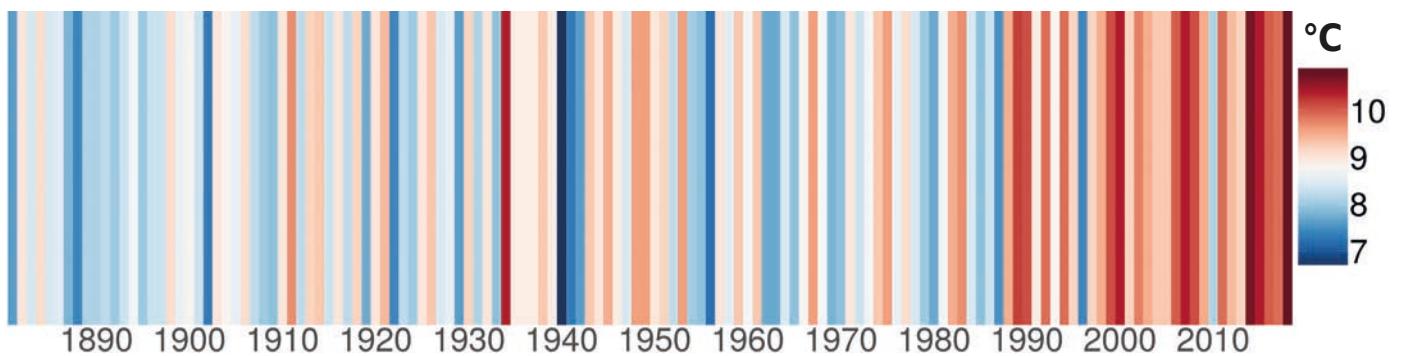




Klimareport Brandenburg

**Fakten bis zur Gegenwart –
Erwartungen für die Zukunft**





„Warming Stripes“

Die farbigen Streifen auf der Titelseite visualisieren die Durchschnittstemperaturen für Brandenburg zwischen 1881 und 2018; jeder Streifen steht für ein Jahr. Die Grafik wurde von Ed Hawkins entwickelt.

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

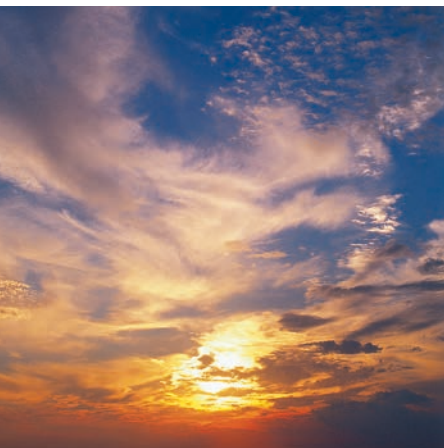
Titelfotos

Links: Rapsfeld und Windräder in der Uckermark © Jens Ottoson

Mitte: Einsteinturm auf dem Telegrafenberg in Potsdam © AIP Potsdam

Rechts: Oderniederung bei Schwedt © MLUL-Fotoarchiv

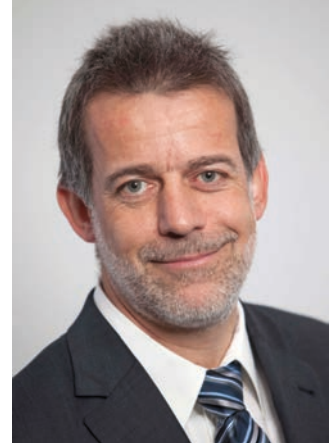
Inhalt



Vorwort.....	2
Grußwort von Jörg Vogelsänger	3
Immer in Bewegung: Wetter und Klima	4
Klima, Klimavariabilität und Extreme.....	6
Klimamodelle.....	8
Klimawandel und Klimaprojektionen.....	10
Klimaparameter und ihre Veränderungen	
Temperatur	12
Niederschlag	18
Sonnenschein.....	26
Meeresspiegel.....	28
Phänologie	30
Extremereignisse	32
Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima	38
Begriffskompass Klima.....	40

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,



der vorliegende Klimareport Brandenburg fasst das derzeitige Wissen über das Klima in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in kurzer und prägnanter Form zusammen. Er soll Ihnen als Leser die Möglichkeit geben, sich einen fundierten Überblick über die vergangene und zukünftige zu erwartende Klimaentwicklung in Ihrem Bundesland zu verschaffen.

Neun der fünfzehn wärmsten Jahre seit Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 traten in Brandenburg im 21. Jahrhundert auf. Das Jahr 2018 war mit einem Jahresmittel von 10,8 °C das bisher wärmste Jahr und lag damit mehr als zwei Grad über dem langjährigen Jahresmittel der Referenzperiode 1961–1990. 2018 war auch das trockenste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen. Im Verbund mit andauernden Hitzeperioden führte die vielerorts außergewöhnliche Trockenheit zu zahlreichen großflächigen Wald- und Feldbränden sowie erheblichen Ernteaufschlägen. Diese Werte stellen dabei nur die bisherigen Maxima der fortlaufenden Entwicklung dar. Der 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) lässt für die noch folgenden Jahre dieses Jahrhunderts eine weitere deutliche Klimaerwärmung erwarten.

Der Klimawandel stellt für jeden von uns eine bedeutende Herausforderung dar, zum Beispiel durch vermehrt auftretende Tage mit starker Wärmebelastung oder durch eine eventuell steigende Häufigkeit von extremen Witterungsereignissen wie längere Dürreperioden oder auf der anderen Seite lokal auftretende Starkniederschlagsereignisse.

Der internationale Rahmen für den Umgang mit dem Klimawandel wurde auf der UN-Klimakonferenz COP21 im Jahr 2015 in Paris vereinbart. Eine Voraussetzung für die Umsetzung der dort definierten Ziele ist ein detailliertes Verständnis des aktuellen Standes der Klimaentwicklung. Ein Sonderbericht des Weltklimarates zeigte im Jahr 2018 auf, dass es immer noch möglich ist, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen. Dafür sind umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen notwendig.

Der **Klimareport Brandenburg** stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Erarbeitung von Entwicklungsstrategien an den Klimawandel dar.



Tobias Fuchs

Leiter des Geschäftsbereiches Klima und Umwelt des Deutschen Wetterdienstes i.V.



Grußwort von Jörg Vogelsänger

Wir sind Zeugen dramatischer Veränderungen in unserer Atmosphäre. Die Konzentration des Klimagases Kohlendioxid hat erstmals seit zwei Millionen Jahren einen Wert von über 400 ppm (parts per Million) erreicht. Diese Entwicklung, die durch den Verbrauch fossiler Energieträger und durch diverse Landnutzungsformen vorangetrieben wird, hat sich in den vergangenen Jahrzehnten weiter beschleunigt. Das macht sich auch in unserer Region schon bemerkbar.

Brandenburg gilt als gewässerreich und wasserarm. Einerseits ist Brandenburg durch seine naturnahen Gewässer, Wälder und Landschaften immer eine Reise wert – andererseits gehört die Region aber zu den niederschlagsärmsten Teilen Deutschlands.

Hochwasserereignisse und Niedrigwasserphasen fordern uns schon heute heraus. Trockenheit und Starkniederschläge sind keine Seltenheit mehr. Hitze gefährdet die menschliche Gesundheit ebenso wie die der Tiere. Höhere Temperaturen können die Vegetation, die Land- und Forstwirtschaft auf vielfältige Weise verändern.

Die letzten beiden Jahre 2017 und 2018 zeigten die Bandbreite der möglichen Entwicklung. Während 2017 sehr hohe Sommerniederschläge aufwies, war 2018 das trockenste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Waldbrände und Ernteauffälle sind nur zwei tiefgreifende Folgen gewesen. Das Frühjahr 2019 war deutlich zu warm und – wie bereits die letzten zehn Jahre zuvor – ebenfalls zu trocken.

Der vorliegende Klimareport beschreibt präzise das Klimageschehen von gestern und heute in der Region Brandenburg-Berlin. Gleichzeitig wirft er einen kurzen Blick auf mögliche, zukünftige Entwicklungen.

Wir alle sind Akteure, die weitere dramatische Veränderungen eindämmen können. Der Report ist eine Mahnung, dass wir unsere Bemühungen zur Reduktion der Treibhausgase forcieren und gleichzeitig unsere Anpassungsstrategien stetig weiterentwickeln müssen.

Jörg Vogelsänger

Minister für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft



Immer in Bewegung: Wetter und Klima

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 zukünftig erwartete Entwicklungen in Brandenburg.

Die folgenden Seiten geben einen Überblick über die klimatischen Verhältnisse in der Vergangenheit und über zukünftig erwartete Entwicklungen in Brandenburg.



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 Osteuropas. 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 die Variabilität des Klimas in Brandenburg.

Der Deutsche Wetterdienst beobachtet an vielen Orten das Wetter, teilweise, wie in Potsdam, 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 langfristige Änderungen erkannt werden. So ist es in Brandenburg seit 1881 etwa 1,3 °C* wärmer geworden.

* Temperaturdifferenzen werden in Kelvin (K) angegeben. 1 K entspricht 1 °C. Zugunsten der besseren Lesbarkeit verzichten wir in dieser Broschüre auf die Angaben in Kelvin und nutzen °C.

Gleichzeitig nahm die Anzahl der Frost- und Eistage ab und die der Sommer- und heißen Tage zu (Definition dieser sog. „Kenntage“: siehe Seite 13 f.).

Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 zugenommen. Dieses gilt insbesondere für den Winter. In der Jahressumme sind es bis 2018 etwa drei Prozent mehr als noch vor 137 Jahren. Die Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter stieg seit 1951 bis heute nur leicht um einen Tag an.

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 15 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 untersucht. Für Brandenburg wird – je nach gewähltem Szenario – eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um fast 1 °C bis hin zu 5 °C in den nächsten 100 Jahren projiziert.

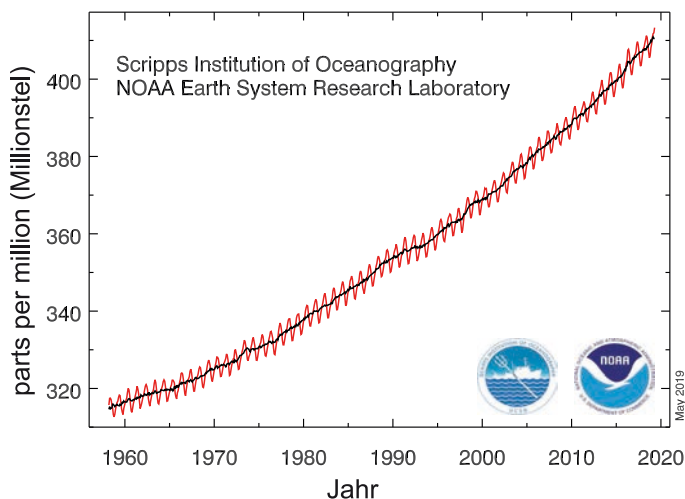
Eine Änderung von nur 1 °C ist laut den Klimamodellen nur bei deutlicher Reduktion der Emission von Treibhausgasen möglich. Bei weiterem Wirtschaftswachstum und weiterhin hohen Treibhausgasemissionen ist eine Änderung von fast 3 bis 5 °C zu erwarten.



Damit einhergehend nimmt künftig die Anzahl der Frost- und Eistage noch weiter ab, während die Zahl der Sommer- und heißen Tage deutlich zunimmt.

Verbunden mit der Temperaturzunahme werden sehr wahrscheinlich die jährlichen Niederschlagsmengen weiter zunehmen. Die Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter wird sich nach den Ergebnissen der Klimaprojektionen erhöhen.

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 werden in der Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschiedenen langen Zeiträumen ablaufen, verstanden. 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 immer auf einen Ort bezogen. Das Klima von der Prignitz ist beispielsweise ein anderes als das vom Spreewald. Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden entsprechend den Vorgaben der WMO Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert.





▲ Messfeld des Deutschen Wetterdienstes in Angermünde.

Klimavariabilität

Das Klima ist als Summe von Wetter und Witterung etwas Variables. Es ist nicht ausreichend, das Klima allein mit einem Mittelwert zu beschreiben. Schon auf der Tagesskala beobachten wir eine hohe Variabilität des Wetters. Diese Variabilität zeigt sich ebenfalls 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 untereinander. Es gibt milde oder kalte Winter und heiße oder kühle Sommer.

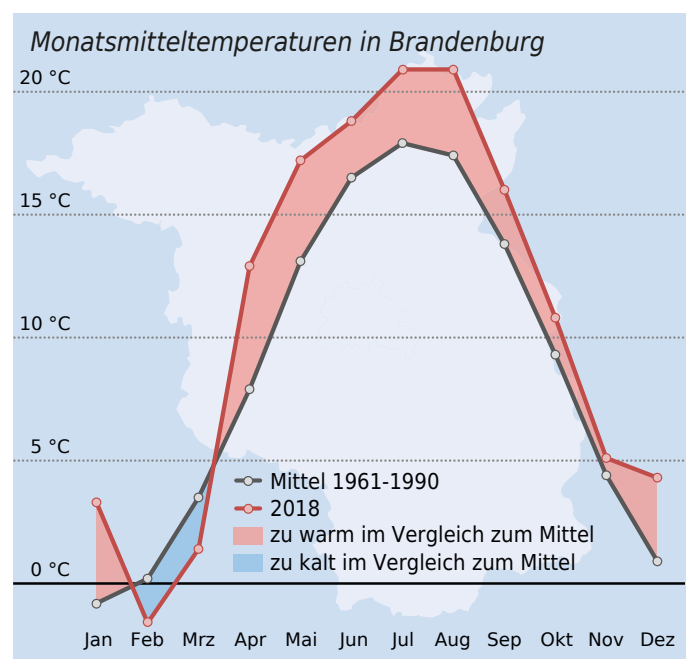
Die beschriebene Variabilität zeigt sich nicht nur bei der Temperatur. Sie gilt für alle meteorologischen Elemente (z. B. Niederschlag und Sonnenscheindauer). Auch ein sich durch den Klimawandel erwärmendes Klima weist diese Variabilität auf: Es wird nicht jedes Jahr etwas wärmer sein als das vorhergehende.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

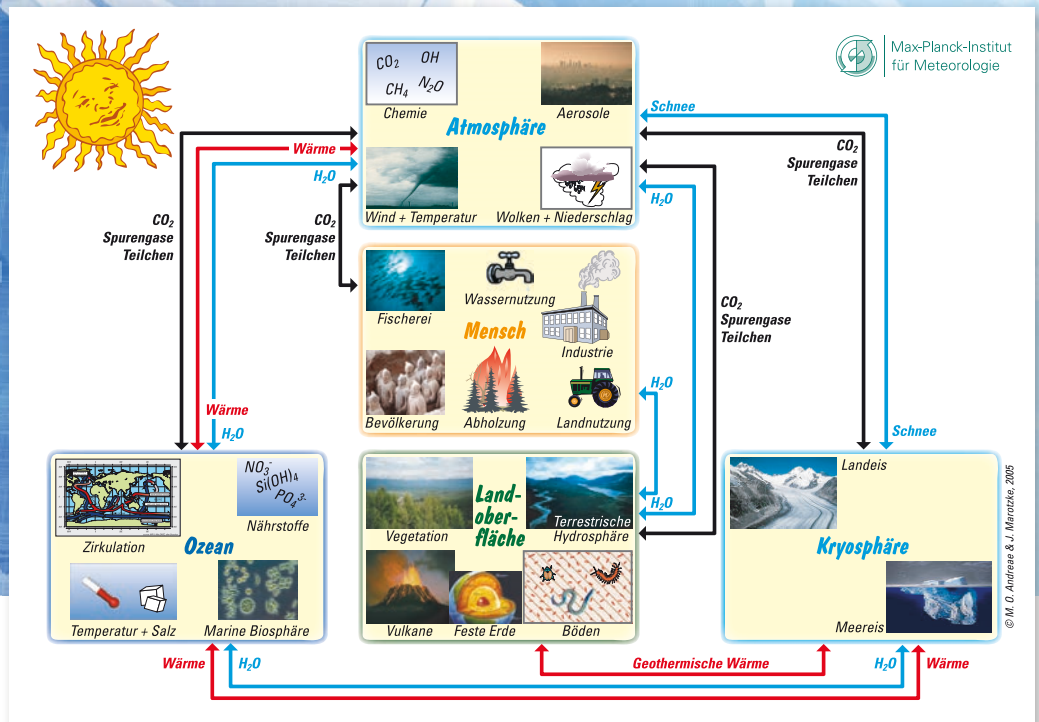
Extremereignisse sind sehr seltene Ereignisse, die stark von den mittleren Bedingungen abweichen.



