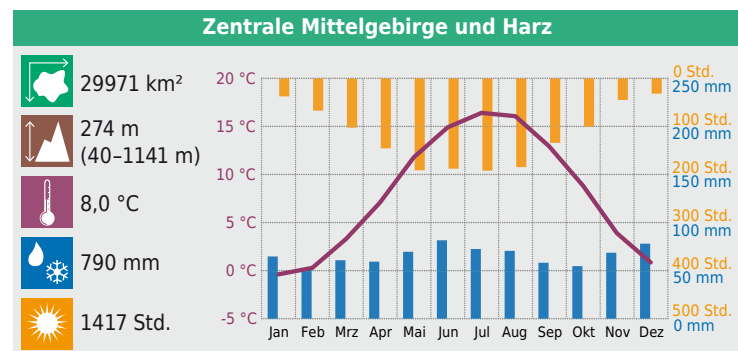
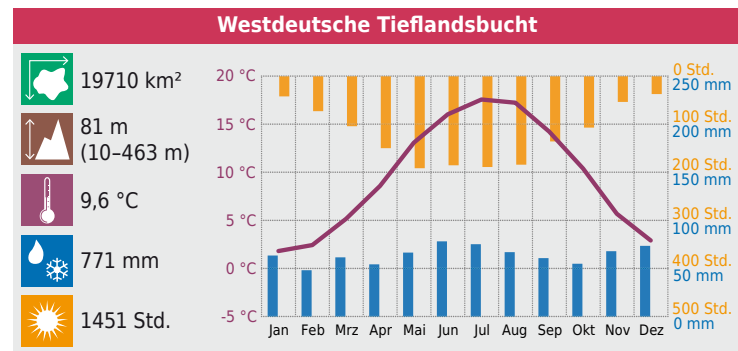
Eine Beschreibung des Klimas in Deutschland mit Hilfe von Flächenmitteln für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik ist nicht immer sinnvoll. Oft lässt sich die entsprechende Situation kleinräumig/regional besser beschreiben. Je nach Ereignis oder Thema kann die dafür notwendige regionale Einteilung sich 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.

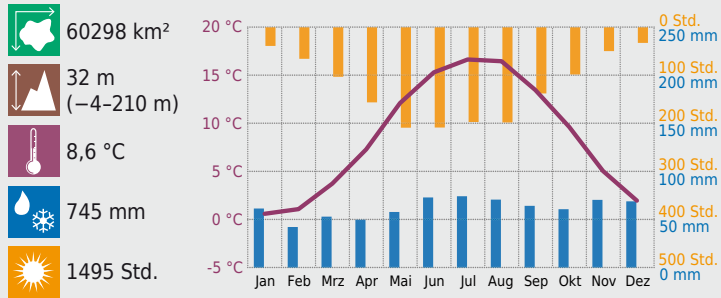
In der Karte ist diese regionale Aufteilung dargestellt. Die zugehörigen Klimadiagramme zeigen die Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der international gültigen Referenzperiode 1961–1990. Auch für das gesamte Bundesgebiet sind die entsprechenden Daten abgebildet.

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.

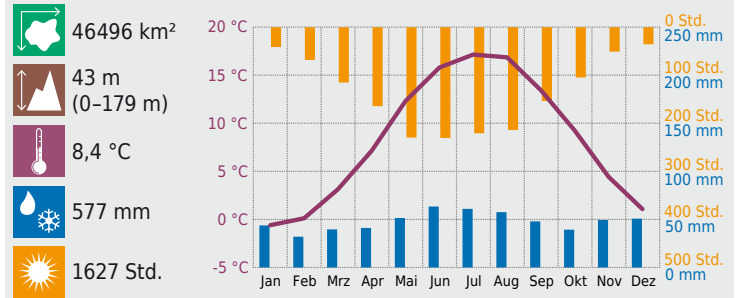
Gebiet	
	Fläche
	Mittlere Höhe (minimale-maximale Höhe)
	Jahresmitteltemperatur
	Jährliche Niederschlagssumme
	Jährliche Sonnenscheindauer
Diagramme	
	Monatsmitteltemperatur
	Monatliche Niederschlagssumme
	Monatliche Sonnenscheindauer



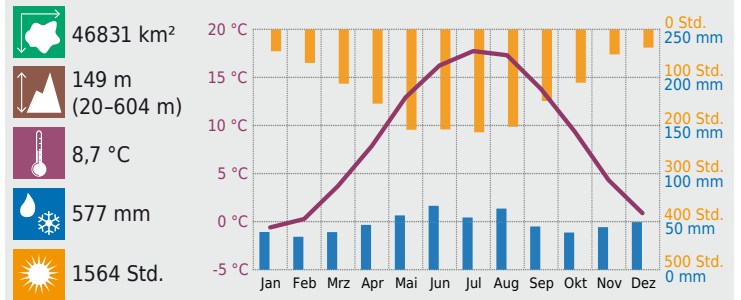
Nordwestdeutsches Tiefland



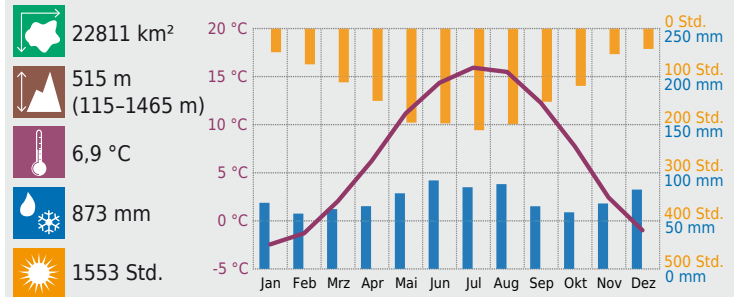
Nordostdeutsches Tiefland



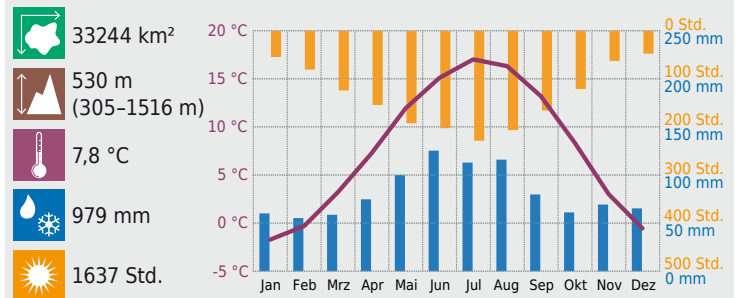
Ostdeutsche Becken und Hügel



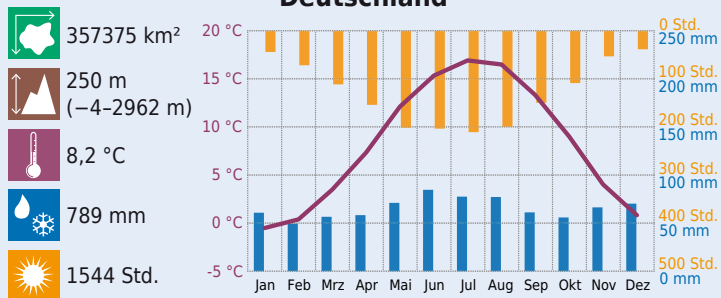
Östliche Mittelgebirge



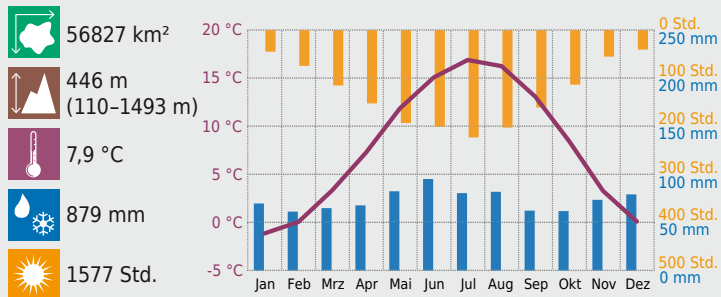
Alpenvorland



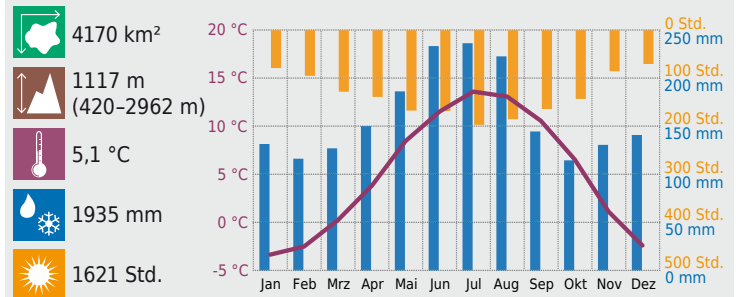
Deutschland



Südwestdeutsche Mittelgebirge



Alpen





Temperatur

Temperatur

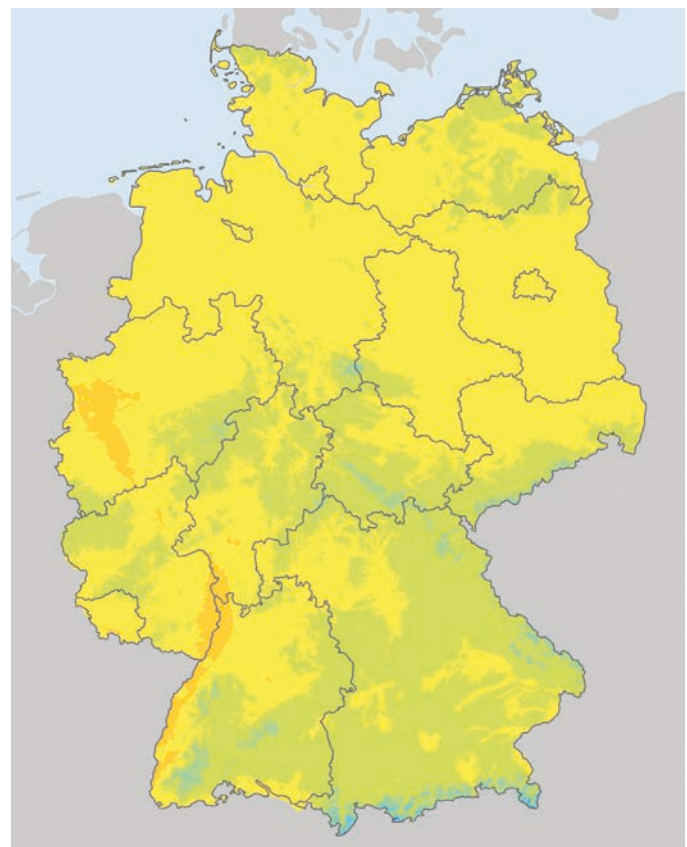
Die Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland beträgt für die Referenzperiode 1961–1990 8,2 °C. Während in den deutschen Mittelgebirgsräumen und im Alpenvorland aufgrund der höheren Lage die Durchschnittstemperaturen etwas niedriger liegen (6,9 bis 8,0 °C) und die Alpen nur 5,1 °C erreichen, treten 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 2016 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur für Deutschland um 1,4 °C angestiegen. Auch der vieljährige Mittelwert der Referenzperiode 1961–1990 von 8,2 °C ist mittlerweile auf 8,9 °C im aktuelleren 30-Jahres-Zeitraum 1981–2010 gestiegen.

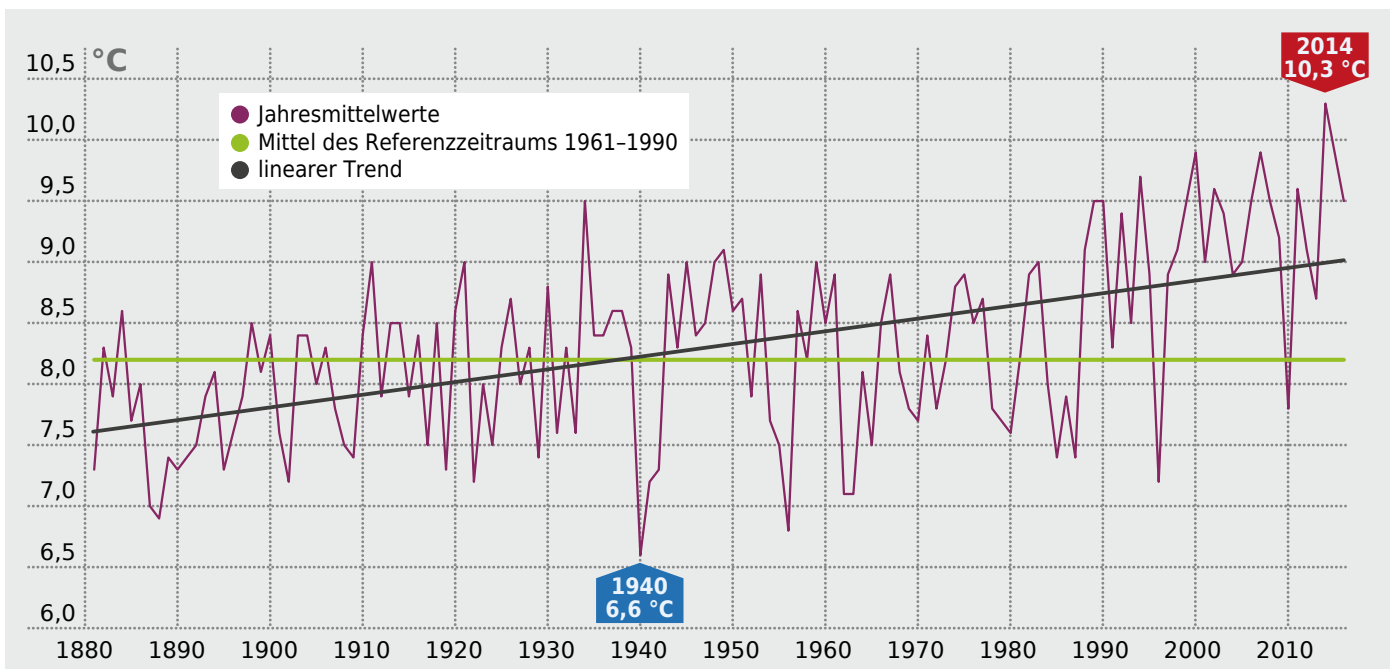
Der auch global zu beobachtende Trend der Erwärmung der Atmosphäre ist überlagert durch die natürliche Variabilität des Klimasystems, durch die es auch immer wieder Zeiträume gibt, in denen der Temperaturanstieg stagniert, oder sogar Phasen, in denen die Temperatur kurzfristig zurückgegangen ist. Bei 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 Klimaantreiber, zu denen neben den natürlichen Faktoren wie Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität auch die vom Menschen verursachten Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zum Beispiel durch Landnutzungsänderungen und Luftverschmutzungen zählen.