▲ 2018 war in Brandenburg das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf Februar und März 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 beispielsweise eine Temperatur von 20 °C an einem Julitag nicht ungewöhnlich. 20 °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 zum Klima der Zukunft gehören. Die Analyse der Intensität und der Häufigkeit des Auftretens solcher extremen 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.

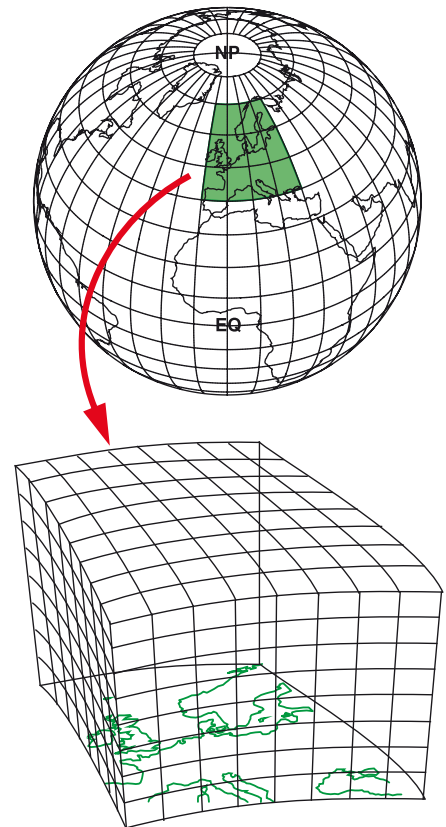
Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Gitterweite von 50 und 12,5 km vor. Das bedeutet zum Beispiel, dass die simulierte Temperatur nur alle 12,5 km einen anderen Wert annehmen kann.

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.



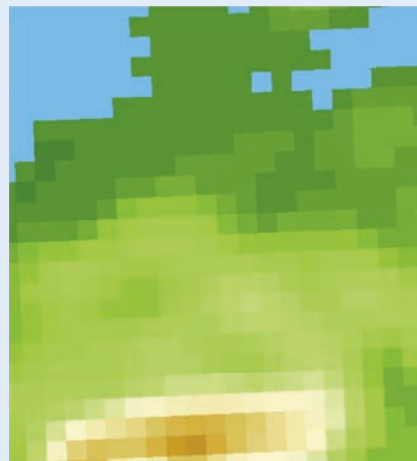
Max-Planck-Institut
für Meteorologie

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

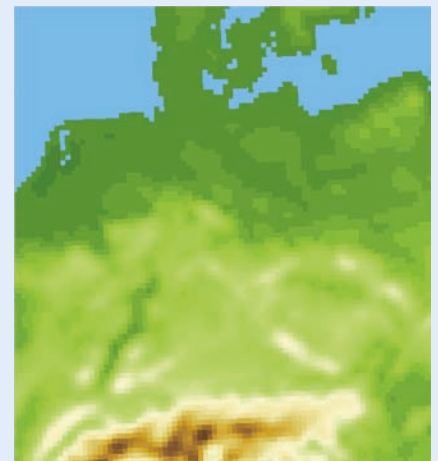
Je engmaschiger, desto genauer - hier am Beispiel des Höhenreliefs von Deutschland in unterschiedlichen Modellgitterauflösungen. Die Auswirkungen der Beschreibung einer Region auf Basis eines wesentlich dichteren Gitternetzes sind deutlich erkennbar. ▼



Globales Klimamodell (sehr grob)
1,875° (ca. 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 kontinuierlich die Landnutzung auf der regionalen und globalen Skala.

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

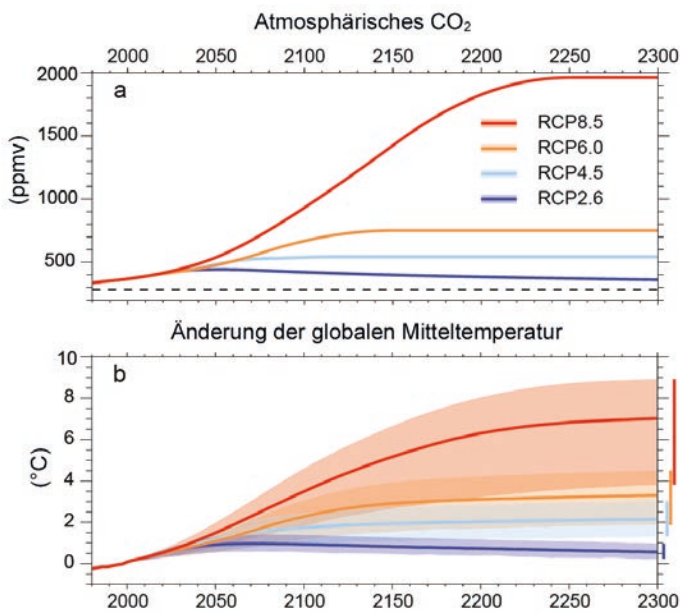
Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einflussnahme. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft Szenarien genannt. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl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

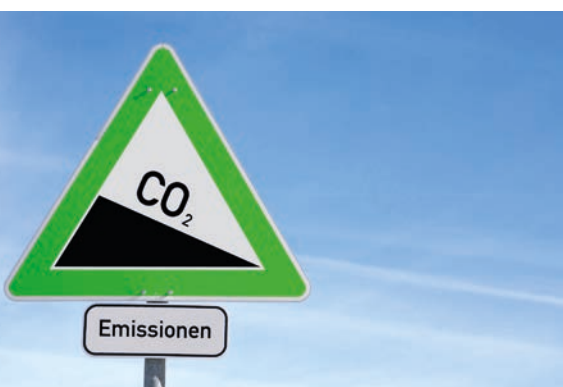
Das **Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5)** beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Der Ausstoß von Treibhausgasen wird sich gegenüber heute mit einem stetigen Anstieg des Strahlungsantriebes bis hin zum Jahr 2100 erhöhen.

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 38 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 beide Zeiträume 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.





Temperatur

Temperatur

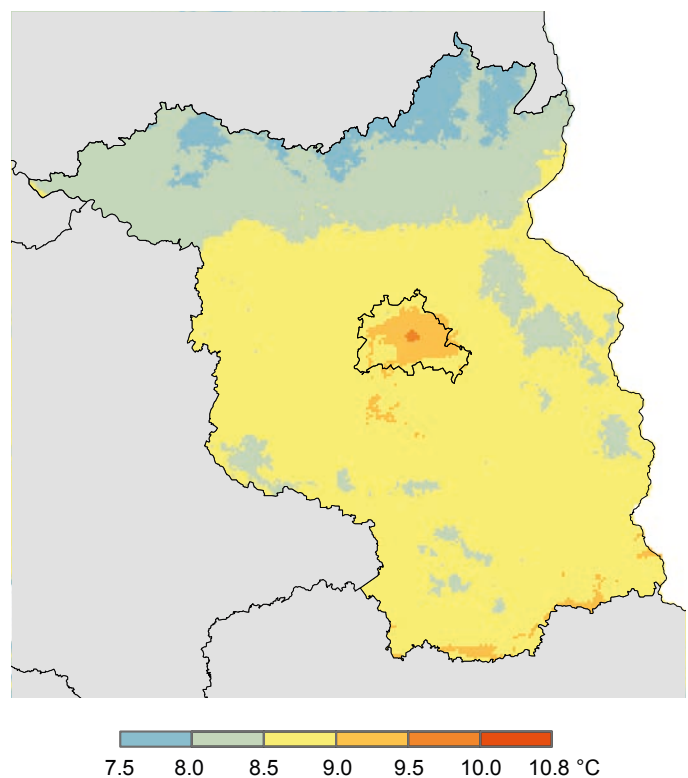
Die Jahresdurchschnittstemperatur in Brandenburg beträgt für die Referenzperiode 1961–1990 8,7 °C. Höhere Durchschnittstemperaturen sind im Berliner Raum anzutreffen. Auch im Südosten Brandenburgs ist es wegen der zunehmenden Kontinentalität wärmer.

Veränderungen der Lufttemperatur seit 1881

Von 1881 bis 2018 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur in Brandenburg um 1,3 °C angestiegen. Auch der vieljährige Mittelwert der Referenzperiode 1961–1990 von 8,7 °C ist mittlerweile auf 9,2 °C im aktuelleren 30-Jahres-Zeitraum 1981–2010 gestiegen.

Der global zu beobachtende Trend der Erwärmung der Atmosphäre ist überlagert durch die natürliche Variabilität des Klimasystems, wegen der es immer wieder Zeiträume gab, in denen der Temperaturanstieg stagnierte, oder sogar Phasen, in denen die Temperatur kurzfristig zurückging. Rückgänge sind in der Regel Folge periodischer Schwankungen, die eng an die Zirkulation der Ozeane gekoppelt sind. Die periodischen Schwankungen der Ausprägung der Klimatelemente überlagern den Einfluss der externen Klimaantriebe. Zu diesen zählen neben den natürlichen Faktoren wie Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität die vom Menschen verursachten Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zum Beispiel durch Landnutzungsänderungen und Luftverschmutzungen.

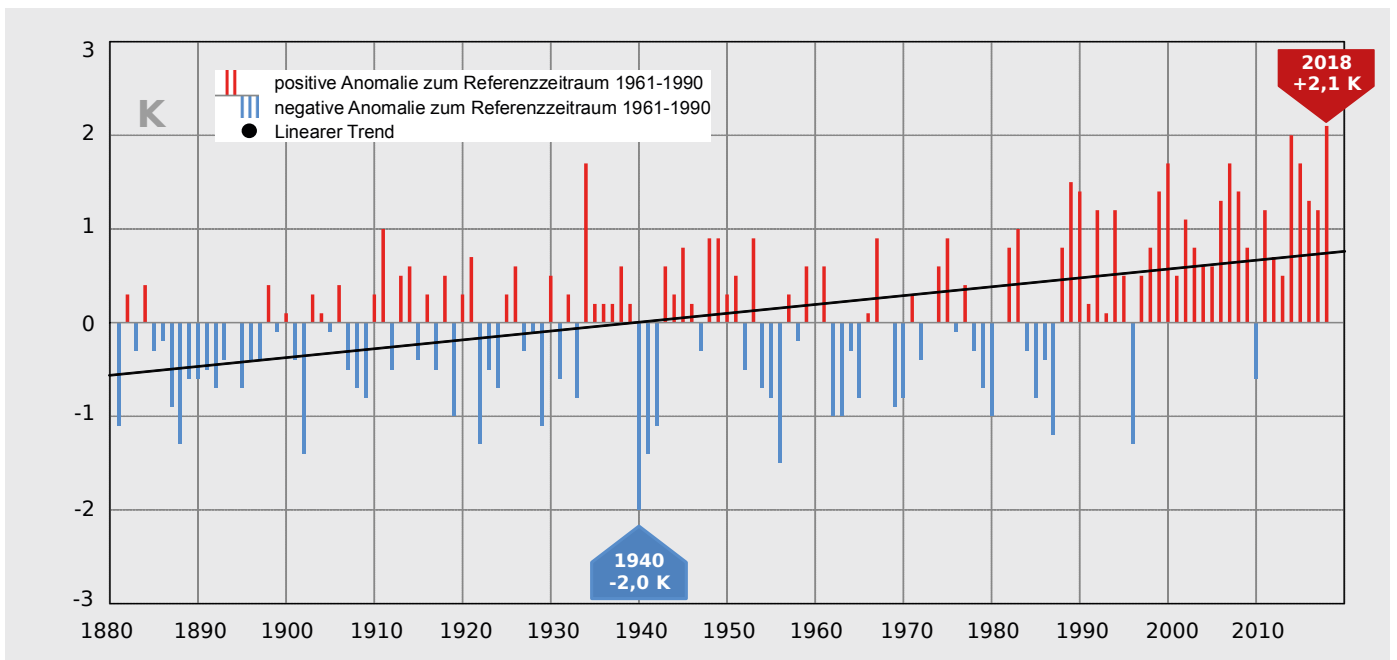
Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis 1910 lag die Temperatur bei etwa 8,3 °C. Der Zeitraum 1910 bis 1950 und insbesondere der Zeitraum seit der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre waren geprägt von einer Zunahme der Temperatur, während sie dazwischen weitestgehend auf demselben Niveau verharrte. 2018 war mit einer Mitteltemperatur von 10,8 °C bisher das wärmste Jahr in Brandenburg.



▲ Jahresmitteltemperaturen in Brandenburg im Referenzzeitraum 1961–1990 als Flächen-darstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).

Die zwölf wärmsten Jahre in

2018	10,8 °C
2014	10,7 °C
1934	10,4 °C
2000	10,4 °C
2007	10,4 °C
2015	10,4 °C
1989	10,2 °C
1990	10,1 °C
1999	10,1 °C
2008	10,1 °C
2006	10,0 °C
2016	10,0 °C



▲ Es ist wärmer geworden in Brandenburg: Abweichungen des Jahresmittels der Temperatur (Gebietsmittelwerte) 1881-2018 von der für den Referenzzeitraum 1961-1990 berechneten Jahresmitteltemperatur.

Meteorologische Kenntage, wie Sommertage oder Frosttage, vermitteln die Temperaturverhältnisse weitaus anschaulicher. Daher wird die Entwicklung der beiden Kenntage seit 1951 nachfolgend näher betrachtet.

Ein Sommertag liegt dann vor, wenn die höchste Temperatur des Tages 25 °C erreicht bzw. überschreitet. Die Anzahl der Sommertage (hier als 30-jähriges Gebietsmittel angegeben) stieg in Brandenburg von knapp 35 Tagen in der Referenzperiode 1961-1990 auf 42 Tage im Zeitraum 1981-2010, also um rund 7 Tage. Deutschlandweit liegen die Vergleichswerte bei rund 27 bzw. 35 Tagen, was einem Anstieg von rund 8 Tagen entspricht. Der lineare Trend der Sommertage von 1951 bis heute zeigt für das Gebiet Brandenburgs ein Plus von rund 21 Tagen auf. Die höchste Anzahl wurde 2018 mit knapp 75 Tagen registriert.

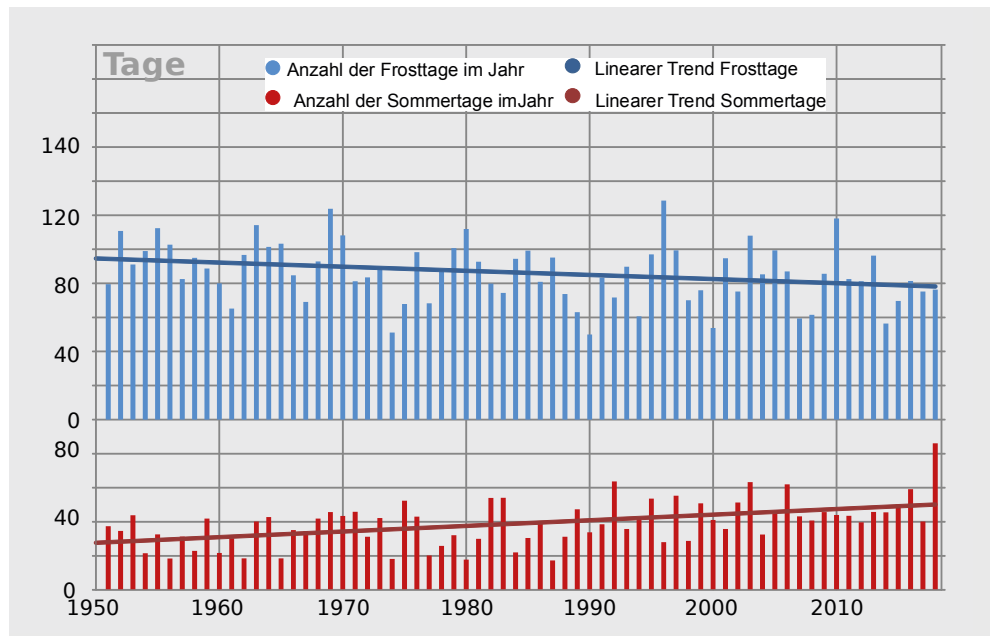
Brandenburg seit 1881





Ein Tag wird als Frosttag bezeichnet, wenn die Tiefsttemperatur am betreffenden Tag $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ unterschreitet. Brandenburg weist innerhalb der Referenzperiode 1961-1990 im Mittel rund 87 Frosttage im Jahr auf, Deutschland dagegen rund 91. Die durchschnittliche Anzahl der Frosttage sank in Brandenburg im Zeitraum 1981-2010 auf rund 84. Im Zeitraum 1951 bis heute ist für Brandenburg im Trend ein Rückgang um rund 16 Frosttage festzustellen.

Die Zahl der Sommertage nimmt in Brandenburg zu, Frosttage werden seltener. Die Darstellung zeigt die Jahreswerte für Brandenburg von 1951-2018 sowie den entsprechenden linearen Trend.



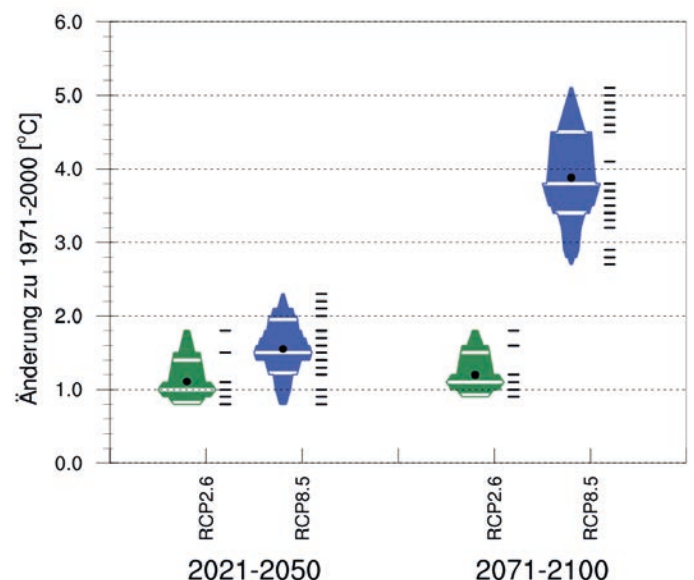


Zukunft

Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Brandenburg ist zu erwarten. Für den kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) beträgt der Anstieg etwa +1,1 bis +1,5 °C. Der Unterschied zwischen den durch die beiden Klimaprojektionen (**Klimaschutz-Szenario** und **Weiter-wie-bisher-Szenario**) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen +0,7 und +2,3 °C.

Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem **Klimaschutz-Szenario** ist eine Erhöhung um +1,1 °C zu erwarten. Erreicht wird die Stabilisierung auf dem Niveau des kurzfristigen Planungshorizontes durch die sehr starke Reduktion der Treibhausgasemissionen innerhalb der Szenariendefinition. Die Änderung im Vergleich zum vorindustriellen Zustand beträgt +1,7 °C. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden. Unter den Bedingungen des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** beträgt die Erwärmung etwa +3,8 °C. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt bei +2,7 bis +5,0 °C.

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



▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresmitteltemperatur von Brandenburg. 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 abgebildeten 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 %, Erläuterung im Begriffskompass auf Seite 40) als weiße Linien. Neben den Körpern werden als schwarze Linien die Einzelergebnisse der Modelle gezeigt.

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	8,2 °C	8,6 °C	+0,9 °C	+1,3 °C	+1,0 °C	+3,3 °C
Sommer	17,3 °C	17,5 °C	+1,1 °C	+1,5 °C	+1,2 °C	+4,0 °C
Herbst	9,2 °C	9,0 °C	+1,2 °C	+1,7 °C	+1,1 °C	+4,1 °C
Winter	0,1 °C	0,8 °C	+1,2 °C	+1,7 °C	+1,3 °C	+4,2 °C
Jahr	8,7 °C	9,0 °C	+1,1 °C	+1,5 °C	+1,1 °C	+3,8 °C

▲ Mittelwerte der Lufttemperatur pro Jahr und Jahreszeit, jeweils für Referenzzeitraum und Bezugszeitraum (Datenspalte 1 und 2). Die Datenspalten 3 bis 6 zeigen die Ergebnisse der Projektionsrechnungen. Hier sind nicht absolute Temperaturen, sondern die Abweichungen zum Bezugszeitraum 1971-2000 angegeben.

Jahreszeitliche Unterschiede

Die Erwärmung in Brandenburg ist in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt. Besonders im Winter macht sich die Erwärmung bemerkbar. Mit der Temperaturzunahme geht eine markante Veränderung der Temperaturextreme einher. Die mit tiefen Temperaturen verbundenen Extreme nehmen stark ab und die mit Wärme verbundenen Extreme nehmen stark zu. Die Häufigkeit des Auftretens von Frost- und Eistagen geht zurück und die Wahrscheinlichkeit für längere Frostperioden im Winter verringert sich. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage und die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen nimmt zu.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Ungebrochener Trend der Erwärmung in Brandenburg
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,3 °C seit 1881
- Änderung der Extreme: Mehr Sommertage, weniger Frostage

Kurzfristiger Planungshorizont

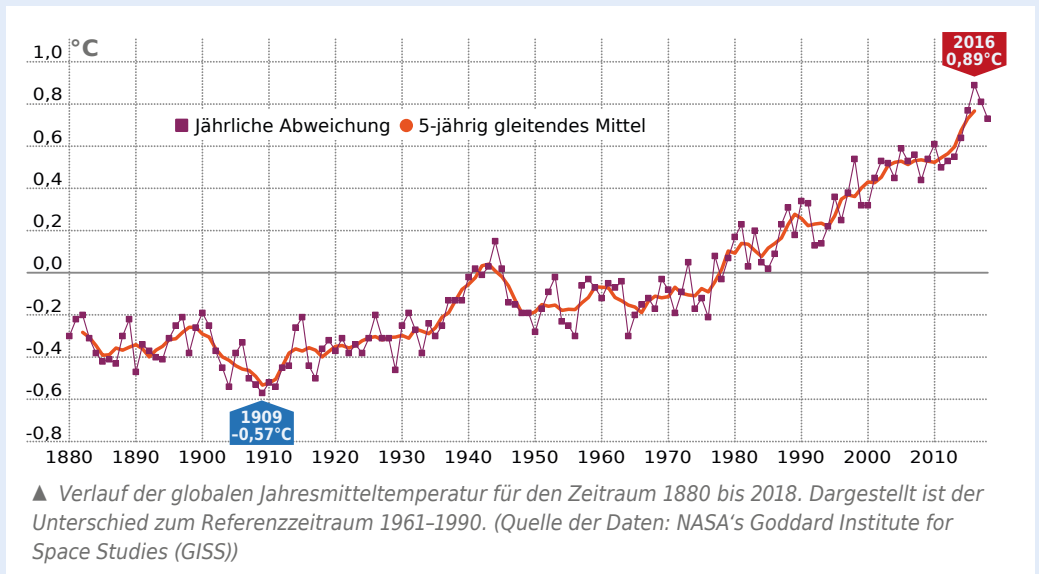
- Landesweite Erwärmung um im Mittel +1,1 bis +1,5 °C

Langfristiger Planungshorizont

- Beim **Klimaschutz-Szenario** Erwärmung um im Mittel +1,1 °C
- Beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** Erwärmung um im Mittel +3,8 °C

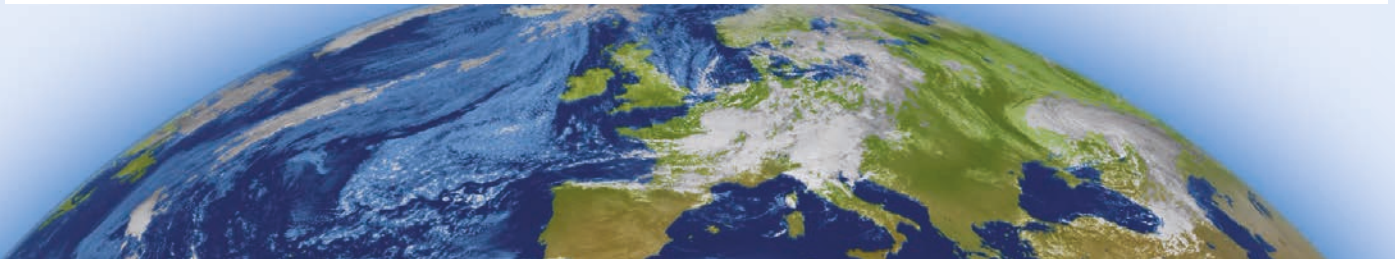
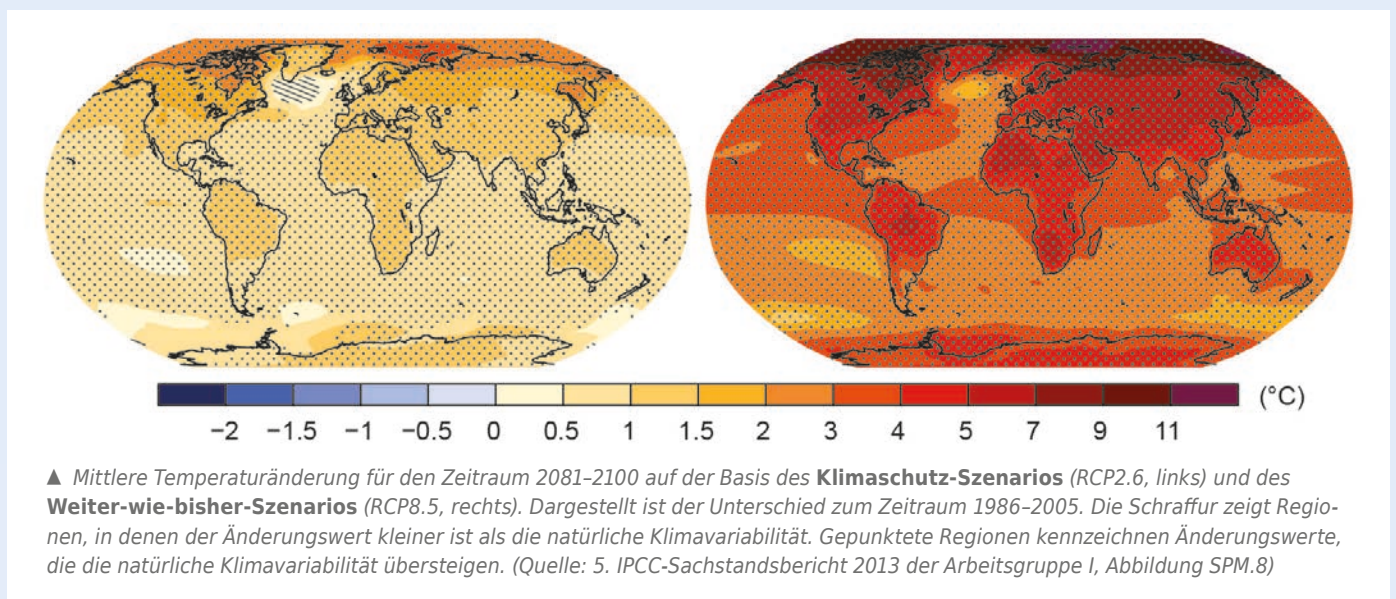
Globale Temperaturentwicklung

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

Die Niederschlagsverteilung in Brandenburg wird bestimmt durch den Wechsel maritim und kontinental geprägter Luftmassen. Im Osten des Landes – im Oderbruch – sind die niedrigsten Jahresniederschlagshöhen zu beobachten.