Der Zeitraum 1910 bis 1950 und insbesondere der Zeitraum seit der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre sind geprägt von einer ansteigenden Temperatur, während diese dazwischen weitestgehend auf demselben Niveau verharrt. Auch zum Ende des 19. Jahrhunderts blieb die Temperatur im Wesentlichen konstant.



-4 -2 0 2 4 6 8 10 12 °C

▲ 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 (Flächenmittel aus Stationsmessungen in 2 m Höhe) von 1881-2016.

Die stärksten Änderungen seit 1881 finden sich in der Westdeutschen Tieflandsbucht, dem Linksrheinischen Mittelgebirge und im Oberrheinischen Tiefland mit 1,5 °C; im Nordostdeutschen Tiefland ist der Anstieg mit 1,0 °C am geringsten.

2014 wurde das bisher wärmste Jahr seit 1881 in Deutschland beobachtet. Zehn der siebzehn 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.



Die zehn wärmsten Jahre in Deutschland seit 1881

2014	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
1934	9,5 °C
1989	9,5 °C
1990	9,5 °C



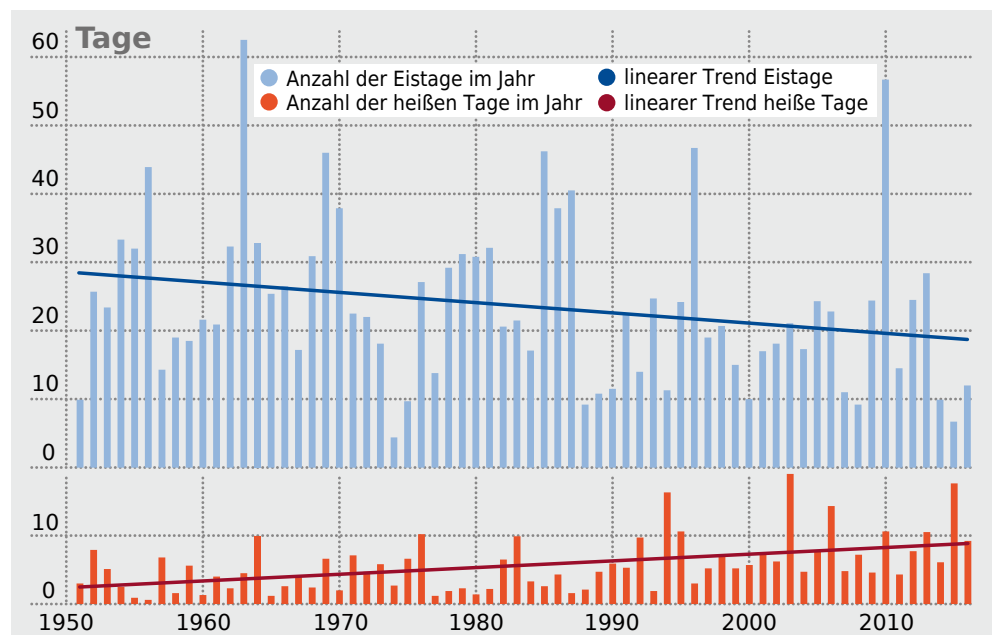
Hügeln bei fünf bis neun Tagen im Jahr. 1981–2010 sind diese Ereignisse inzwischen auf durchschnittlich acht bis neun, am Oberrheinischen Tiefland sogar auf 13 Tage pro Jahr angestiegen. Im Alpenvorland und in den Alpen ist nach wie vor mit weniger als sieben bzw. drei heißen Tagen pro Jahr zu rechnen. Allerdings entspricht dies dem Doppelten (Alpenvorland) bzw. Dreifachen (Alpen) im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990.

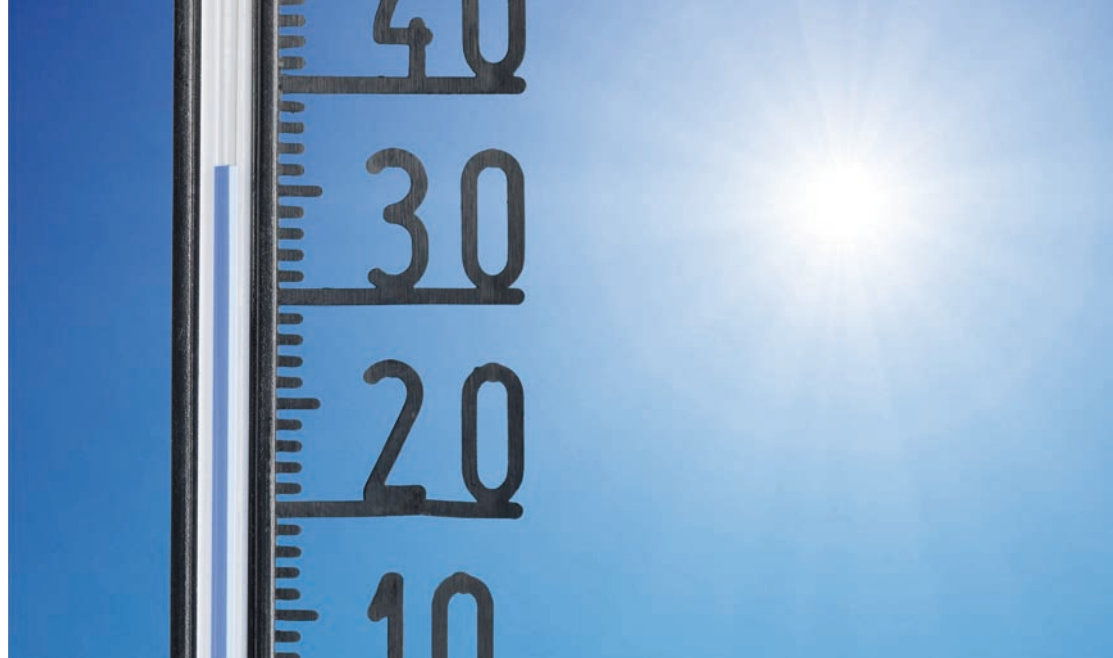
Veränderung von Kenntagen

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 neun Tage im Jahr angestiegen. Die mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum der Lufttemperatur < 0 °C) hat im gleichen Zeitraum von 28 Tagen auf 19 Tage abgenommen. In den wärmsten Regionen Deutschlands finden sich auch die meisten Hitzesituationen. Im Zeitraum 1961–1990 lag die mittlere Anzahl von heißen Tagen im Oberrheinischen Tiefland, in der Westdeutschen Tieflandsbucht und in den Ostdeutschen Becken und

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 1981–2010 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 ein Viertel verringert hat.

Die Zahl der heißen Tage nimmt in Deutschland zu, Eistage werden seltener. Die Darstellung zeigt die Jahreswerte für Deutschland von 1951–2016 sowie den entsprechenden linearen Trend.



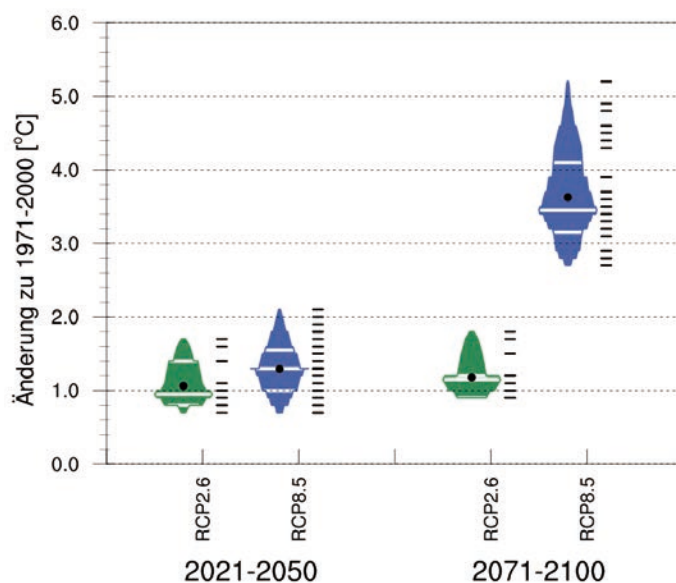


Zukunft

Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Deutschland ist zu erwarten (*sehr hohe Übereinstimmung*). Für den kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) beträgt dieser Anstieg etwa 1,0 bis 1,3 °C (*mittlere Übereinstimmung*). Der Unterschied zwischen den durch die Klimaprojektionen (**Klimaschutz-Szenario** und **Weiterwie-Bisher-Szenario**) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 0,7 und 2,1 °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 1,2 °C zu erwarten (*mittlere Übereinstimmung*). 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 vorindustriellen Zustand beträgt 2,5 °C. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden. Unter den Bedingungen des **Weiterwie-Bisher-Szenarios** beträgt die Erwärmung etwa 3,7 °C (*mittlere Übereinstimmung*). Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,7 und 5,3 °C. Die Erwärmung ist in den südlichen Regionen stärker ausgeprägt.

Die vorliegenden Ergebnisse des **Weiterwie-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 (2021–2050) und langfristigen (2071–2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971–2000. Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, grün) denen des Weiterwie-bisher-Szenarios (RCP8.5, blau) gegenübergestellt. Die dargestellten Körper symbolisieren den Bereich zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Breite des Körpers signalisiert die Wahrscheinlichkeit des Eintretens (je breiter, umso höher die Wahrscheinlichkeit). Zusätzlich eingetragen sind der Mittelwert (schwarzer Punkt) und die Perzentile (25, 50 und 75 %) als weiße Linien. Neben den Körpern werden als schwarze Linien die Einzelergebnisse der Modelle gezeigt.

Jahreszeitliche Mittelwerte der Temperatur und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	2021-2050 (RCP2.6)	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	7,7 °C	8,1 °C	+0,9 °C	+1,1 °C	+1,0 °C	+2,9 °C
Sommer	16,3 °C	16,6 °C	+1,1 °C	+1,3 °C	+1,0 °C	+3,5 °C
Herbst	8,8 °C	8,7 °C	+1,2 °C	+1,5 °C	+1,2 °C	+3,9 °C
Winter	0,3 °C	0,8 °C	+1,1 °C	+1,6 °C	+1,2 °C	+4,0 °C
Jahr	8,2 °C	8,6 °C	+1,0 °C	+1,3 °C	+1,2 °C	+3,7 °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 +1,3 °C (**Klimaschutz-Szenario**) und +1,5 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971-2000. Für den langfristigen Planungshorizont werden mittlere Erwärmungsraten zwischen 1,3 °C (**Klimaschutz-Szenario**) und 4,4 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario, mittlere Übereinstimmung**) 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 1,2 °C (**Klimaschutz-Szenario, mittlere Übereinstimmung**) und 3,4 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario, mittlere Übereinstimmung**) projiziert.

Jahreszeitliche Unterschiede

Die Erwärmung ist in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Frühjahrs, hier fällt sie geringer aus. 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 (*sehr hohe Übereinstimmung*). 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 4,5 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario, mittlere Übereinstimmung**) über den für Gesamtdeutschland projizierten Erwärmungsraten von im Mittel 4 °C (**Weiter-wie-bisher-Szenario**).

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Ungebrochener Trend der Erwärmung in Deutschland
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,4 °C in 136 Jahren
- Änderung der Extreme: Mehr heiße Tage, weniger Eistage

Kurzfristiger Planungshorizont

- Deutschlandweite mittlere Erwärmung um im Mittel 1,0 bis 1,3 °C

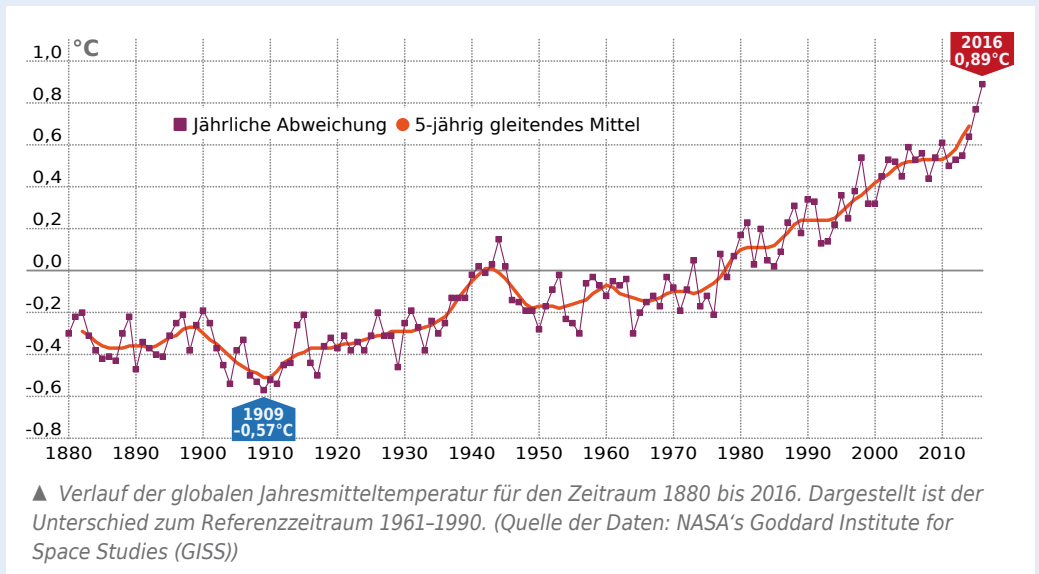
Langfristiger Planungshorizont

- Beim Klimaschutz-Szenario Stabilisierung auf eine Erwärmung von 1,2 °C
- Beim Weiter-wie-bisher-Szenario deutschlandweite mittlere Erwärmung um im Mittel 3,7 °C

Stärkere Erwärmung in den Alpen und im Alpenvorland.

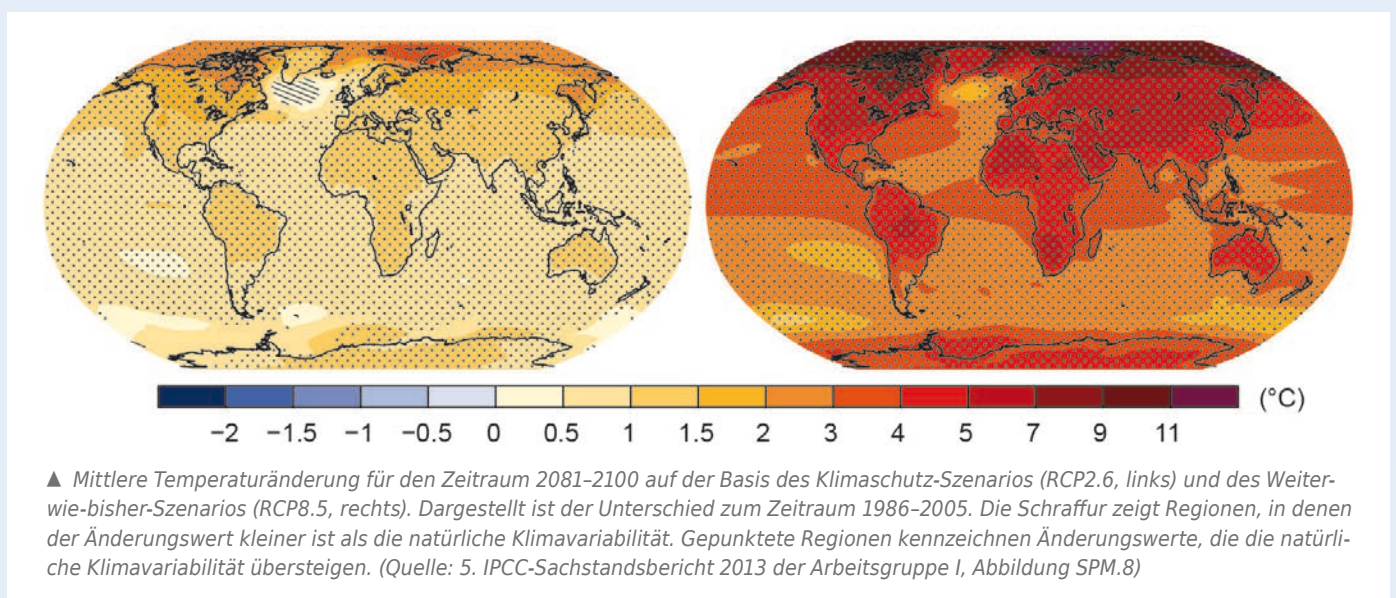
Globale Temperaturentwicklung

2016 war global das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen. Das Jahr folgt damit dem langfristigen Trend der globalen Erwärmung. 16 der 17 wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen sind seit 2001 gemessen worden. Die globale Mitteltemperatur des Jahres 2016 lag $1,1\text{ °C}$ über der mittleren Temperatur der vorindustriellen Zeit. Die beobachtete Erwärmung der letzten Jahrzehnte war über den Landmassen höher als über den Ozeanen.



Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen einen weiteren Anstieg der globalen Mitteltemperatur. Auf der Basis des **Klimaschutz-Szenarios** wird zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung von 1 °C gegenüber dem Zeitraum 1986–2005 berechnet. Für das **Weiter-wie-bisher-Szenario** ergibt sich eine mittlere Erwärmung von $3,7\text{ °C}$. Die Erwärmung ist regional sehr unterschiedlich. Die höchsten Erwärmungsraten treten über den Kontinenten und an den beiden Polkappen auf.

Um die COP21-Ziele (siehe Seite 3) einordnen zu können, ist die Summation der bisherigen beobachteten Erwärmung und der projizierten Erwärmung auf der Basis der Klimaszenarien notwendig. Erster Summand ist die Erwärmung des Zeitraums 1986–2005 gegenüber 1850–1900. Diese beträgt $0,6\text{ °C}$. Die COP21 2-Grad-Obergrenze kann bei einer Entwicklung analog zum **Klimaschutz-Szenario** ($0,6 + 1,0\text{ °C}$, Summe $1,6\text{ °C}$) eingehalten werden. Ein Verlauf entsprechend dem **Weiter-wie-bisher-Szenario** ($0,6 + 3,7\text{ °C}$, Summe $4,3\text{ °C}$) verfehlt die COP21-Ziele deutlich.





Niederschlag

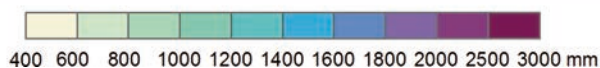
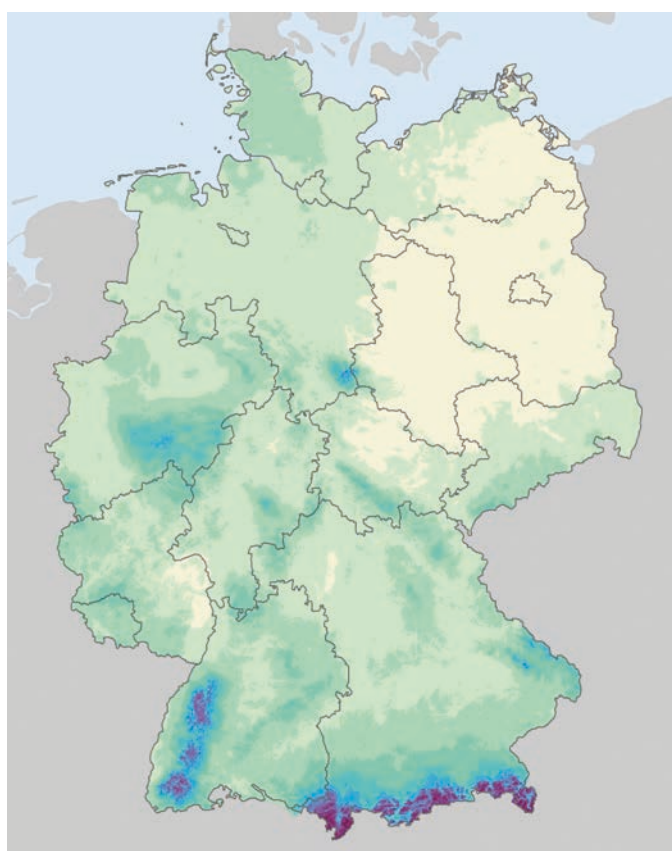
Niederschlag

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 Zunahme der Jahresniederschlagssumme zu rechnen.

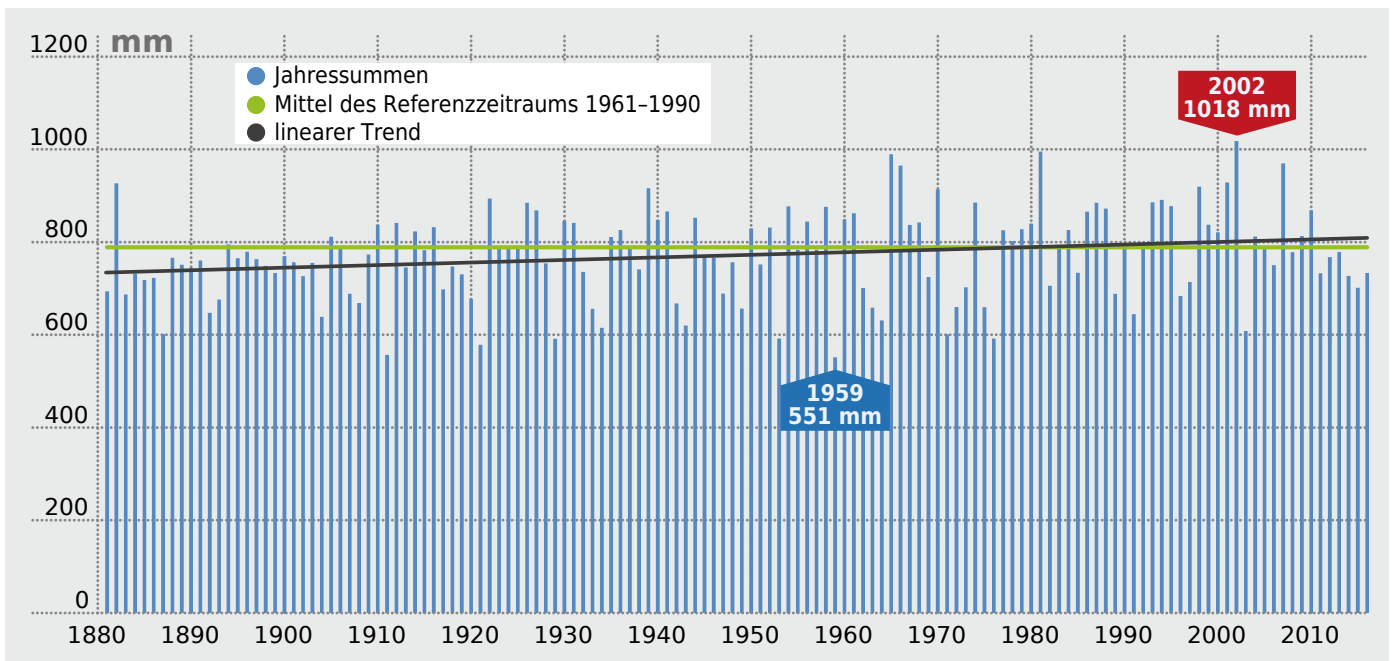
Das Niederschlagsaufkommen in Deutschland

In Deutschland fallen im Durchschnitt 789 mm Niederschlag pro Jahr. Das entspricht 789 Litern pro Quadratmeter. In den nordöstlichen und zentralen Teilen Deutschlands sind verbreitet mittlere jährliche Niederschlagshöhen von unter 600 mm, in den höheren Lagen der Alpen und des Schwarzwaldes von über 1500 mm 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 mm die geringsten und in den Alpen mit 1935 mm die größten Jahresniederschlagshöhen zu verzeichnen.

In Einzeljahren und kleinräumig kann die Niederschlagshöhe deutlich niedriger oder auch deutlich reichlicher ausfallen. So wurden mit 209 mm im Jahr 1911 (Aseleben, Sachsen-Anhalt) und mit 3503 mm 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 2016.

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 mm, das trockenste das Jahr 1959 mit 551 mm. Unter teils starken Schwankungen von Jahr zu Jahr oder von Jahrzehnt zu Jahrzehnt nahm die deutschlandweite jährliche Niederschlagshöhe in den 136 Jahren seit 1881 um 74 mm bzw. 9 % 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.