Veränderungen in der Niederschlagshöhe seit 1881

Der Niederschlag ist eine sehr veränderliche Größe in Raum und Zeit. Das Gebietsmittel der Jahressummen des Niederschlags für Brandenburg beträgt rund 558 mm. Es gibt im Trend seit 1881 einen leichten Anstieg, jedoch auch eine große Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr. In Einzeljahren und kleinräumig kann die Niederschlagshöhe deutlich niedriger oder deutlich reichlicher ausfallen. Das höchste Gebietsmittel trat im Jahr 2007 mit 789 mm (entspricht Liter/m²) auf, während im Jahr 2018 nur 390 mm gemessen wurden.

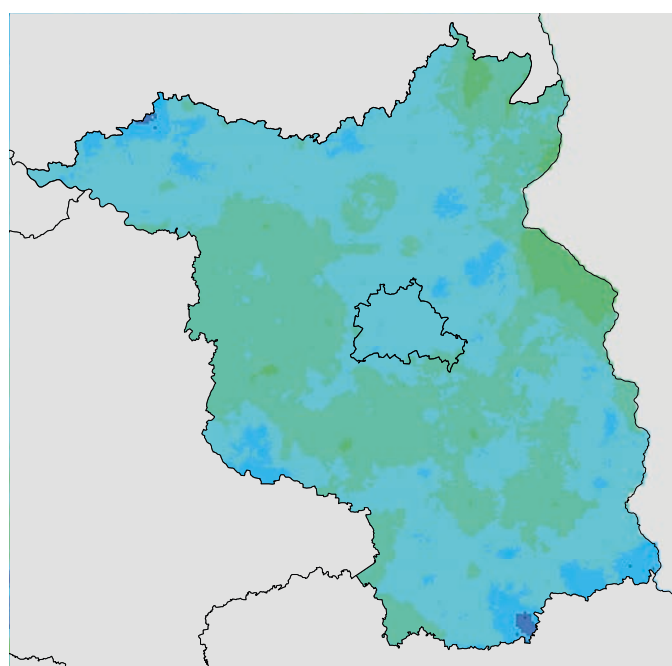
Im Trend gibt es für Brandenburg im Zeitraum 1881 bis heute einen Zuwachs der Jahressumme von knapp 3 % relativ zur Referenzperiode 1961–1990.

Jahreszeitliche Unterschiede

Im Mittel sind in Brandenburg seit 1881 über alle Beobachtungsjahre die hydrologischen Sommerhalbjahre (Mai bis Oktober) etwas niederschlagsreicher als die Winterhalbjahre. Etwa 56 % des Jahresniederschlags fällt im Sommerhalbjahr, etwa 44 % im Winterhalbjahr. Betrachtet man nur die drei Sommermonate Juni, Juli und August, so steht dem trockensten Sommer mit 72 mm im Jahr 1976 der nasseste Sommer mit 351 mm im Jahr 1927 gegenüber. Normal sind 177 mm (Mittel 1961–1990). Von 1881 bis heute hat sich der sommerliche Niederschlag so gut wie nicht verändert. Gleiches gilt in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst. Beachtlich ist jedoch die Entwicklung in den drei Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar). Die Winterniederschläge haben seit dem Winter 1881/82 bis heute um 20 %, 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 in

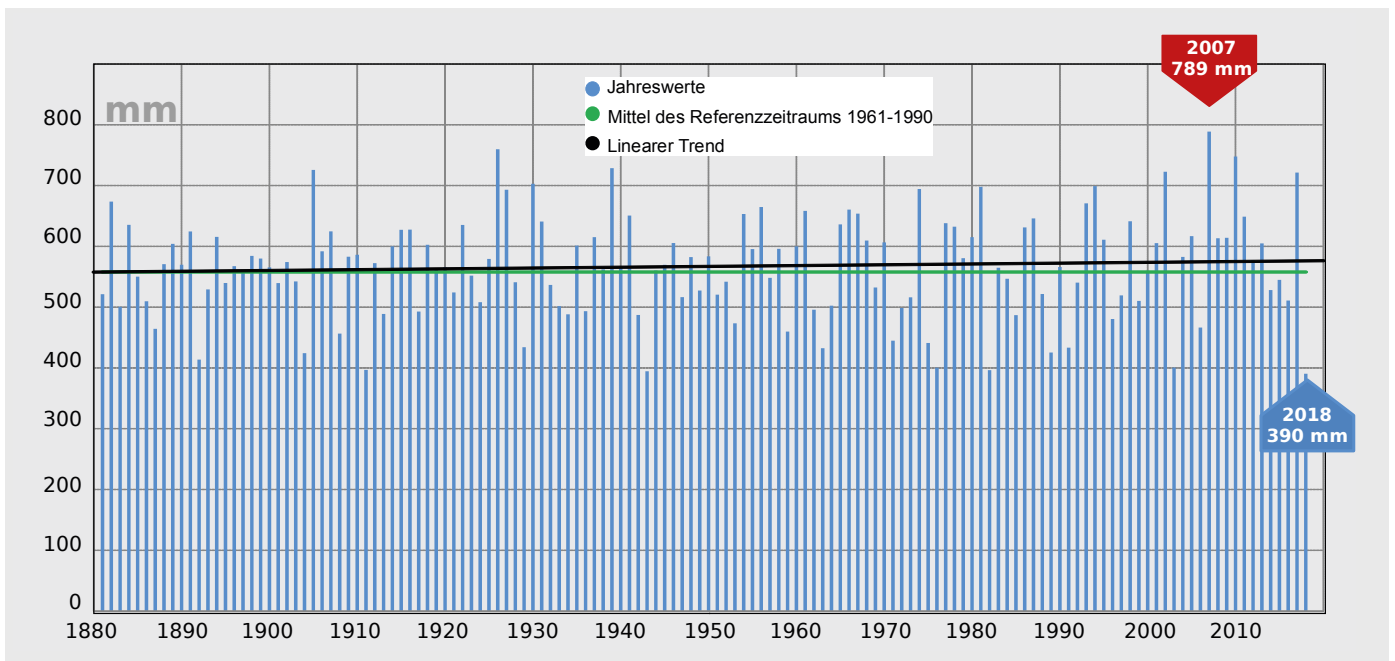
dieser Jahreszeit deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren auf. Dem niederschlagsärmsten Winter 1946/47 mit 53 mm steht der niederschlagsreichste Winter 1947/48 mit 209 mm gegenüber. Normal sind 123 mm (Mittel 1961–1990).

Die tägliche Niederschlagsmenge zeigt sich sehr variabel zwischen beiden Extremen des Zuwenig und des Zuviels. Große Niederschlagsmengen können durch den Kenntag mit einer Menge von mindestens 10 mm Niederschlag beschrieben werden. Im Mittel gab es zwischen 1951 und 2018 in Brandenburg an 12 Tagen

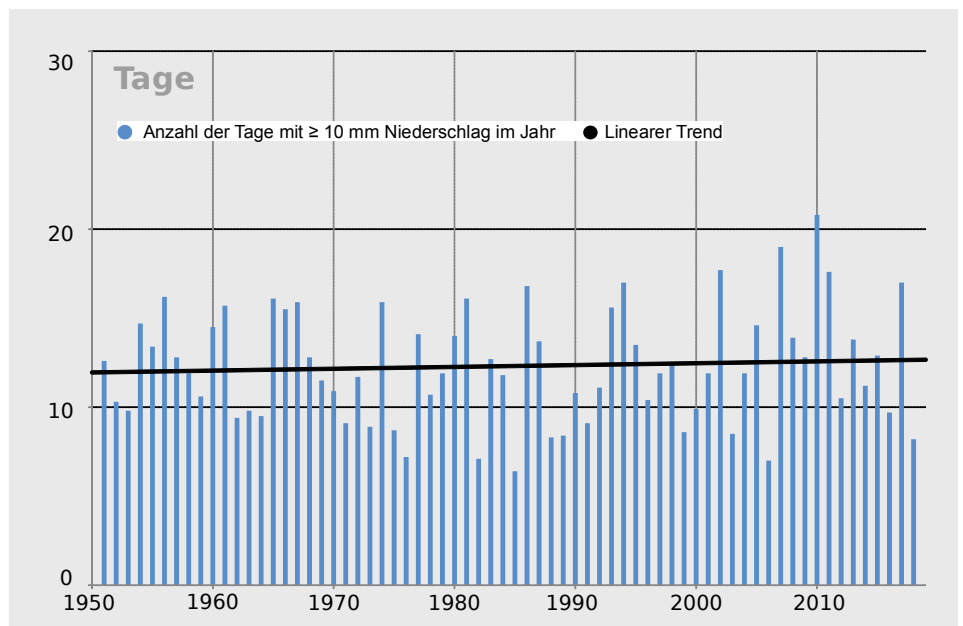


450 500 550 600 650 700 750 mm

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



▲ Es ist nasser geworden in Brandenburg: Zeitreihe der Jahresniederschlagshöhen (Gebietsmittelwerte) von 1881 bis 2018.



Anzahl der Tage mit mindestens 10 mm Niederschlag (Gebietsmittelwerte) von 1951 bis 2018.

pro Jahr eine Niederschlagsmenge von mindestens 10 mm. Die Anzahl weist große jährliche Schwankungen auf: das Minimum trat mit 6 Tagen 1985 auf. Die größte Anzahl wurde mit 21 Tagen 2010 verzeichnet. Der lineare Trend von 1951 bis 2018 zeigt nur einen minimalen Anstieg um einen Tag.

Starkniederschläge, insbesondere in Form von kurzzeitigen sommerlichen Schauern und Gewittern, weisen nur kleinräumig Intensitätsmaxima auf. Die Auswertungen des Niederschlagsradars, dessen Messungen seit 2001 zur Verfügung stehen, werden zukünftig zu einer deutlichen Informationsverbesserung führen.

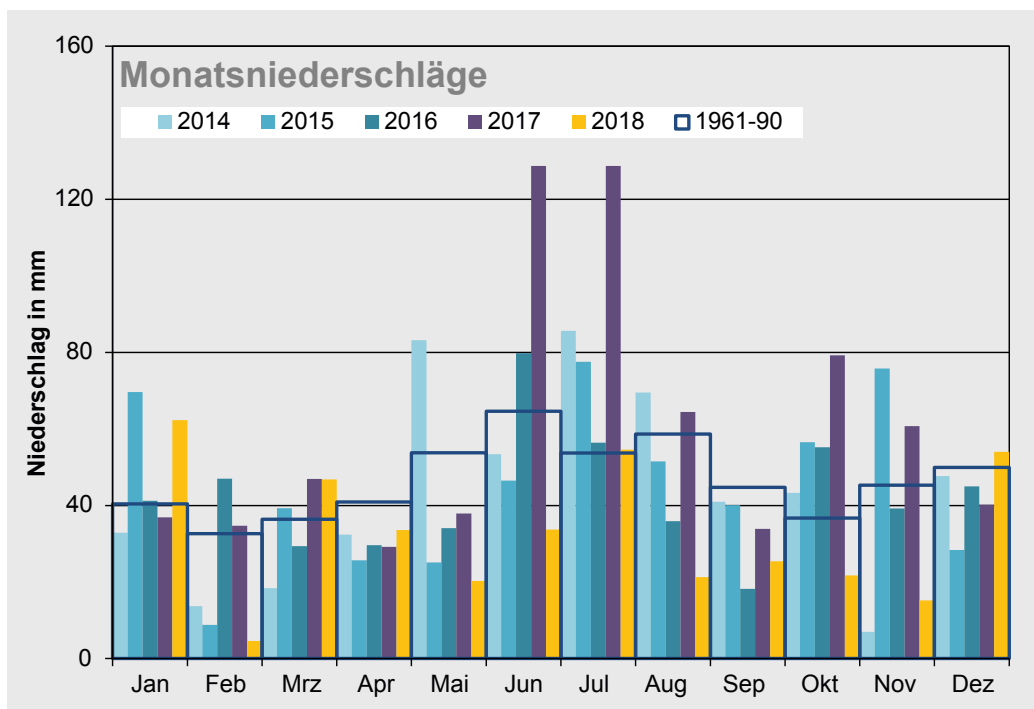
Sehr hohe Monatssummen treten am häufigsten im Juli und August auf. In Brandenburg fielen z. B. im Juli 2011 203 mm, was 378 % des Mittelwertes von 1961-1990 (53,7 mm) entspricht.

Aber auch zu wenig Niederschlag stellt in unterschiedlicher Weise ein Problem für Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie die Schiffbarkeit der Flüsse dar. Das hat sich im Jahr 2018 in aller Deutlichkeit gezeigt. Es wurden nur 390 mm Jahresniederschlag gemessen. Das sind 70 % des normalerweise zu erwartenden Niederschlags von 557 mm (1961-1990).