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 mm im Jahr 1911 der nasseste Sommer mit 358 mm im Jahr 1882 gegenüber. Normal sind 239 mm (Mittel 1961-1990). Von 1881 bis heute hat sich der sommerliche Niederschlag so gut wie nicht verändert. 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 mm 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 mm im Jahr 1890/91 steht der niederschlagsreichste Winter mit 304 mm im Jahr 1947/48 gegenüber. Normal sind 181 mm (Mittel 1961-1990).

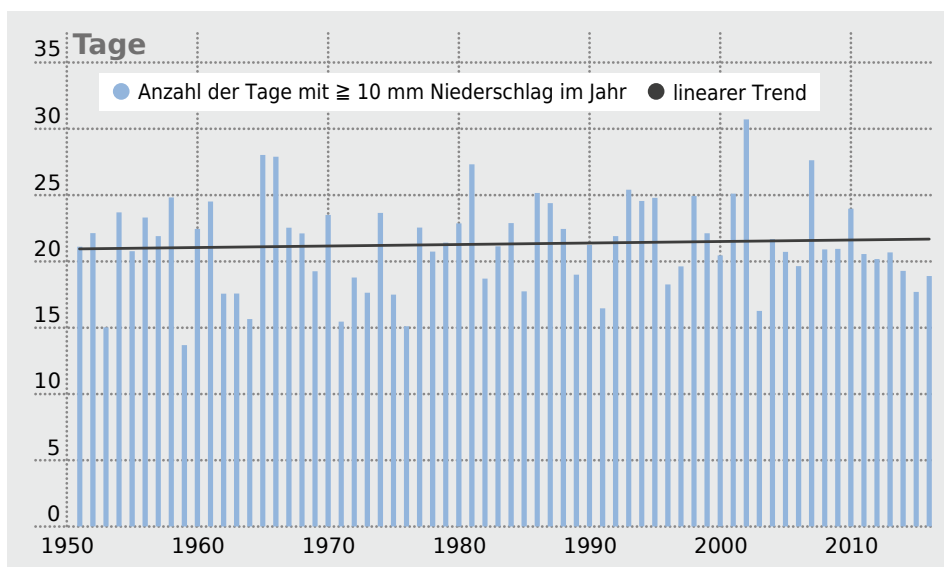
Die Alpen sind in allen Jahreszeiten die nasseste Region. Bei den trockensten Regionen gibt es hingegen Unterschiede zwischen den Jahreszeiten: Das Nordostdeutsche Tiefland weist im Frühling und Sommer mit 132 mm bzw. 182 mm (Mittel 1961-1990) die niedrigsten Werte auf, während die Ostdeutschen Becken und Hügel im Herbst mit 128 mm und im Winter mit 123 mm trockener sind. In diesen beiden Regionen finden sich auch keine nennenswerten Änderungen in der Niederschlagshöhe zwischen 1881 und 2016. Der stärkste Jahrestrend relativ zu 1961-1990 findet sich im Nordwestdeutschen Tiefland mit +14 %, wobei der Hauptanstieg wie schon in Gesamtdeutschland mit +33 % im Winter zu finden ist.

Veränderung von Kenntagen

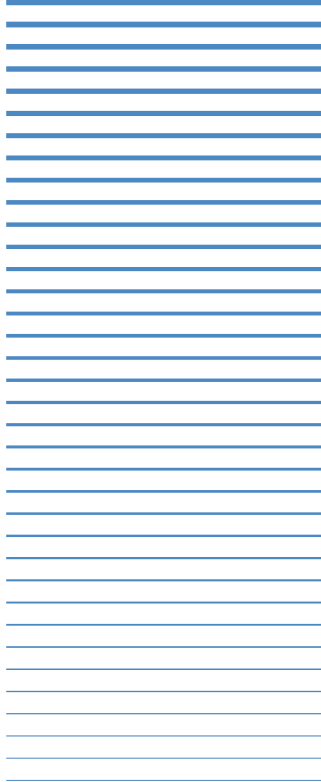
In Bezug auf besondere Niederschlagsereignisse gibt es zwei zu betrachtende Seiten: ein Zuviel und ein Zuwenig. Wird die Anzahl der Tage von mindestens 10 mm Niederschlag ausgezählt, so werden bei gleichzeitig großen jährlichen Schwankungen im Mittel über ganz Deutschland 21 Tage beobachtet. Diese Zahl hat sich in den letzten 66 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 mm pro Tag ist keine Änderung der Anzahl seit den 1950er-Jahren festzustellen. Die Variabilität der Anzahl der Starkniederschlagsereignisse von Jahr zu Jahr ist sehr hoch und insgesamt ist die Anzahl der Ereignisse mit 5 Tagen pro Jahr im Mittel über ganz Deutschland relativ selten. Die regionalen Unterschiede sind hingegen sehr groß. In Nordostdeutschland und an den Küsten gibt es drei oder weniger Ereignisse im Jahr, in Süddeutschland und allen Gebirgsregionen mehr als 7 Tage pro Jahr.

Neben der Frage nach der Veränderung der Häufigkeit von Starkniederschlägen 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 Starkniederschlägen 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 Starkniederschlagsereignissen zu finden sind.



Mittlere Anzahl der Tage mit 10 mm und mehr Niederschlag (Flächenmittel aus Stationsmessungen) von 1951 bis 2016.



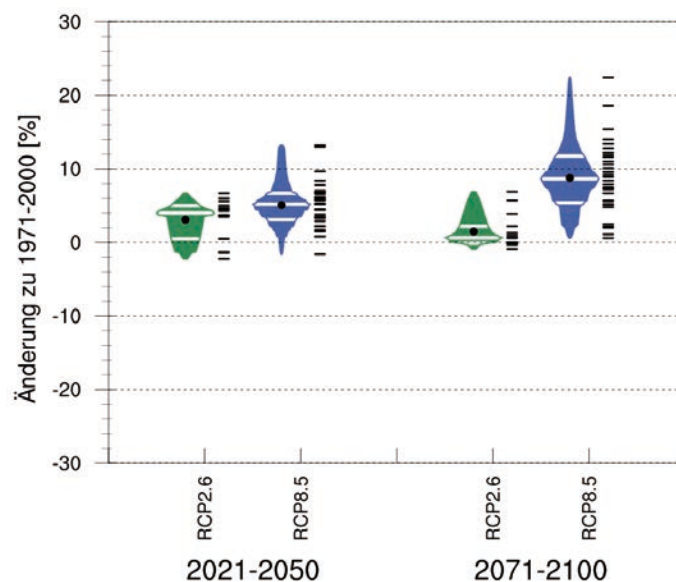
Zukunft

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) ist für Deutschland nicht zu erwarten (*sehr hohe Übereinstimmung*). Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags um 5 % (*mittlere Übereinstimmung*). Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen –2 % 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. Die oben und im weiteren Text geschriebenen Attribute *mittlere* bis *sehr hohe Übereinstimmung* beziehen sich auf die wissenschaftliche Plausibilität und die einheitliche Tendenz der Modellergebnisse.

Regionale Unterschiede

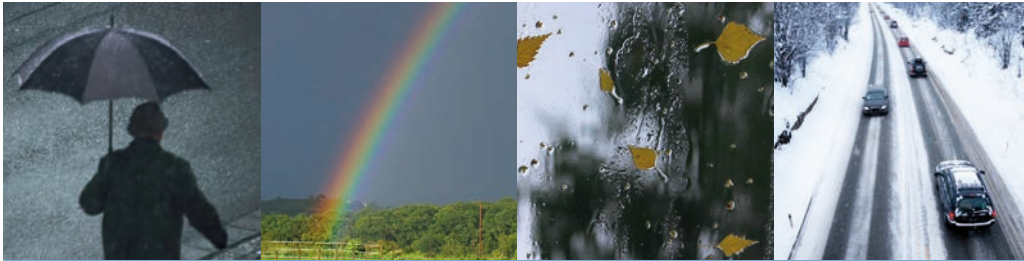
Für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) ist für Deutschland mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +9 % zu rechnen (*mittlere Übereinstimmung*). Die Änderung wird in allen Teilen des Bundesgebietes in etwa gleich stark ausgeprägt sein.

Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 10 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 20 mm und mehr projiziert. Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Spannbreite innerhalb des Ensembles teilweise sehr groß, so dass die



▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresniederschlagssumme von Deutschland. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2021–2050) und langfristigen (2071–2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971–2000. Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, grün) denen des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, blau) gegenübergestellt. Die dargestellten Körper symbolisieren den Bereich zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Breite des Körpers signalisiert die Wahrscheinlichkeit des Eintretens (je breiter, umso höher die Wahrscheinlichkeit). Zusätzlich eingetragen sind der Mittelwert (schwarzer Punkt) und die Perzentile (25, 50 und 75 %) als weiße Linien. Neben den Körpern werden als schwarze Linien die Einzelergebnisse der Modelle gezeigt.

Jahreszeitliche Mittelwerte der Niederschlagshöhe und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	2021-2050 (RCP2.6)	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	186 mm	179 mm	+5 %	+8 %	+3 %	+13 %
Sommer	239 mm	234 mm	-2 %	±0 %	±0 %	-9 %
Herbst	183 mm	191 mm	+3 %	+4 %	±0 %	+7 %
Winter	181 mm	183 mm	+7 %	+7 %	+4 %	+17 %
Jahr	789 mm	788 mm	+3 %	+5 %	+2 %	+9 %

Resultate nur wenig belastbar sind. Regionale Unterschiede bezüglich der Änderung der mittleren Jahressumme der Niederschlagshöhe sind wenig ausgeprägt.

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2021-2050 werden unter Verwendung aller RCP-Szenarien für den Winter Zunahmen der Niederschlagsmenge um +7 % berechnet (*mittlere Übereinstimmung*). Für den Sommer ist eine Richtungsaussage 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) (*mittlere Übereinstimmung*).

Im Frühjahr und im Herbst kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) +1 bis +13 % betragen (*mittlere Übereinstimmung*), wohingegen die Änderung im Winter bis zu +17 % betragen kann (*mittlere Übereinstimmung*). Für den Sommer wird in diesem Planungshorizont eine Spanne von keiner Änderung im **Klimaschutz-Szenario** (±0 %) bis hin zu Abnahmen der Niederschlagshöhe im **Weiter-wie-bisher Szenario** (-9 %) berechnet. Die Spannweite liegt im **Weiter-wie-bisher-Szenario** zwischen einer Zunahme um +30 % (*sehr geringe Übereinstimmung*) und einer Abnahme um -50 % (*sehr geringe Übereinstimmung*). 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 9 % in 136 Jahren
- Niederschlagsanstieg im Frühling, Herbst und Winter, aber nicht im Sommer
- Hinweise auf früheren Beginn und späteres Ende der Saison mit konvektiven Niederschlägen bei gleichzeitig stärkerer Ausprägung der Starkregenereignisse

Kurzfristiger Planungshorizont

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

Langfristiger Planungshorizont

- Für Deutschland ist mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +9 % zu rechnen

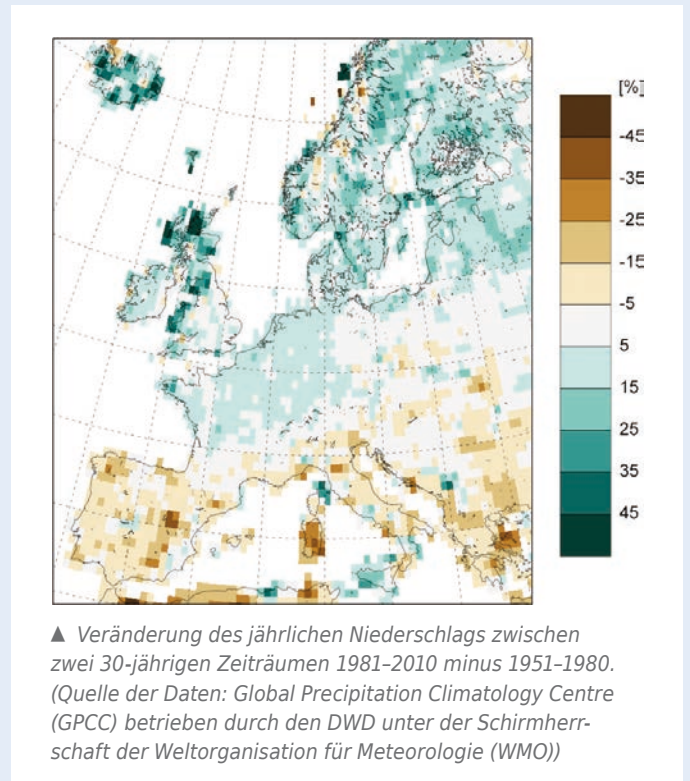
Für beide Planungshorizonte werden jeweils für die Wintermonate Zunahmen der Niederschlagsmenge und für den Sommer eine Spanne von keiner Änderung hin zu Abnahmen im langfristigen Planungshorizont simuliert.

Globale Niederschlagsentwicklung

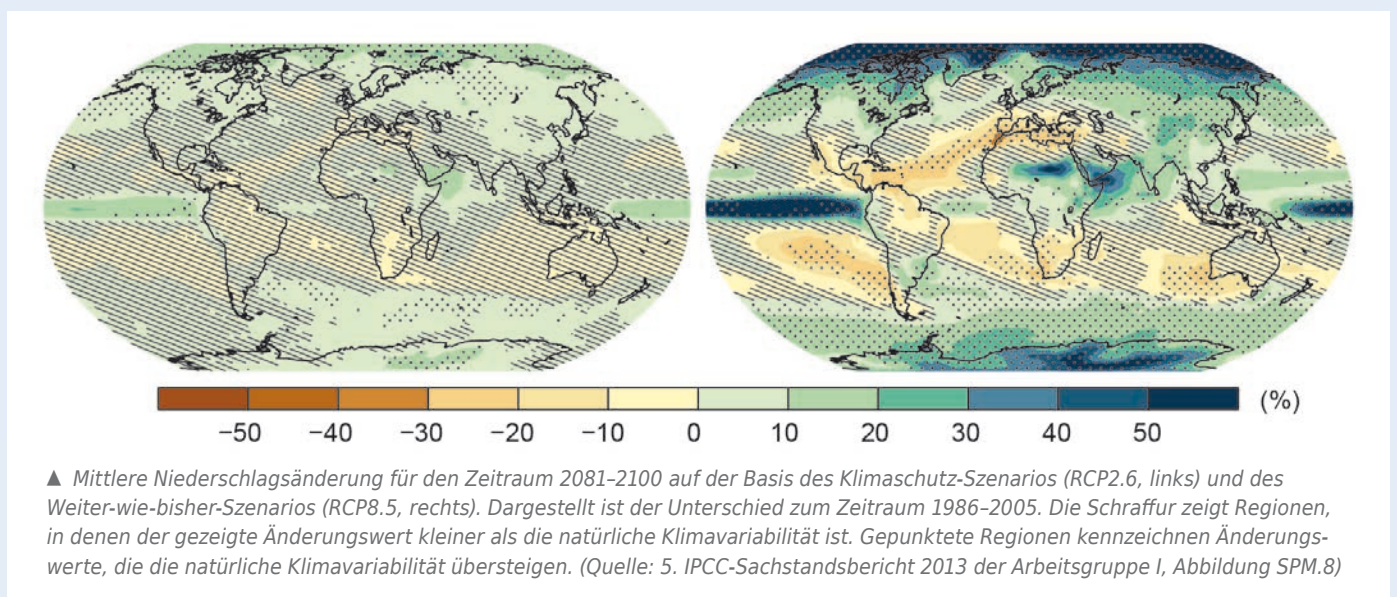
Der globale Niederschlag hat eine sehr große räumliche und zeitliche Variabilität, die durch viele natürliche Schwankungen, z. B. durch Zirkulationsmuster wie ENSO und die Nordatlantische Oszillation, geprägt ist.

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 20 % 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 **Klimaschutz-Szenarios** (RCP2.6) werden zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Zeitraum 1986–2005 jedoch nur sehr moderat ausfallen, insbesondere über Europa. Im **Weiter-wie-bisher-Szenario** (RCP8.5) werden die Signale deutlicher, wobei sich, wie bei den Beobachtungen, wieder eine deutliche Zweiteilung über Europa zeigt: Dabei sind Niederschlagsabnahmen von



Südwesteuropa über den Balkan bis nach Mittelasien von 20–40 % im Jahreschnitt und sogar von 50–75 % im Sommer projiziert. Zunahmen von 10–30% sind im Jahreschnitt nur in Skandinavien zu finden. Im Sommer ist hingegen für ganz Europa eine Abnahme der Niederschläge wahrscheinlich.





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.

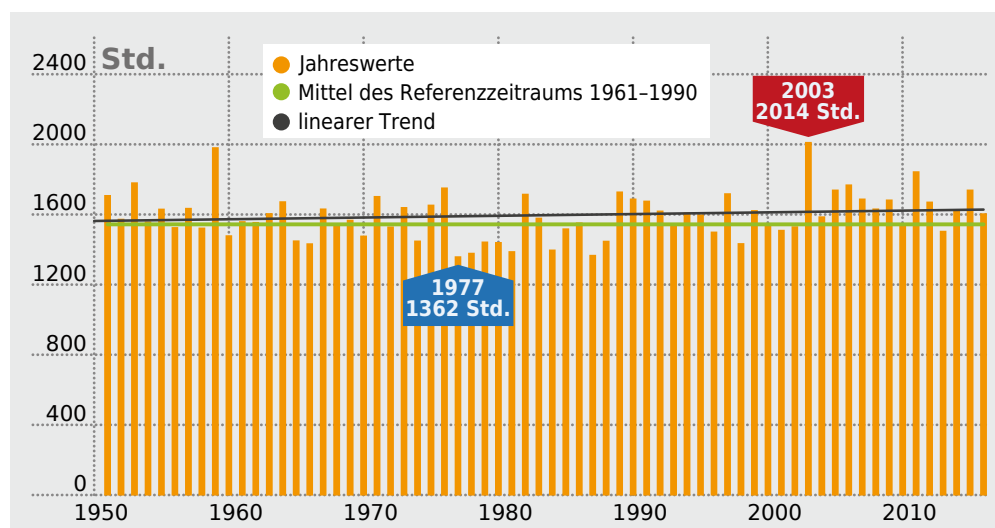
Vergangenheit und Gegenwart

Aus der Darstellung der Jahressummen bis 2016 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 2016 ist die mittlere Tagessonnenscheindauer um neun Minuten gestiegen. Dies resultiert zum größeren Teil aus mehr Sonnenschein in den Frühlings- und Sommermonaten (jeweils +16 Minuten pro Tag). Für den Herbst ist eine leichte Abnahme der Sonnenscheindauer (-6 Minuten pro Tag) zu beobachten. Die höchsten Zuwachsraten finden sich mit 23 Minuten mehr Sonnenschein pro Tag in der Westdeutschen Tieflandsbucht, während es in den Östlichen Mittelgebirgen keine Änderung im Zeitraum 1951-2016 gab.

Jahressummen der Sonnenscheindauer (Flächenmittel aus Stationsmessungen) in Deutschland von 1951-2016.





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 hoch. Dieses führt dazu, dass die Ergebnisse weniger aussagekräftig sind als beispielsweise die Ergebnisse der Temperaturänderungen.

Jahreszeitliche Mittelwerte der täglichen Sonnenscheindauer und erwartete Änderungen

	1961-1990	1971-2000	2021-2050 (RCP2.6)	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	304 Min.	312 Min.	+12 Min.	-12 Min.	-12 Min.	-24 Min.
Sommer	400 Min.	403 Min.	-6 Min.	±0 Min.	-12 Min.	6 Min.
Herbst	205 Min.	199 Min.	±0 Min.	±0 Min.	±0 Min.	±0 Min.
Winter	102 Min.	105 Min.	-12 Min.	-12 Min.	-12 Min.	-24 Min.
Jahr	254 Min.	256 Min.	-6 Min.	-6 Min.	-6 Min.	-12 Min.

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2021–2050 wird deutschlandweit ein Rückgang der Tagessonnenscheindauer um 6 Minuten projiziert (*mittlere Übereinstimmung*). Dieser Rückgang macht sich beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** besonders im Winter und Frühjahr bemerkbar (*hohe Übereinstimmung*), wohingegen im Sommer und im Herbst mit keinen Änderungen zu rechnen ist (*hohe Übereinstimmung*). Diese Änderungen werden deutschlandweit gleichförmig projiziert.

Für den langfristigen Planungshorizont 2071–2100 wird eine Verstärkung dieser Änderungen erwartet. Im Jahresmittel ist mit einer Abnahme der mittleren Tagessonnenscheindauer zwischen 6 Minuten und 12 Minuten zu rechnen (*hohe Übereinstimmung*). Dieser Rückgang macht sich besonders im Frühjahr und im Winter bemerkbar, hier kann mit einer Abnahme von bis zu 24 Minuten pro Tag gerechnet werden (*geringe Übereinstimmung*). 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 (*sehr geringe Übereinstimmung*).

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

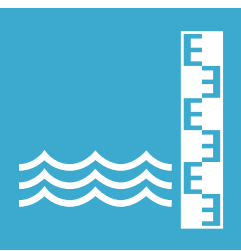
Kurzfristiger Planungshorizont

- 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 steigt der mittlere Meeresspiegel an der gesamten Nordseeküste um etwa 2 bis 4 mm pro Jahr an. Für die Zukunft sagen Klimamodelle einen weiteren Anstieg voraus. Neue Untersuchungen über Ozeanerwärmung und zu den Eisschilden in der Antarktis und Grönland lassen eine Beschleunigung des Anstiegs als wahrscheinlich erscheinen.

Der Meeresspiegel – eine schwankende Größe

Der mittlere Meeresspiegel und seine zukünftige Änderung sind für die langfristigen Planungen der Küstenschutzbauwerke von großer Bedeutung. Die Änderung des Meeresspiegels setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen:

- der sogenannte sterische Anteil (Änderung des Meeresspiegels aufgrund von Temperatur- oder Salzgehaltsänderungen)
- dynamisch bedingte Änderungen aufgrund geänderter Meeresströmungen
- verstärkter Süßwassereintrag in die Weltmeere aufgrund von Gletscherschmelze
- verstärkter Süßwassereintrag durch schmelzende grönländische und/oder antarktische Eisschilde
- Landhebungen bzw. Landsenkungen

Die durch die Punkte a) bis d) hervorgerufenen Beiträge bewirken die absolute Meeresspiegeländerung,

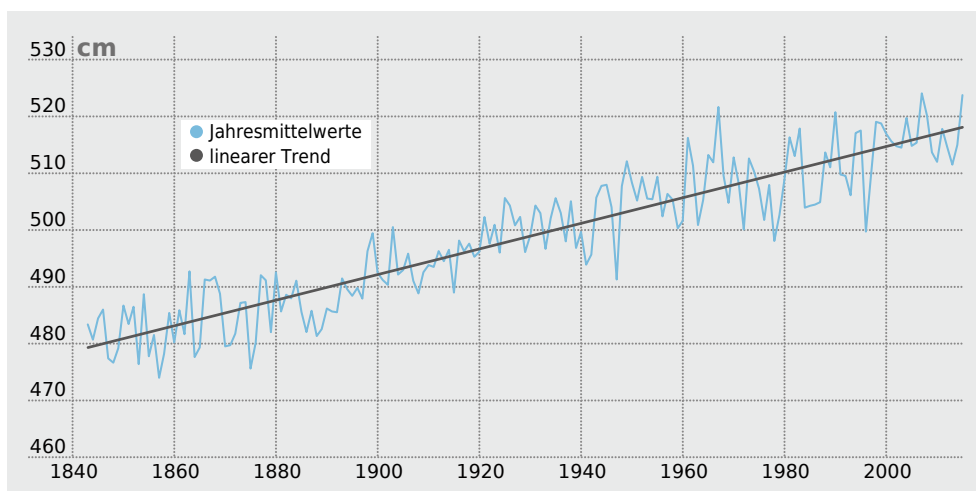
während die an den Pegeln tatsächlich gemessene Änderung die vertikale Landbewegung mitberücksichtigt und als relative Meeresspiegeländerung bezeichnet wird.

Die globalen wie auch regionalen Klimamodelle sind derzeit noch nicht in der Lage, den Süßwassereintrag aufgrund von Gletscher- und Eisschildschmelze hinreichend zu simulieren, daher müssen Abschätzungen dieser Werte heutzutage noch zu den berechneten sterischen und dynamischen Werten addiert werden.

Beobachtete Meeresspiegeländerungen

Nordsee: Für die Deutsche Bucht gibt es Pegelaufzeichnungen, die bis 1843 (Cuxhaven) zurückreichen, zumeist allerdings ab den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts vorliegen. Zwischen den einzelnen Pegeln gibt es größere, von der geographischen Lage abhängige Unterschiede in der Rate des relativen

Mittlerer Meeresspiegel am ►
Pegel Cuxhaven 1843-2015.
(Quelle: Universität Siegen,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie)





Meeresspiegelanstiegs, zwischen 1,7 mm/Jahr und 4,1 mm/Jahr. Allen Pegeln gemeinsam ist eine große dekadische Variabilität. So gibt es Dekaden mit einem Meeresspiegelanstieg von über 4 mm/Jahr wie auch Dekaden mit leicht sinkendem Meeresspiegel. Allerdings müssen wegen der Landsenkung an der deutschen Nordseeküste etwa 0,5–1,5 mm/Jahr abgezogen werden. An der englischen und schottischen Ostküste, an der niederländischen Küste, wie auch generell im Nordostatlantik treten ähnliche Anstiege des absoluten Meeresspiegels (um 1,7 mm/Jahr) auf wie in der Deutschen Bucht.

Die gezeitenabhängigen Wasserstände verändern sich in der Nordsee nicht parallel zum mittleren Anstieg des Meeresspiegels. Am Pegel Cuxhaven steigen seit 1950 das mittlere Hochwasser stärker und das mittlere Niedrigwasser schwächer an als der mittlere Wasserstand. Die Ursache könnten Maßnahmen des Gewässerausbaus in der Elbe und geänderte morphologische Verhältnisse im Bereich des Elbe-Weser-Dreiecks sein.