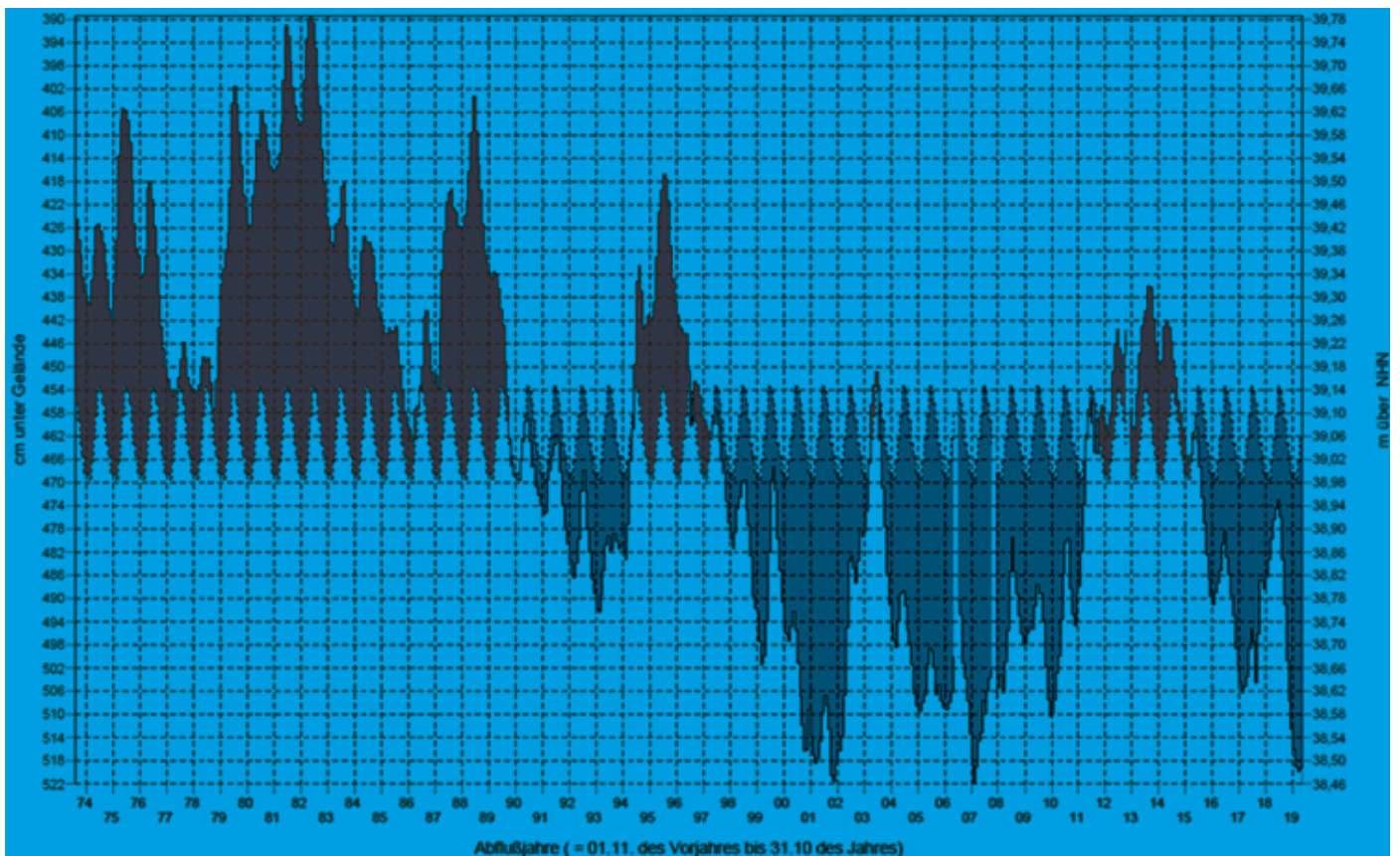
Niederschlagsvariabilität

Die Gebietsniederschläge für Brandenburg variieren stark. 2017 und 2018 waren für Brandenburg extreme und ausgesprochen gegensätzliche Jahre. 2017 standen weite Flächen des Landes im Sommer lange unter Wasser. Trotz der hohen Niederschläge ab Mitte 2017 hat die Dürre 2018 das Land Brandenburg stark getroffen. Erhebliche Ernteauffälle bedrohten die Existenzen vieler Landwirte und hatten große ökonomische Auswirkungen. Das Jahr 2018 zählt wegen der Trockenheit zu den Jahren mit den meisten und flächenmäßig größten Waldbränden in der Region. Die Jahre 2017 und 2018 zeigen die enorme Niederschlagsvariabilität und Spannweite der Ereignisse, die sich mit dem Klimawandel noch verschärfen können, eindrucksvoll auf.

Das Jahr 2017 verzeichnete mit einem Jahresniederschlag von 721 mm etwa 160 mm mehr Niederschlag im Vergleich zum langjährigen Mittel und war somit etwa 30 % nasser als gewöhnlich. Während das Frühjahr, vor allem der April und Mai, eher durch Trockenheit gekennzeichnet war, lagen die Sommerniederschläge im Juni und Juli mit doppelt so hohen Mengen signifikant über den langjährigen Mittelwerten. Auch im Oktober fiel etwas mehr als die doppelte übliche Niederschlagsmenge, sodass die zweite Jahreshälfte ebenfalls durch überdurchschnittlich hohe Niederschläge geprägt war.



◀ Gebietsniederschlag in Brandenburg. (Quelle: Landesamt für Umwelt Brandenburg)



▲ Grundwasserstände in Seddin: Monatsmittel der Einzeljahre und langjährige monatliche Vergleichswerte der Jahre. (Quelle: Landesamt für Umwelt Brandenburg)

In Teilen Brandenburgs und Berlins kam es infolge der starken Niederschläge zu zahlreichen und teilweise anhaltenden regionalen Überschwemmungen. Insbesondere die Region um Leegebruch in der Oberhavel hatte wochenlang mit Hochwasser zu kämpfen.

Das Jahr 2018 hingegen war das trockenste Jahr in Brandenburg, seit Daten aus der Wetterbeobachtung für die Region vorliegen. Mit 393 mm Niederschlag ist im Jahr 2018 knapp 30 % weniger Niederschlag gefallen als im langjährigen Mittel (1961-1990). Nur in vier Monaten wurde der durchschnittliche Monatsniederschlag überhaupt erreicht. Lediglich im Januar lagen die Niederschlagssummen deutlich über dem Mittel. Alle vier Jahreszeiten lagen mit ihren Niederschlagssummen deutlich unter den zu erwartenden Niederschlagswerten, insbesondere der Sommer mit fast 40 % und der Herbst mit etwa über 50 % zu wenig Niederschlag.

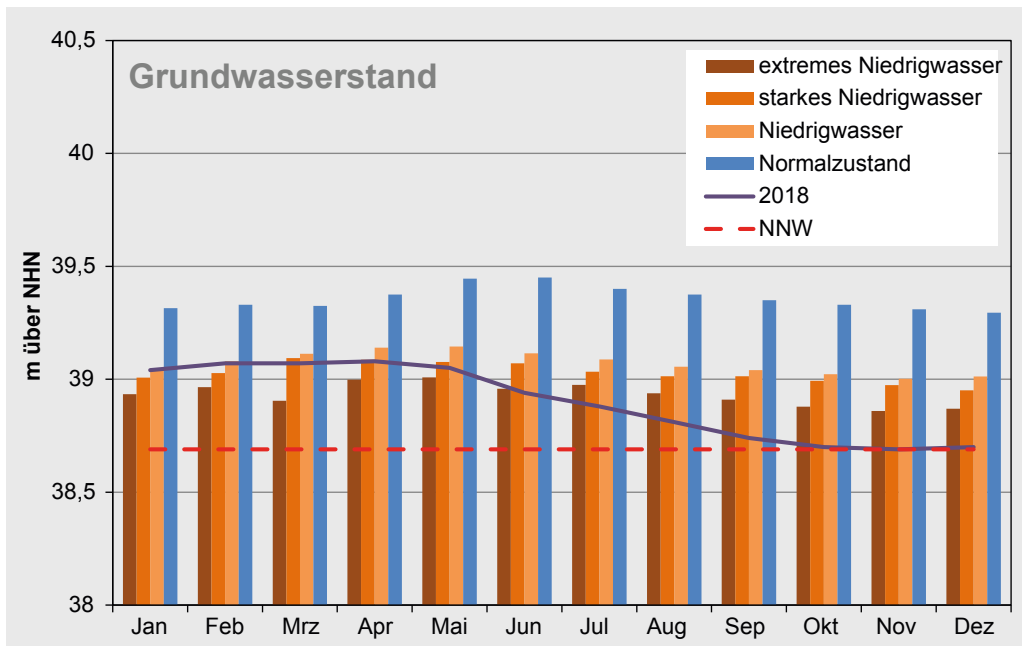
Manchmal verschleierten die Vergleichswerte das Niederschlagsdefizit. Zum Beispiel wurde an der Station Potsdam im Juli 2018 mit 52 mm Niederschlag fast das Monatsmittel von 64 mm erreicht. Diese Summe setzt sich aber nur aus zwei Einzelereignissen mit Kleinstmengen sowie einem Starkniederschlagsereignis vom 11./12. Juli mit 39 mm zusammen.

Insgesamt jedoch war der Juli 2018 von langen Trockenphasen geprägt.

Im Durchschnitt gleichen sich die Niederschläge von 2017 und 2018 aus. Aber nur rein rechnerisch. Gerade in längeren Trockenphasen können ausgetrocknete Böden starke Niederschlagsmengen nicht unmittelbar aufnehmen. Diese fließen deshalb großteils als oberflächlicher Abfluss über die Kanalisation oder nahegelegene Flüsse ab. Sie stehen somit den Pflanzen, den Böden und der Grundwasserneubildung nur vermindert zur Verfügung.

Anhand der Messreihe der Grundwasserstände am Standort Seddin südlich von Potsdam (siehe Grafik oben) wird deutlich, dass sich das Jahr 2018 einreicht in eine etwa seit 30 Jahren bestehende Defizitphase. Dargestellt ist die Abweichung der Grundwasserstände vom langjährigen Mittel.

Die Grundwasserstände haben sich in einigen Regionen des Landes nicht durch die Regenfälle in 2017 erholt. Positiv hob sich zu Jahresbeginn der Standort Paulinaue im Havelländischen Luch ab. Doch auch dort kippte ab Juni die Situation und verzeichnete ebenfalls extremes Niedrigwasser.



◀ Grundwasserstand 2018 in in Beelitz - Potsdam Mittelmark. (Quelle: Landesamt für Umwelt Brandenburg)

In Beelitz begann trotz eines niederschlagsreichen Vorjahres das Jahr 2018 bereits auf Niedrigwasser-niveau. In der ersten Hälfte des Jahres erreichten die Grundwasserstände starkes Niedrigwasser und begannen ab Mai beständig zu sinken, sodass im Juni ein extrem niedriges Niveau erreicht wurde. Auch die zunehmenden Niederschläge in der zweiten Jahreshälfte konnten die Grundwasserstände nicht auffüllen, sodass zum Jahresende diese auf den tiefsten jemals gemessenen Wert sanken. Der Winter 2018/19 fiel in allen Regionen Brandenburgs zu trocken aus.

Treten Jahre wie 2018 im Zuge des Klimawandels künftig häufiger auf, werden sich Nutzungskonkurrenzen und langfristig Nutzungskonflikte um das knapper werdende Gut Wasser verschärfen. Das Land Brandenburg gilt als gewässerreiche und zugleich niederschlagsarme Region. Wie sich die steigenden Temperaturen auf die Zunahme der Verdunstung auswirken werden, ist aktuell noch nicht vollständig abzuschätzen. Konfliktverschärfend wirkt sich die zunehmende Verdunstung auf die Wassermenge und

Gewässerqualität aus. Zudem nimmt durch den Klimawandel die Gefahr von Hochwasser und regionalen Überschwemmungen in Folge von Starkniederschlägen in der Region weiter zu.



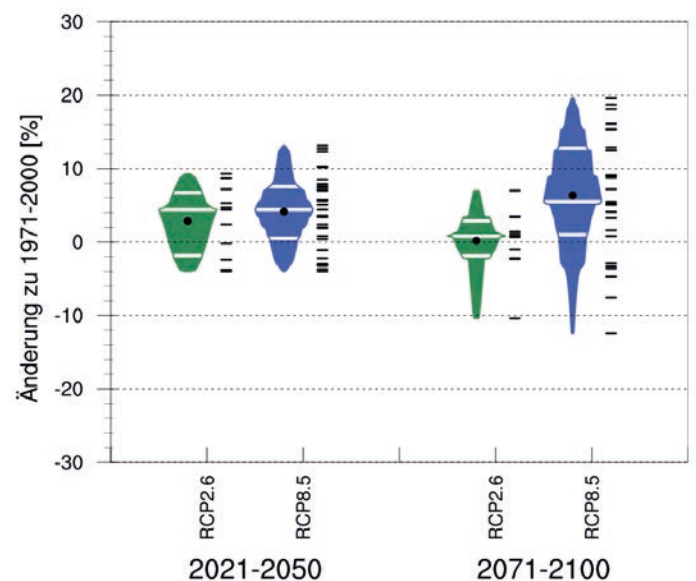


Zukunft

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) ist für Brandenburg nicht zu erwarten. Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags um 3 bis 5 %. Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen –4 % und +13 % Änderung. Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass eine modellierte Änderung unterhalb ± 10 % nicht von der natürlichen Klimavariabilität unterschieden werden kann.

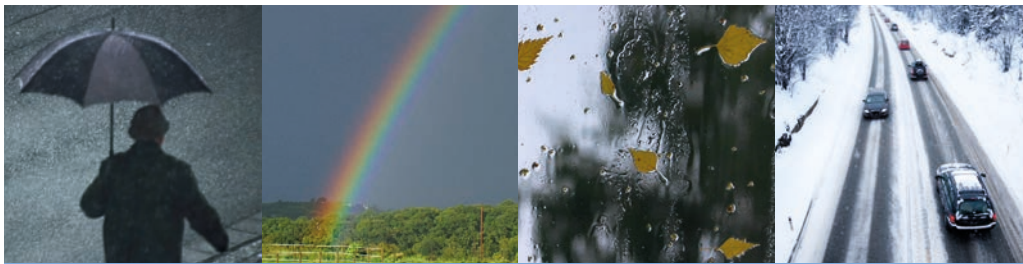
Im langfristigen Planungshorizont (2071–2100) ist beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** mit einer leichten Zunahme des Jahresniederschlags um 6 % zu rechnen. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen –13 % und +20 % Änderung. Beim **Klimaschutz-Szenario** zeigt sich wenig Änderung.

Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 10 mm pro Tag ist sowohl für den kurzfristigen als auch für den langfristigen Planungshorizont mit einer Zunahme zu rechnen. Ein weniger deutlich ausgeprägter Anstieg wird für die Tage mit 20 mm Niederschlag und mehr projiziert. Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Spannweite innerhalb des Ensembles sehr groß, so dass die Resultate nur wenig belastbar sind.



▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresniederschlagssumme von Brandenburg. Abgebildet 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.

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	131 mm	129 mm	+6 %	+6 %	+2 %	+11 %
Sommer	177 mm	176 mm	-2 %	-1 %	±0 %	-10 %
Herbst	127 mm	123 mm	+1 %	+1 %	-3 %	+4 %
Winter	123 mm	126 mm	+7 %	+11 %	+2 %	+19 %
Jahr	558 mm	554 mm	+3 %	+4 %	±0 %	+6 %

▲ Mittelwerte der Niederschlagshöhe pro Jahr und Jahreszeit, jeweils für Referenzzeitraum und Bezugszeitraum (Datenspalte 1 und 2). Die Datenspalten 3 bis 6 zeigen die Ergebnisse der Projektionsrechnungen. Hier sind jeweils die prozentualen Abweichungen zum Bezugszeitraum 1971-2000 angegeben.

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2021-2050 werden unter Verwendung aller RCP-Szenarien für den Winter Zunahmen der Niederschlagsmenge um +7 bis +11 % berechnet. Für den Sommer und Herbst weisen die Ergebnisse im Mittel keine Änderung auf (-2 bis +1 %). Im Frühjahr werden leichte Anstiege modelliert. Jedoch ist die Spannbreite innerhalb des Ensembles bei allen Jahreszeiten sehr groß.

Im Frühjahr kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) in der Spanne von keine Änderung (**Klimaschutz-Szenario**) bis +11 % (**Weiter-wie-bisher-Szenario**) betragen, wohingegen sich der Anstieg im Winter auf +2 bzw. +19 % summieren kann. Für den Sommer wurde für diesen Planungshorizont beim **Klimaschutz-Szenario** keine Änderung und beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** ein Rückgang von -10 % berechnet.

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 Jahresniederschläge um 3 % seit 1881
- Niederschlagsanstieg im Winter; im Frühling, Sommer und Herbst kaum Änderungen
- 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 (+4 %)

Langfristiger Planungshorizont

- Im **Weiter-wie-bisher-Szenario** ist mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +6 % zu rechnen

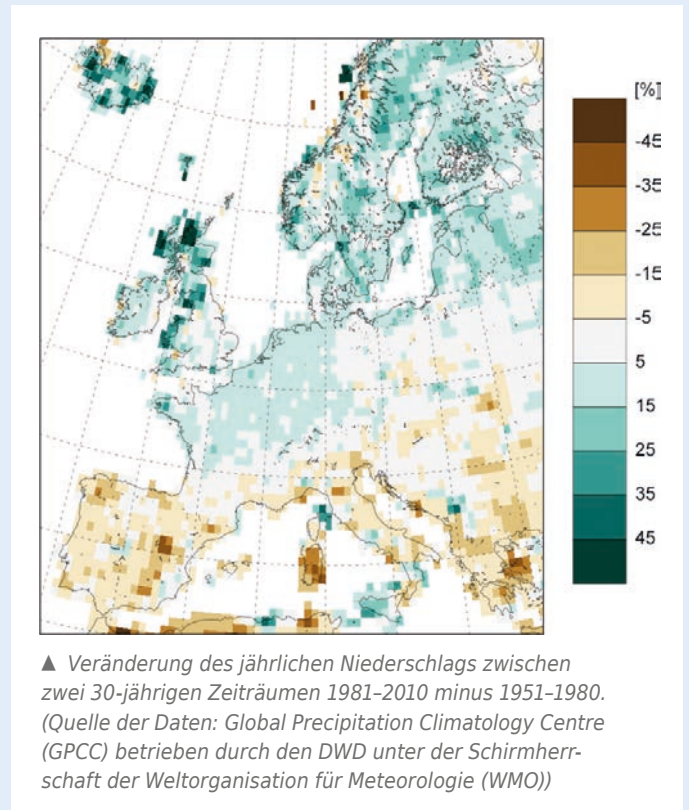
Für beide Planungshorizonte werden jeweils für Winter und Frühjahr Zunahmen und für den Sommer Abnahmen der Niederschlagsmenge simuliert.

Globale Niederschlagsentwicklung

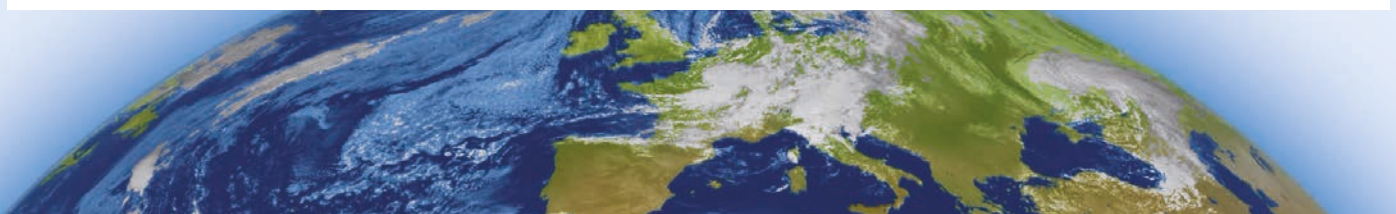
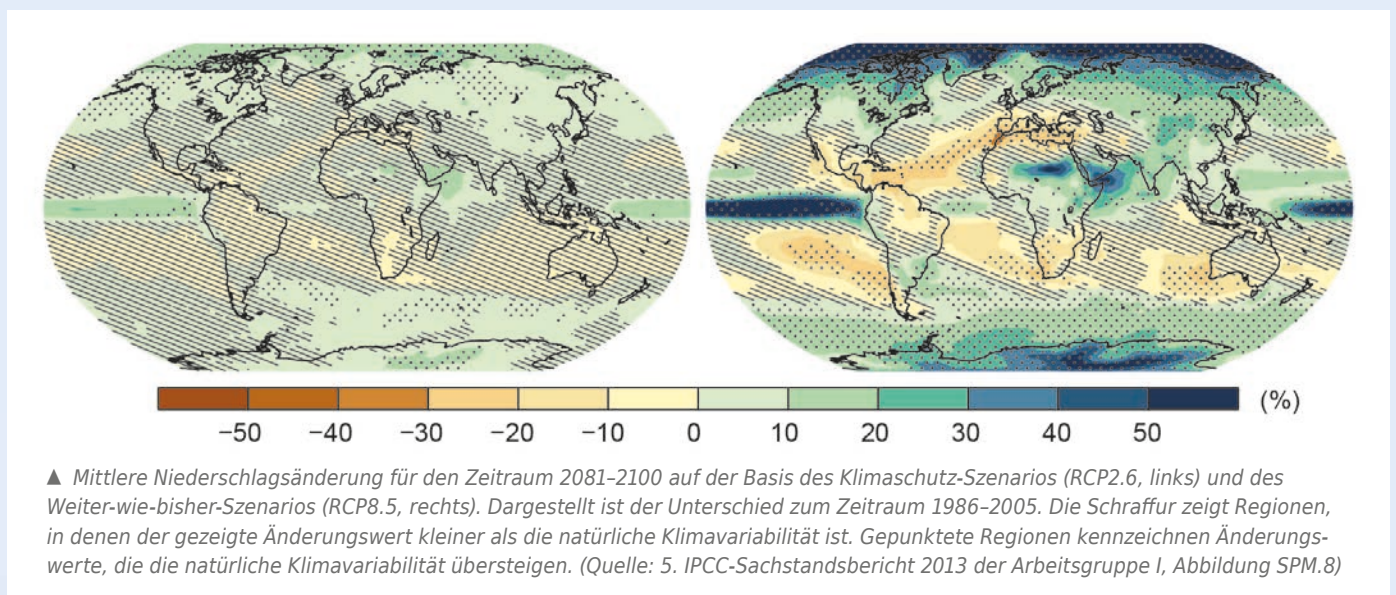
Der globale Niederschlag hat eine sehr große räumliche und zeitliche Variabilität, die durch viele natürliche Schwankungen, z. B. durch Zirkulationsmuster wie ENSO und die Nordatlantische Oszillation, geprägt ist.

Die Niederschläge über Europa haben im letzten Jahrhundert um 6–8 % zugenommen, dabei eine deutliche Zweiteilung erkennbar. Wie schon in Deutschland treten regional unterschiedliche Trends auf. 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. Nord- und Westeuropa sind 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 denjenigen Regionen, die im Vergleich bereits jetzt durch weniger Niederschlag gekennzeichnet sind, künftig trockener werden wird. Entsprechend werden diejenigen Regionen, die heute vergleichsweise mehr Niederschlag erhalten, feuchter werden. 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

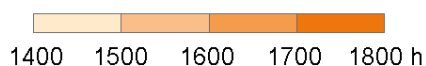
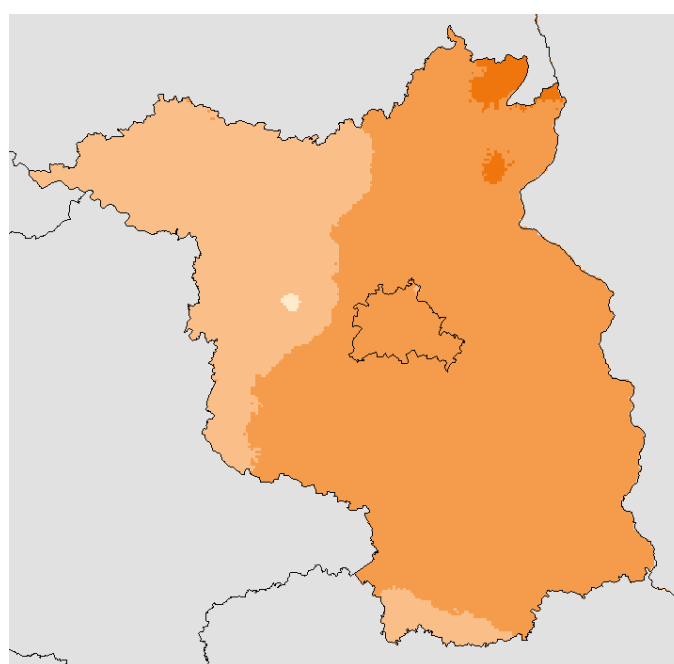
In Brandenburg scheint im Durchschnitt 268 Minuten pro Tag die Sonne, das entspricht 1634 Stunden im Jahr. Am meisten scheint die Sonne im Nordosten, am wenigsten im Westen und Südwesten.

Vergangenheit und Gegenwart

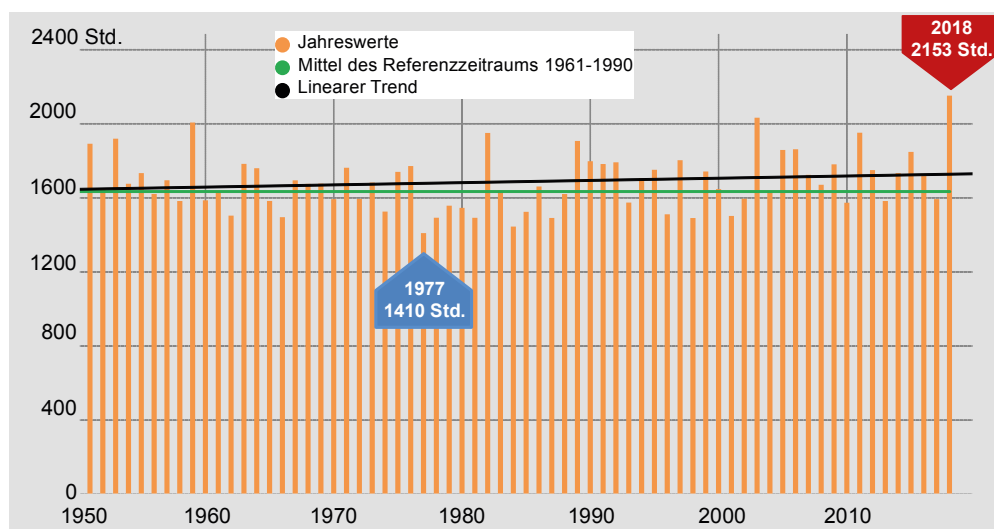
Aus der Darstellung der Jahressummen bis 2018 lassen sich grob drei Zeitabschnitte unterschiedlicher Sonnenscheindauer identifizieren: Von 1951 bis 1976 eine Phase höherer Jahreswerte, anschließend bis etwa zum Ende der 1980er-Jahre vermehrt geringere Jahressummen und dann wieder zunehmend. Weltweit gab es zwischen etwa 1950 und 1980 eine Phase geringerer 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. Die bisherigen jährlichen Gebietsmittel der Sonnenscheindauer in Brandenburg variieren zwischen 1410 Stunden (1977) und 2153 Stunden (im „Dürrejahr“ 2018). Der zweithöchste Wert liegt mit 2033 Stunden im Jahr 2003 weit darunter.

Entwicklung des Sonnenscheins seit 1951

Im Zeitraum von 1951 bis 2018 ist das Tagesmittel der Sonnenscheindauer leicht gestiegen. Dies resultiert zum größeren Teil aus mehr Sonnenschein in den Frühlings- und Wintermonaten.



▲ Jährliche Sonnenscheindauer in Brandenburg im Referenzzeitraum 1961-1990 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).



Jahressummen der Sonnenscheindauer (Gebietsmittelwerte) in Brandenburg von 1951-2018.



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.

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2021–2050 wird in Brandenburg ein Rückgang der mittleren täglichen Sonnenscheindauer um wenige Minuten projiziert. Dieser Rückgang macht sich beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** besonders im Winter und Frühjahr bemerkbar, wohingegen im Sommer und im Herbst mit keinen Änderungen zu rechnen ist. Diese Änderungen werden für Brandenburg gleichförmig projiziert.

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

KURZ NOTIERT

Beobachtung

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

Kurzfristiger Planungshorizont

- 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

Änderungen des mittleren Meeresspiegels in der Ostsee werden durch den Klimawandel und vertikale Landbewegungen verursacht. In der nördlichen Ostsee sinkt der Meeresspiegel relativ zum Land aufgrund der noch stattfindenden nacheiszeitlichen Landhebung. In der südlichen Ostsee und somit auch an der deutschen Ostseeküste dagegen addieren sich die Senkung der Landmassen und der Meeresspiegelanstieg. Für die nahe und ferne Zukunft sagen aktuelle Klimamodelle einen weiteren Anstieg voraus. Dieser wird durch das vermehrte Abschmelzen der Eisschilde in der Antarktis und auf Grönland mit großer Wahrscheinlichkeit sogar eine Beschleunigung erfahren.

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:

- dem sogenannten sterischen Anteil (Änderung des Meeresspiegels aufgrund von Temperatur- oder Salzgehaltsänderungen, die die Dichte beeinflussen),
- den dynamisch bedingten Änderungen aufgrund geänderter Meeresströmungen,
- dem verstärkten Süßwassereintrag in die Weltmeere aufgrund von Gletscherschmelze,
- dem verstärkten Süßwassereintrag durch schmelzende grönländische und/oder antarktische Eisschilde und
- dem Effekt von Landhebungen bzw. Landsenkungen.

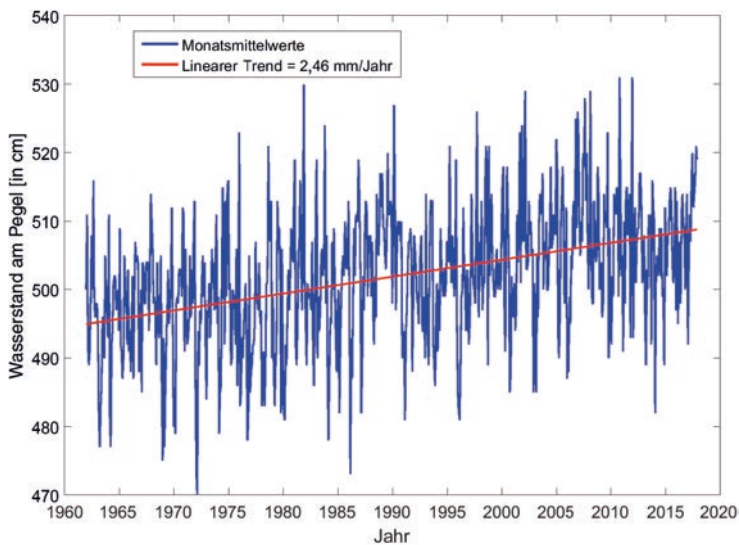
Die durch die Punkte a) bis d) hervorgerufenen Beiträge bewirken die absolute Meeresspiegeländerung. Die an den Pegeln gemessene relative Meeresspiegeländerung beinhaltet auch den Effekt der vertikalen Landbewegung.

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 Ostsee

Die Ostsee hat eines der dichtesten und langlebigsten Pegelbeobachtungsnetze weltweit und viele Stationen sind seit Ende des 19. Jahrhunderts kontinuierlich in Betrieb. Die Pegelaufzeichnungen beispielsweise in Warnemünde reichen bis 1855 zurück. Zwischen den einzelnen Pegeln der Ostsee gibt es größere, von der geographischen Lage abhängige Unterschiede in der Rate des relativen Meeresspiegelanstiegs. Nacheiszeitliche Landhebungen im Norden und -senkungen im Süden führen zu einem Gefälle von Südost nach Nordwest.

Basierend auf den langen Pegelzeitreihen geben Richter et al. (2012) hundertjährige Trends zwischen $-8,2$ mm/Jahr für den Norden der Ostsee (Bottnischer Meerbusen) und $+1,0$ – $2,0$ mm/Jahr für die südliche Ostsee an. Allerdings unterscheiden sich auch die Werte entlang der südlichen Ostseeküste: im Westen liegen sie bei $+1,5$ mm/Jahr, im Osten bei $+1,0$ mm/Jahr. Auch zeitlich ist der Trend des Meeresspiegels nicht einheitlich, da Perioden mit starkem Zuwachs und geringem Anstieg vorkommen. Allen Pegeln gemeinsam ist eine große dekadische Variabilität. Über 30 Jahre gleitende Mittel des Meeresspiegelanstiegs für Warnemünde zeigen starke Schwankungen im Meeresspiegeltrend zwischen $-0,5$ mm/Jahr und $+2,5$ mm/Jahr (Richter et al., 2012). Durch den Vergleich der 30-jährigen Mittel lässt sich die aktuelle Rate des Meeresspiegelanstiegs mit vergangenen Zeiträumen vergleichen. Die hohen Raten



◀ Monatsmittelwerte Pegel Warnemünde seit 1962.
(Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie,
Pegelbetreiber: Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund)

des relativen Meeresspiegelanstiegs, die in dieser Analyse für den Beginn des 21. Jahrhunderts auftauchen, sind demnach nicht beispielsweise in der langen Messzeitreihe: zu Beginn des 20. Jahrhunderts und in den 1950er-Jahren gab es ähnliche Raten.

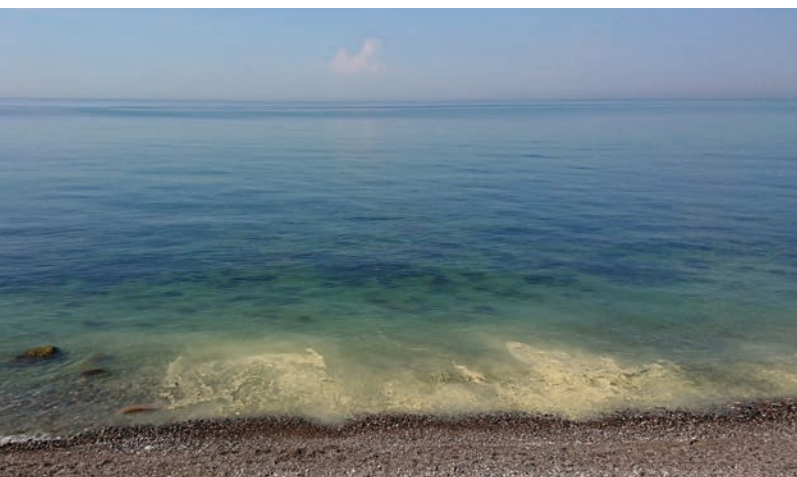
Zukünftige Änderungen des Meeresspiegels

Basierend auf den Erkenntnissen des 4. Sachstandsberichts des Weltklimarates IPCC (Meehl et al., 2007) sind im zweiten Assessment-Bericht über den Klimawandel im Ostseebecken (BACC2, 2015) regionalisierte Aussagen für die Ostseeküsten über den bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zusammengefasst. Die betrachteten Projektionen basieren zum einen auf einer moderaten Erderwärmung (A1B-Szenario, s. Seite 11), die zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von 70 cm mit einer Bandbreite von ± 30 cm führen würde. Ein alternatives Extremszenario mit höherer Erderwärmung resultiert in einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm. In den Regionalisierungen für die Ostsee wird ein Meeresspiegelanstieg erreicht, der 80% des globalen mittleren Anstiegs entspricht. Dies führt in der südlichen Ostsee zu Werten von ca. +50 cm. Im Extremszenario erhöhen sich diese Werte um weitere 50 cm.

Die größte Unsicherheit bei diesen Projektionen liegt in der Verlustrate des antarktischen Eisschildes. Im 5. Sachstandsbericht des IPCC von 2013 werden für verschiedene Treibhausgasszenarien aktualisierte Aussagen zum globalen Meeresspiegel bis Ende des 21. Jahrhunderts gemacht. Für das **Klimaschutz-Szenario** ergibt sich im globalen Mittel ein Anstieg von 26–55 cm und für das **Weiter-wie-bisher-Szenario** ein Bereich von 52–98 cm. Auch dieser Bericht weist auf die Unsicherheiten der möglichen Beiträge der Eisschilde von Grönland und der Antarktis hin. Diese sind besonders groß, da die physikalischen Prozesse, die das Abschmelzen der Eisschilde beschleunigen, zum Zeitpunkt des Berichts entweder noch unbekannt oder noch nicht mathematisch beschrieben waren. 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 auch von unten zerstört, wodurch der Kontakt zwischen Gletschern und dem unterlagernden Festgestein mehr und mehr schwindet. Dadurch können die Gletscher erheblich schneller ins Meer strömen als bisher vermutet wurde. In der Konsequenz wird dieser Prozess den Meeresspiegelanstieg derart beschleunigen, dass Werte erreicht werden, die weit größer sind als im letzten IPCC Bericht angenommen. Gegenwärtig tendieren die Angaben über den weiteren Anstieg beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** für die deutschen Küsten bis hin zu Werten von deutlich über einem Meter Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Allerdings ist weiterhin noch nicht die sich abzeichnende Möglichkeit eines Kollabierens der beiden großen Eisschilde (Antarktis und Grönland) einbezogen.

Als gesichert gilt, dass die große Wärmespeicherkapazität der Ozeane den Meeresspiegel, ungeachtet des weiteren Verlaufs der Erderwärmung, weit über das 21. Jahrhundert hinaus ansteigen lassen wird.





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 Brandenburg

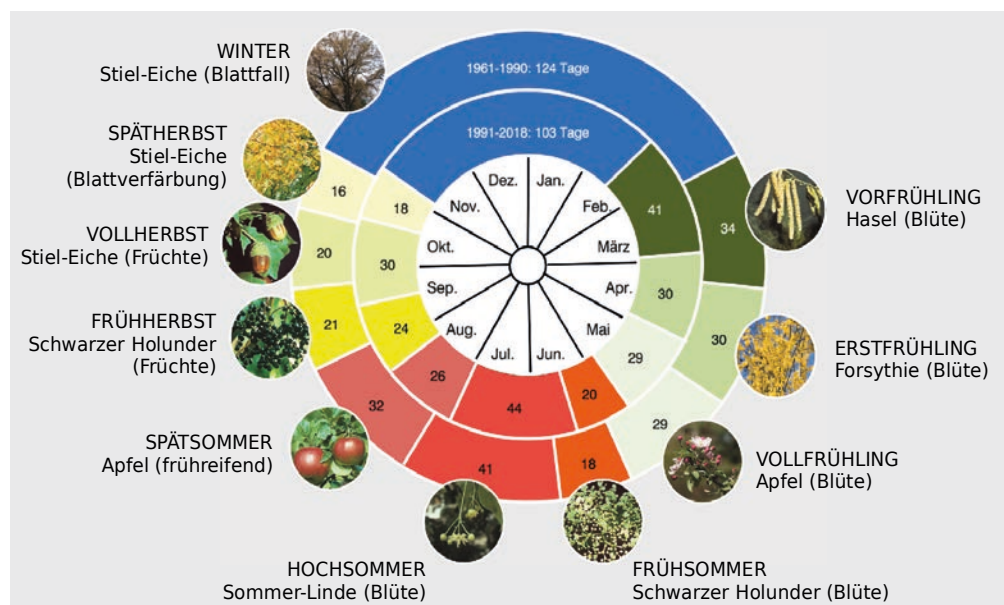
Das phänologische Jahr beginnt mit dem Vorfrühling. In der Referenzperiode 1961–1990 startete diese phänologische Jahreszeit im Mittel über Brandenburg am 4. März. Der Beginn orientiert sich an der Blüte der Gemeinen Hasel (*Corylus avellana*). Nach durchschnittlich 34 Tagen folgt mit der Blüte der Forsythie (*Forsythia × intermedia*) der Erstfrühling am 7. April und nach wiederum 30 Tagen am 7. Mai mit dem Erblühen der ersten Apfelbäume (*Malus*) der Vollfrühling mit einer mittleren Dauer von 29 Tagen. Im Vergleich der Referenzperiode 1961–1990 mit dem nachfolgenden Abschnitt 1991–2018 zeigt sich, dass der Vorfrühling nunmehr schon am 16.2. startet und sieben Tage länger geworden ist als in der Referenzperiode. Auch der Erstfrühling (28.3.) 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 5. Juni und er dauert knapp drei Wochen. In den letzten 28 Jahren hat sich

an der Dauer wenig geändert, aber die Holunderdolden zeigten sich schon um den 26. Mai blühend. Die ersten blühenden Sommer-Linden (*Tilia platyphyllos*) signalisieren den Übergang in den Hochsommer. Im Mittel der dreißig Jahre von 1961 bis 1990 begann der Hochsommer am 23. Juni. Die letzten Jahre zeigen eine Verfrühung von 8 Tagen. Der Hochsommer ist die längste der phänologischen Jahreszeiten in der Vegetationszeit mit einer brandenburgweiten Dauer von 41 Tagen, die sich auf 44 Tage verlängert hat. Wenn die ersten frühreifenden Äpfel von den Bäumen gepflückt werden können, wird der Spätsommer begrüßt. 1961 bis 1990 war das um den 3. August. In der jüngeren Vergangenheit kommen die Freunde beispielsweise des „Klarapfels“, von „James Grieve“ oder „Retina“ schon knapp eine Woche früher in den Genuss der Früchte. In den letzten 26 Jahren hat sich der Spätsommer um etwa 6 Tage verkürzt.

Während der Frühherbst mit den ersten reifen Früchten des Schwarzen Holunders in der Referenzperiode erst um den 4. September aufwartete, ist dieser Ter-

Die verschiedenen Entwicklungsphasen der Pflanzen sind phänologischen Jahreszeiten zugeordnet. Die „Phänologische Uhr“ zeigt diese Jahreszeiten und ihre sogenannten Leitphasen (Mittelwert für Brandenburg). Beim Vergleich der Zeiträume 1961–1990 und 1991–2018 wird die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten deutlich.



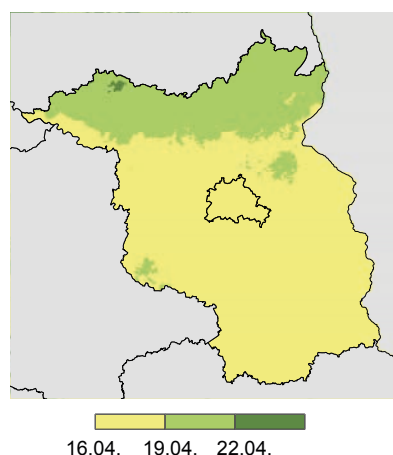


min ebenfalls deutlich nach vorn gerutscht und wird aktuell um den 24. August beobachtet. Der Frühherbst hat sich in der jüngeren Zeit um 3 Tage ausgedehnt. Der Vollherbst mit den ersten reifen Früchten der Stiel-Eiche (*Quercus robur*) schloss sich in der Referenzperiode am 25. September an. Nun liegt dieser Termin etwa 8 Tage früher und dauert im Durchschnitt 10 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 1961–1990 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 31. Oktober gewesen. Hier zeigt sich keine markante Veränderung: Lediglich 4 Tage später begann der Winter im Mittel der Jahre 1991 bis 2018. Während man in der Zeit von 1961 bis 1990 rund 124 Tage warten musste, bis der Winter zu Ende war und das neue phänologische Jahr begann, lagen in den letzten 28 Jahren im Mittel 21 Tage weniger zwischen dem Blattfall der Stiel-Eiche und dem erneuten Erblühen der Haselsträucher.

Änderungen der Phänologischen Entwicklung in Brandenburg

Die Pflanzen- und Tierwelt reagiert auf die Veränderungen der klimatischen Bedingungen mit einer



◀ Apfel, Zeigerpflanze des Vollfrühlings: Blühbeginn 2018.

Anpassung des Erreichens der Entwicklungsstufen. So ist aufgrund des gestiegenen Lufttemperaturniveaus insgesamt eine frühere und zum Teil schnellere Entwicklung zu erkennen. Die Verfrühung zieht sich durch fast alle phänologischen Jahreszeiten und kehrt sich zum Beginn des phänologischen Spätherbstes mit der Blattverfärbung der Stieleiche sogar um. Die Blätter der Stieleiche fielen in Brandenburg in der jüngeren Vergangenheit etwa 5 Tage später als in der Klimanormalperiode 1961–1990. Insgesamt kann in Brandenburg im Durchschnitt von einer etwa drei Wochen längeren Vegetationszeit ausgegangen werden. Für frostempfindliche landwirtschaftliche und gartenbauliche Kulturpflanzenarten stellt die Verfrühung des Entwicklungsbeginns keinen Gewinn, sondern in manchen Jahren sogar ein Risiko dar, denn obwohl die mittlere Lufttemperatur zunimmt, bleibt das Risiko von Spätfrösten bis in die ersten Maitage hinein erhalten und so kann der Spätfröste besonders bei sehr frühem Vegetationsbeginn beispielsweise in der Obstblüte oder im Freilandgemüsebau (bspw. Spargel) verheerend wirken.

Die Vegetationsentwicklung startet in Brandenburg gewöhnlich in den südlichen und südwestlichen Landesteilen und wandert dann mit einer Geschwindigkeit von etwa 40 km am Tag nordwärts, so dass die Regionen zwischen Prignitz und Uckermark einen um etwa eine Woche verzögerten Vegetationsbeginn zeigen. Dieser Abstand hat sich im Laufe der Zeit nicht wesentlich geändert. Potsdam zeigt auf Grund des urbanen Wärmeinseleffektes in etwa gleiche Start- und Verlaufsbedingungen der phänologischen Entwicklung wie der Süden Brandenburgs. Nach Wintern, die in der zweiten Hälfte durch den Zustrom osteuropäischer Festlandskaltluft gekennzeichnet waren, können der Bereich der Uckermark, aber auch weiter südliche angrenzende Regionen längs von Oder und Neiße eine erhebliche Verspätung der ansonsten frühen Vegetationsentwicklung gegenüber den westlichen und südwestlichen Landesteilen aufweisen. Dies ist insbesondere dann merkbar, wenn keine nennenswerte Schneedecke vorhanden war.

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 Frühling 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 für Deutschland 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 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 der Jahre 2002 und 2013, beide ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, das Hitzeereignis im August 2003 sowie die Stürme Lothar (1999), Kyrill (2007) und Friederike (2018).

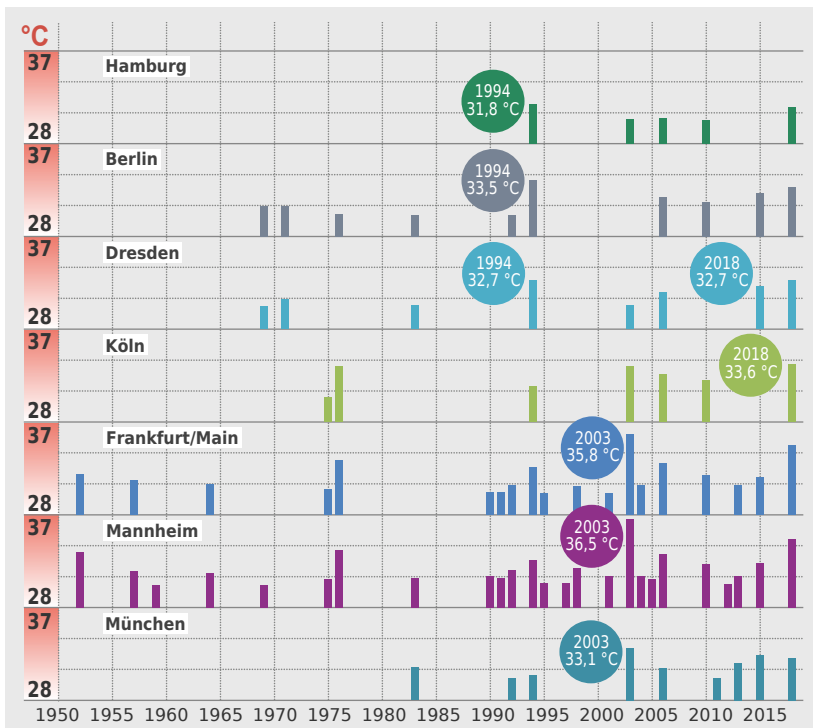
Damit steht berechtigterweise eine Frage im Raum: *Was kommt mit dem Klimawandel noch alles?* Da Extreme definitionsgemäß sehr selten auftretende Ereignisse sind, sind statistische Analysen weniger belastbar. Häufig wird ein Wiederkehrzeitraum von einmal in 100 Jahren betrachtet (das Jahrhundertereignis). 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 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 sieben 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 1950–2018 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 oben-



◀ Darstellung des Mittelwertes der wärmsten 14-tägigen Periode je Jahr für den Zeitraum 1950–2018. 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.

stehender 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 extreme Hitzewellen seit den 1990er-Jahren häufiger auftreten; in Hamburg trat zum Beispiel im Zeitraum 1950–1993 kein entsprechendes Ereignis auf, seit 1994 gab es inzwischen vier extreme Hitzewellen.

Aufgrund der festgestellten und weiter fortschreitenden Erwärmung ist es sehr wahrscheinlich, dass hohe Temperaturen und höhere Extrema künftig 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, 2010/11 und 2012/13 sprechen dagegen. Sie waren durch regional auftretende, länger andauernde starke Kälteperioden geprägt. Ursache dafür war eine anhaltende Zufuhr arktischer Kaltluft. Wie sich die Wahrscheinlichkeit für derartige Witterungssituationen vor dem Hintergrund einer zukünftig 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 herabregnet, müssen mehrere meteorologische Ursachen zeitgleich aufeinandertreffen. Lokal müssen starke Hebungsprozesse auftreten, die zu einem Ausfallen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit führen. Je wärmer eine Luftmasse ist, 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 Niederschlagsereignisse 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.

Extreme, gewittrige Kurzzeitniederschläge hoher Intensität sind in der Regel lokal begrenzt. Zu in der Fläche extrem ergiebigen Niederschlägen kommt es

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.



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 1951–2010 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.

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).

Zahlreiche offene Fragen gibt es hingegen im Zusammenhang mit starken, lokal begrenzten und nur kurz andauernden Niederschlägen. 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 jeweils betrachteten Dauerstufe sowie von Lage und Größe des untersuchten 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

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 im Trend eine leichte Zunahme 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 urbane Sturzfluten werden seitens der wasserwirtschaftlichen Anwender derzeit verstärkt Handlungsempfehlungen herausgebracht. Dennoch muss der diagnostizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf zum Risikomanagement – im Hinblick auf die zwischen der Siedlungsentwässerung (15 Minuten als relevanteste Dauerstufe) und dem Umgang mit Fluss-Hochwassern (Dauerstufe von 12 Stunden und mehr) bestehende Lücke – weiter abgebaut werden.

Die mit dem Klimawandel verbundene Zunahme der Lufttemperatur führt zu einer Erhöhung des Potenzials für extreme Niederschlagsereignisse. Dieser Prozess wird dadurch weiter verstärkt, dass der Zusammen-

hang 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 vergleich-

baren 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 in der Atmosphäre. Diese sind aktueller Forschungsgegenstand.

Analysen der höchsten Tagesniederschlagssummen 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. Die Entwicklung von Regionalmodellen, in denen konvektive Prozesse berücksichtigt werden, ist 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 von Hagelereignissen 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.

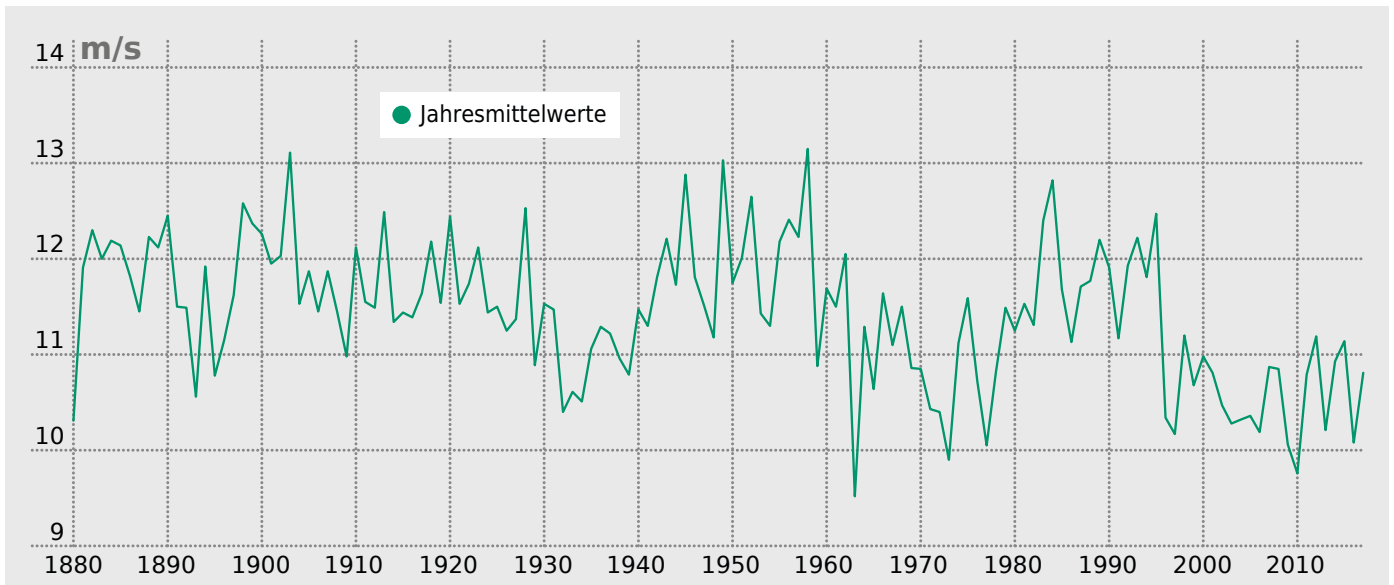
Die räumliche Auflösung der aktuell genutzten regionalen Klimamodelle ist nicht ausreichend, um Hagel direkt zu modellieren. Hagel wird nur grob über Parametrisierungen abgeschätzt. Somit sind keine Aussagen zu zukünftigen Tendenzen möglich. Analysen des Konvektionspotentials zeigen für den kurzfristigen 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 Stürme oder Orkane, die besonders von Interesse sind, sind seltene Ereignisse und damit nur mit möglichst langen Zeitreihen statistisch zu bewerten.

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





▲ Jahresmittel des geostrophischen Windes. Abgebildet ist der Zeitraum 1880 bis 2017.

Eine Möglichkeit, trotzdem Aussagen über die Entwicklung der Windgeschwindigkeit und das Auftreten von Stürmen in den letzten etwa 100 Jahren abzuleiten, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes. Dieser beruht auf Luftdruckdifferenzen und ist eng mit dem „wahren“ Wind gekoppelt. Die Messung des Luftdrucks ist bereits seit dem Ende des 18. Jahrhunderts mit hoher Qualität möglich. Wird der geostrophische Wind betrachtet, der aus den Luftdruckdaten von Hamburg, Emden und List auf Sylt für die Deutsche Bucht berechnet wurde, zeigen sich Abschnitte mit einer Dauer von zehn Jahren bis wenigen Jahrzehnten mit höherer oder niedrigerer Windgeschwindigkeit (multidekadische Schwankungen). Für die gesamte Zeitreihe ist nur ein schwacher Trend hin zu einer Abnahme der Windgeschwindigkeit erkennbar, der jedoch deutlich kleiner ist als die Schwankungen von Jahr zu Jahr. Er ist somit statistisch nicht signifikant.

Ein ähnliches Bild liefern die Ergebnisse von Klimamodellprojektionen. Auch hier zeigen sich für die Vergangenheit und für die Zukunft die multidekadischen Schwankungen ohne signifikanten Langzeitrend. Dies gilt ebenfalls für Stürme, bei denen für die Zukunft keine deutliche Änderung erkennbar ist.

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 detektiert. 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 pro 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 in der Erdatmosphäre 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, 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 sich mit der vermehrten 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 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 dauerhafte Aktivitäten notwendig. So können mit Hilfe von 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 stellt, abgesehen von den Wissenschaftlern, alle Akteure

- im Hinblick auf die Klärung der Fragen nach Nutzen und Schaden der Auswirkungen - vor eine besondere Herausforderung, die es zu bewältigen gilt. Beide Fragen sind nicht durch einzelne Akteure der Wissenschaft zu beantworten. Ferner müssen Handlungsoptionen auf regionaler und globaler Ebene als Gemeinschaftsaufgabe vieler Wissenschaftsbereiche interdisziplinär entwickelt 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 ist, welche Position Wissenschaftler und Forschungsinstitutionen künftig in der Gesellschaft einnehmen werden. 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? Zudem gilt es, die Fragen zu beantworten, ob die vorhandenen institutionellen Strukturen der Klimaforschung sinnvoll sind und ob die einzelnen Themenfelder ausreichend miteinander vernetzt sind.



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

Bei einer 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, 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 $\geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) 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

Mittels Vorhersagen werden aus dem vergangenen und aktuellen Zustand des Klimasystems Aussagen über dessen zukünftigen Zustand abgeleitet. 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 zu einer Dekade.

Perzentil

Perzentile oder 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 = $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 2021–2050, der langfristige das Zeitfenster der Jahre 2071–2100. Auf diese Zeiträume bezogene Aussagen erfolgen immer in Relation zur Bezugsperiode 1971–2000.

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 1961–1990 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.

Impressum

Die Erstellung des Klimareports Brandenburg erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Wetterdienst und dem Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg.

Autoren

Falk Böttcher, Dr. Thomas Deutschländer, Meike Dorfner*, Andreas Friedrich, Karsten Friedrich, Dr. Kristina Fröhlich, Dr. Barbara Früh, Dr. Frank Kreienkamp, Carsten Linke*, Dr. Gabriele Malitz, Dr. Monika Rauthe, Wolfgang Riecke, Thomas Schmidt, Dr. Andreas Walter

* Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg

Beitrag zum Meeresspiegel
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Str. 78
20359 Hamburg
www.bsh.de
Dr. Birgit Klein (Birgit.Klein@bsh.de)

Redaktion

Dr. Frank Kreienkamp

Online-Ausgabe

Dieses Heft liegt als digitales Dokument auf unserer Internetseite www.dwd.de/klimareport-bb. 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 (2019): Klimareport Brandenburg.
1. Auflage, Deutscher Wetterdienst,
Offenbach am Main, Deutschland, 44 Seiten.

Gestaltung und Satz

Elke Roßkamp (Deutscher Wetterdienst)

Bildnachweis

DWD: 2, 7, 13o (Hans-Richard Henkes), 17, 25, 29, 36/37 (Johann Siemens)

Fabian Schellhorn: 3

Creative Collection: 1o, 6m, 12/13u, 16, 24l, 31

Panthermedia.net: 1m (Hans Eder), 4 (Dario Sabljak), 6l (Clemens Humeniuk), 6r (Wolfgang Filser), 10u (Orlando Rosu), 11 (Hendrik Fuchs), 14r (Daniel Loretto), 20u (Sonja Büchel), 22 (MP2), 23 (bestshot70), 24ml (Oliver C. Bellido), 24mr (Gabi Faltenbacher), 24r (Tyler Olson), 32 (Bernd Leitner), 34 (pekada), 35 (Volker Werner), 38 (James Steidl), 40 (Rilo Naumann)

MEV-Verlag: 1u, 14l

Fotolia.com: 5 (Gina Sanders), 8 (AndreasG), 10o (Paul Paladin), 15 (gradt), 20o (Oleg Rosental), 27 (Mykola Velychko)

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

ISBN 978-3-88148-518-0



Deutscher Wetterdienst

Abt. Klima- und Umweltberatung
Regionales Klimabüro Potsdam
Güterfelder Damm 87-91
14532 Stahnsdorf
Tel: +49 (0) 69 / 8062 - 5444
E-Mail: klima.potsdam@dwd.de



Landesamt für Umwelt

Landesamt für Umwelt Brandenburg

Referat Luftqualität, Nachhaltigkeit (T14)
Seeburger Chaussee 2
14476 Potsdam OT Groß Glienicke

<http://www.lfu.brandenburg.de>

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