Ostsee: An der Ostseeküste steigt der Meeresspiegel absolut um etwa 1,4–2,0 mm/Jahr an. Außer in der südwestlichen Ostsee sinkt in allen anderen Küstenregionen der relative Meeresspiegel aufgrund der noch stattfindenden nacheiszeitlichen Landhebung.

Zukünftige Änderungen des Meeresspiegels

Im 5. Sachstandsbericht des IPCC von 2013 wurden für verschiedene Treibhausgasszenarien Anstiege des Meeresspiegels bis Ende des 21. Jahrhunderts ange-

geben. Für das **Klimaschutz-Szenario** ergab sich ein Bereich von 26–55 cm, für das **Weiter-wie-bisher-Szenario** ein Bereich von 52–98 cm. Allerdings war darauf hingewiesen worden, dass die möglichen Beiträge der Eisschilde von Grönland und der Antarktis bislang unzureichend berücksichtigt worden sind, da deren physikalische Prozesse unbekannt oder noch nicht mathematisch beschrieben seien.

Mittlerweile haben sich die Kenntnisse darüber deutlich verbessert. Des Weiteren wird mithilfe von ozeanographischen Beobachtungen und bathymetrischen Vermessungen an den Rändern der Eisschilde zunehmend festgestellt, dass erwärmtes Ozeanwasser die Eisschelfe zerstört sowie den Kontakt zwischen Gletschern und dem unterlagernden Festgestein mehr und mehr aufschmilzt. Dieses führt dazu, dass Gletscher erheblich schneller ins Meer strömen. In der Konsequenz wird dieses den Meeresspiegelanstieg in Größen beschleunigen, die deutlich über die Werte von 2013 hinaus reichen. Dieser stärkere Anstieg ist schon aktuell zu beobachten. Gegenwärtig tendieren die Angaben über den weiteren Anstieg beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** für die deutschen Küsten bis hin zu Werten von deutlich über einen Meter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Allerdings ist weiterhin noch nicht die sich abzeichnende Möglichkeit eines Kollabierens der beiden Eisschilde einbezogen.

Durch die große Wärmespeicherkapazität der Ozeane wird der Meeresspiegelanstieg, ungeachtet des weiteren Verlaufs der Erderwärmung, weit über das 21. Jahrhundert hinaus andauern.





Phänologie

Phänologie

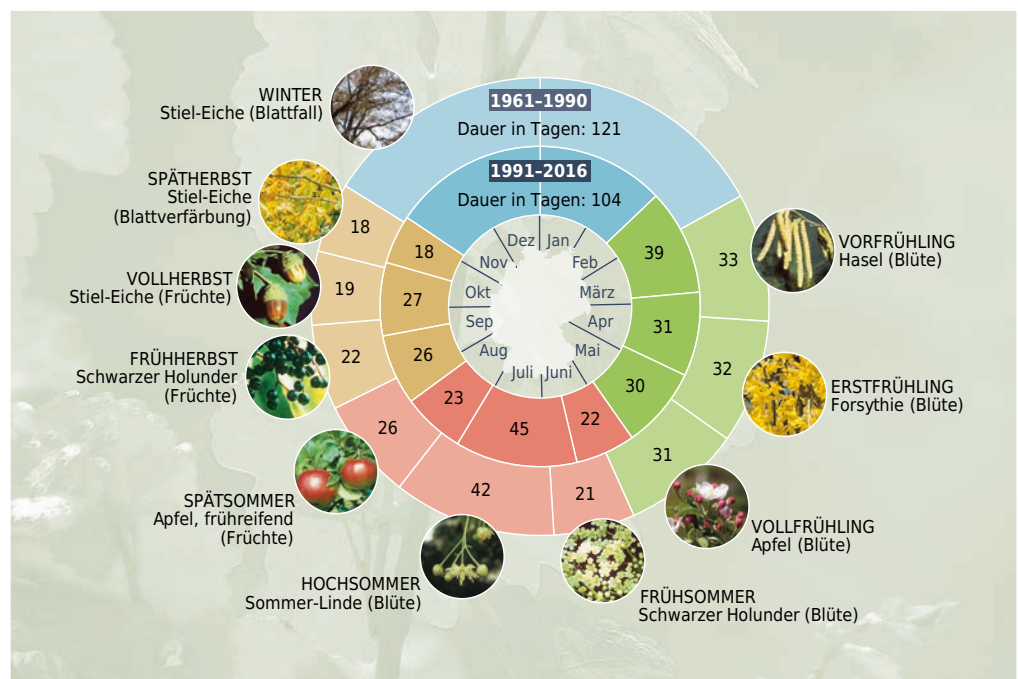
Die Witterungs- und Klimaverhältnisse beeinflussen Wachstum und Entwicklung von Pflanzen. Die Wissenschaft, die sich damit beschäftigt, ist die Phänologie (griech.: „Lehre von den Erscheinungen“). Daten pflanzenphänologischer Beobachtungen zählen zu den wertvollsten Anzeigern von Veränderungen in den Umweltbedingungen und werden weltweit seit Jahrhunderten erhoben.

Die phänologische Entwicklung in Deutschland

Das phänologische Jahr beginnt mit dem **Vorfrühling**. In der Referenzperiode 1961 bis 1990 startete diese phänologische Jahreszeit im Mittel über Deutschland am 3. März. Der Beginn orientiert sich an der Blüte der Gemeinen Hasel (*Corylus avellana*). Nach durchschnittlich 33 Tagen folgt mit der Blüte der Forsythie (*Forsythia × intermedia*) der **Erstfrühling** am 5. April und nach wiederum 32 Tagen am 7. Mai mit dem Erblühen der ersten Apfelbäume (*Malus*) der **Vollfrühling** mit einer mittleren Dauer von 31 Tagen. Im Vergleich der Referenzperiode 1961 bis 1990 mit dem nachfolgenden Abschnitt von 1991 bis 2016 zeigt sich, dass der Vorfrühling nunmehr schon am 16.2. startet und auch sechs Tage länger geworden ist als in der Referenzperiode. Auch der Erstfrühling (27.3.) und der Vollfrühling (27.4.) beginnen früher.

Mit der Blüte des Schwarzen Holunders (*Sambucus nigra*) setzt der **Frühsommer** ein. Bezogen auf die Referenzperiode ist das am 7. Juni und er dauert drei Wochen. In den letzten 26 Jahren hat sich an der Dauer wenig geändert, aber die Holunderdolden zeigten sich schon um den 27. Mai blühend. Die ersten blühenden Sommerlinden (*Tilia platyphyllos*) signalisieren den Übergang in den **Hochsommer**. Im Mittel der dreißig Jahre von 1961 bis 1990 begann der Hochsommer am 28. Juni. Die letzten Jahre zeigen eine Verfrühung von 10 Tagen. Der Hochsommer ist die längste der phänologischen Jahreszeiten in der Vegetationszeit mit einer deutschlandweiten Dauer von 42 Tagen, die sich auf 45 Tage verlängert hat. Wenn die ersten frühreifen Äpfel von den Bäumen gepflückt werden können, wird der **Spätsommer** begrüßt. 1961 bis 1990 war das um den 9. August. In der jüngeren Vergangenheit

Die verschiedenen Entwicklungsphasen der Pflanzen sind phänologischen Jahreszeiten zugeordnet. Die „Phänologische Uhr“ zeigt diese Jahreszeiten und ihre sogenannten Leitphasen (Mittelwert für Deutschland). Beim Vergleich der Zeiträume 1961–1990 und 1991–2016 wird die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten deutlich.





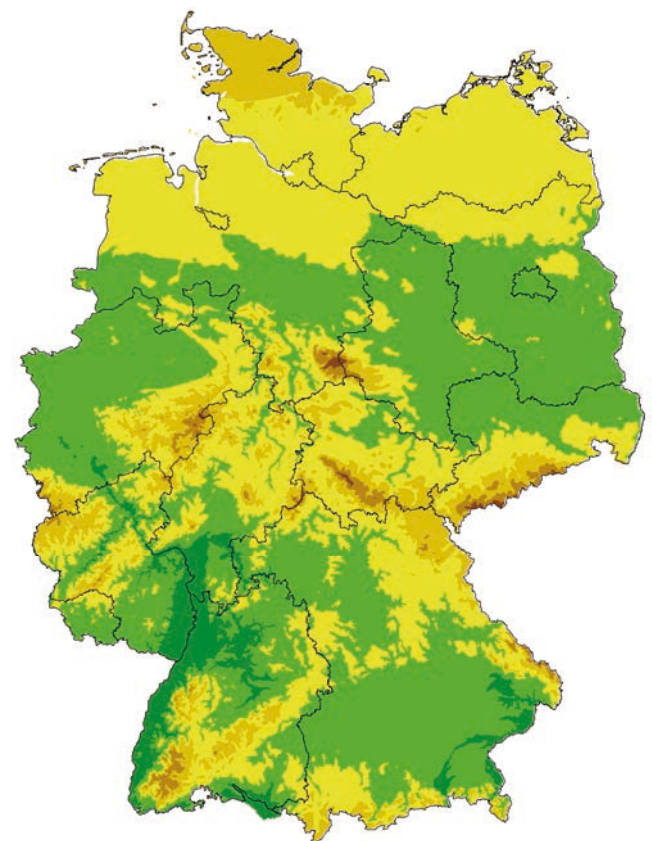
kommen die Freunde beispielsweise des „Klarapfels“, von „James Grieve“ oder „Retina“ schon eine Woche früher in den Genuss der Früchte. In den letzten 26 Jahren hat sich der Spätsommer um etwa 3 Tage verkürzt.

Während der **Frühherbst** mit den ersten reifen Früchten des Schwarzen Holunders in der Referenzperiode erst um den 4. September aufwartete, ist dieser Termin ebenfalls deutlich nach vorn gerutscht und wird aktuell um den 25. August beobachtet. Der Frühherbst hat sich in der jüngeren Zeit um 4 Tage ausgedehnt. Der **Vollherbst** mit den ersten reifen Früchten der Stiel-Eiche (*Quercus robur*) schloss sich in der Referenzperiode am 26. September an. Nun liegt dieser Termin etwa 6 Tage früher und dauert im Durchschnitt 8 Tage länger, so dass die Blattverfärbung der Stiel-Eiche, die vom Beginn des **Spätherbstes** kündigt, im Vergleich der beiden betrachteten Zeiträume nur um 2 Tage verspätet eintritt. War der Termin 1961 bis 1990 im Mittel am 15. Oktober, ist jetzt der 17. Oktober registriert. Die Dauer hat sich nicht verändert.

Wenn die Stiel-Eiche beginnt, ihre Blätter abzuwerfen, beginnt der phänologische **Winter**. Während der Referenzperiode ist dies um den 2. November gewesen. Hier zeigt sich keine markante Veränderung: Lediglich einen Tag später begann der Winter im Mittel der Jahre 1991 bis 2016. Während man in der Zeit von 1961 bis 1990 rund 121 Tage warten musste, bis der Winter zu Ende war und das neue phänologische Jahr begann, lagen in den letzten 26 Jahren im Mittel 17 Tage weniger zwischen dem Blattfall der Stiel-Eiche und dem erneuten Erblühen der Haselsträucher.

Regionale Unterschiede

Die im vorigen Abschnitt angegebenen Zahlen und Daten beziehen sich auf mittlere Werte für ganz Deutschland. Da die phänologischen Phasen aber direkt von der Temperatur abhängig sind, gibt es auch deutliche regionale Unterschiede zu verzeichnen. So unterliegen die Eintrittstermine stark dem Einfluss der geographischen Breite und Länge sowie der Höhe



▲ Apfel, Zeigerpflanze des Vollfrühlings: Blühbeginn 2016.

über dem Meeresspiegel. Die frühesten phänologischen Termine werden in der Regel im Oberrheinischen Tiefland registriert und die spätesten entweder in den Mittelgebirgen oder ganz im Norden an den Küsten der Ostsee. Im Durchschnitt wandert der Frühling von Süd nach Nord und West nach Ost. Wenn er aber dabei Gebirge überwinden muss, verlangsamt sich dort der Vormarsch. Das Ende der Wachstumszeit setzt dort am frühesten ein, wo die Vegetation am spätesten startete.

Maßgebend für die geschilderten Veränderungen sind die Änderungen der Lufttemperatur, am stärksten ausgeprägt im Winter und im Frühjahr. Vor allem im Frühjahr kommen noch Veränderungen der solaren Einstrahlung dazu.

Zukunft

Mit Hilfe phänologischer Modelle lassen sich in der Verknüpfung mit Klimaprojektionen auch Aussagen über weitere Veränderungen der phänologischen Entwicklung treffen. So zeigen Studien, dass bis zum Ende des Jahrhunderts eine weitere Verfrühung der phänologischen Entwicklung insbesondere im Frühjahr zu erwarten ist. Für den Vollfrühling wurden nochmals etwa 15 Tage frühere Blühtermine des Apfels ermittelt.



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 Sonne 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 und 2013, beide ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, das Hitzeereignis im August 2003 oder die Stürme Lothar (1999) und Kyrill (2007).

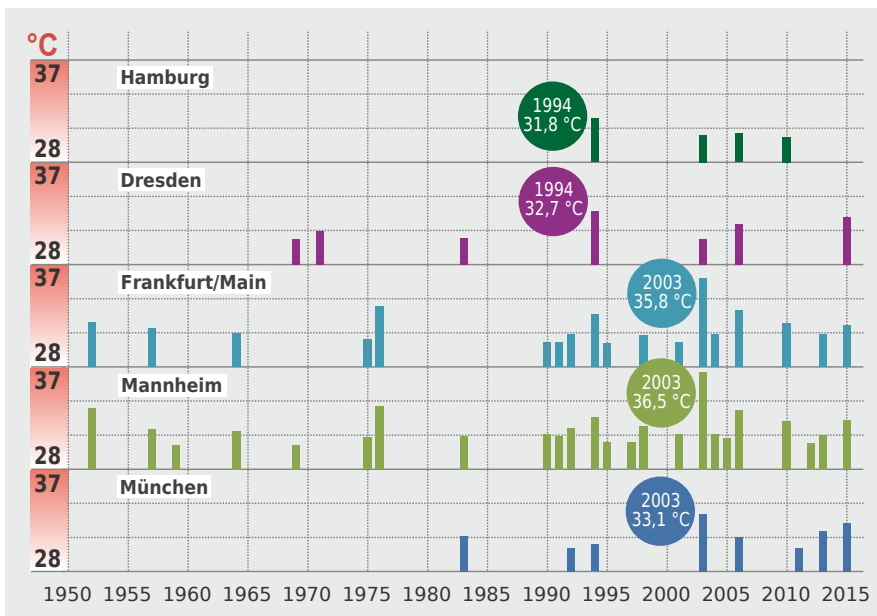
Damit steht berechtigterweise eine Frage im Raum: *Was kommt mit dem Klimawandel noch alles?* Da Extreme definitionsgemäß sehr seltene Ereignisse sind, sind statistische Analysen weniger belastbar. Häufig wird ein Wiederkehrzeitraum von einmal in 100 Jahren betrachtet (das Jahrhundertereignis). Die vorhandenen 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 dafür ist der im Sommer 2015 zweimal gemessene neue Temperaturrekord für Deutschland: 40,3 °C in Kitzingen.

Um extreme Temperaturereignisse wie z. B. den Hitzesommer 2015 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 1950–2016 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; in Norddeutschland (Hamburg) wurde 2015 überhaupt keine lange Hitzeperiode nach



◀ 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.

obenstehender Definition ermittelt. 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).

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 vier extreme Hitzewellen.

Aufgrund der vorhandenen und weiter fortschreitenden Erwärmung ist es sehr wahrscheinlich, dass solch hohe Temperaturen und auch höhere Extrema öfter auftreten werden. Sie werden oft mit lang anhaltenden Hitzeperioden verbunden sein. Hierfür geben die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen klare Indizien. Eine belastbare Abschätzung, welche Spitzentemperatur zukünftig auftreten kann, gibt es noch nicht.

Es stellt sich die Frage, ob es zukünftig keine kalten Winter mehr geben wird. Die kalten Winter 2009/10, 2010/2011 und 2012/2013 sprechen dagegen. Sie waren durch regional auftretende, längere starke Kälteperioden geprägt. Ursache dafür war eine anhaltende Zufuhr arktischer Kaltluft. Wie sich die Wahrscheinlichkeit für derartige Witterungssituationen vor dem Hintergrund einer häufiger eisfreien Barentssee entwickeln wird, ist Gegenstand aktueller Forschung. Grundsätzlich schwächt sich aber die Intensität solcher Witterungsverhältnisse durch die globale Erwärmung ab.

Niederschlag

292 mm Niederschlag fielen innerhalb von 7 Stunden am 29. Juli 2014 in Münster und 353 mm Niederschlag innerhalb von 24 Stunden am 12./13. August 2002 in Zinnwald. Damit so viel Niederschlag abregnet, müssen mehrere meteorologische Ursachen aufeinandertreffen. Lokal müssen starke Hebungsprozesse auftreten, die zu einem Ausfallen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit führen. Je wärmer die Luftmasse, umso mehr Wasser kann sie aufnehmen. Konkret heißt das ~7 % mehr Wasser je 1 Grad Temperaturzunahme (Clausius-Clapeyron-Beziehung). Dieser Zusammenhang ist der Grund dafür, dass die Niederschlagsmenge extremer Niederschläge, in einer definierten Zeit, im Sommer deutlich höher ist als im Winter. Die großräumige Wettersituation muss weiterhin für eine stetige Zufuhr weiterer warmer und feuchter Luftmassen sorgen.

Die extremen, gewittrigen Kurzzeitniederschläge hoher Intensität sind in der Regel lokal begrenzt. Zu in der Fläche extrem ergiebigen Niederschlägen kommt

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
312 mm	Zinnwald-Georgenfeld	1 Tag	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.

es vor allem bei sich nur zögernd abschwächenden Tiefdruckkomplexen (z. B. bei der Großwetterlage „Tief Mitteleuropa“), bei äußerst langsam vordringenden Fronten bzw. quasi-stationären Luftmassengrenzen oder bei von Oberitalien auf einer so genannten Vb-Zugbahn nordnordostwärts ziehenden Tiefdruckgebieten, deren Niederschlagsgebiete sich anschließend westwärts vordringend im Osten Deutschlands auswirken.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Abfolge von Ereignissen. So ist es möglich, dass sich – wie im Mai/Juni 2016 – eine über viele Tage stabile Strömungssituation einstellt, die als regionaler Auslöser für extreme Niederschläge wirkt. So kann eine Abfolge von mehreren extremen Niederschlagsereignissen hintereinander auftreten.

Der DWD hat für den Basiszeitraum 1951 bis 2010 Karten erarbeitet, die deutschlandweit flächendeckend die räumliche Verteilung von Starkniederschlagshöhen für 5.405 Rasterfelder von je 67 km² zeigen und standortbezogene Aussagen zum Starkniederschlag ermöglichen. Für jede Dauerstufe (ausgewählter Zeitabschnitt mit Niederschlag einschließlich Unterbrechungen, unabhängig von Beginn und Ende des natürlichen Niederschlagsereignisses) zwischen D = 5 Min. und D = 72 Std. können Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2010 in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall (von T = 1 a bis T = 100 a) berechnet werden. Das Wiederkehrintervall ist die mittlere Zeitspanne (in Jahren), in der die Niederschlagsmenge einen Wert einmal erreicht oder überschreitet.



Zahlreiche offene Fragen gibt es hingegen im Zusammenhang mit starken, lokal begrenzten Kurzzeitzniederschlägen. Daher hat der Deutsche Wetterdienst jüngst die hoch aufgelösten Niederschlagsdaten stärker untersucht.

Die vermutlich größte Niederschlagsmenge (*Probable Maximum Precipitation*, PMP) ist die theoretisch maximale Niederschlagshöhe, die innerhalb einer Dauerstufe, in einem bestimmten Gebiet und zu einer Jahreszeit unter definierten Klimabedingungen physikalisch möglich ist. Im DWD wurde der PMP mittels einer physikalisch begründeten Bewertung meteorologischer Daten abgeschätzt und in Form maximierter Gebietsniederschlagshöhen (MGN) angegeben. Wie hoch die MGN in Deutschland sind, hängt von der interessierenden Dauerstufe sowie von Lage und Größe des betrachteten Gebiets ab. In Deutschland gilt für die Dauerstufe D = 24 Stunden in den meisten Gebieten der Größenordnung 25 km² ein MGN-Wert von 400 mm. Es gibt Hinweise, dass bei einem signifikant veränderten Klima in Deutschland in Zukunft die Gebietsniederschläge die derzeit abgeschätzten MGN überschreiten könnten.

Um mögliche langfristige Klimatrends bei beobachteten Starkniederschlägen zu untersuchen, werden Niederschlagsmessungen aus vielen Jahrzehnten benötigt. Nur so ist es möglich, zwischen kurz- und mittelfristigen Variationen und wirklichen langfristigen Trends zu unterscheiden. Erschwert werden Trendanalysen dadurch, dass intensive kleinräumige Starkniederschläge nicht immer von den vorhandenen Niederschlagsmessgeräten erfasst werden. Auch ist

Wiederkehrintervalle von Niederschlagsmengen

D	5 Min.	15 Min.	30 Min.	1 Std.	3 Std.	6 Std.	24 Std.	72 Std.
T = 1 a	8	15	19	24	40	60	120	180
T = 10 a	18	32	40	45	80	110	200	320
T = 100 a	30	45	60	80	100	140	280	450

▲ Auflistung von maximalen Niederschlagshöhen (in mm) je Dauerstufe (D), die statistisch einmal in 1, 10 und 100 Jahren in Deutschland auftreten (Wiederkehrintervall T).

zu unterscheiden zwischen einem Trend in der Häufigkeit und in der Intensität der Niederschläge. Analysen der täglichen Niederschläge im Winter zeigen für den Zeitraum 1951–2006 eine Zunahme der Tage mit hohen Niederschlagsmengen um ca. 25 %. Eine hohe Niederschlagsmenge wird als ein Ereignis definiert, das in einem Referenzzeitraum einmal alle 100 Tage mit Niederschlag auftritt. Die Zunahmen treten in allen Regionen Deutschlands auf. Die Jahreszeiten Frühjahr und Herbst weisen einen leicht ansteigenden Trend auf.

Für den Sommer lassen sich derzeit mit den vorhandenen Beobachtungsdaten und den bekannten Methoden keine Trends der Anzahl von Tagen mit hohen Niederschlagsmengen identifizieren. Hier dominiert eine kurz- und mittelfristige zyklische Variabilität. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Niederschlagsmenge extremer Niederschläge im Winter deutlich kleiner ist als im Sommer.

Die Datenbasis für die Analyse von Niederschlägen mit Andauern unterhalb von 24 Stunden ist deutlich schlechter. Analysen der seit 15 Jahren flächendeckend vorliegenden Radardaten deuten regional auf eine Zunahme von Starkniederschlägen kurzer Dauer hin. Jedoch sind diese Ergebnisse aufgrund der geringen Länge der Zeitreihen aus klimatologischer Sicht nicht aussagekräftig und können durch kurz- und mittelfristige Variationen bedingt sein. Auf der Basis der Stationsdaten mit einer Zeitreihenlänge von mehr als 50 Jahren ergeben sich räumlich heterogene und zudem für die verschiedenen Dauerstufen spezifische Trendmuster. Dabei betragen die relativen Änderungen für die meisten Regionen in Deutschland maximal 5 %.

Im Hinblick auf die urbanen Sturzfluten werden seitens der wasserwirtschaftlichen Anwender derzeit verstärkt Handlungsempfehlungen herausgebracht. Dennoch muss der diagnostizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf zum Risikomanagement in der Lücke zwischen der Siedlungsentwässerung (15 Minuten als relevanteste Dauerstufe) einerseits und dem Umgang mit Fluss-Hochwassern (Dauerstufe von 12 Stunden und mehr) andererseits weiter abgebaut werden.

Der Klimawandel führt durch die Erhöhung der Lufttemperatur zu einer Erhöhung des Potenzials für extreme Niederschlagsereignisse. Dieser Prozess wird noch

dadurch verstärkt, dass der Zusammenhang zwischen Temperatur und Wassergehalt nicht linear, sondern exponentiell verläuft. Die aktuelle Generation regionaler Klimamodelle zeigt eine Tendenz weiterer Zunahmen von Niederschlagsextremen an, ist aber aufgrund einer für diese Prozesse zu groben Auflösung nicht in der Lage, detaillierte lokale Angaben zu liefern.



Wie eingangs beschrieben gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der maximal möglichen Niederschlagsmenge. Mit der bislang beobachteten Erwärmung und der durch die Klimamodellierung für die Zukunft projizierten weiteren Erwärmung steigt das Potenzial für höhere Niederschlagsmengen.

Der Klimawandel kann auch auf anderem Weg die Niederschlagsmengen in Deutschland verändern. Das ist möglich über Veränderungen der großräumigen Strömungsmuster und der Erhaltungsneigung, d.h. der Andauer der dadurch bedingten Wetterlagen. Auswertungen der Beobachtungen und Klimamodell-Simulationen zeigen einen Anstieg der globalen Niederschlagsmenge von ~2 % je 1 Grad Temperaturerhöhung. Dieser Wert ist geringer als der beschriebene Anstieg von

~7 % Wassermenge. Grundlage für einen vergleichbaren Anstieg der Niederschlagsmengen ist ein Gleichbleiben der relativen Luftfeuchte. Beobachtungen und Modellrechnungen für die Vergangenheit zeigen für Deutschland allerdings einen leichten Rückgang der relativen Feuchte. Weitere Einflussfaktoren für die Niederschlagsbildung sind die veränderten Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen. Diese sind aktueller Forschungsgegenstand.

Analysen der höchsten Tagesniederschläge je Jahr zeigen weltweit an vielen Stationen minimale Anstiege der extremen Niederschlagssummen. Bei nur wenigen Stationen (< 10 %) sind diese Trends signifikant. Die feinste regionale Auflösung, d. h. die Gitterzellengröße von globalen Klimamodellen, beträgt aktuell 150 bis 200 km, die von regionalen Klimamodellen 12 bis 25 km. Damit sind beide Modellsysteme nicht in der Lage, Prozesse direkt zu simulieren, die Gewitter auslösen können. Prozesse wie die Gewitterbildung werden in vereinfachten Parametrisierungen erfasst.

Die aktuelle Generation regionaler Klimamodelle zeigt eine Tendenz zur Zunahme von Niederschlagsextremen, ist aber aufgrund einer für diese Prozesse zu groben Auflösung nicht in der Lage, detaillierte lokale Angaben zu liefern. Konvektionserlaubende Regionalmodelle sind aktuell Gegenstand der Forschung.

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.

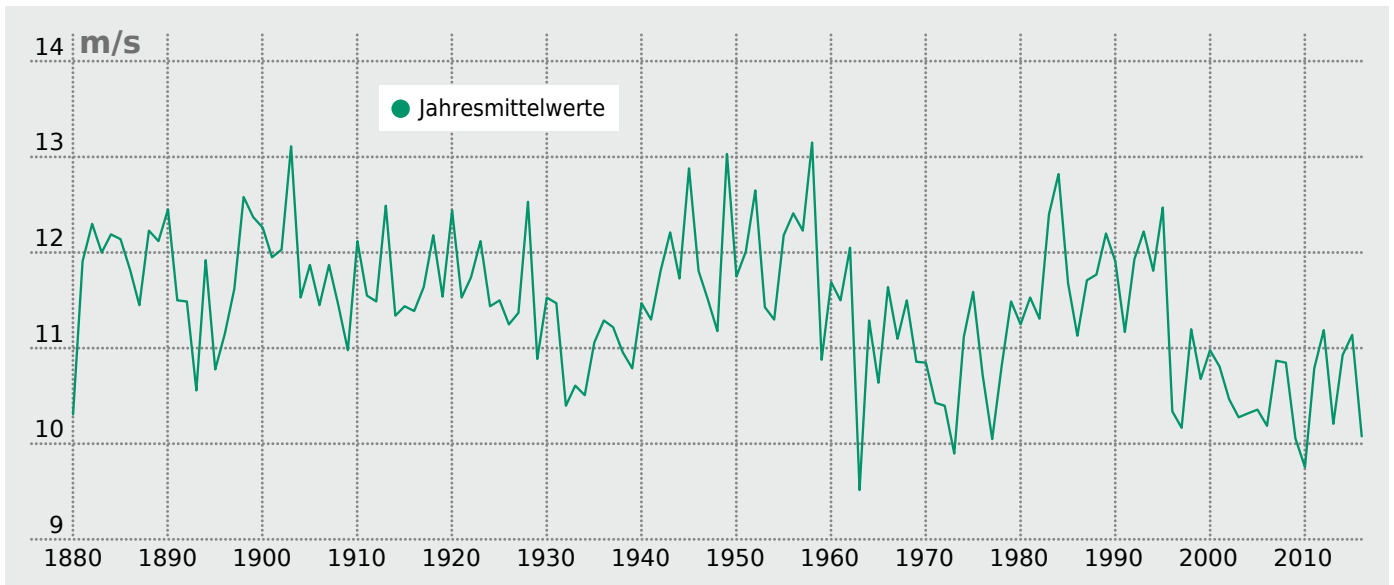
Die räumliche Auflösung der aktuell genutzten regionalen Klimamodelle ist nicht ausreichend, um Hagel direkt zu modellieren. Hagel wird nur grob über Parametrisierungen abgeschätzt. Somit sind keine Aussagen zu zukünftigen Tendenzen möglich. Analysen des Konvektionspotentials zeigen für den kurzfristigen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

Wind

Markante Sturmereignisse wie „Christian“ oder „Xaver“ im Jahr 2013 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





▲ Jahresmittel des geostrophischen Windes, berechnet aus den bodennahen Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List. Dargestellt ist der Zeitraum 1880 bis 2016.

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 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.

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



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

Tornados

Tornados sind kurzlebige und räumlich stark begrenzte, rotierende Luftmassen unter einer konvektiven Wolke, mit Bodenkontakt. Je nach Stärke können sie sehr hohe Schäden verursachen. Aktuell werden mehr Tornados entdeckt als früher. Schwächere Tornados, die nur geringere Schäden verursachen, bleiben in vielen Fällen auch heute noch unentdeckt. Seit dem Jahr 2000 werden in Deutschland jährlich zwischen 20 und 60 Fälle nachgewiesen. Aufgrund der unbekanntenen Dunkelziffer liegt die tatsächliche Zahl vermutlich deutlich höher. Stärkere Tornados mit großer Zerstörungskraft sind in Deutschland selten. Im Mittel rechnen die Meteorologen mit etwa fünf bis zehn Fällen im Jahr. Ob die Zahl der Tornados in Deutschland zugenommen hat, ist aufgrund der Dunkelziffern in der Vergangenheit nicht nachweisbar.

Auf Basis der vorliegenden regionalen Klimaprojektionen ist nicht abzuleiten, dass Tornados zukünftig häufiger in Deutschland auftreten werden. Aufgrund des zukünftig höheren Energiepotenzials könnte es in der Verteilung der Stärke von Tornados zu einer Erhöhung des Anteils starker Ereignisse kommen und damit zu einem erhöhten Risiko sehr zerstörerischer Tornados.



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 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. 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 prinzipiell verstanden. Seine Komplexität erfordert jedoch zukünftig noch enorme Forschungsanstrengungen, um bei noch unvollständig verstandenen Detailspekten weiterhin Fortschritte im Verständnis zu erzielen. Diese Aspekte betreffen sowohl Verständnislücken bei einzelnen Prozessen als auch Wechselwirkungen zwischen Klimasystemkomponenten.

In Zusammenarbeit vieler Klimawissenschaftler 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 Aufarbeitung dieser Themenfelder 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 Akteure. So ist die Frage nach Nutzen und Schaden durch den Klimawandel nicht durch einzelne Akteure in der Wissenschaft zu beantworten. Diese Frage und die daraus zu entwickelnden Handlungsoptionen müssen

auf regionaler und globaler Ebene als Gemeinschaftsaufgabe vieler Wissenschaftsbereiche interdisziplinär bearbeitet werden.

Die regionalen Wirkungen des Klimawandels treffen weltweit auf unterschiedlich geprägte wirtschaftliche, soziale und kulturelle Gegebenheiten. Der Umgang mit Risiken unterscheidet sich durch die verschiedenen kulturellen Hintergründe teilweise deutlich. Die Forschung muss die jeweiligen Herangehensweisen analysieren und regional spezifische Handlungsoptionen entwickeln.

Erforschung des Zusammenspiels Klimawandel und Gesellschaft

Eine wichtige Frage der Zukunft ist die zukünftige Position des Wissenschaftlers und der Forschungs-

institutionen in der Gesellschaft. Dabei steht die Frage nach deren Aufgabe und den damit verbundenen Grenzen im Vordergrund. Welche Aufgaben hat ein Klimaforscher? Hört seine Verantwortlichkeit bei der Wissenschaft auf und inwieweit darf oder sollte er sich in die Politik einmischen? Ein Beispiel dafür ist das IPCC-Mandat, das sich als „... politikrelevant, aber nicht Politik vorschreibend ...“ positioniert.

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 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 Vorhersagen für die kommenden Monate (Stichwort: Jahreszeitenvorhersagen) und Jahre (Stichwort: Dekadenvorhersagen). Die Kombination mit Vorhersagen aus der Vergangenheit erlaubt eine umfassende statistische Bewertung der Prognosen und die Ableitung von Tendaussagen 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 Vorhersage 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 Vorhersagen werden eine Vielzahl an historischen und aktuellen Vorhersagen 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.

Jahreszeitenvorhersagen werden aktuell unter anderem auf den Rechnern des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage in Reading (Großbritannien) jeden Monat neu berechnet. Durch den Deutschen Wetterdienst werden diese Vorhersagen monatlich analysiert. Mit den Ergebnissen sind beispielsweise El Niño-Vorhersagen möglich. Dekadenvorhersagen sind aktuell noch Forschungsgegenstand. Eine Operationalisierung ist in den nächsten Jahren geplant.

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.

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.

Perzentil

Perzentile oder auch Quantile sind Prozentangaben. Sie gliedern die Anzahl der untersuchten Modellergebnisse in Maßklassen, womit sich ein bestimmter Prozentanteil dieser Ergebnisse umschließen lässt. Der Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil umschließt beispielsweise 70 % der Modellergebnisse. Der Wert, den ein Perzentil annimmt, z.B. 85. Perzentil = 9,4 °C, bedeutet, dass 85 % der Ergebnisse unterhalb dieses Wertes liegen und nur 15 % darüber.



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.

Begriffsbestimmung in der Klimamodellierung

Für die Analyse von Ergebnissen der Klimamodellierung ist es notwendig, in den Texten zum Klimawandel eine einheitliche und fest definierte Sprache zu nutzen. Sie soll helfen

- das Vertrauen in die Stichhaltigkeit der Erkenntnisse, basierend auf der Art, der Menge, der Qualität, der Konsistenz der Belege und dem Grad der Übereinstimmung, aufzubauen.
- ein auf der Basis quantitativer Analysen berechnetes Maß der Unschärfe der Erkenntnisse bereitzustellen.

Multi-Modell-Ensembles sind ihrer Natur nach „Ensembles of Opportunity“, das heißt, sie sind eine Ansammlung zur Verfügung stehender Klimaprojektionen, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen, wie beispielsweise für eine gewisse Region in einer gewissen Auslösung über einen gewissen Zeitraum vorzuliegen. Weiterhin weisen viele Klimamodelle mehr oder weniger starke Ähnlichkeiten auf. Die Kombination dieser beiden wichtigen Eigenschaften von Multi-Modell-Ensembles, willkürliche Zusammensetzung des Ensembles und nichtzufällige Ähnlichkeiten zwischen den Modellen, bewirkt, dass sich



Begriff	Übereinstimmung
<i>sehr hohe Übereinstimmung</i>	In mindestens 9 von 10 Fällen
<i>hohe Übereinstimmung</i>	In etwa 8 von 10 Fällen
<i>mittlere Übereinstimmung</i>	In etwa 5 von 10 Fällen
<i>geringe Übereinstimmung</i>	In etwa 2 von 10 Fällen

die Datenwolke der Klimaänderungssignale, die aus einem solchen Ensemble generiert wird, nicht wie eine unabhängige, identisch verteilte Zufallsstichprobe verhält und zudem erhebliche Redundanzen aufweist. In der Folge ist es nur möglich, den Grad der Übereinstimmung der genutzten Modellläufe zu beschreiben.

Der Grad der Übereinstimmung ist kursiv gesetzt, z. B. *sehr hohe Übereinstimmung*.



Impressum

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

Autoren

Falk Böttcher, Dr. Thomas Deutschländer, Andreas Friedrich, Karsten Friedrich, Dr. Kristina Fröhlich, Dr. Barbara Früh, Dr. Anette Ganske*, Dr. Hartmut Heinrich*, Dr. Frank Kreienkamp, Dr. Gabriele Malitz, Jens Möller*, Dr. Monika Rauthe, Wolfgang Riecke, Thomas Schmidt, Dr. Birger Tinz, Dr. Andreas Walter

* Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Redaktion

Dr. Frank Kreienkamp

Steuerungsgruppe

PD Dr. Achim Daschkeit (Umweltbundesamt), Dr. Kai-Achim Höpker (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg), Carsten Linke (Landesamt für Umwelt Brandenburg), Dr. Frank Kreienkamp (Deutscher Wetterdienst)

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 (2017): Nationaler Klimareport. 3. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 46 Seiten.

ISSN 2509-3630 (Online)

Gestaltung und Satz

Elke Roßkamp (Deutscher Wetterdienst)

Bildnachweis

DWD: Ur (Reno Schafranek), 2, 7, 36/37 (Johann Siemens)

Feuerwehr Gerolstein: 34

Creative Collection: Um, 1o, 6m, 16, 18, 24l, 27ml, 27mr, 27r, 31

Panthermedia.net: Ul (Dominik Zwingmann), Um (Robert Biedermann), 1m (Hans Eder), 4 (Dario Sabljak), 6l (Clemens Humeniuk), 6r (Wolfgang Filser), 10u (Orlando Rosu), 11 (Hendrik Fuchs), 15r (Daniel Loretto), 21 (pekada), 23 (bestshot70), 24ml (Oliver C. Bellido), 24mr (Gabi Faltenbacher), 24r, (Tyler Olson), 27l (Ingram Vitantonio Cicorella), 29o (Roland Schmock), 29u (Ines Weiland-Weiser), 32 (Bernd Leitner), 35 (Ingo Gronostay), 38 (James Steidl), 40 (Rilo Naumann), 41 (drizzd)

MEV-Verlag: 1u, 15l

Fotolia.com: 5 (Gina Sanders), 8 (AndreasG), 10o (Paul Paladin), 17 (gradt), 27o (Mykola Velychko)

(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:

