



Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

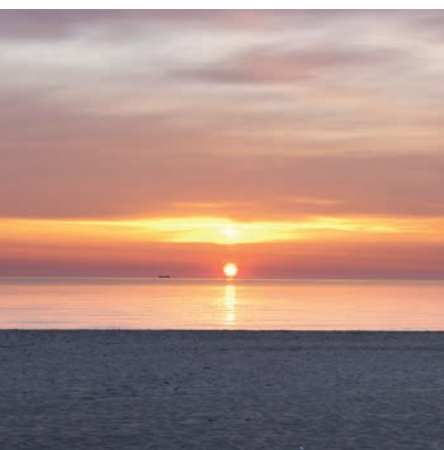


Klimareport Niedersachsen

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



Inhalt



Vorwort.....	2
Grußwort von Olaf Lies.....	3
Immer in Veränderung: Wetter und Klima	4
Klima, Klimavariabilität und Extreme.....	6
Klimamodelle.....	8
Klimawandel und Klimaprojektionen.....	10
Das Klima in Niedersachsen heute und morgen	12
Klimaparameter und ihre Veränderungen	
Temperatur	14
Niederschlag	18
Sonnenschein.....	22
Wind.....	24
Verdunstung	26
Klimatische Wasserbilanz	28
Phänologie	30
Meeresspiegel.....	32
Extremereignisse	36
Stadtklima	42
Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima	44
Begriffskompass Klima.....	46
Impressum	48

Vorwort



Liebe Leserinnen und Leser,

der vorliegende Klimareport Niedersachsen stellt das bekannte Wissen über das Klima der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in kurzer und prägnanter Form zusammen. Es soll Ihnen als Leser die Möglichkeit geben, sich einen fundierten Überblick zu verschaffen.

In Niedersachsen traten sieben der zehn wärmsten Jahre seit Beginn der systematischen Messungen im Jahr 1881 im 21. Jahrhundert auf. 2014 war mit einem Jahresmittel der Lufttemperatur von 10,8 °C das wärmste Jahr, ein Plus von 2,2 Grad im Vergleich mit dem Referenzzeitraum 1961–1990. Das vergangene Jahr 2017 rangiert an 11. Stelle in der Rangfolge der wärmsten Jahre. Diese Werte stellen dabei sehr wahrscheinlich nur die bisherigen Maxima einer 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 nahezu jeden von uns eine große Herausforderung dar. Sei es zum Beispiel durch vermehrt auftretende Tage mit starker Wärmebelastung oder durch eine ansteigende Häufigkeit von extremen Witterungsereignissen. Niedersachsen mit seiner Meeresküste ist einerseits betroffen vom erwarteten Meeresspiegelanstieg, andererseits als Agrarland von den wahrscheinlichen Veränderungen im Wasserhaushalt. Obgleich die Anpassung an den Klimawandel eine langfristige Aufgabe darstellt, ist in Anbetracht der Risiken, die mit einem weiteren Temperaturanstieg einhergehen, unverzügliches Handeln erforderlich.

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

*Der **Klimareport Niedersachsen** stellt eine wesentliche Wissensgrundlage für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel dar.*

Dr. Paul Becker

Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes

Grußwort von Olaf Lies zum Klimareport Niedersachsen



Liebe Leserin, lieber Leser,

der Klimawandel ist auch in Niedersachsen längst Realität. Die durchschnittlichen Temperaturen sind seit Beginn der Industrialisierung um ca. 1,5 Grad angestiegen. Auch bei den Niederschlägen steigt die Intensität, vor allem aber verändert sich die jahreszeitliche Verteilung. Projektionen zufolge werden sich diese Trends in Zukunft weiter verstärken. Extremwetterereignisse wie Hitzewellen oder auch Starkregen werden aller Voraussicht nach zunehmen.

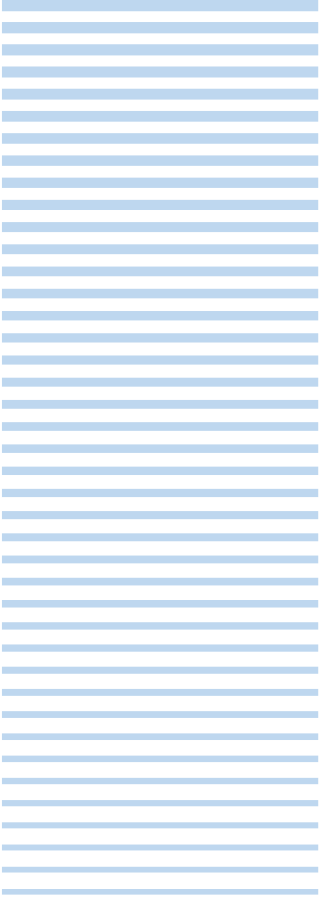
Das bleibt nicht ohne Folgen – für unsere Ökosysteme, aber auch für Wirtschaft und Gesellschaft. Der Klimawandel beeinflusst dabei nicht nur die Lebensgrundlagen der heutigen, sondern beschränkt auch die Entwicklungschancen zukünftiger Generationen.

Klimaänderungen zeigen sich bisher meist noch schleichend. Die Folgen sind häufig erst mittel- bis langfristig spürbar. Umso wichtiger ist eine gute Datengrundlage, wie sie der vorliegende Klimareport liefert. Der Bericht beschreibt auf der Basis aktuellster Berechnungen detailliert das Klimageschehen in Niedersachsen. Nur so können Entwicklungen frühzeitig erkannt und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel rechtzeitig getroffen werden. Die Berechnungen sensibilisieren gleichzeitig für die Notwendigkeit ehrgeiziger Klimaschutzpolitik: Um die Folgen des Klimawandels insgesamt noch in einem beherrschbaren Rahmen zu halten, müssen die globalen Treibhausgasemissionen so weit wie möglich reduziert und langfristig vollständig vermieden werden.

Auch die Klimapolitik in Niedersachsen verfolgt deshalb zwei Ziele: Mit einem Landesklimagesetz wird Niedersachsen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten und eigene Klimaschutzziele für Niedersachsen festlegen. Gleichzeitig müssen wir uns heute schon auf den nicht mehr abwendbaren Klimawandel einstellen und notwendige Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen treffen. Unter anderem hierfür wollen wir ein Klimakompetenzzentrum einrichten, um das Klimawissen in Niedersachsen zu bündeln und damit die Klimakompetenz des Landes zu stärken.

Olaf Lies

Niedersächsischer Minister für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz



Immer in Veränderung: 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 zukünftige Entwicklungen in Niedersachsen.



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

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

Wassers sorgt für relativ milde Winter und mäßig warme Sommer.

Der Deutsche Wetterdienst beobachtet an vielen Orten das Wetter, teilweise seit mehr als 100 Jahren. Registriert werden Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenschein und vieles mehr. Die Beobachtungswerte variieren von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr. Neben diesen Variationen können durch die Aufzeichnungen der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes auch langfristige Änderungen erkannt werden. So ist es in Niedersachsen seit 1881 etwa 1,5 Grad wärmer geworden. Gleichzeitig nahm die Anzahl der kalten und sehr kalten Tage ab und die der warmen und sehr warmen Tage zu.

Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 zugenommen. Dieses gilt insbesondere für den Herbst und den Winter. In der Jahressumme waren es 2017 knapp 15 Prozent mehr als noch vor 137 Jahren. Die Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter Niederschlag je Quadratmeter stieg seit 1951 bis heute um gut 2 Tage an.

Erfasst wird des Weiteren die Höhe des Meeresspiegels. Auch hier ist eine Änderung zu beobachten. Der Meeresspiegel in der Deutschen Bucht ist in den letzten 100 Jahren um etwa 25 cm gestiegen.

Hat der Mensch einen Einfluss auf das Klima?

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

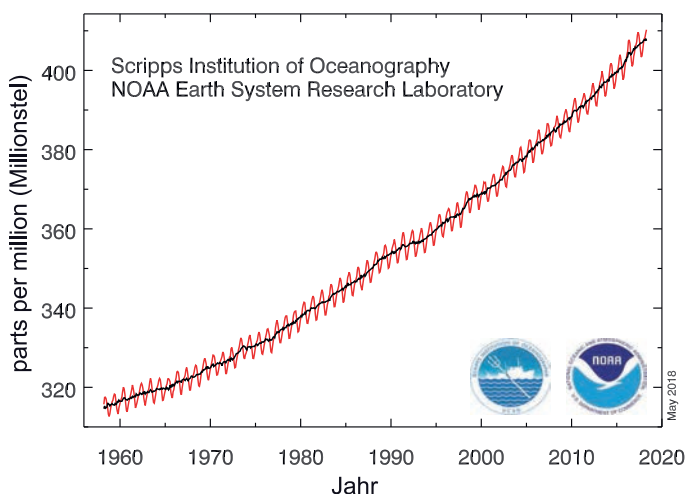
Mit Hilfe von Klimamodellen haben die Wissenschaftler die Auswirkungen auf das globale und regionale Klima auf der Basis von Szenarien untersucht. Für Niedersachsen wird je nach gewähltem Szenario eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 1 °C bis hin zu mehr als 4 °C in den nächsten 100 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 3 bis 4 °C zu erwarten. Damit einhergehend nimmt die Anzahl



der kalten und sehr kalten Tage noch weiter ab, während die Zahl der warmen und sehr warmen Tage deutlich zunimmt.

Verbunden mit der Temperaturzunahme werden sehr wahrscheinlich die jährlichen Niederschlagsmengen weiter zunehmen. 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

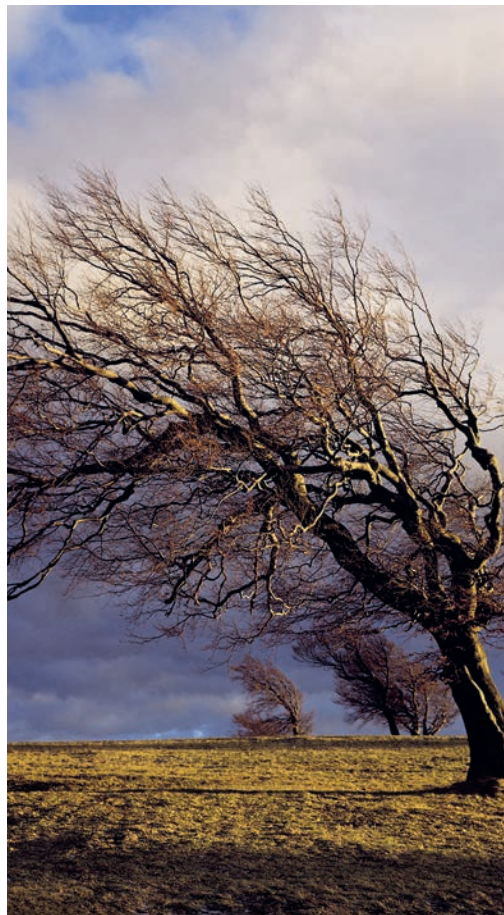
Wetter, Witterung, Klima: Unter diesen drei Begriffen versteht die Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschiedenen langen Zeiträumen ablaufen. Das Wetter beschreibt den kurzfristigen Zustand der Atmosphäre, die Witterung eine Phase von Wochen bis mehreren Monaten und das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

Was ist Klima?

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

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

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





◀ Messfeld des Deutschen Wetterdienstes in Braunlage.

Klimavariabilität

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

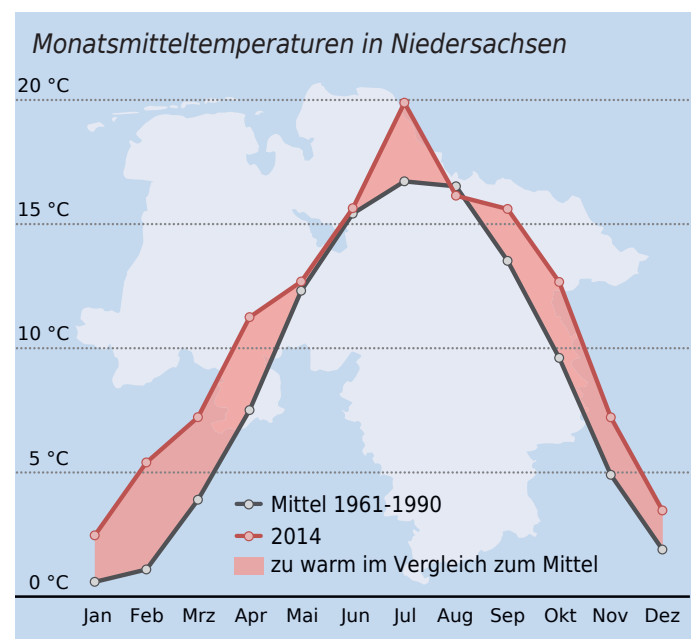
Die beschriebene Variabilität zeigt sich nicht nur bei der Temperatur. Sie gilt für alle meteorologischen Elemente (z. B. Niederschlag und Sonnenscheindauer). Auch ein sich durch den Klimawandel erwärmendes Klima weist diese Variabilität auf: Es wird nicht jedes Jahr etwas wärmer sein als das vorhergehende.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

Klimatrend

Von einem Klimatrend sprechen wir, wenn innerhalb einiger Jahrzehnte verstärkt eine Veränderung, z. B. 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

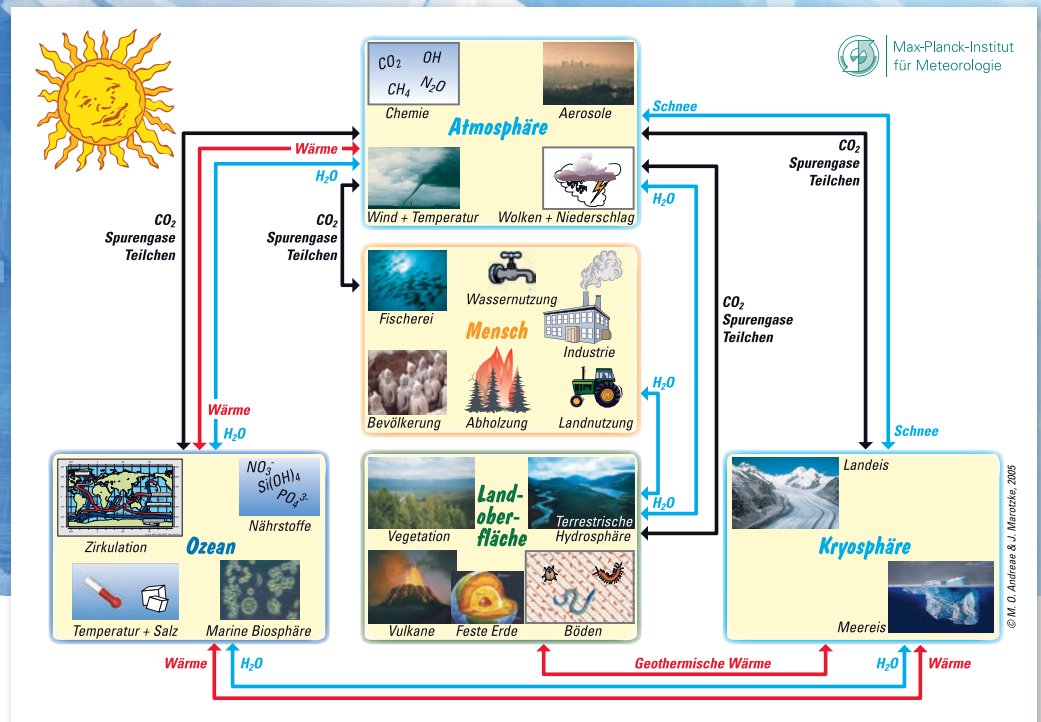
Extremereignisse sind sehr seltene Ereignisse, die stark von den mittleren Bedingungen abweichen.



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

Ein Ereignis kann aus vielfältigen Gründen zu einem Extremereignis werden. Es kann ein auf einen Tag bezogenes Ereignis sein, wie eine Orkanböe, ein längerfristiges Ereignis, wie eine langanhaltende Trockenheit, oder ein für den Zeitpunkt im Jahr sehr untypisches Ereignis. So ist 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 auch zum Klima der Zukunft gehören. Die Analyse der Intensität und der Häufigkeit des Auftretens solcher extremer Wetterereignisse ist ein wesentlicher Schwerpunkt in der aktuellen Klimaforschung.



▲ In einem Klimamodell werden die wesentlichen Prozesse und Wechselwirkungen in der Natur mit Nährungsformeln beschrieben. Einige der Wechselwirkungen 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 ist dies durch extrem hohen Aufwand an Computerrechenzeit bislang nicht umsetzbar.

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. Die regionalen Modelle werden an den seitlichen Rändern von den globalen Modellen gesteuert.

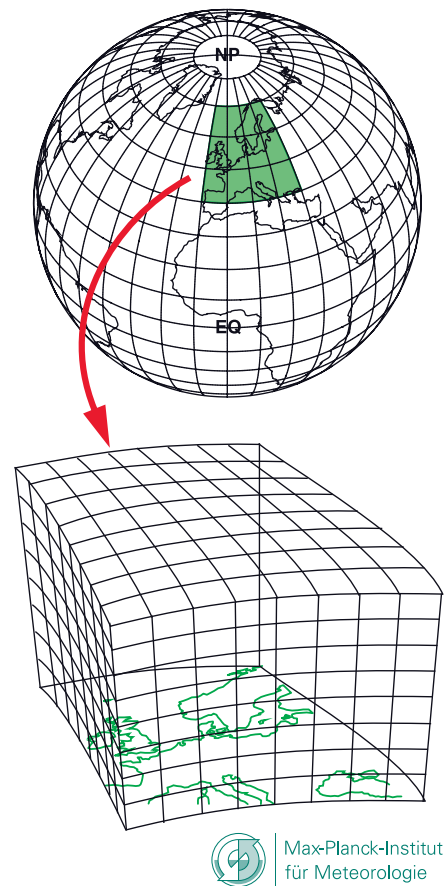
Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Gitterweite von 50 und 12,5 km vor. Das bedeutet zum Beispiel, dass die simulierte Temperatur nur alle 12,5 km einen anderen Wert annehmen kann.

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

Viele Modelle, viele Ergebnisse

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

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

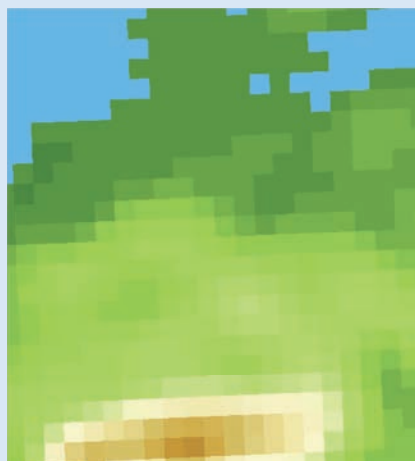


▲ Beispielhafte Darstellung von Modellgitterzellen. Sie unterteilen die Atmosphäre nicht nur in der Horizontalen, sondern bilden auch in der Vertikalen eine Reihe von Schichten. (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie)

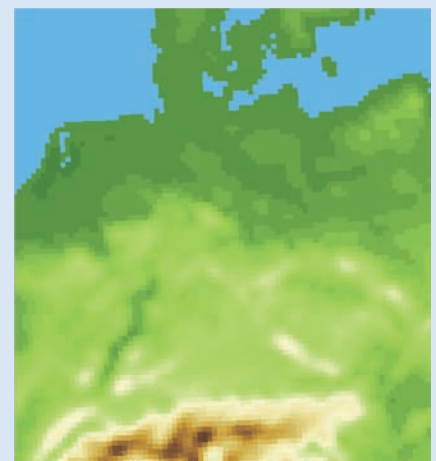
Je engmaschiger, desto genauer – hier am Beispiel des Höhenreliefs von Deutschland in unterschiedlichen Modellgitterauflösungen. Die Auswirkungen der Beschreibung einer Region auf Basis eines wesentlich dichteren Gitternetzes sind deutlich erkennbar. ▼



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



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



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



Klimawandel und Klimaprojektionen

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

Klimafaktor Mensch

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

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

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

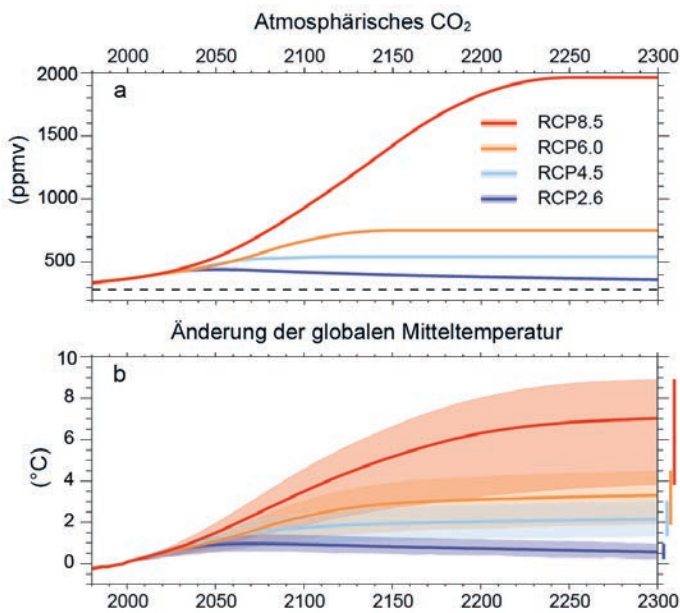
Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einflussnahme. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft Szenarien genannt. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl denkbarer Szenarien entwickelt, die einen mehr oder minder starken Einfluss des Menschen auf das Klima beschreiben. In Vorbereitung auf den 5. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurden vier repräsentative Szenarien oder „Konzentrationspfade“ (engl. *Representative Concentration Pathways* – RCPs) ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Szenarien, die den Verlauf von Treibhausgaskonzentrationen und den Einfluss von 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 können 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 (3,0 W/m²) wird vor dem Jahr 2050 erreicht. Von da an sinkt er kontinuierlich auf den Wert 2,6 W/m² im Jahr 2100. Hierzu ist ein Wandel hin zu einer Welt notwendig, deren Energieversorgung nicht mehr auf der Verbrennung von fossilen Kohlenstoffvorräten basiert. 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 im Folgenden ein weiteres Szenario 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 über 50 Klimaprojektionen verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen. Um den Unterschied zwischen dem heutigen und einem zukünftigen Zustand zu berechnen, werden jeweils zwei 30-Jahres-Zeiträume genutzt. Für jeden Zeitraum wird ein mittlerer Zustand berechnet. Als Bezugszeitraum für das beobachtete Klima dienen die Jahre 1971 bis 2000 aus den Modellen. Für die Zukunft werden zwei Zeiträume analysiert, sie werden im Weiteren kurzfristiger und langfristiger Planungshorizont genannt. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt den mittleren Zustand der Jahre 2021 bis 2050. Die Jahre 2071 bis 2100 werden als Grundlage für den langfristigen Planungshorizont genutzt. Die zukünftigen Änderungen werden als ein mittlerer Wert und als Bandbreite angegeben. Beschrieben wird die Bandbreite über den geringsten und höchsten Änderungswert aus den vorhandenen Datensätzen.





Das Klima in Niedersachsen

Im geografischen Gebiet der Bundesrepublik finden wir unterschiedliche Klimaverhältnisse vor. Diese werden einerseits bestimmt durch den Übergang vom maritimen zum kontinentalen Einfluss und andererseits durch die naturräumlichen Strukturen, die im Wesentlichen durch das Relief geprägt sind. Der nordwestliche Teil Deutschlands bis zu den Mittelgebirgen stellt eine Klimaregion dar, geprägt von der Meeresnähe und der niedrigen Geländehöhe.



Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für Deutschland wurden für zwölf klimatisch unterschiedliche Modellregionen bestimmt. Der größte Teil von Niedersachsen gehört zur Region „Nordwestdeutsches Tiefland“. Das südliche Niedersachsen ist Teil der Region „Zentrale Mittelgebirge und Harz“, ein kleiner Bereich im Nordosten gehört zur Region „Nordostdeutsches Tiefland“.

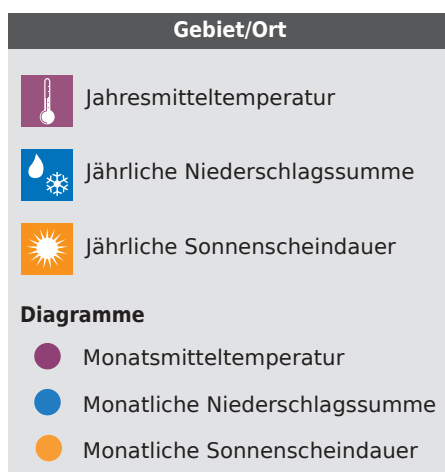
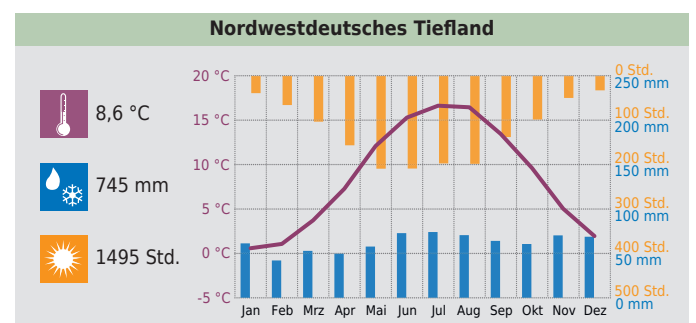
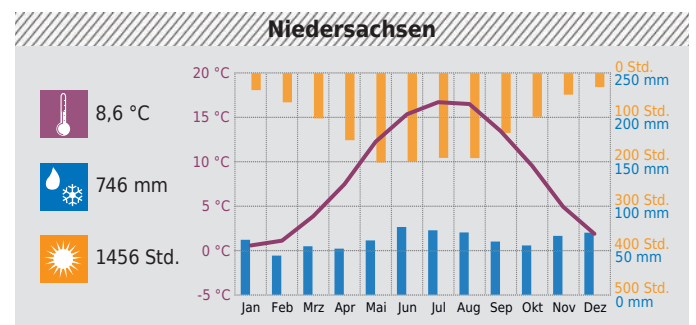
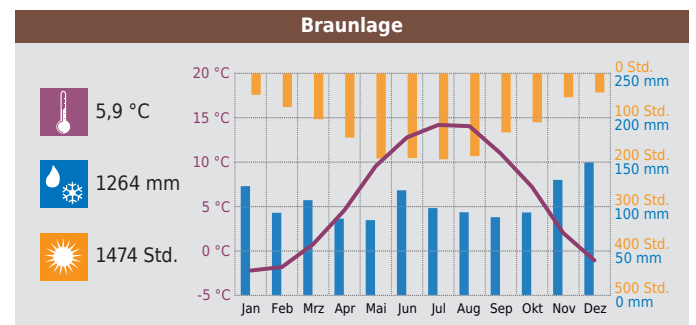
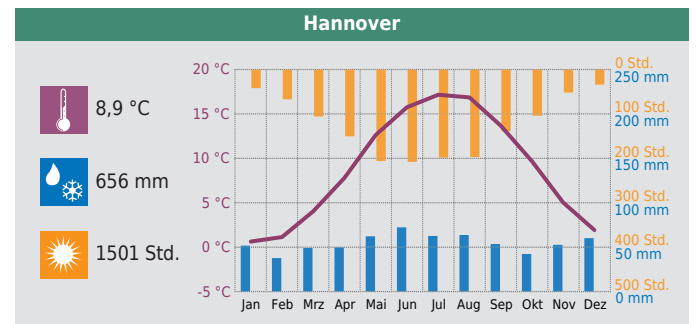
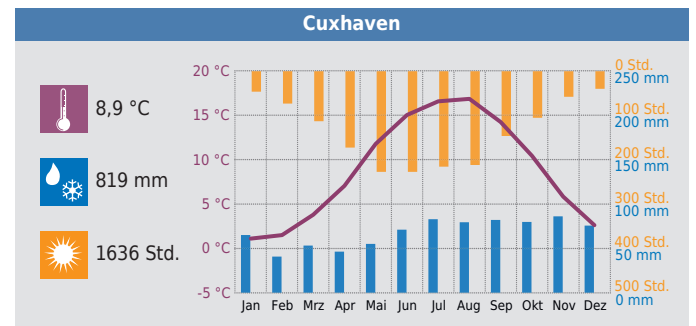
Die Klimaverhältnisse in einer Region lassen sich durch Flächenmittelwerte charakterisieren, d. h. die Klimaparameter mehrerer Orte innerhalb dieses Gebietes werden flächig interpoliert. Die Klimadiagramme zeigen die Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der international gültigen Referenzperiode 1961–1990. Die Unterschiede in den Flächenmitteln dieser Parameter zwischen den Modellregionen einerseits und Niedersachsen andererseits sind nur gering.



Nichtsdestotrotz kann das Klima einzelner Orte vom Flächenmittel abweichen. Dies zeigen exemplarisch die Klimadiagramme der Orte Cuxhaven, Hannover und Braunlage. Während Cuxhaven aufgrund seiner Lage direkt an der Nordseeküste milde Winter und mäßig warme Hochsommer aufweist, macht sich an der im Westharz gelegenen Station Braunlage (607 m ü. NN) der Einfluss der Höhenlage durch niedrige Winter- und Sommertemperaturen bemerkbar. Auch die jährliche Niederschlagssumme fällt im Bergland deutlich höher als im Osten Niedersachsens aus. Hannover bildet die mittleren Verhältnisse gut ab.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Veränderungen des Klimas in Niedersachsen in der Vergangenheit und mögliche zukünftige Entwicklungen für die Modellregion „Nordwestdeutsches Tiefland“ aufgezeigt. Die Ergebnisse für die Modellregion „Zentrale Mittelgebirge und Harz“ unterscheiden sich davon kaum.

heute und morgen





Temperatur

Die Jahresdurchschnittstemperatur in Niedersachsen beträgt 8,6 °C für die Referenzperiode 1961–1990. Höhere Durchschnittstemperaturen sind direkt an der See anzutreffen und im Süden des Landes im Flachland – mit höheren Werten im Westen als im Osten wegen des abnehmenden maritimen Einflusses. Kühlere Bedingungen herrschen im Bergland und insbesondere in den Hochlagen der Mittelgebirge.

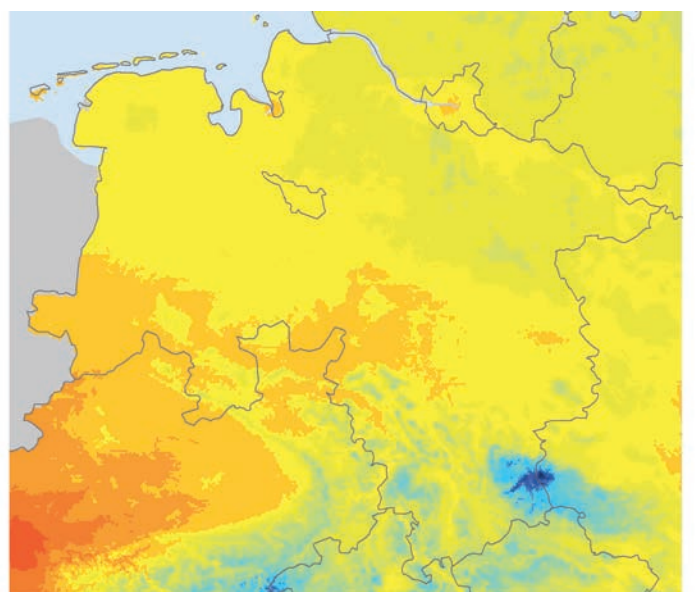
Veränderungen der Lufttemperatur seit 1881

In Niedersachsen ist das Jahresmittel der Temperatur seit 1881 bis heute um 1,5 °C gestiegen. Der vieljährige Mittelwert im aktuellen 30-Jahreszeitraum 1981–2010 beträgt 9,3 °C und liegt damit deutlich über dem Wert 8,6 °C der Referenzperiode 1961–1990.

Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis 1910 lag die Temperatur bei etwa 8,2 °C. Im Zeitraum 1910 bis 1950 und insbesondere im Zeitraum seit Mitte der 1980er-Jahre war ein verstärkter Anstieg der Temperatur zu beobachten, während sie dazwischen weitestgehend auf demselben Niveau verharrte. 2014 war mit einer Mitteltemperatur von 10,8 °C das bisher wärmste Jahr in Niedersachsen.

Kenntage wie Sommertage oder Frosttage vermitteln Temperaturverhältnisse vielmals anschaulicher. Daher wird die Entwicklung dieser beiden Kenntage seit 1951 an dieser Stelle näher betrachtet.

Ein Sommertag liegt dann vor, wenn die höchste Temperatur des Tages 25 °C erreicht bzw. überschreitet. Die Anzahl der Sommertage als 30-jähriges Flächenmittel stieg in Niedersachsen von 22,3 Tagen in der Referenzperiode 1961–1990 auf 29,2 Tage im Zeitraum 1981–2010, also um rund 7 Tage. Deutschlandweit liegen die Vergleichswerte bei 27,3 bzw. 34,8 Tagen, was einem Anstieg von 7,5 Tagen entspricht. Die etwas geringere Anzahl in Niedersachsen ist der nördlichen Lage geschuldet. Der lineare Trend der Sommertage 1951 bis heute zeigt für das Gebiet Niedersachsen ein Plus von rund 16 zusätzlichen Tagen auf. Die höchste Anzahl wurde 2006 mit 51,2 Tagen registriert.

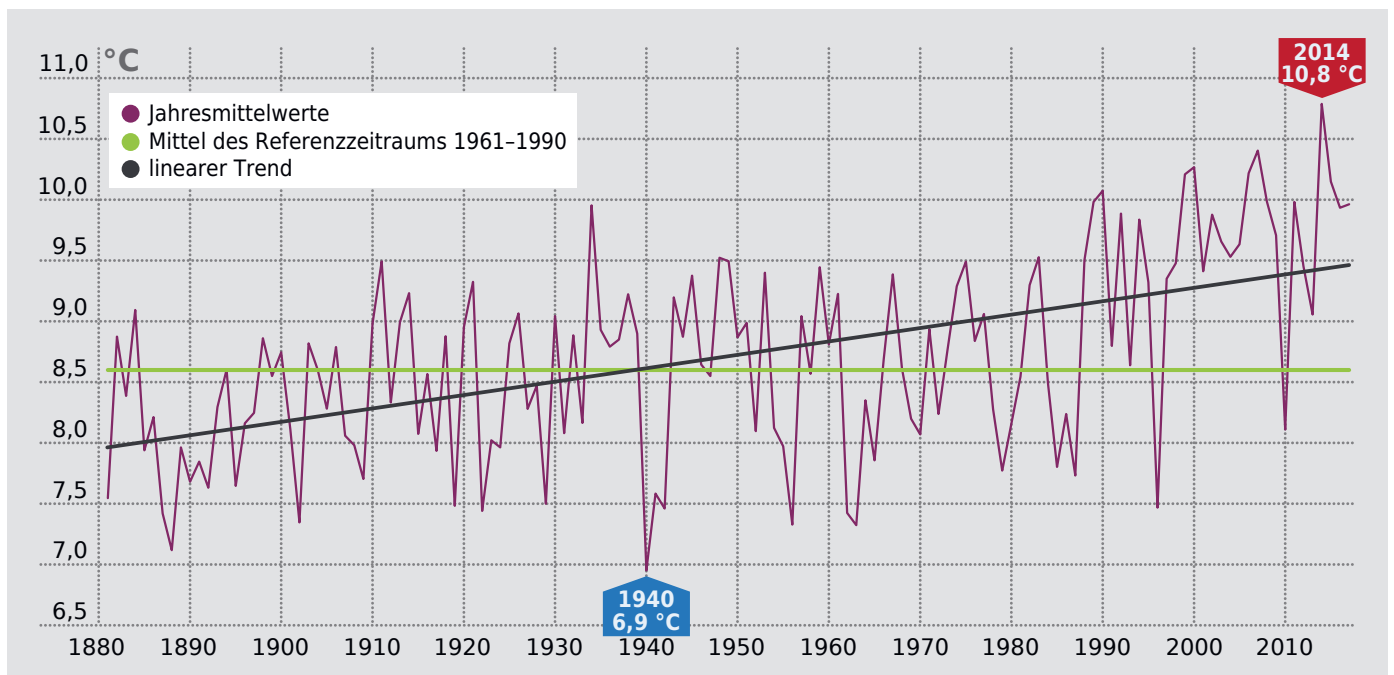


3,6 4,0 4,4 4,8 5,2 5,6 6,0 6,4 6,8 7,2 7,6 8,0 8,4 8,8 9,2 9,6 10,0 10,4 °C

▲ Jahresmitteltemperatur in Niedersachsen im Zeitraum 1981–2010 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).

Die zwölf wärmsten Jahre in

2014	10,8 °C
2007	10,4 °C
2000	10,3 °C
2006	10,2 °C
1999	10,2 °C
2015	10,2 °C
1990	10,1 °C
2008	10,0 °C
2011	10,0 °C
1989	10,0 °C
2017	10,0 °C
1934	10,0 °C

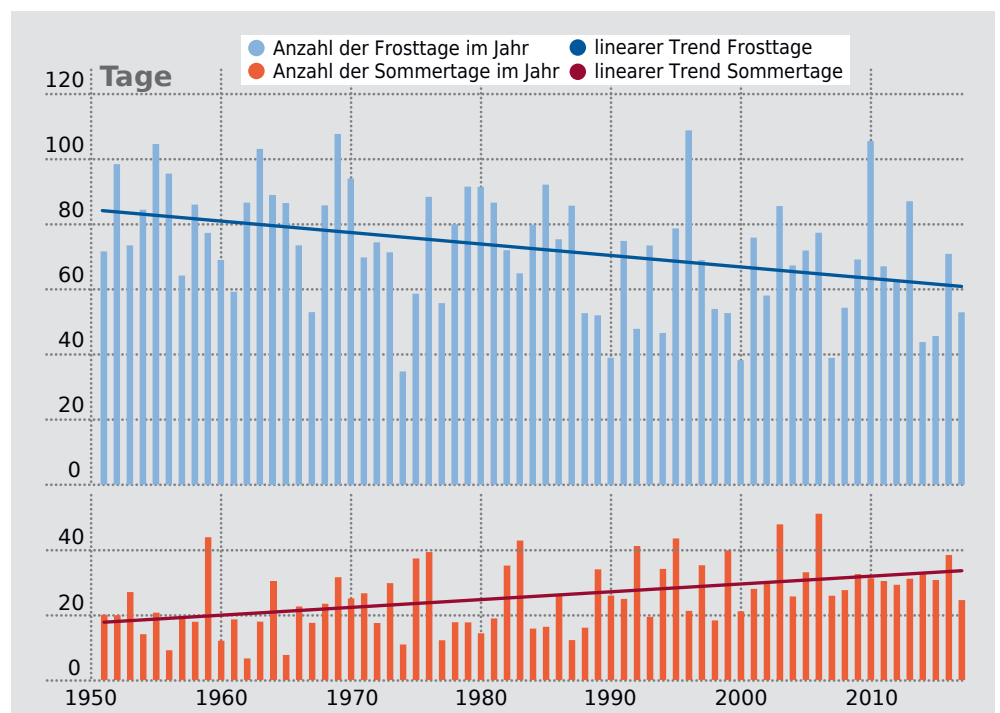


▲ Es ist wärmer geworden in Niedersachsen: Jahresmittel der Temperatur (Gebietsmittelwerte) von 1881-2017.

Die ausgleichend auf die Temperaturen wirkende Meeresnähe zeigt sich auch in der geringeren Anzahl von Frosttagen in Niedersachsen im Vergleich zu Deutschland. Ein Tag wird zu einem Frosttag, wenn die tägliche Tiefsttemperatur 0 °C unterschreitet. So weist Niedersachsen für die Referenzperiode 1961-1990 im Mittel 75 Frosttage im Jahr auf,

Deutschland dagegen 91. Die Anzahl der Frosttage sinkt im Bundesland Niedersachsen im Zeitraum 1981-2010 mit 7 Tagen stärker als mit 6 Tagen deutschlandweit. Im Zeitraum 1951 bis heute ist für Niedersachsen im Trend eine Abnahme von 23 Frosttagen festzustellen.

Die Zahl der Sommertage nimmt in ► Niedersachsen zu, Frosttage werden seltener. Die Darstellung zeigt die Jahreswerte von 1951-2017 sowie den entsprechenden linearen Trend.



Niedersachsen seit 1881





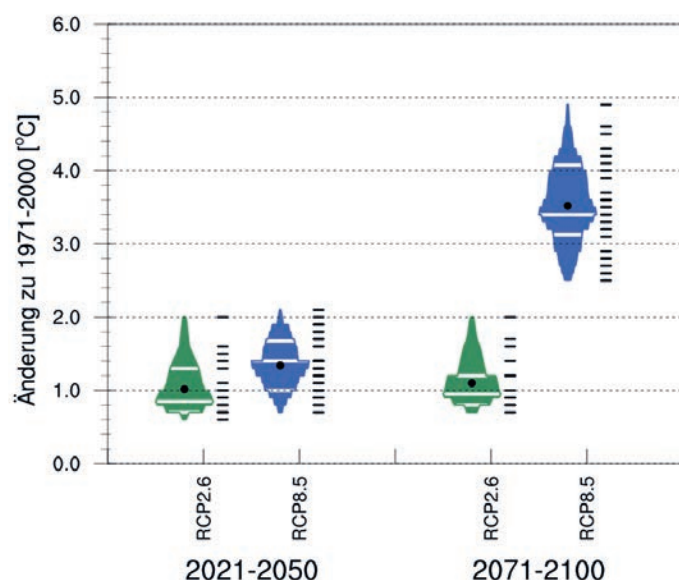
Zukunft

Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Niedersachsen ist zu erwarten (*sehr hohe Übereinstimmung**). Für den kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) beträgt dieser Anstieg etwa 0,9 bis 1,4 °C. Der Unterschied zwischen den durch die beiden unterschiedlichen Klimaprojektionen (**Klimaschutz-Szenario** und **Weiter-wie-Bisher-Szenario**) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 0,6 und 2,2 °C.

Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem **Klimaschutz-Szenario** ist eine Erhöhung um 1,0 °C zu erwarten (*mittlere Übereinstimmung*).

Erreicht wird die Stabilisierung auf dem Niveau des kurzfristigen Planungshorizontes durch die sehr starke Reduktion der Treibhausgasmissionen innerhalb der Szenariendefinition. Die Änderung im Vergleich zum vorindustriellen Zustand beträgt 2,1 °C. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden. Unter den Bedingungen des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** beträgt die Erwärmung etwa 3,5 °C (*mittlere Übereinstimmung*). Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,5 und 4,9 °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 Niedersachsen. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2021–2050) und langfristigen (2071–2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971–2000. Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, grün) denen des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, blau) gegenübergestellt. Die dargestellten Körper symbolisieren den Bereich zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Breite des Körpers signalisiert die Wahrscheinlichkeit des Eintretens (je breiter, umso höher die Wahrscheinlichkeit). Zusätzlich eingetragen sind der Mittelwert (schwarzer Punkt) und die Perzentile (25, 50 und 75 %) als weiße Linien. Neben den Körpern werden als schwarze Striche die Einzelergebnisse der Modelle gezeigt.

* Leitlinien des IPCC zur Kommunikation von Ergebnissen der Klimamodellierung; siehe Begriffskompass Klima

Jahreszeitliche Mittelwerte der Temperatur und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	1981-2010	2021-2050 (RCP2.6)	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	7,9 °C	8,3 °C	8,8 °C	+0,8 °C	+1,1 °C	+0,9 °C	+3,0 °C
Sommer	16,2 °C	16,5 °C	17,0 °C	+0,9 °C	+1,3 °C	+1,0 °C	+3,5 °C
Herbst	9,3 °C	9,2 °C	9,6 °C	+1,0 °C	+1,5 °C	+1,1 °C	+3,7 °C
Winter	1,1 °C	1,8 °C	1,9 °C	+0,9 °C	+1,4 °C	+1,0 °C	+3,7 °C
Jahr	8,6 °C	9,0 °C	9,3 °C	+0,9 °C	+1,4 °C	+1,0 °C	+3,5 °C

▲ Mittelwerte der Lufttemperatur pro Jahr und Jahreszeit, jeweils für die drei Referenzzeiträume in den Spalten 1-3. Die Spalten 4-7 zeigen die Ergebnisse der Projektionsrechnungen. Hier sind nicht absolute Temperaturen, sondern jeweils die Abweichungen zum Bezugszeitraum 1971-2000 angegeben.

Jahreszeitliche Unterschiede

Die Erwärmung ist in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Frühjahrs, hier fällt sie etwas geringer aus. Mit der Temperaturzunahme geht auch 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 von Frost- und Eistagen geht zurück und auch die Wahrscheinlichkeit für längere Frostperioden im Winter verringert sich. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage und nimmt die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen zu.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Ungebrochener Trend der Erwärmung in Niedersachsen
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,5 °C seit 1881
- Änderung der Extreme: Mehr Sommertage, weniger Frosttage

Kurzfristiger Planungshorizont

- Landesweit Erwärmung um im Mittel 0,9 bis 1,4 °C

Langfristiger Planungshorizont

- Beim Klimaschutz-Szenario Erwärmung um im Mittel 1,0 °C
- Beim Weiter-wie-bisher-Szenario Erwärmung um im Mittel 3,5 °C





Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung in Niedersachsen wird bestimmt durch den Wechsel atlantischer und kontinental geprägter Luftmassen. In den östlichsten Landesteilen Wendland und Ostbraunschweigisches Hügelland sind die niedrigsten Jahresniederschlagshöhen zu beobachten, ein Maximum des Niederschlags findet sich im Harz und in Teilen des Weser-Leine-Berglandes.

Veränderungen in der Niederschlagshöhe seit 1881

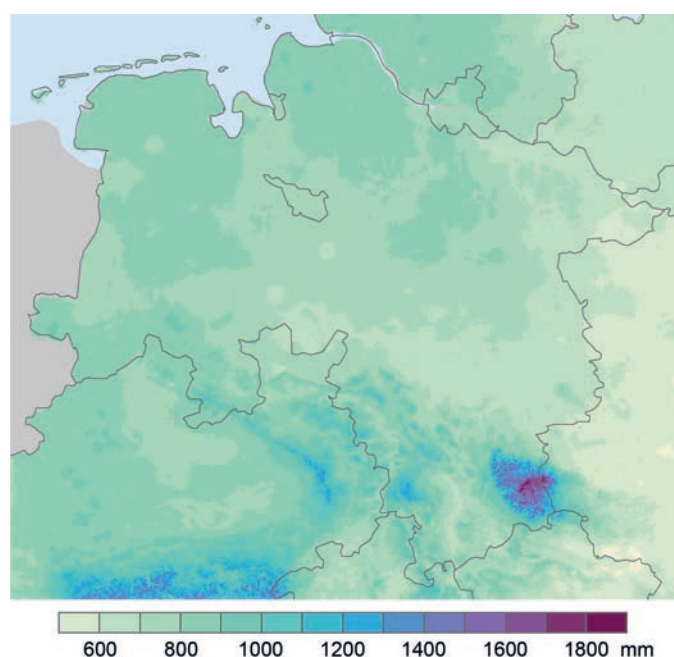
Der Niederschlag ist eine sehr veränderliche Größe in Raum und Zeit. Das Gebietsmittel der Jahressummen des Niederschlags für Niedersachsen beträgt rund 730 mm. Es zeigt seit 1881 einen ansteigenden Trend, jedoch auch eine große Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr. Das höchste Flächenmittel wurde 2007 mit 1007 mm (entspricht Liter/m²) ermittelt, während im Jahr 1959 mit 404 mm der niedrigste Wert auftrat. Das 30-jährige Mittel 1961–1990 beträgt 746 mm, im Zeitraum 1981–2010 liegt es höher mit einem Mittelwert von 787 mm.

Im Trend gibt es für Niedersachsen im Zeitraum 1881 bis heute einen Zuwachs in der Jahressumme von knapp 100 mm. Auf die Jahreszeiten bezogen tragen insbesondere der Winter und der Herbst zu dieser Zunahme bei, im Einzelnen etwa +52 mm im Winter, +28 mm im Herbst und +16 mm im Frühjahr. Der Sommer ist zwar insgesamt die nasseste Jahreszeit, es gab seit 1881 aber nur einen Zuwachs um 2 mm.

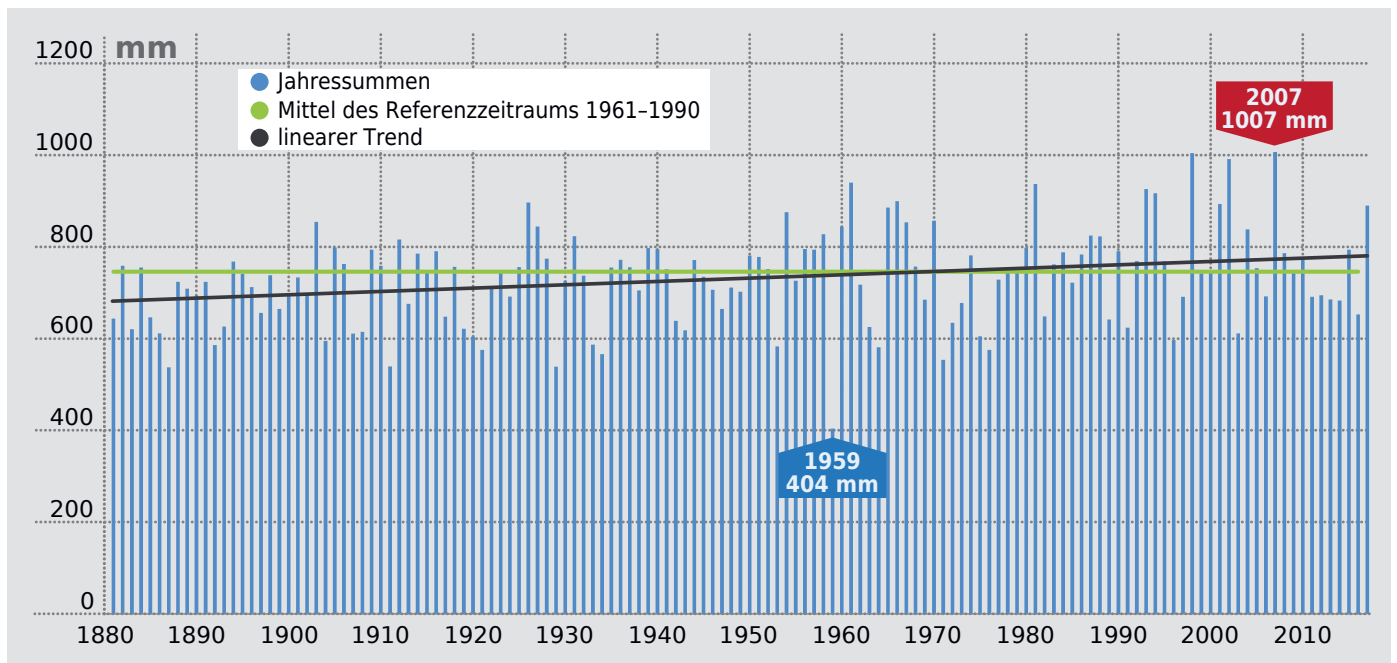
Die tägliche Niederschlagsmenge zeigt sich sehr variabel zwischen den beiden Extremen des Zuwenig und des Zuviels. Große Niederschlagsmengen können durch den Kenntag mit einer Menge von mindestens 10 mm Niederschlag beschrieben werden. Im Mittel gab es zwischen 1951 und 2017 in Niedersachsen an 19 Tagen pro Jahr eine Niederschlagsmenge von mindestens 10 mm. Die Anzahl weist große jährliche Schwankungen auf: ein Minimum von 7 Tagen trat 1959 auf, die größte Anzahl mit 29 Tagen wurde 2002 verzeichnet. Der lineare Trend zeigt eine Zunahme von 2,3 Tagen für den Zeitraum seit 1951.

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

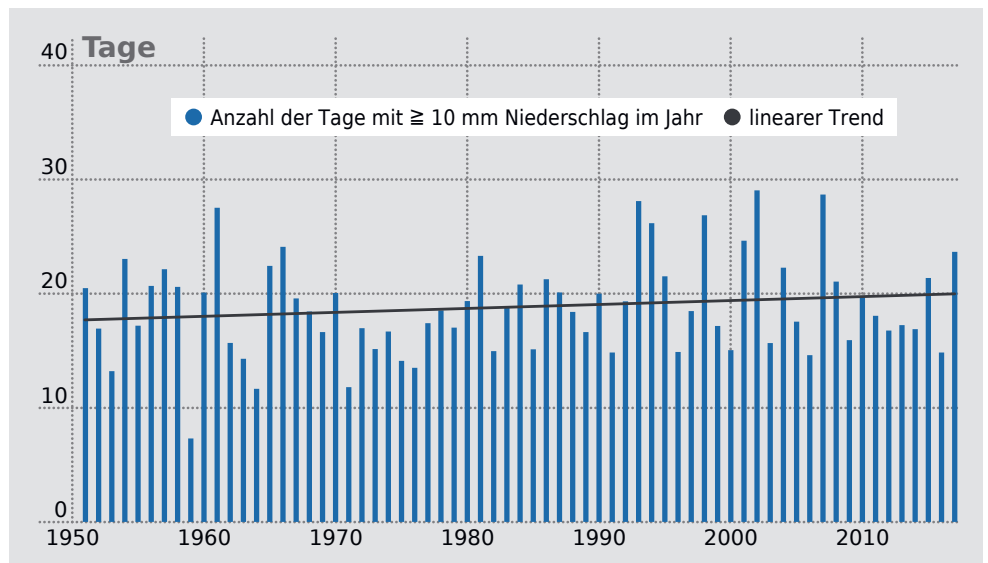
Sehr hohe Monatssummen gibt es am häufigsten im Juli und August. In Niedersachsen fiel z.B. im Juli 2017 190 % der zu erwartenden Menge.



▲ Jährliche Niederschlagshöhe in Niedersachsen im Zeitraum 1981–2010 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).



▲ Es ist nasser geworden in Niedersachsen: Zeitreihe der Jahresniederschlagshöhen (Gebietsmittelwerte) von 1881 bis 2017.



Anzahl der Tage mit mindestens 10 mm Niederschlag (Gebietsmittelwerte) von 1951 bis 2017.



Aber auch zu wenig Niederschlag stellt in unterschiedlicher Weise ein Problem für Land- und Wasserwirtschaft sowie die Schiffbarkeit der Flüsse dar. Für diesen Bericht wurde eine Jahreszeit als trocken definiert, wenn die Gebiets-Niederschlagsmenge weniger als 50 % des Wertes aus dem Referenzzeitraum 1961-1990 betrug. Für alle Jahreszeiten liegt die Zahl dieser Ereignisse in Niedersachsen zwischen eins und fünf in den vergangenen 137 Jahren. Das trockenste Frühjahr war 2001 mit 39 % der Durchschnittsmenge. Einen besonders trockenen Sommer gab es 1983 mit 41 %. Genauso trocken zeigte sich der Herbst sowohl 1908 als auch 1959. In den Wintern 1890/91 sowie 1946/47 fielen jeweils weniger als 40 % der langjährigen Menge.



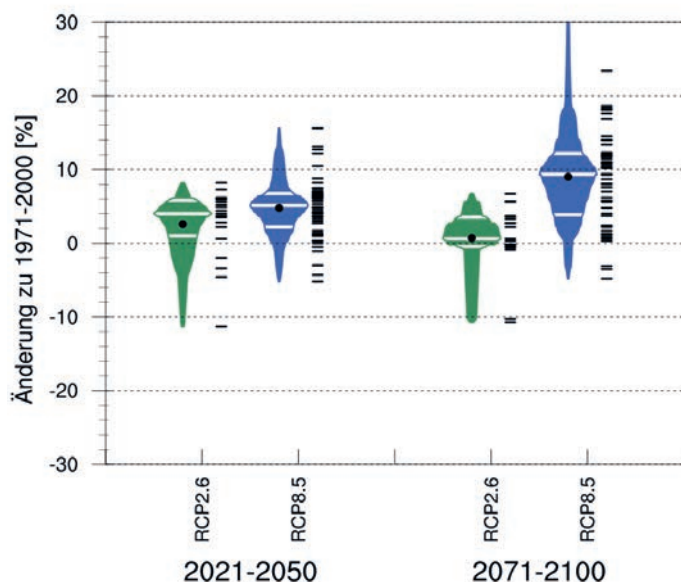
Zukunft

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) ist für Niedersachsen nicht zu erwarten. Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags um 4 % (*mittlere Übereinstimmung*). Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen –11 % und +16 % Änderung. Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass eine modellierte Änderung unterhalb von ± 10 % nicht von der natürlichen Klimavariabilität unterschieden werden kann.

Im langfristigen Planungshorizont (2071–2100) ist beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** mit einer leichten

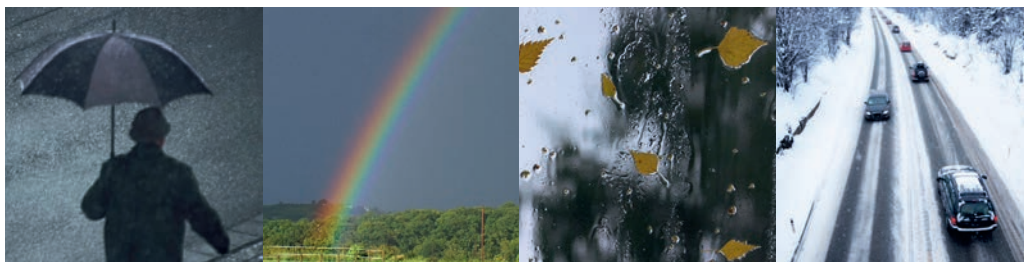
Zunahme des Jahresniederschlags um 8 % zu rechnen (*mittlere Übereinstimmung*). Die Änderung fällt in den Mittelgebirgen und im Harz mit Werten um 5 % etwas geringer aus. Beim **Klimaschutz-Szenario** zeigt sich wenig Änderung.

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



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

Jahreszeitliche Mittelwerte der Niederschlagshöhe und erwartete Änderungen



	1961-1990	1971-2000	1981-2010	2021-2050 (RCP2.6)	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	168 mm	161 mm	167 mm	+7 %	+6 %	+4 %	+12 %
Sommer	219 mm	212 mm	222 mm	-4 %	-1 %	-4 %	-12 %
Herbst	182 mm	190 mm	202 mm	+3 %	+4 %	0 %	+7 %
Winter	173 mm	183 mm	195 mm	+5 %	+11 %	+5 %	+24 %
Jahr	746 mm	745 mm	787 mm	+4 %	+4 %	+1 %	+8 %

◀ Mittelwerte der Niederschlags-
höhe pro Jahr und Jahreszeit,
jeweils für die drei Referenzzeit-
räume in den Spalten 1-3. Die
Spalten 4-7 zeigen die Ergebnis-
se der Projektionsrechnungen.
Hier sind jeweils die prozentualen
Abweichungen zum Bezugszeit-
raum 1971-2000 angegeben.

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2021-2050 werden unter Verwendung aller RCP-Szenarien für den Winter Zunahmen der Niederschlagsmenge um +5 bis +11 % berechnet (*mittlere Übereinstimmung*). Für den Sommer weisen die Ergebnisse einen leichten Rückgang aus. In den Übergangsjahreszeiten zeigen sich für diesen Planungshorizont Zunahmen der mittleren Niederschlagssumme um +4 % (Herbst) bzw. um +7 % (Frühjahr) (*mittlere Übereinstimmung*).

Im Frühjahr kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) bis +12 % (*mittlere Übereinstimmung*) betragen, wohingegen sich der Anstieg im Winter auf +5 bis +24 % (*mittlere Übereinstimmung*) summieren kann. Für den Sommer werden in diesem Planungshorizont im Mittel über alle Szenarien Abnahmen der Niederschlagshöhe berechnet. Die Abnahme ist beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** (-12 %) stärker ausgeprägt als beim **Klimaschutz-Szenario** (-4 %). Bezogen auf das ganze Jahr liegt die Spannbreite der Niederschlagsänderungen beim **Weiter-wie-bisher-Szenario** zwischen einer Abnahme um -5 % und einer Zunahme um +30 %.

Die genannten Änderungsraten und Tendenzen gelten im Wesentlichen auch für die Mittelgebirge und den Harz. Für beide Planungshorizonte und beide Szenarien wird ein leichter Rückgang der Sommerniederschläge sowie eine Zunahme der Winter- und Frühlingsniederschläge errechnet.

Die vorliegenden Ergebnisse des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** unterscheiden sich von denen der bisher genutzten Klimaprojektionen auf der Basis des SRES-Szenarios A1B. Das **Weiter-wie-bisher-Szenario** zeigt nicht mehr die im SRES-Szenario A1B beschriebenen hohen Rückgänge der Sommerniederschläge beim langfristigen Planungshorizont.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Zunahme der Jahresniederschlagshöhe um 15 % seit 1881
- Niederschlagsanstieg im Herbst und im Winter; im Frühjahr und Sommer kaum Änderungen
- Leichter Anstieg der Häufigkeit von Starkregenereignissen seit 1951

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 +8 % zu rechnen

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



Sonnenschein

Sonnenschein

In Niedersachsen scheint die Sonne im Mittel 1528 Stunden im Jahr, bezogen auf den Zeitraum 1981–2010. Besonders viel Sonnenschein wird auf den Ostfriesischen Inseln, im Wendland und in den Börden registriert, am wenigsten Sonne gibt es im Harz und in der Lüneburger Heide.

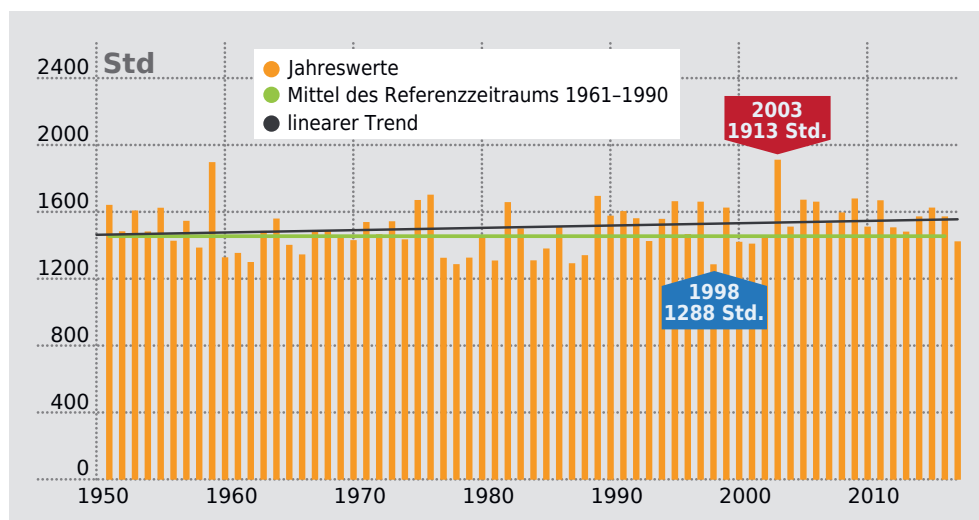
Vergangenheit und Gegenwart

Die Zeitreihe der Jahressummen der Sonnenscheindauer in Niedersachsen zeigt große Schwankungen von Jahr zu Jahr, aber dennoch lassen sich Muster erkennen. Zunächst gab es bis zu den 1980er-Jahren weltweit eine Phase zurückgehender Sonneneinstrahlung, die u.a. einer verstärkten Luftverschmutzung zugeschrieben wird. In den 1960er- und 1980er-Jahren zeigt das Diagramm vermehrt geringe Jahressummen, ebenso rund um die Jahrtausendwende. Höhere Werte gab es vereinzelt in den 1950er- und 1970er-Jahren. Aber seit 1989 werden wieder häufiger hohe Sonnenscheindauern gemessen. Die Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft waren zunehmend erfolgreich und mehr Sonnenstrahlung erreichte den Boden.

Die bisherigen jährlichen Gebietsmittel der Sonnenscheindauer in Niedersachsen variierten zwischen 1288 Stunden (1998) und 1913 Stunden (im „Hitzejahr“ 2003). Bereits im Jahr 1959 gab es mit knapp 1900 Sonnenstunden einen ähnlich hohen Wert.

Der vieljährige Mittelwert 1981–2010 des Flächenmittels für die Sonnenscheindauer beträgt 1528 Stunden, das entspricht einer täglichen durchschnittlichen Sonnenscheindauer von 251 Minuten und liegt damit 12 Minuten höher als der entsprechende Wert für 1961–1990. Bei einer jahreszeitlichen Betrachtung der durchschnittlichen täglichen Sonnenscheindauer zeigt vor allem das Frühjahr eine Zunahme (+22 Minuten), Herbst (+6 Minuten) und Winter (+10 Minuten) kaum, während die Sommermonate keinen Trend aufweisen.

Jahressummen der Sonnenscheindauer (Gebietsmittelwerte) in Niedersachsen von 1951 bis 2017.





Zukunft

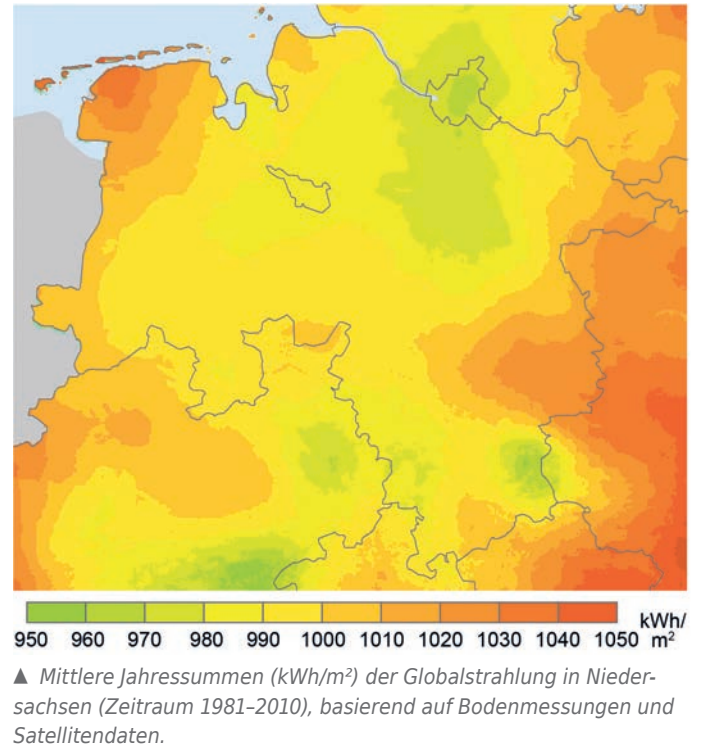
Die Sonnenscheindauer wird in den Klimamodellen nicht direkt berechnet, sondern indirekt aus der kurzwelligen Strahlung abgeleitet. Die Strahlung ist, verbunden mit den Bewölkungsverhältnissen, eine der großen Herausforderungen der Klimamodellierung. Die Bandbreite der modellierten Werte ist daher zwischen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

Weder für den kurzfristigen noch für den langfristigen Planungshorizont können derzeit belastbare Aussagen für die zu erwartenden Änderungen gegeben werden.

Globalstrahlung

Mit der Globalstrahlung steht uns ein weiterer meteorologischer Parameter zur Verfügung, um die Sonnenstrahlung zu beschreiben. Die Globalstrahlung setzt sich zusammen aus der direkten, schattengebenden Sonnenstrahlung und der in der Atmosphäre gestreuten, diffusen Sonnenstrahlung und wird in Kilowattstunden (kWh) pro m^2 angegeben. Die Karte der Globalstrahlung für Niedersachsen zeigt hohe Jahresmittelwerte in Ostfriesland sowie in Südostniedersachsen. Niedrige Werte werden in der Lüneburger Heide, aber auch im Harz und den Mittelgebirgen gemessen.

Das Zusammenwirken von Sonnenstrahlung und Atmosphäre hat die Entstehung von Leben auf der Erde erst ermöglicht. Ein Zuviel an Globalstrahlung kann allerdings für alle Lebewesen gefährlich werden. Daher erstellt der Deutsche Wetterdienst in den Sommermonaten täglich Vorhersagen des UV-Indexes. Aber auch als Quelle für erneuerbare Energien spielt die Nutzung der Globalstrahlung eine zunehmend wichtige Rolle.



KURZ NOTIERT

Beobachtung

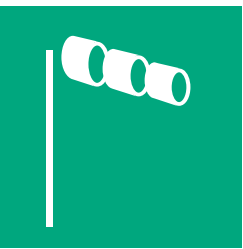
- Durchschnittlich 251 Minuten Sonnenschein pro Tag 1981-2010
- Wenig Änderung der Sonnenscheindauer in Niedersachsen seit 1951
- Große Variabilität von Jahr zu Jahr

Kurzfristiger Planungshorizont

- Änderungen wahrscheinlich nur gering

Langfristiger Planungshorizont

- Veränderung nicht ablesbar



Wind

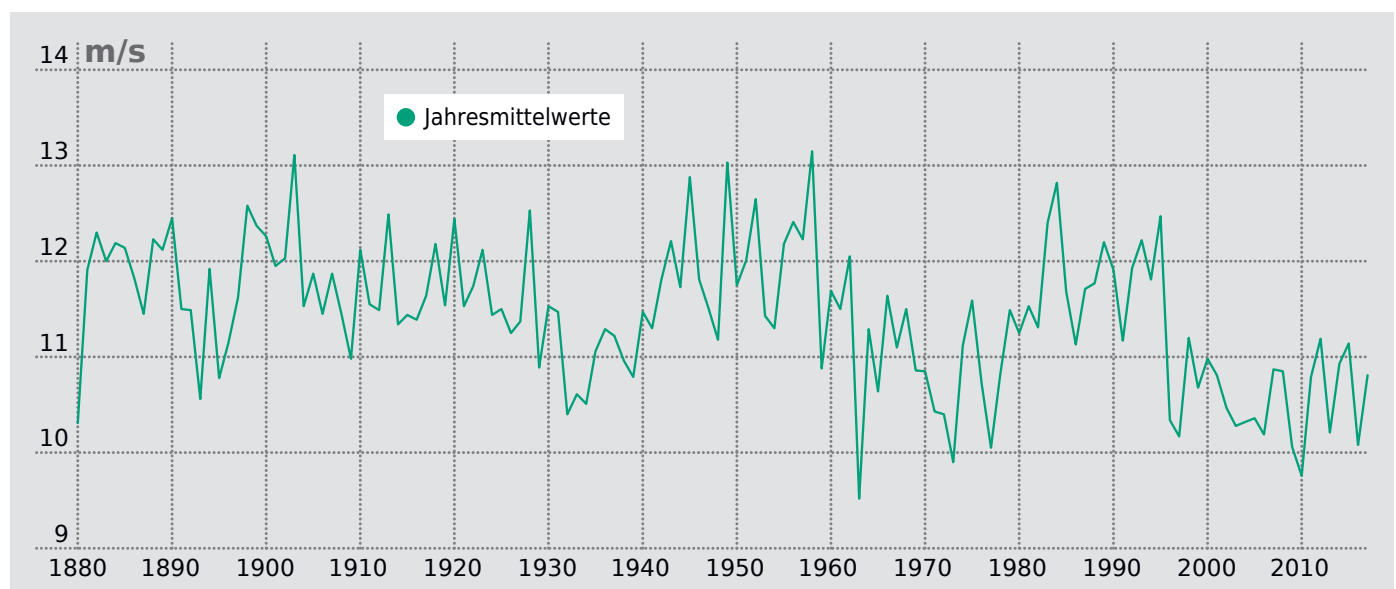
Die Verteilung der Windgeschwindigkeit in Niedersachsen wird vom Abstand zur Küste und vom Geländere relief geprägt: die höchsten Werte sind an der Nordseeküste anzutreffen; die niedrigsten Windgeschwindigkeiten werden in der Lüneburger Heide und im Südosten des Landes verzeichnet.

Windverhältnisse in der Vergangenheit und Gegenwart

Standardmäßig wird der Wind in 10 m Höhe über Grund gemessen, um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten. Trotzdem reagiert der gemessene Wind, insbesondere die Windgeschwindigkeit empfindlich auf Veränderungen im Umfeld der Messstation (z. B. wachsende Bäume) oder auf Änderungen des Messortes. Fast alle Windzeitreihen weisen

Inhomogenitäten auf. Die zur Verfügung stehenden Zeitreihen umfassen nur einige Jahrzehnte.

Eine Möglichkeit, trotzdem Aussagen über die Entwicklung der Windgeschwindigkeit zu machen, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes. Dieser beruht auf Luftdruckdifferenzen und ist eng mit dem



▲ Jahresmittel des geostrophischen Windes, berechnet aus den bodennahen Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List. Dargestellt ist der Zeitraum 1880 bis 2017.



„wahren“ Wind gekoppelt. Die Messung des Luftdrucks ist bereits seit dem Ende des 18. Jahrhunderts mit hoher Qualität möglich. Betrachtet man den geostrophischen Wind, der aus den Luftdruckdaten von Hamburg, Emden und List auf Sylt für die Deutsche

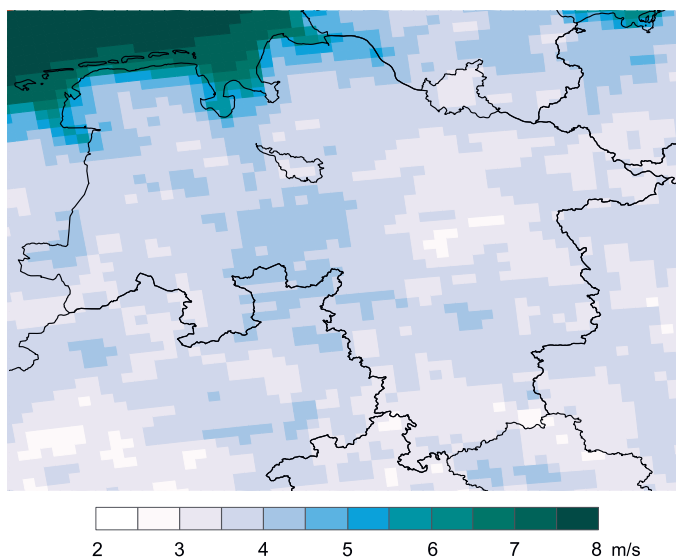
Bucht berechnet wurde, zeigen sich Abschnitte mit Längen von 10 Jahren bis wenigen Jahrzehnten mit höherer oder niedrigerer Windgeschwindigkeit (sogenannte multidekadische Schwankung). Für die gesamte Zeitreihe ist ein schwacher, abfallender Trend zu sehen. Deutlich erkennbar ist die windreiche Zeit der 1990er-Jahre, die sich aber unauffällig in die Maxima der Gesamtreihe einreihen. 2017 betrug der Jahresmittelwert des geostrophischen Windes 10,8 m/s.

Sturmtage

Sturmtage sind Tage, an denen Böen mit Spitzenwindgeschwindigkeiten von mindestens 8 Bft (62 km/h) registriert wurden. Wie zu erwarten, gibt es deutliche Unterschiede in den Häufigkeiten zwischen Küste und Binnenland. In der Periode 1981–2010 weisen die Stationen Norderney und Cuxhaven jährlich knapp 75 Sturmtage auf, Hannover und Braunlage bis 32 Tage. Lüchow und Göttingen zeigen lediglich bis zu 18 Sturmtage.

Zukunft

Die Berechnungen der Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass sich die Windverhältnisse in der Zukunft wenig ändern bzw. eine Änderung aus den Modellen nicht ablesbar ist.



▲ Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (10 m über Grund) in Niedersachsen im Zeitraum 1995 bis 2014 als Flächendarstellung der Rasterwerte (6 km x 6 km). Basis sind Reanalysedaten des Wettervorhersagemodells COSMO.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Große regionale Unterschiede zwischen windreicher Küste und windschwächeren Gebieten im südlichen und östlichen Niedersachsen
- Kein deutlicher Trend in den Windverhältnissen seit 1880

Kurzfristiger Planungshorizont

- Wahrscheinlich keine Veränderung

Langfristiger Planungshorizont

- Veränderung nicht ablesbar



Verdunstung

Beitrag des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie

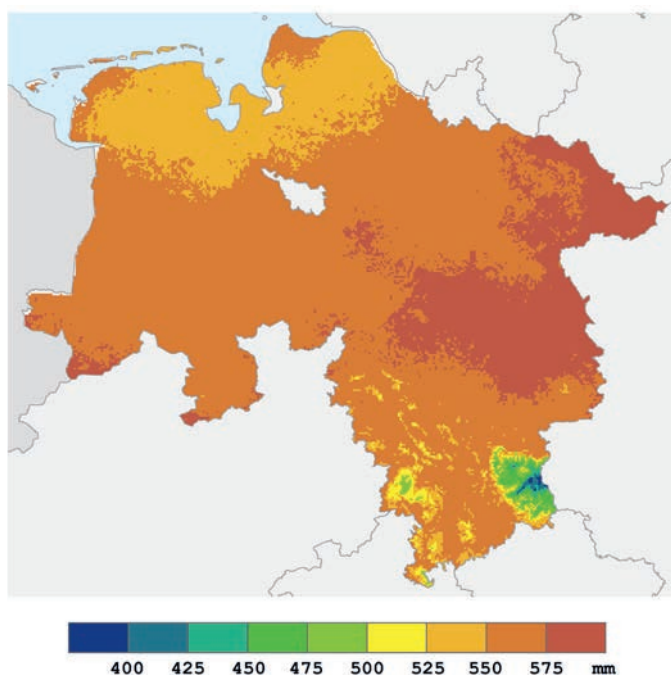
In Niedersachsen liegt die mittlere jährliche FAO-Gras-Referenzverdunstung bei etwa 561 mm bezogen auf den Zeitraum 1971–2000. Besonders hoch ist die Verdunstung im östlichen Teil des Landes, im Bereich des Wendlandes, der Lüneburger Heide und des Weser-Aller-Flachlandes. Am geringsten ist die Verdunstung im Harz. Auch die Küste weist etwas weniger Verdunstung auf als der Rest Niedersachsens.

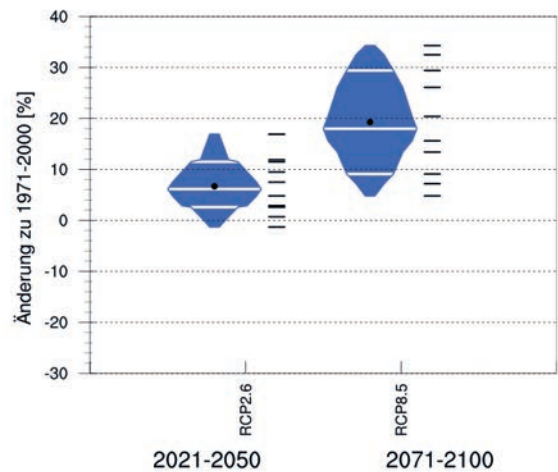
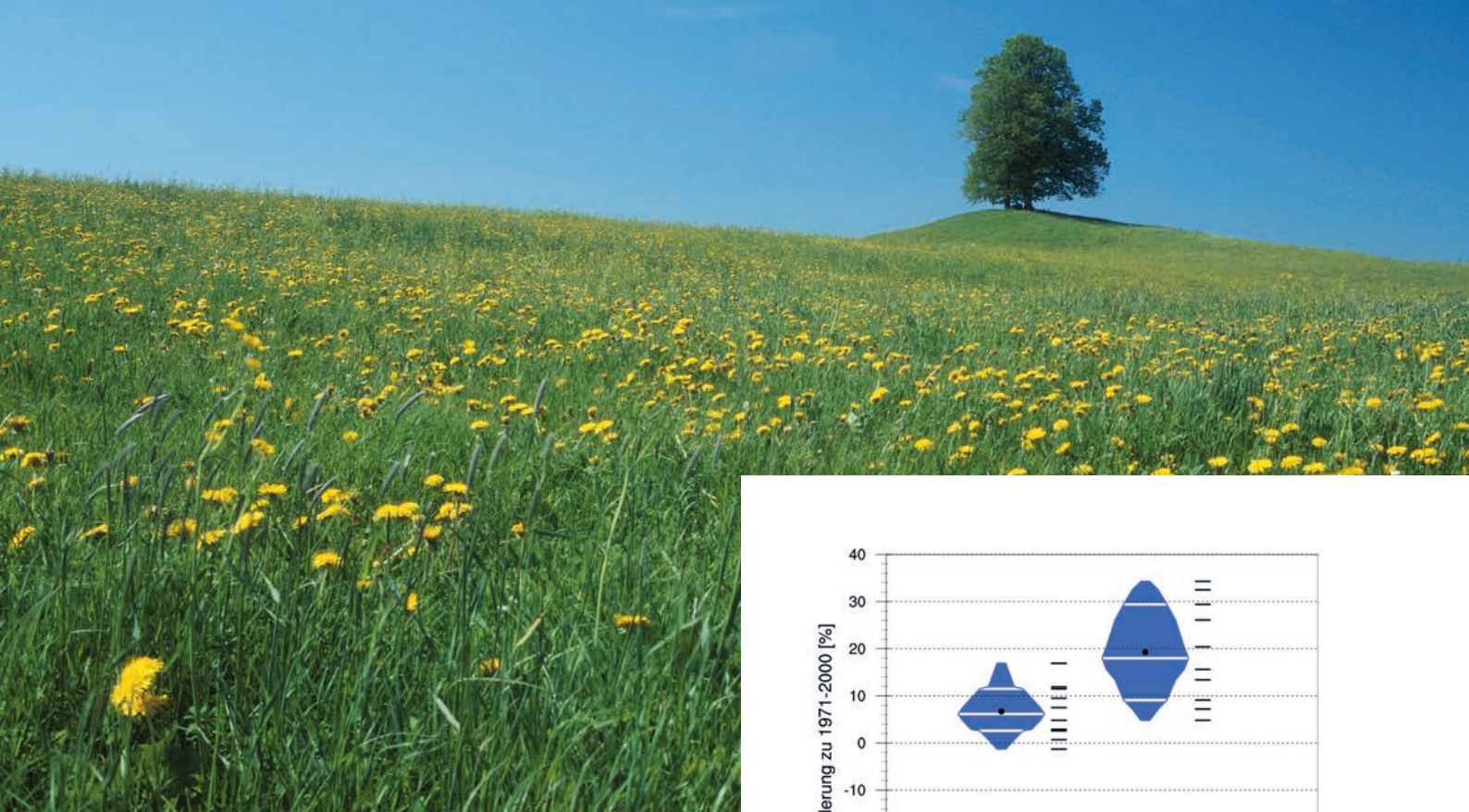
Vergangenheit und Gegenwart

Die FAO-Gras-Referenzverdunstung ist die potenzielle Verdunstung einer zwölf Zentimeter hohen Grasdecke, die nach dem Vorschlag der Welternährungsorganisation (*Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO*) berechnet wird. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass eine weltweit vergleichbare Berechnung der potenziellen Verdunstung möglich ist.

Für Niedersachsen liegt der vieljährige Mittelwert 1971–2000 der FAO-Gras-Referenzverdunstung bei 561 mm pro Jahr. Regional betrachtet nimmt die Verdunstung von Norden nach Osten hin zu. An der Küste ist die Verdunstung geringer als im Bereich der Lüneburger Heide, des Weser-Aller-Flachlandes und des Wendlands. Auffällig ist besonders die Harzregion, in der aufgrund niedrigerer Temperaturen die Verdunstung geringer ist als in anderen Teilen Niedersachsens.

Jährliche FAO-Gras-Referenzverdunstung ► in Niedersachsen im Zeitraum 1971–2000 als Flächendarstellung auf Basis der Rasterwerte (1 km x 1 km).





▲ Darstellung der Bandbreite der vorhandenen Klima-projektionen für die FAO-Gras-Referenzverdunstung von Niedersachsen. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2021–2050) und den langfristigen (2071–2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971–2000 für das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5). 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 Striche die Einzelergebnisse der Modelle gezeigt.

Zukunft

Mit dem Anstieg der Temperatur erhöht sich auch die potenzielle Verdunstung. Für Niedersachsen sagt das **Weiter-wie-bisher-Szenario** einen Anstieg der potenziellen Verdunstung um 7 % im kurzfristigen Planungshorizont (2021–2050) voraus. Dabei liegt die Bandbreite der Änderungssignale des betrachteten Ensembles bei –1 bis +16 %. Für den langfristigen Planungshorizont wird für das **Weiter-wie-bisher-Szenario** eine Zunahme der potenziellen Verdunstung um 19 % erwartet. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen +5 und +34 %.

Mittelwerte der FAO-Gras-Referenzverdunstung und erwartete Änderungen



	1971-2000	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP8.5)
Jahr	561 mm	+7 %	+19 %

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Durchschnittlich 561 mm Verdunstung pro Jahr im Zeitraum 1971-2000

Kurzfristiger Planungshorizont

- Landesweit leichter Anstieg der Verdunstung möglich

Langfristiger Planungshorizont

- Verstärkter Anstieg der Verdunstung wird erwartet



Klimatische Wasserbilanz

Wasserbilanz

Beitrag des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie

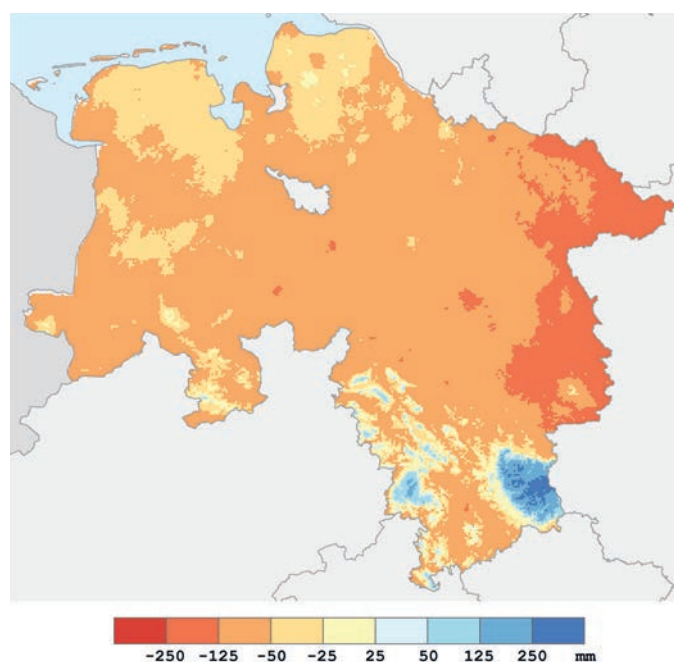
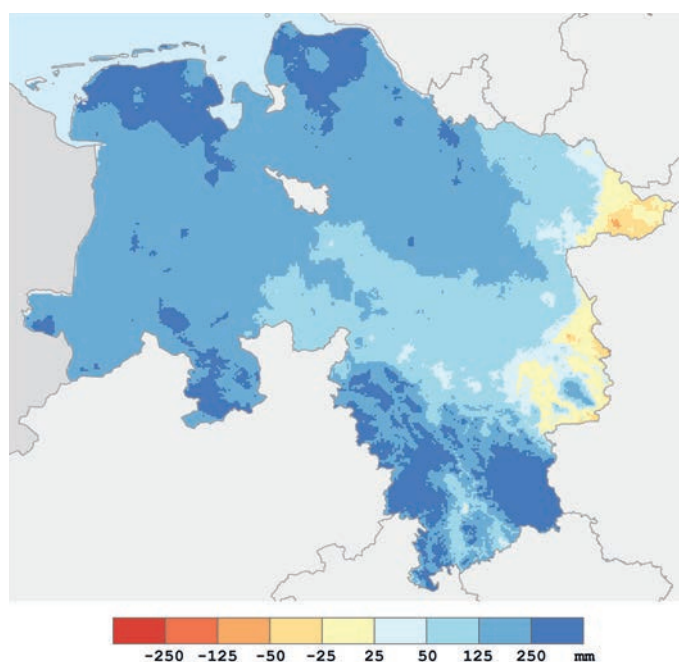
Die jährliche Klimatische Wasserbilanz in Niedersachsen liegt für den größten Teil des Landes im positiven Bereich. Hier übersteigt der Niederschlag die Verdunstung. Ein Wasserbilanzdefizit tritt nur im äußersten Osten des Landes, an der Grenze zu Sachsen-Anhalt, auf.

Vergangenheit und Gegenwart

Die Klimatische Wasserbilanz ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag minus Verdunstung. Sie ist ein zusammenfassender Kennwert von Niederschlag und Verdunstung und damit auch der Temperatur. Damit liefert die Klimatische Wasserbilanz in erster Annäherung ein gutes Maß für die regionale Wasserverfügbarkeit und kann Hinweise darauf geben, ob ein Gebiet von Wassermangel betroffen sein kann. Ist der Wert der Klimatischen Wasserbilanz positiv, so übersteigt der Niederschlag die Verdunstung. Ist aber die

Verdunstung größer als der Niederschlag, so entsteht ein Wasserbilanzdefizit und die Klimatische Wasserbilanz liegt im negativen Bereich.

Im dreißigjährigen Mittel 1971–2000 ist der Niederschlag größer als die Verdunstung und die Klimatische Wasserbilanz im Gebietsmittel für Niedersachsen mit 185 mm im Jahr positiv. Regionale Unterschiede sind jedoch vorhanden. An der Küste ist der Niederschlag höher als im Landesinneren, sodass die Klimatische Wasserbilanz mit zunehmender Kontinentalität



▲ Klimatische Wasserbilanz in Niedersachsen im Zeitraum 1971–2000 als Flächendarstellung auf Basis der Rasterwerte (1 km x 1 km); links: jährlich, rechts: im Sommerhalbjahr (April bis September).

abnimmt. Eine Ausnahme bilden der Harz und das Harzvorland, denn auch hier ergibt sich eine positive Klimatische Wasserbilanz durch die vergleichsweise hohen Niederschläge. Anders sieht es im östlichen Niedersachsen aus. Hier wird im dreißigjährigen Mittel mehr verdunstet als durch Niederschläge nachgeliefert werden kann. Daraus resultiert eine negative Wasserbilanz in dieser Region.

Im Sommerhalbjahr (April bis September), in dem die Temperatur und somit auch die Verdunstung höher ist, übersteigt die Verdunstung den Niederschlag deutlich. Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. den Harz) liegt Niedersachsen bei diesem Kennwert im negativen Bereich. So liegt die Klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr im Flächenmittel für Niedersachsen bei -69 mm. Das größte Defizit entsteht entlang der östlichen Grenze Niedersachsens. Hier macht sich die zunehmende Kontinentalität bemerkbar.



Zukunft

Die Veränderungen der Klimatischen Wasserbilanz des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** für die Zukunft sind deutlich. Niedersachsenweit wird die positive mittlere Klimatische Wasserbilanz des Jahres zukünftig geringer ausfallen als im Zeitraum 1971–2000, im kurzfristigen Planungshorizont zunächst nur wenig, im langfristigen Planungshorizont um etwa zwei Drittel.

Sehr deutlich sind die Ergebnisse für den Sommer. Das ohnehin vorhandene Defizit der Klimatischen Wasserbilanz verstärkt sich, denn mit steigenden Temperaturen geht auch ein Anstieg der Verdunstung einher. So wird im **Weiter-wie-bisher-Szenario** im kurzfristigen Planungshorizont eine Erhöhung des bestehenden Defizits um etwa ein Viertel und im langfristigen Planungshorizont eine Verdopplung des Defizits erwartet.



KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Die Klimatische Wasserbilanz liegt im Jahresmittel bei 185 mm und im Sommerhalbjahr bei -69 mm.

Kurzfristiger Planungshorizont

- Der Überschuss des Jahreswertes der klimatischen Wasserbilanz nimmt etwas ab. Das Defizit im Sommer nimmt zu.

Langfristiger Planungshorizont

- Der Überschuss der klimatischen Wasserbilanz im Jahr nimmt um etwa zwei Drittel ab. Im Sommer verdoppelt sich das Defizit.



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.

Der Kreislauf der Natur als Klimaindikator

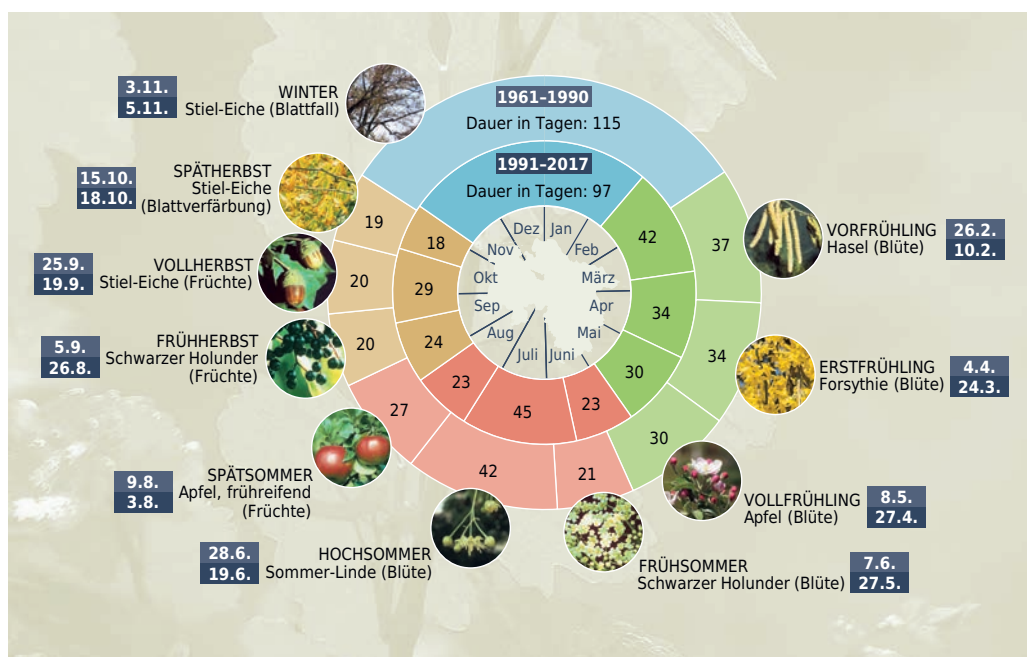
Phänologie beschreibt im Jahresverlauf periodisch wiederkehrende Erscheinungen in der Natur: das Aufblühen einer Pflanze, Fruchtreife, den Brutbeginn von Vögeln und so weiter. Gerade Pflanzen eignen sich gut als sensibler Bioindikator für Klima- und Umweltveränderungen, da ihre Entwicklung direkt von sich verändernden Umweltbedingungen beeinflusst wird. Die Pflanzen der gemäßigten Breiten sind in ihrer Vegetationsrhythmik – Wachstumsperiode im Frühling und Sommer und Ruheperiode im Winter – an den jahreszeitlichen Wechsel ihrer Umweltbedingungen angepasst.

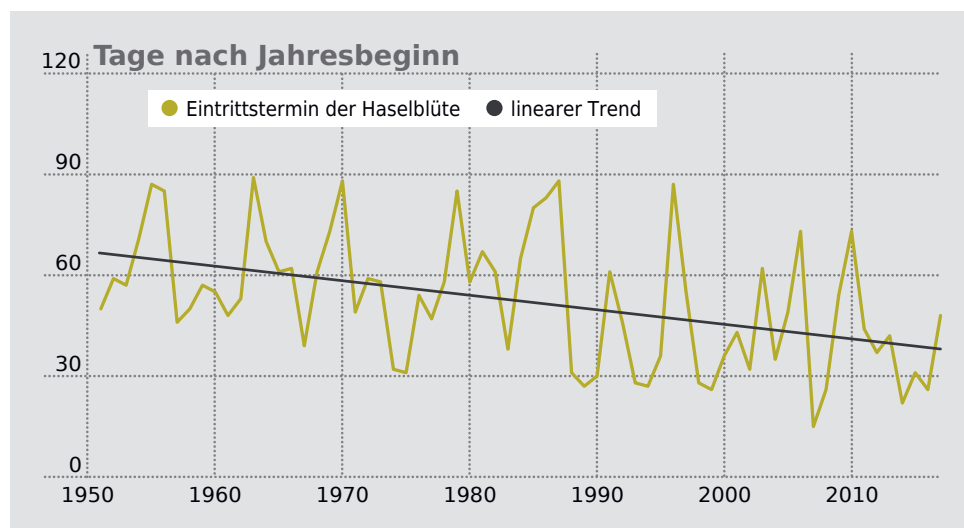
Die Natur Niedersachsens zeigt bereits Auswirkungen auf die sich verändernden klimatischen Bedingungen. So verändern sich beispielsweise die Eintrittszeiten der phänologischen Jahreszeiten.

Die verschiedenen Entwicklungsphasen der Pflanzen sind phänologischen Jahreszeiten zugeordnet. Die „Phänologische Uhr“ zeigt diese Jahreszeiten und ihre sogenannten Leitphasen (Mittelwert für Niedersachsen). Beim Vergleich der Zeiträume 1961–1990 und 1991–2017 wird die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten deutlich.

Phänologische Jahreszeiten

Der Phänologische Kalender unterteilt sich in zehn physiologisch-biologisch begründete Jahreszeiten. Jeder phänologischen Jahreszeit werden bestimmte Zeigerpflanzen mit entsprechenden Entwicklungsphasen zugeordnet. So beginnt das phänologische Jahr mit dem **Vorfrühling**, dessen Beginn von der Blüte der Gemeinen Hasel (*Corylus avellana*) eingeleitet wird. In den Jahren 1991–2017 waren die Eintrittszeiten des Vorfrühlings 16 Tage früher als in der Referenzperiode 1961–1990. Der Vorfrühling endet mit dem Beginn der Forsythienblüte (*Forsythia x intermedia*), die den **Erstfrühling** einläutet. Hier kann eine Verfrühung der Eintrittszeit von 11 Tagen beobachtet werden. Dem Erstfrühling folgt der **Vollfrühling**, welcher durch das Erblühen der ersten Apfelbäume (*Malus*) beginnt. Hier tritt die Blüte in den Jahren 1991–2017 um 11 Tage früher ein als in der Vergleichsperiode.





▲ Eintrittstermine 1951–2017 der Leitphase der phänologischen Jahreszeit Vorfrühling, die den Beginn des phänologischen Jahres markiert und sich an der Blüte der Gemeinen Hasel orientiert. Eintrittstermin der Haselblüte 2017 in Niedersachsen: 17. Februar.

Mit der Blüte des Schwarzen Holunders (*Sambucus nigra*) setzt der **Frühsommer** ein, dessen Eintrittszeit sich im Untersuchungszeitraum 1991–2017 um 11 Tage nach vorne verschoben hat. Der **Hochsommer**, welcher sich durch erste blühende Sommerlinden (*Tilia platyphyllos*) bemerkbar macht, weist eine Verfrühung von 9 Tagen auf. Nachdem das Erblühen der Leitpflanzen bisher als Indikator diente, rücken nun erste Früchte in den Fokus der Beobachtung. Die ersten frühreifenden Äpfel können zu Beginn des **Spätsommers** gepflückt werden. Diese phänologische Phase ist mit 6 Tagen nur leicht verfrüht.

Beim Übergang zum **Frühherbst** wird nochmals der Schwarze Holunder als Leitpflanze herangezogen. Seine ersten reifen Früchte zeigen sich im Zeitraum 1991–2017 etwa 10 Tage früher. Der **Vollherbst** beginnt mit den ersten reifen Früchten der Stiel-Eiche (*Quercus robur*) und zeigt mit einer um 6 Tage verfrühten Fruchtreife einen nur gering verfrühten Eintrittstermin. Beginnen die Blätter der Stiel-Eiche sich zu verfärben, bricht der **Spätherbst** an. Diese Phase weist eine Verspätung von 3 Tagen auf. Der Grund hierfür ist, dass höhere Temperaturen im Herbst den Chlorophyllabbau im Blatt verlangsamen und damit zu einer späteren Blattverfärbung führen. Wirft die Stiel-Eiche ihre ersten Blätter ab, beginnt der phänologische **Winter**.

Die Eintrittstermine der Frühjahrsphasen zeigen die stärksten Änderungen. Das liegt einerseits daran, dass zu Beginn der Vegetationsperiode die stärksten Veränderungen stattfinden, und daran, dass diese Phasen wesentlich durch den Anstieg der Temperatur

ausgelöst werden, während in späteren Phasen immer mehr Faktoren eine Rolle spielen.

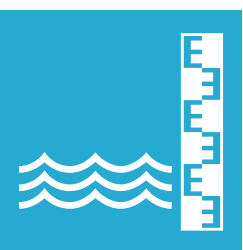
Regionale und zeitliche Unterschiede

Die oben beschriebenen Entwicklungen beziehen sich auf die mittleren Werte für ganz Niedersachsen. Da die phänologischen Jahreszeiten im engen Zusammenhang mit meteorologischen Größen wie der mittleren bodennahen Lufttemperatur und der Wasser- und Lichtverfügbarkeit stehen, können regional und von Jahr zu Jahr zum Teil massive Unterschiede entstehen. Entgegen des landesweiten Trends der früheren Haselblüte, welche den Eintrittstermin des Vorfrühling bestimmt, weisen in 2017 große Teile des südlichen Niedersachsen kaum eine Änderung zum langjährigen Mittel auf. Eigene Beobachtungen können sich also vom landesweiten Trend abheben.

Allgemeiner Trend

Auch deutschlandweit lassen sich Verschiebungen der phänologischen Jahreszeiten feststellen. Bis auf die Eintrittstermine des phänologischen Spätherbstes und Winters, die keine markanten Veränderungen aufzeigen, rutschen alle phänologischen Jahreszeiten im Jahresverlauf nach vorne und weisen zum Teil auch eine längere Dauer auf.

Der Jahreszyklus der Pflanzen ist dahingehend optimiert, bei einer möglichst langen Wachstumsperiode das Frostrisiko gering zu halten. Ein im Jahr früher Anstieg der mittleren Tagestemperaturen verlängert zwar die Vegetationsperiode durch verfrühten Austrieb, ist aber auch möglicherweise mit einer erhöhten Spätfrostgefahr verbunden.



Meeresspiegel

Meeresspiegel

Beitrag des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft, Küsten-und Naturschutz

Seit dem Tiefpunkt der letzten Kaltzeit steigt der Meeresspiegel. In der jüngsten Vergangenheit liegt dieser Anstieg in etwa bei 20 bis 30 cm pro Jahrhundert für die südliche Nordsee. Klimaprojektionen zeigen in Abhängigkeit vom Emissionsszenario unterschiedliche Anstiegsraten. So erscheint ohne aktive Klimaschutzmaßnahmen eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs unvermeidlich.

Herausforderung Meeresspiegelanstieg

Für den Schutz der Küstenregion Niedersachsens stellt der Meeresspiegelanstieg die bedeutendste Herausforderung dar. Das vor Sturmfluten geschützte Gebiet umfasst 14 % der Landesfläche. Vorwiegend Deiche trennen etwa 1,2 Millionen Menschen und mehr als 12 Milliarden Einheitswerte in den Niederungs- und Marschgebieten von der Nordsee (Regierungskommission Klimaschutz 2012). Steigende Wasserstände in der Nordsee führen unmittelbar auch zu einer höheren Belastung durch Seegang an der rund 610 Kilometer langen Deichlinie. Der in Niedersachsen praktizierte vorsorgliche Küstenschutz berücksichtigt daher bei der Planung der Bauwerke mögliche Klimaänderungsfolgen.

Warum steigt der Meeresspiegel?

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels wirkt sich sowohl auf das küstenschutzrelevante mittlere Tidehochwasser als auch auf das für die Entwässerung der Niederungsgebiete bedeutsame mittlere Tideniedrigwasser aus. Dabei sind im Wesentlichen zwei Effekte ursächlich.

Der sterische Meeresspiegelanstieg ist ein sehr langsamer und aufgrund der Wärmespeicherefähigkeit der Ozeane langanhaltender Prozess. Durch die projizierten steigenden Temperaturen wird das Wasser an der Oberfläche erwärmt und dehnt sich aus. Durchmischungsprozesse fördern langsam kälteres Wasser nach oben, was sich wiederum aufwärmt und ausdehnen kann. Vergleichbare Prozesse finden bei einer Änderung des Salzgehaltes durch Süßwassereintrag statt, was ebenfalls die Dichte des Wassers verändert und den Wasserspiegel anhebt. Dieser Einfluss ist

jedoch deutlich geringer als die Wärmeausdehnung. Der eustatische Effekt bezieht sich auf die Zufuhr von Wassermassen, die vorher nicht Teil der Ozeane waren. Abschmelzende Gletscher oder Eisschilde können den Meeresspiegel deutlich schneller ansteigen lassen als bisher aufgezeichnet.

Beide Effekte können Auswirkungen auf die Meeresströme, wie beispielsweise den Golfstrom, erzielen und damit zusätzliche Änderungen in der Neigung der Meeresoberfläche auslösen, was den Meeresspiegel dort ändert. Hinzu kommt die Landabsenkung der südlichen Nordseeküste (glazialisostatischer Effekt) mit einer eher untergeordneten Rolle. Erdöl- oder Gasentnahmen können die Landabsenkung jedoch lokal beschleunigen.



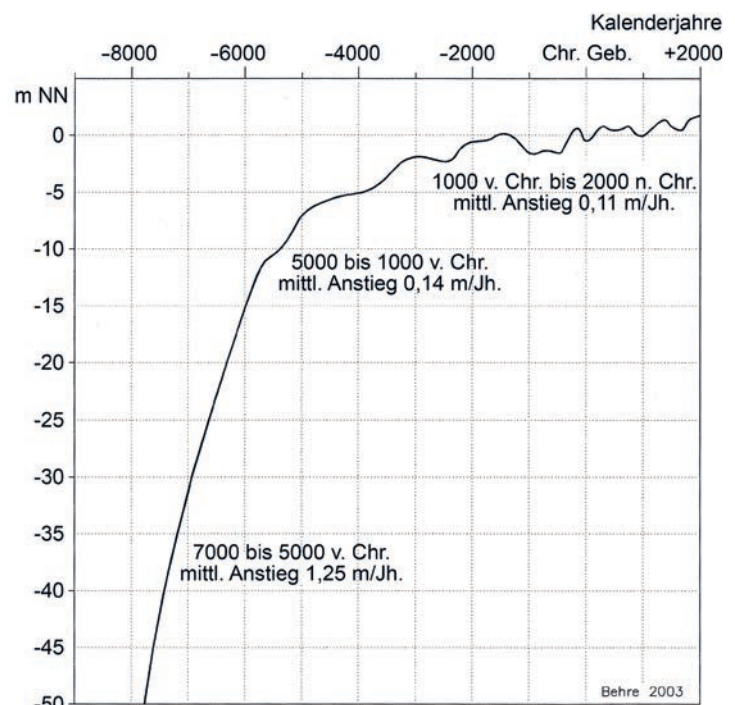
Vergangenheit

Seit dem Tiefpunkt der letzten Kaltzeit steigt der Meeresspiegel bis heute an. Durch das in den eiszeitlichen Eisschilden gebundene Wasser lag der Meeresspiegel rund 120 m unter dem heutigen Niveau. Die flache Nordsee fiel bis über die Doggerbank hinaus trocken. Bis ca. 5000 v. Chr. stieg der Meeresspiegel zunächst mit über einem Meter pro Jahrhundert sehr schnell an. Danach nahm die Geschwindigkeit ab, zwischenzeitlich gab es sogar rückläufige Phasen, wobei der Trend aber weiterhin ansteigt.

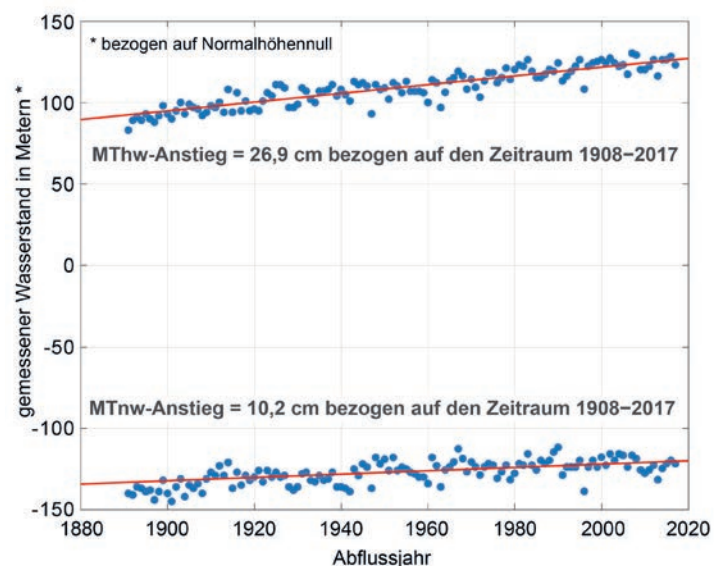
Gegenwart

Die jüngste Entwicklung kann anhand von Pegelaufzeichnungen verfolgt werden, sofern diese homogene Datensätze erzeugen, die nicht im Laufe der Jahre durch wasserbauliche oder morphologische Veränderungen in ihrer Umgebung beeinflusst wurden. Der Norderneyer Messpegel erfüllt diese Anforderung. Die Messdaten zeigen im mehrjährigen Mittel einen kontinuierlichen Anstieg der mittleren Tidehochwasser (MThw) und mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) und einen Anstieg des Tidehubs.

Die Messwerte unterliegen gewissen natürlichen Schwankungen, zeigen aber insgesamt einen linearen Trend der letzten 120 Jahre von etwa 25 cm MThw-Anstieg. Signifikante Trendänderungen zeichnen sich hier nicht ab. Die Schwankungen um die Trendlinie sind unmittelbare Folge der mittleren meteorologischen Situation im betrachteten Zeitraum.



▲ Meeresspiegelanstieg (MThw) der letzten 10 000 Jahre für die südliche Nordsee. (Quelle: Behre 2003)



▲ Änderung der mittleren Tidewasserstände bezogen auf den Pegel Norderney Riffgat (Pegelbetreiber Wasser- und Schiffsamt Emden). Das Abflussjahr umfasst den Zeitraum November bis Oktober.



Zukunft

Die für den aktuellen Sachstandsbericht des IPCC (s. a. Seite 10) verwendeten RCPs beinhalten, zusammen mit Verbesserungen in der Modellierung, einen höheren Detaillierungsgrad, auch für den Meeresspiegel. Die aktuellen Erdsystemmodelle führen, u.a. durch die Hinzunahme von Schätzungen zum Abtauen des Festlandeseis zu neuen, höheren Projektionen des Meeresspiegelanstiegs im Vergleich zu den vorherigen Sachstandsberichten des IPCC.

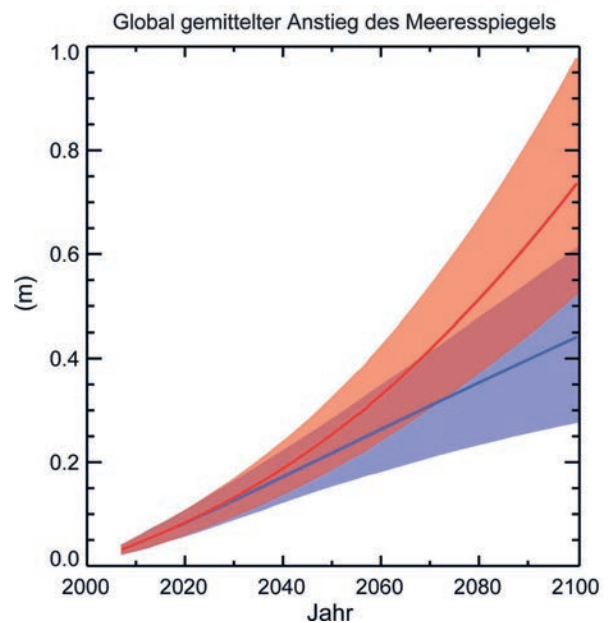
Der global gemittelte Meeresspiegel soll bis 2100 ansteigen. Das **Klimaschutz-Szenario** und das **Weiter-wie-bisher-Szenario** zeigen anfangs keinen unterschiedlichen Trend der Meeresspiegelerhöhung. Ab 2030 ändert sich der Trend in Abhängigkeit vom untersuchten Szenario. Während das **Klimaschutz-Szenario** sogar eine leichte Abflachung der Anstiegsrate zeigt, zeigt das **Weiter-wie-bisher-Szenario** eine signifikante Beschleunigung. Der Meeresspiegel wird – je nach Szenario – noch über Jahrhunderte bis Jahrtausende weiter ansteigen und 1 bis 3 m erreichen. Um die konkreten Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die lokalen Bedingungen an der Niedersächsischen Küste abschätzen zu können, ist die sogenannte Regionalisierung der globalen Projektionen erforderlich. Weitere Fragestellungen zur konkreten lokalen Ausprägung von bislang nur global abgeschätzten Effekten sind Gegenstand aktueller Forschung.

Ob die dargestellte Bandbreite die zukünftigen Möglichkeiten tatsächlich abdecken, ist umstritten. Neuere Studien weisen u.a. darauf hin, dass die verwendeten Modelle das Schmelzen der Eisschilde nicht ausreichend berücksichtigen und kommen zu höheren

Ergebnissen als der Weltklimarat in seinem Bericht von 2013.

Unsicherheiten bleiben

Die Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Meeresspiegels sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Es ist davon auszugehen, dass er bis zur nächsten Warmzeit weiter ansteigt, unklar ist jedoch mit welcher Geschwindigkeit. Abhängig vom untersuchten Szenario wird ein mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg von rund 25 bis 100 cm bis 2100 projiziert.



▲ Projizierter globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg bis 2100, ermittelt aus Klimaprojektionsrechnungen (IPCC 2013). Rote Linie: RCP8.5, blaue Linie: RCP2.6, Schattierung: Bandbreite der Änderungssignale der Modelle innerhalb der Szenarien.



Auch gibt es bislang kein gesichertes Wissen um die lokale Ausprägung des globalen Anstiegs. Gleiches gilt für den Einfluss der Meteorologie auf die Wasserstände entlang der Niedersächsischen Küste. Die Unterschiede beruhen im Wesentlichen auf unterschiedlichen Annahmen für Treibhausgase und Aerosole und der Streubreite der Ergebnisse der Klimarechnungen. Ob das Abschmelzen des Festlandeises dabei ausreichend berücksichtigt wurde, ist umstritten.

Notwendig: Vorausschauender Küstenschutz

Trotz der Unsicherheiten müssen die Niederungsgebiete Niedersachsens auf den Meeresspiegelanstieg vorbereitet sein. Insbesondere eine Beschleunigung der derzeitigen Anstiegsrate verkürzt die Reaktionszeiten für Deichverstärkungen im Küstenschutz, wobei auch für die pessimistischen Szenarien ausreichend Zeit für eine Anpassung der Schutzwerke verbleibt. Zentrales Element einer Schutzstrategie muss daher die regelmäßige Überprüfung der tatsächlichen Entwicklung sein. Da die mittleren Hoch- und Niedrigwasser unterschiedlich stark ansteigen, sind zwei Aspekte separat zu betrachten: Einerseits wird der Küstenschutz mit höheren Werten als den vorausgesagten Mittelwerten rechnen müssen. Andererseits ist durch den Anstieg der Niedrigwasser auch die Entwässerung des Binnenlandes anzupassen.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Durchschnittlicher Anstieg des mittleren Tidehochwassers seit Beginn der Pegelaufzeichnungen 20 bis 30 cm pro Jahrhundert

Kurzfristiger Planungshorizont

- Küstenschutzmaßnahmen auf einen Anstieg von bis zu 50 cm pro Jahrhundert auslegen
- Trend des mittleren Tidehochwassers beobachten

Langfristiger Planungshorizont

- Eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs auf über 100 cm pro Jahrhundert ist theoretisch möglich



Extremereignisse

Jeder erinnert sich daran. Ein verheerender Orkan, extreme Hitze oder eine katastrophale Sturmflut. Extremereignisse verursachen oft menschliches Leid und richten große Zerstörungen an. Wie hat sich die Häufigkeit von Extremen in der Vergangenheit entwickelt und welche Veränderungen sind in Zukunft zu erwarten?

Extrem = selten

Extremereignisse sind sehr selten auftretende Ereignisse. Sie sind gekennzeichnet durch stark vom üblichen Zustand abweichende Verhältnisse. Es gab sie in der Vergangenheit und es wird sie auch in der Zukunft geben. Beispiele aus der entfernten Vergangenheit sind die Dionysiusfluten im Oktober 1374 und im Oktober 1375, die zwischen Dollart und Jadebusen zu Landverlust führten, oder 1816, das Jahr ohne Sommer nach dem Ausbruch des Vulkans Tambora.

Auch in der nahen Vergangenheit haben wir immer wieder Extremereignisse beobachten können. Das sind beispielsweise die Hochwasser in den Jahren 2002 und 2013 an der Elbe, beide ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, die lang andauernden Hitzeperioden im Juli 1994 und im Sommer 2003 oder die Stürme Anatol (1999) und Christian (2013).

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

Temperatur

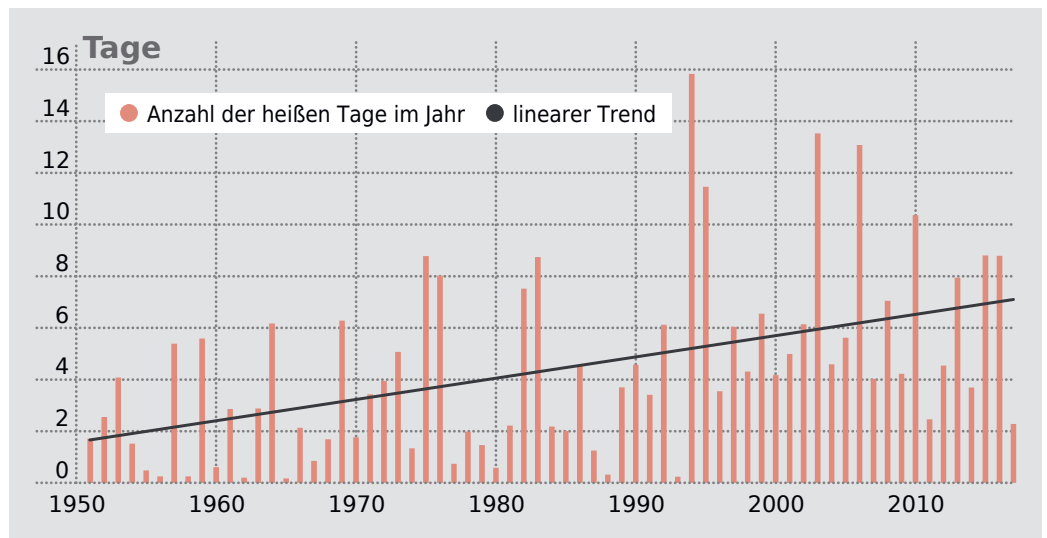
Die mittlere Temperatur hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. In der Folge sind mehr Tage mit sehr hohen Temperaturen und auch Hitzeperioden aufgetreten. Beispiel dafür sind die im Lande verzeichneten Temperaturrekorde: am 09.08.1992 wurden an vielen Orten in Niedersachsen die bisher höchsten Temperaturen gemessen, in Bergen und Fassberg wurden damals 38,6 °C erreicht.

Sommerliche Hitze

Um extreme Temperaturereignisse klimatologisch einordnen zu können, kann die Anzahl der heißen Tage (Höchsttemperatur mindestens 30 °C) pro Jahr als Anhaltspunkt dienen. Der Trend in Niedersachsen ist seit 1951 von unter zwei Tagen pro Jahr auf 7 Tage pro Jahr in 2017 angestiegen, im Mittel gab es jährlich 4,4 heiße Tage. Das Maximum wurde 1994 mit 16 Tagen verzeichnet, über 10 heiße Tage wiesen die Jahre 1995, 2003, 2006 und 2010 auf.

Daneben eignet sich auch der Kenntag ‚Tropennacht‘ als Anzeiger für belastende Wärmeereignisse, die speziell im Sommer vorkommen. Von einer Tropennacht spricht man, wenn das nächtliche Temperaturminimum nicht unter 20 °C absinkt. Tropennächte sind in der Regel keine Einzelereignisse, sondern flankiert von Sommertagen oder heißen Tagen. Eine fehlende nächtliche

Anzahl der heißen Tage ►
(Tageshöchsttemperatur
≥ 30 °C, Gebietsmittel-
werte) von 1951 bis 2017.



Abkühlung erschwert die Regeneration der Menschen und ist daher besonders belastend. In Niedersachsen ist die Anzahl der Tropennächte von 0,6 Tagen pro Jahrzehnt im Zeitraum 1961–1990 auf 2,4 Tage pro Jahrzehnt im Zeitraum 1981–2010 angestiegen.

Landesweit zeigen sich markante regionale Unterschiede in der Häufigkeit des Auftretens von Tropennächten. So werden z.B. an der Nordseeküste und ganz allgemein in der Nähe großer Wasserflächen deutlich mehr warme Nächte verzeichnet als im Binnenland und in den Mittelgebirgsregionen. Wasserflächen kühlen nachts kaum ab, dadurch wirken sie wie eine Warmwasserheizung auf die nähere Umgebung. Im Zeitraum 1981–2010 wiesen die Stationen Norderney und Cuxhaven 10 bzw. 16 Tropennächte pro Jahrzehnt auf. Hannover und Braunschweig kamen nur auf 6, Göttingen auf eine Tropennacht pro 10 Jahre.

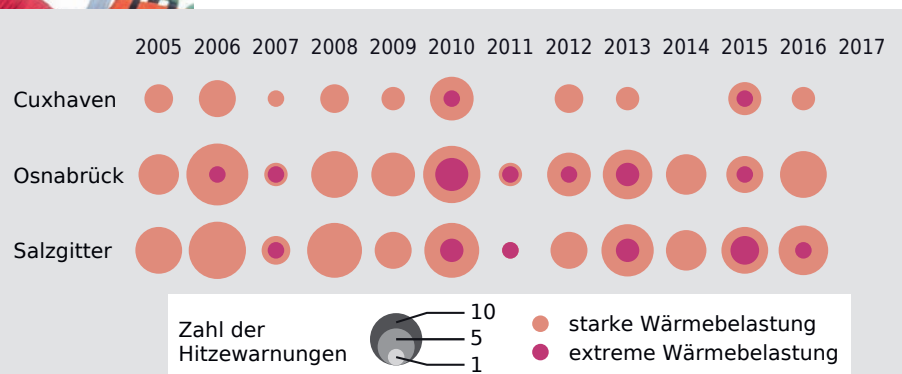
Hitzewarnsystem des DWD

Mehrtägige Hitzeperioden können erhebliche negative Folgen für die Gesundheit haben. Bei Wetterlagen, die hohe Temperaturen, hohe Luftfeuchte, geringe Windgeschwindigkeit, intensive Sonneneinstrahlung und geringe nächtliche Abkühlung aufweisen, steigt das Risiko hitzebedingter Erkrankungen. Um die Auswirkungen möglichst gering zu halten, führte der Deutsche Wetterdienst im Jahr 2005 ein Hitzewarnsystem ein.

Hitzewarnsysteme verwenden die aktuellen Wettervorhersagen, um Episoden mit hoher Wärmebelastung vorherzusagen. Gewarnt wird in zwei Stufen anhand einer berechneten gefühlten Temperatur: Liegt sie für den Landkreis an zwei Tagen in Folge über 32 °C und bleibt die Nacht dazwischen warm, wird vor starker Wärmebelastung gewarnt. Werden 38 °C überschritten, gibt der DWD eine Warnung vor



Zahl der vom DWD ausgegebenen Hitze-
warnungen im Zeitraum 2005 bis 2017
für einige Landkreise in Niedersachsen.
▼ Keine Warnungen gab es im Jahr 2017.



extremer Hitzebelastung heraus. In den Landkreisen Osnabrück und Salzgitter gab es 2006 und 2010 die meisten Warnungen vor Wärmebelastung, aber auch 2008 und 2013 wurde häufig gewarnt. Ein Trend ist in der Ausgabe von Hitze警告en in dem kurzen Zeitraum seit 2005 nicht erkennbar.

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

Winterliche Kälte

Es stellt sich die Frage, ob es zukünftig keine kalten Winter mehr geben wird. Kalte Winter in Norddeutschland werden hervorgerufen durch längere Witterungsperioden, die durch arktische oder eurasische Kaltluft-

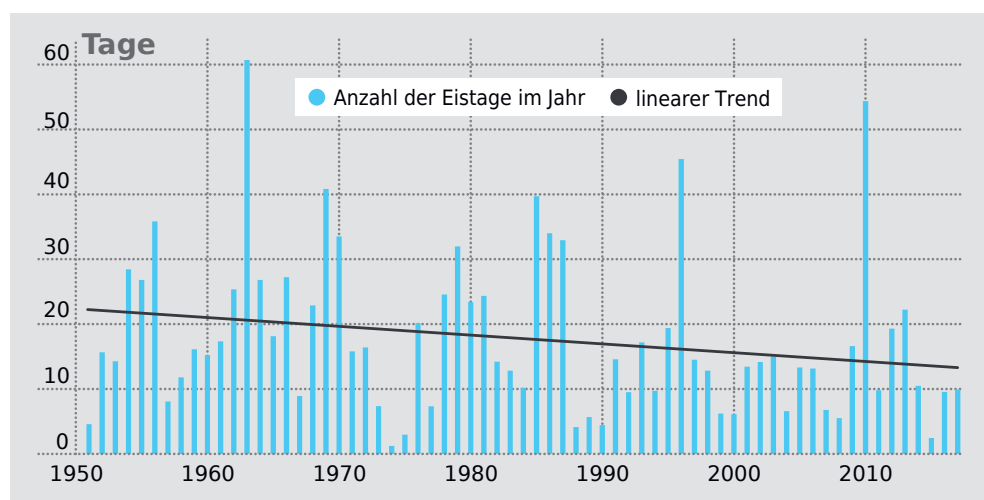
zufuhr geprägt sind. Wie sich die Wahrscheinlichkeit für derartige Witterungssituationen vor dem Hintergrund einer häufiger eisfreien Barentssee entwickeln wird, ist Gegenstand aktueller Forschung. Grundsätzlich schwächt sich aber die Intensität solcher Witterungsereignisse durch die globale Erwärmung ab.

Die Winter in Niedersachsen zeigen von Jahr zu Jahr ein anderes Gesicht. Zur Einordnung eignet sich der Kenntag ‚Eistag‘, an dem die Maximumtemperatur unter null Grad bleibt. Von jährlich 21 Eistagen im Zeitraum 1961–1990 ist die Häufigkeit auf 17 im Zeitraum 1981–2010 zurückgegangen. Im Mittel gab es in Niedersachsen 18 Eistage pro Jahr, allerdings zeigten sich auch gewaltige Schwankungen von Jahr zu Jahr. In den kalten Wintern 1963 und 2010 wurden über 50 Eistage gezählt, 1974 und 2014 gab es nur 1 bis 2 Eistage.

Auch bei den Eistagen zeigt sich eine deutliche Regionalität in Niedersachsen. Die im Harz gelegenen Orte Braunlage und Clausthal-Zellerfeld wiesen im Zeitraum 1961–1990 jährlich über 45 Eistage auf. In der Lüneburger Heide, den Börden und den Geestgebieten wurden 20 bis 23 Eistage gezählt. In Ostfriesland und speziell auch auf den Inseln gab es im gleichen Zeitraum nur 15 Eistage. Weiße und kalte Winter stellen auf den Ostfriesischen Inseln also eine Ausnahme dar, werden aber auch in Zukunft nicht ganz ausgeschlossen sein.



Anzahl der Eistage (Tageshöchsttemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$, Gebietsmittelwerte) von 1951 bis 2017. ▼



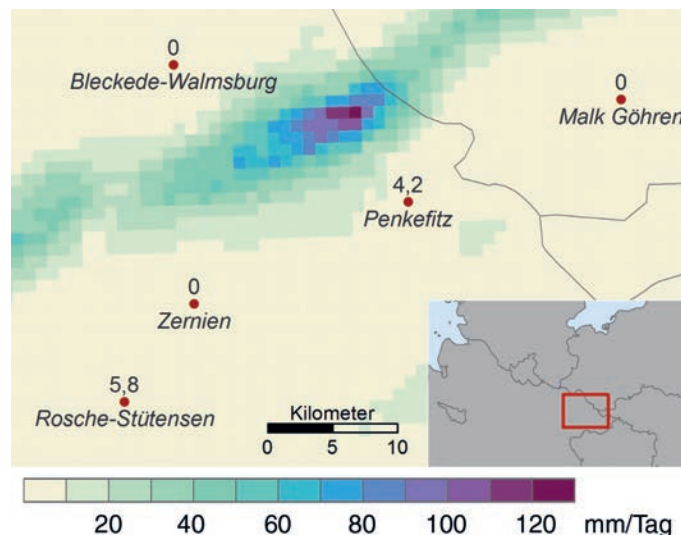


Niederschlag

Der Juli 2017 war in Niedersachsen außerordentlich niederschlagsreich: das Gebietsmittel betrug 138 mm, und damit nahezu das Doppelte der üblichen Menge. Eine solche Regenmenge wurde seit 1881 in weniger als 5 % aller Julimonate ermittelt. In einigen Regionen kam es zu Überschwemmungen und in der Folge zu immensen Schäden. Damit so viel Niederschlag abregnet, müssen mehrere meteorologische Ursachen aufeinander treffen. Lokal müssen starke Hebungsprozesse auftreten, die zu einem Ausfallen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit führen. Dabei gilt: je höher die Temperatur der Luftmasse, desto mehr Wasser kann enthalten sein. Die großräumige Wettersituation muss anhaltend für eine stetige Zufuhr weiterer warmer und feuchter Luftmassen sorgen.

In Seesen fielen Ende Juli 2017 in einem Zeitraum von 48 Stunden gut 160 mm Niederschlag. Die Häufigkeit des Auftretens derartiger Starkniederschläge lässt sich mittels extremwertstatistischer Auswertungen als Wiederkehrzeit bestimmen. Diese ist abhängig von der Andauer des Ereignisses und von der Menge des gefallenen Niederschlags. Für den Starkniederschlag, der in Seesen gemessen wurde, ergibt sich eine Wiederkehrzeit von 100 Jahren; es war also ein Jahrhundertereignis!

Es gibt einen hohen Forschungsbedarf in der Thematik Starkniederschläge, denn die Anforderungen an quantitative Angaben zu großen bis außergewöhnlich extremen Niederschlagsmengen für praxisrelevante Zielsetzungen sind hoch. Die für unterschiedliche Anwendungen relevanten Starkniederschlagsereignisse können sowohl lokale Niederschläge kurzer Dauer und hoher Intensität als auch mehrere Stunden oder Tage anhaltende und ausgedehnte Niederschläge mit beträchtlichen Gesamtniederschlagsmengen sein. So wird für die Siedlungsentwässerung unter anderem als wichtige Bezugsgröße die Auftretenshäufigkeit von Niederschlägen mit einer Andauer von 15 Minuten genutzt. Für das Risikomanagement von Fluss-Hochwassern sind Niederschläge mit einer Dauerstufe von 12 Stunden und mehr relevant.



▲ Starkregenereignis am 4.6.2016: In schwülwarmer Luft entwickelten sich Schauer und Gewitter, die räumlich eng begrenzt zu hohen Niederschlagsmengen führten. Die Bodenmessstationen liefern exakte Angaben zu den lokal gefallenen Regenmengen, Radarbilder zeigen die flächendeckende Verteilung des Niederschlags. Im Verfahren RADOLAN werden beide Informationen kombiniert.

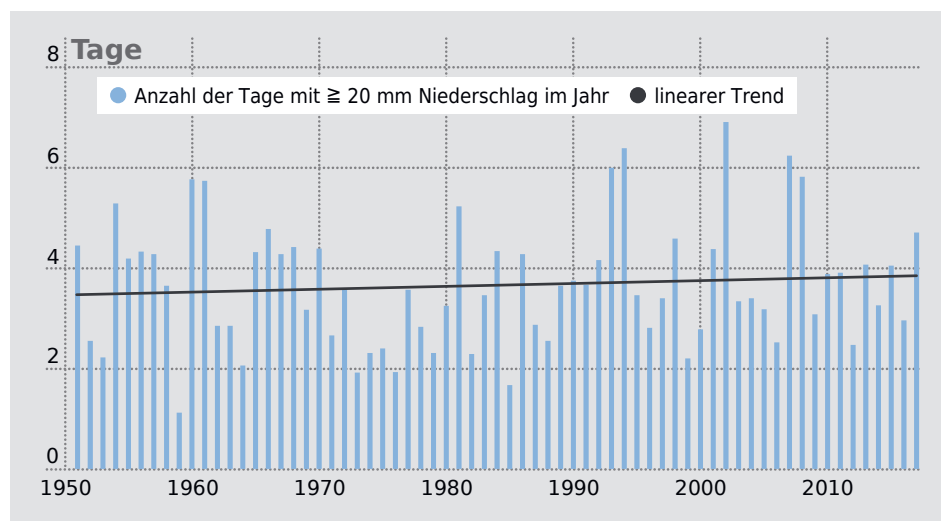
Punkte: Automatische Niederschlagsstationen, Tagessumme des Niederschlags (in mm); farbiges Raster: Tagessumme des Niederschlags (in mm) aus RADOLAN. Größe der Rasterzellen 1 km x 1 km.

Seit 2001 ist es möglich, durch Fernerkundungsmethoden, wie dem Wetterradarverbund des Deutschen Wetterdienstes, den Niederschlag flächendeckend zu erfassen und damit auch die lokal und kurzzeitig hohen Intensitäten des Niederschlags. Der Zeitraum von 17 Jahren, in dem diese Daten erfasst sind, ist aber klimatologisch gesehen noch sehr kurz. Die Analyse der Nutzbarkeit der Daten steht noch am Anfang.

Bis zum Jahr 2000 stellten die Messdaten der Bodenmessstationen die einzige, bekanntermaßen unzureichende Informationsquelle dar, um Starkregenereignisse zu erfassen. Zu einer Abschätzung der Entwicklung der Starkniederschläge kann der Kenntag mit einer Tagessumme des Niederschlags von mindestens 20 mm herangezogen werden.

Die größte Anzahl derartiger Starkregenereignisse trat im Gebietsmittel im Jahr 2003 mit 7 Tagen auf; ausgewertet wurde der Zeitraum 1951 bis 2017. Bisher ist in jedem Jahr mindestens ein Tag mit Starkregen aufgetreten.

Anzahl der Tage mit mindestens 20 mm Niederschlag (Gebietsmittelwerte) von 1951 bis 2017.



In der Referenzperiode 1961–1990 wurden landesweit durchschnittlich 3,3 Tage beobachtet, dieser Wert erhöhte sich um 0,6 Tage in der Periode 1981–2010. Generell ist bei diesen geringen Änderungsraten Vorsicht bei der Interpretation geboten.

Für die aktuelle Daseinvorsorge bieten die Starkregenwarnungen des DWD eine wichtige Informationsquelle: Sie unterteilen sich in Warnungen vor markantem Wetter und in Unwetterwarnungen und berücksichtigen sowohl die kurzzeitig intensiven Regenfälle als auch länger andauernde Regenereignisse.

Warnkriterien des Deutschen Wetterdienstes für Niederschlag mit hohen Intensitäten		
Bezugszeitraum	Wetterwarnung	Unwetterwarnung
1 Stunde	15 bis 25 Liter/m ²	>25 Liter/m ²
6 Stunden	20 bis 35 Liter/m ²	>35 Liter/m ²
12 Stunden	25 bis 40 Liter/m ²	>40 Liter/m ²
24 Stunden	30 bis 50 Liter/m ²	>50 Liter/m ²
48 Stunden	40 bis 60 Liter/m ²	>60 Liter/m ²
72 Stunden	60 bis 90 Liter/m ²	>90 Liter/m ²

Der Klimawandel führt durch die Erhöhung der Lufttemperatur zu einem Anstieg des Potenzials für extreme Niederschlagsereignisse. Dieser Prozess wird noch dadurch verstärkt, dass der Zusammenhang zwischen Temperatur und Wassergehalt nicht linear, sondern exponentiell verläuft. Die aktuelle Generation regionaler Klimamodelle zeigt eine Tendenz weiterer Zunahmen von Niederschlagsextremen an, ist aber aufgrund der für diese Prozesse zu groben Auflösung nicht in der Lage, detaillierte lokale Angaben zu liefern.

Hagel

Hagelereignisse sind lokale und seltene Ereignisse, welche hohe Schäden an der Infrastruktur und Verluste in der Landwirtschaft verursachen können. Durch die meist geringe Ausdehnung der Hagelereignisse 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 von Hagelereignissen je Jahr im Süden als im Norden. Auf Basis der vorhandenen Beobachtungsdaten ist es aber 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 z. B. Konvektionsparameter, die das Potential für die Gewitter- und Hagelbildung beschreiben. Statistische Analysen der hagelrelevanten Konvektionsparameter zeigen für die vergangenen 20 bis 30 Jahre eine leichte Zunahme des Potentials.

Die räumliche Auflösung der aktuell genutzten regionalen Klimamodelle ist nicht ausreichend, um Hagel

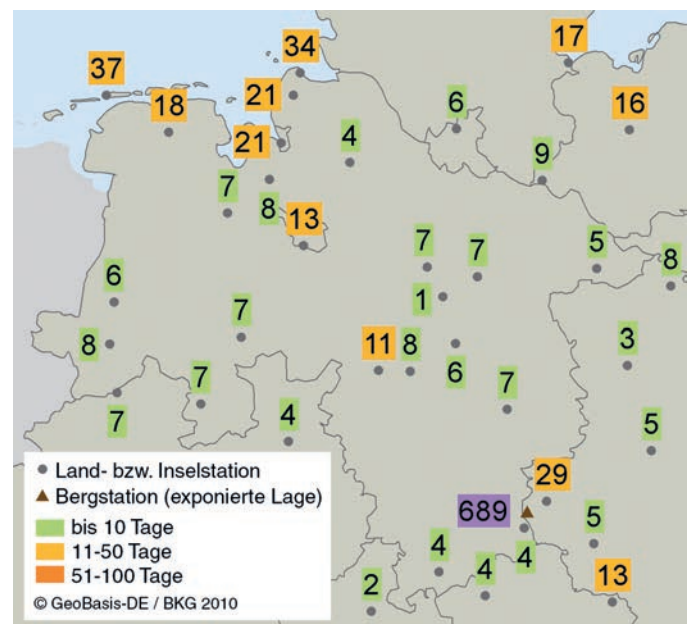


direkt zu modellieren. Hagel wird nur grob über Parametrisierungen abgeschätzt. Somit sind keine Aussagen zu zukünftigen Tendenzen möglich. Analysen des Konvektionspotentials zeigen für den kurzfristigen Planungshorizont keine einheitliche Tendenz auf.

Wind

Markante Sturmereignisse wie z.B. „Xavier“ oder „Herwart“ im Jahr 2017 beleben regelmäßig die Diskussion über mögliche Änderungen der Häufigkeit von Stürmen oder generell über Langzeittrends der Windgeschwindigkeit. Die Antwort darauf ist schwierig. Fast alle Windzeitreihen weisen Inhomogenitäten auf. Des Weiteren sind die zur Verfügung stehenden Zeitreihen meist nur einige Jahrzehnte lang, zu kurz, um Langzeittrends über zum Beispiel 100 Jahre bestimmen zu können. Die besonders interessierenden Stürme oder Orkane sind seltene Ereignisse und damit nur mit möglichst langen Zeitreihen statistisch zu bewerten.

Um darzustellen, wie stark die Regionen in Niedersachsen durch hohe Windgeschwindigkeiten gefährdet sind, wurden die Messungen an den Stationen des Windmessnetzes des DWD ausgewertet. Verwendet wurden die täglichen Windspitzen (höchster 3-Sekunden-Mittelwert des Tages) des Zeitraums 1981–2010. Die Karte der Häufigkeit der Spitzenböen der Stärke 11 und 12 Bft (Beaufort) zeigt die durchschnittliche Anzahl an Tagen für einen Zeitraum von 10 Jahren, in dem Windspitzen ab 103 km/h (Bft 11 und 12) aufgetreten sind. Gibt es z.B. in 10 Jahren Windspitzen ab 11 Bft an durchschnittlich 21 Tagen, so ist – statistisch gesehen – jedes Jahr mit 2 Ereignissen zu rechnen. In Niedersachsen sind der Küstenbereich und die Hochlagen der Mittelgebirge stärker gefährdet als der Süden



▲ Häufigkeit von Spitzenböen der Stärke 11 und 12 Bft (Tage in 10 Jahren) im Zeitraum 1981 bis 2010.

und Osten des Landes. An der Nordseeküste werden im Mittel jährlich 3 bis 4 Orkantage gezählt, wobei die tatsächliche Anzahl von Jahr zu Jahr stark schwankt.

Aus den Ergebnissen der Klimamodellprojektionen ist für die Zukunft bei den Stürmen keine deutliche Änderung erkennbar.

Tornados

Tornados sind kurzlebige und räumlich stark begrenzte, rotierende Luftmassen unter einer konvektiven Wolke, mit Bodenkontakt. Je nach Stärke können sie sehr hohe Schäden verursachen. Aktuell werden mehr Tornados entdeckt als früher. Schwächere Tornados, die nur geringere Schäden verursachen, bleiben in vielen Fällen auch heute noch unentdeckt. In Niedersachsen wurden im Zeitraum 2000 bis 2017 im Mittel 4 Tornados pro Jahr über Land beobachtet und 3 Tornados über See (Wasserhosen). Stärkere Tornados mit großer Zerstörungskraft sind in Niedersachsen selten. Ob die Zahl der Tornados zugenommen hat, ist aufgrund der Dunkelziffern in der Vergangenheit nicht nachweisbar.

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



Stadtklima



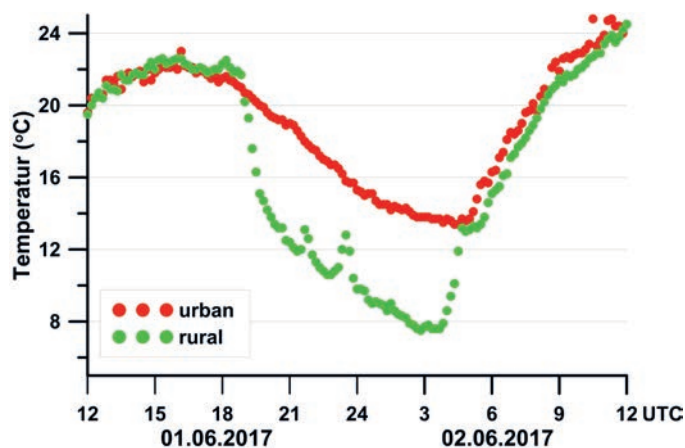
Beitrag des Instituts für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover

Die städtische Wärmeinsel kann für die Bewohner zu einer gesundheitlichen Belastung werden. Mittelfristig wird sich die Anzahl der Tage mit einer Höchsttemperatur von 25 °C und mehr verdoppeln.

Die städtische Wärmeinsel

Im Vergleich zum Umland zeigen Städte und Siedlungen eine deutliche Modifikation der klimatischen und der lufthygienischen Verhältnisse. Veränderungen in der Zusammensetzung der Luft, der Bodeneigenschaften und des Wasserhaushaltes sowie die Freisetzung anthropogener Abwärme führen zu einem Stadtklima, das sich von Stadt zu Stadt unterschiedlich ausbildet und innerhalb eines urbanen Lebensraumes räumlich sehr stark strukturiert sein kann. Eines der auffälligsten Phänomene beim Stadtklima ist die urbane Wärmeinsel, die sich besonders bei windschwachen Hochdruckwetterlagen in der Nacht ausbildet. Während die Temperatur im Umland und den innerstädtischen Grünflächen deutlich zurückgeht, ist die nächtliche Abkühlung in den bebauten und versiegelten Bereichen der Stadt stark reduziert. Dies kann besonders in den Morgenstunden zu großen Temperaturunterschieden führen.

Die maximale Wärmeinselintensität hängt sehr stark von der Einwohnerzahl ab, da dies ein guter Indikator für Flächenverbrauch und Ressourcennutzung ist.



▲ Gemessener Tagesgang der Temperatur an einer urbanen und an einer ruralen Station in Hannover (DWD-Sondermessnetz „Stadtklima Hannover“).

Die größten Städte Niedersachsens wie Hannover und Braunschweig können in den sommerlichen Nachtstunden bis zu 6 bis 8 Grad wärmer sein als das Umland. Aber auch für kleinere Siedlungsbereiche macht sich der Wärmeinseleffekt bemerkbar.

Die großen räumlichen Unterschiede innerhalb eines urbanen Lebensraumes können mit Hilfe von mobilen und stationären Messungen, wie es z.B. in dem DWD-Sondermessnetz „Stadtklima Hannover“ geschieht, oder aber mit Stadtklimamodellen erfasst werden. Die Modelle können Modifikationen der Temperatur auf kleinstem Raum für das gesamtstädtische Gebiet realitätsnah berechnen.

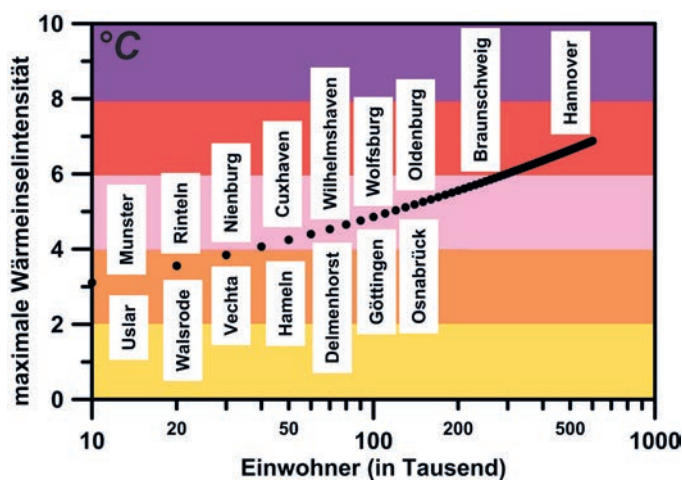
Wie entwickelt sich das Stadtklima?

Vergangenheit und Gegenwart

Die Belastung durch Wärme in der Stadt kann für bestimmte Bevölkerungsgruppen zu einer gesundheitlichen Belastung führen. Klimatologische Kenntage wie Sommertage, charakterisiert durch eine Höchsttemperatur von 25 °C und mehr, und heiße Tage mit Höchstwerten von mindestens 30 °C können als Anhaltspunkt für diese Wärmebelastung dienen.



▲ Stadtklima-Messstation in Hannover, Weidendamm.

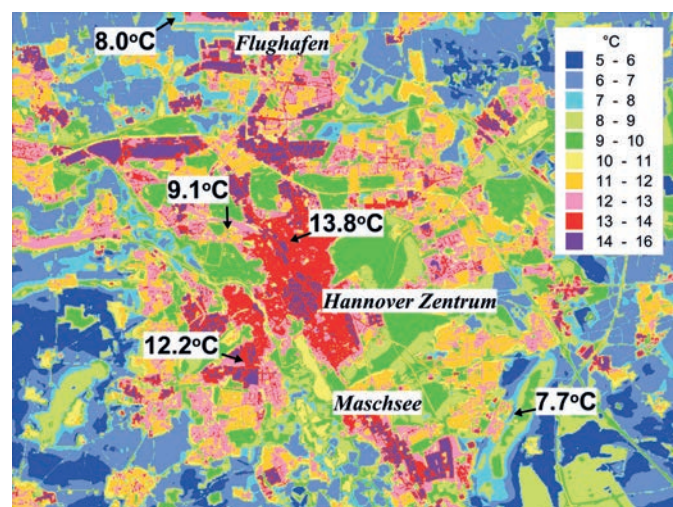


▲ Abhängigkeit der maximalen städtischen Überwärmung (in °C) von der Einwohnerzahl in verschiedenen Städten in Niedersachsen. (Quelle: Kuttler 2015, verändert)

In Niedersachsen gibt es deutliche Unterschiede in der Anzahl dieser Kenntage zwischen Küste und Harz einerseits und den restlichen Landesteilen andererseits. So werden für die Periode 1981-2010 in Clausen-Zellerfeld und auf Norderney 12 bzw. 9 Sommertage und jeweils ein heißer Tag beobachtet, während es in Braunschweig und Hannover mit 32 Sommertagen und 6 heißen Tagen deutlich mehr waren. Spitzenreiter ist Wolfsburg mit 40 Sommer- und 10 heißen Tagen. Im Vergleich mit der Referenzperiode 1961-1990 hat die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage deutlich zugenommen.

Zukunft

Die Ergebnisse der vorliegenden Klimaprojektionen des **Weiter-wie-bisher-Szenarios** liefern wichtige Informationen hinsichtlich der möglichen Entwicklung in der Zukunft. Bei einer allgemeinen Erwärmung wird



▲ Mit dem Stadtklimamodell FITNAH (IMUK Hannover) berechnete räumliche Verteilung der nächtlichen Temperatur in 2 m Höhe am 1.6.2017 um 5 Uhr im Vergleich mit Messwerten des DWD-Sondermessnetzes „Stadtklima Hannover“.

auch die Häufigkeit des Auftretens von Sommertagen und von heißen Tagen zunehmen. Demnach ist bis 2050 mit einer Erhöhung der Sommertage in der Region Hannover im Mittel auf einen Wert von 42 Tagen zu rechnen; die Spannweite der Projektionen liegt zwischen 13 und 68 Tagen. Bis zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Anzahl auf 68 Tage zu, dabei beträgt die Bandbreite der Ergebnisse 34 bis 112 Tage. Bei den heißen Tagen ist der ansteigende Trend noch deutlicher auf zukünftig 12 Tage pro Jahr im kurzfristigen Planungshorizont (2021-2050) bei einer Bandbreite der Ergebnisse von 2 bis 24 Tagen. Im langfristigen Planungshorizont bis zum Jahr 2100 steigt die Zahl auf 27 Tage an mit einer Spannweite der Projektionen von 8 bis 57 Tagen.

Mittelwerte der Sommertage und heißen Tage im Raum Hannover



	1971-2000	1981-2010	2021-2050 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP8.5)
Sommertag	29 Tage	32 Tage	42 Tage	68 Tage
Heißer Tag	5 Tage	6 Tage	12 Tage	27 Tage

KURZ NOTIERT

Beobachtungen und Modelle

- Wärmeinselintensität in großen Städten bis zu 6 bis 8 Grad höher als im Umland
- Große räumliche Variabilität der städtischen Wärmeinsel
- Zunahme der Sommertage in den letzten Dekaden

Kurzfristiger Planungshorizont

- Verdoppelung der Zahl der heißen Tage

Langfristiger Planungshorizont

- Verdoppelung der Zahl der Sommertage



Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima

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

Mit der Erkenntnis, dass die vermehrte Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern wird, wurde der Grundstein der modernen Klimaforschung gelegt. In den letzten Jahren konnte der Zusammenhang zwischen der beobachteten Erwärmung der Erdatmosphäre und den Aktivitäten der Menschheit klar belegt werden. Dies verstärkt die Notwendigkeit zur weiteren Erforschung des Klimasystems. Dazu hat die Forschungsgemeinschaft für die nächsten Jahre drei wesentliche Ziele formuliert:

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

Vertiefung des Systemverständnisses zum Klimageschehen

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

In Zusammenarbeit vieler Klimawissenschaftler auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene wurden in den letzten Jahren viele Themengebiete systematisch analysiert und vorhandene Lücken identifiziert.

Auf Basis dieser Analysen wurden sechs Themengebiete herausgearbeitet, die von besonderem Interesse sind:

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

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

Bewertung und Umgang mit Risiken und Chancen

Der zeitliche und räumliche Versatz zwischen den Ursachen und den Folgen des Klimawandels führt zu einer besonderen Herausforderung aller Akteure. So ist die Frage nach Nutzen und Schaden durch den Klimawandel nicht durch einzelne Akteure in der Wissenschaft zu beantworten. Diese Frage und die daraus zu entwickelnden Handlungsoptionen müssen

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

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

Erforschung des Zusammenspiels Klimawandel und Gesellschaft

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

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

Eine große und dauerhafte Herausforderung einer jeden Wissenschaftsrichtung ist die regelmäßige Analyse der Wissensgenerierung. Auf welchen Annahmen basieren die aktuellen Erkenntnisse? Wo besteht Konsens und wo Dissens? Aber auch die Frage, ob die vorhandenen institutionellen Strukturen der Klimaforschung sinnvoll sind. Sind die einzelnen Themenfelder ausreichend miteinander vernetzt?



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

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

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

Jahreszeitenvorhersagen werden jeden Monat vom German Climate Forecast System (GCFS) neu berechnet. Durch den Deutschen Wetterdienst werden diese Vorhersagen monatlich analysiert und auf der Webseite www.dwd.de/jahreszeitenvorhersage publiziert. Mit den Ergebnissen sind beispielsweise El Niño-Vorhersagen möglich. Dekadenvorhersagen sind aktuell noch Forschungsgegenstand. Eine Operationalisierung ist für 2019/2020 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.

Gebietsmittelwerte

Die Wetterstationen sind sehr unregelmäßig verteilt über Deutschland. Um Aussagen nicht nur für einzelne Stationen, sondern für größere Bereiche machen zu können, werden die Messwerte mit Hilfe mathematischer Methoden auf ein 1 km x 1 km-Raster interpoliert. Aus den Rasterdaten werden die Gebietsmittelwerte für einzelne Bundesländer bzw. für ganz Deutschland berechnet.

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 $\geq 25^\circ\text{C}$) 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

Vorhersagen leiten aus dem vergangenen und aktuellen Zustand der Atmosphäre Aussagen über dessen zukünftigen Zustand ab. Traditionell beinhaltet eine Vorhersage die Wetterentwicklung der nächsten ein bis zehn Tage. Ein aktueller Forschungsgegenstand ist die Abschätzung der Entwicklung über diesen Zeithorizont hinaus für Zeitskalen von mehreren Monaten bis einer Dekade.

Perzentil

Perzentile oder auch Quantile sind Prozentangaben. Sie gliedern die Anzahl der untersuchten Modellergebnisse in Maßklassen, womit sich ein bestimmter Prozentanteil dieser Ergebnisse umschließen lässt.

Der Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil umschließt beispielsweise 70 % der Modellergebnisse. Der Wert, den ein Perzentil annimmt, z.B. 85. Perzentil = $9,4^\circ\text{C}$, 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 bis 2050, der langfristige das Zeitfenster der Jahre 2071 bis 2100. Auf diese Zeiträume bezogene Aussagen erfolgen immer in Relation zur Bezugsperiode 1971 bis 2000.

Referenzzeitraum/Referenzperiode

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

RCP

Repräsentative Konzentrationspfade (*Representative Concentration Pathways* – RCPs) beschreiben Szenarien, die eine zeitliche Entwicklung der Emissionen und Konzentrationen der Treibhausgase, Aerosole und chemisch aktiven Gasen, aber auch der Landnutzung beschreiben. Details sind im Abschnitt *Klimawandel und Klimaprojektionen* beschrieben.

Spannbreite

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

Szenarien

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



Begriffsbestimmung in der Klimamodellierung

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

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

Multi-Modell-Ensembles sind ihrer Natur nach „Ensembles of Opportunity“, das heißt, sie sind eine Ansammlung zur Verfügung stehender Klimaprojektionen, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen, wie beispielsweise für eine gewisse Region in einer gewissen Auslösung über einen gewissen Zeitraum vorzuliegen. Weiterhin weisen viele Klimamodelle



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

mehr oder weniger starke Ähnlichkeiten auf. Die Kombination dieser beiden wichtigen Eigenschaften von Multi-Modell-Ensembles, willkürliche Zusammensetzung des Ensembles und nichtzufällige Ähnlichkeiten zwischen den Modellen, bewirkt, dass sich die Datenwolke der Klimaänderungssignale, die aus einem solchen Ensemble generiert wird, nicht wie eine unabhängige, identisch verteilte Zufallsstichprobe verhält und zudem erhebliche Redundanzen aufweist. In der Folge ist es nur möglich, den Grad der Übereinstimmung der genutzten Modellläufe zu beschreiben.

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



Impressum

Die Erstellung des Klimareports Niedersachsen erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Wetterdienst und dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.

Autoren

Dr. Michael Borsche, Andreas Friedrich, Karsten Friedrich, Dr. Kristina Fröhlich, Dr. Barbara Früh, Dr. Frank Kreienkamp, Gabriele Krugmann, Saskia Pietzsch, Dr. Monika Rauthe, Wolfgang Riecke, Dr. Birger Tinz, Dr. Andreas Walter, Sabrina Wehring, Elmar Weigl

Beiträge Landesinstitutionen

Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

Forschungsstelle Küste

Bst. Norden/Norderney

An der Mühle 5

26548 Norderney

www.nlwkn.niedersachsen.de/FSK

postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Hauptsitz Hannover

Stilleweg 2

30655 Hannover

<https://www.lbeg.niedersachsen.de>

Lena Hübsch (Lena.Huebsch@lbeg.niedersachsen.de)

Leibniz Universität Hannover

Institut für Meteorologie und Klimatologie

Herrenhäuser Straße 2

D-30419 Hannover

<https://www.muk.uni-hannover.de>

Prof. Günter Gross (gross@muk.uni-hannover.de)

Redaktion

Gabriele Krugmann

Online-Ausgabe

Dieses Heft liegt als digitales Dokument auf unserer Internetseite www.dwd.de/klimareport-nds.

Die Online-Ausgabe unterliegt der Lizenz



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

Zitierhinweis

DWD (2018): Klimareport Niedersachsen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 52 Seiten.

ISBN 978-3-88148-508-1 (Print)

ISBN 978-3-88148-509-8 (Online)

Gestaltung und Satz

Elke Roßkamp (Deutscher Wetterdienst)

Druck

Druckerei des BMVI

Robert-Schumann-Platz 1

53175 Bonn

Bildnachweis

DWD: 2, 7, 30, 42

Henning Scheffen: 3

MU: 12m (Lüneburger Heide GmbH), 23o (Antje Mexner), 29o (Gudrun Jahns), 29u (Jürgen Kattenstroth), 34r (Antje Mexner), 35l (Michael Brinkmann), 35r (Gerald Millat)

Creative Collection: 6m, 14/15, 17o, 21l, 27u, 31o

Panthermedia.net: 1o (Laurent Renault), 1m (Hans Eder), 1u (Tilo Grellmann), 4 (Dario Sabljak), 6l (Clemens Humeniuk), 6r (Wolfgang Filser), 10u (Orlando Rosu), 11 (Hendrik Fuchs), 12o (Klaus Raab), 17ul (Paul Maurice), 17ur (Daniel Loretto), 19 (Peter Kaschuba), 20 (Michael Reicke), 21ml (Oliver C. Bellido), 21mr (Gabi Faltenbacher), 21r (Tyler Olson), 32/33 (Roland Schmock), 34l (Ines Weiland-Weiser), 31u (isoga), 36 (Bernd Leitner), 37 (william87), 38 (Carmen Steiner), 41l (D. Mattwich), 41r (Oemer Tigrel), 44 (James Steidl), 47o (Rilo Naumann), 47u (Jörg Röse-Oberreich)

MEV-Verlag: 27o

Fotolia.com: U1 (Eva Gruendemann), Um (TIMDAVID-COLLECTION), Ur (mhp), 5 (Gina Sanders), 8 (AndreasG), 10o (Paul Paladin), 12u (Frank Wiechens), 16 (gradt), 24/25, 40 (akf)

Photocase.com: 39 (Steffnel)

Wikipedia: 43

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



Deutscher Wetterdienst
Abt. Klima- und Umweltberatung
Regionales Klimabüro Hamburg
Bernhard-Nocht-Str. 76
20359 Hamburg
Tel: +49 (0) 69 / 8062 - 6022
Fax: +49 (0) 69 / 8062 - 6033
E-Mail: klima.hamburg@dwd.de



**Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz**

**Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,
Energie, Bauen und Klimaschutz (MU)**
Archivstr. 2
30169 Hannover

E-Mail: poststelle@mu.niedersachsen.de
<https://www.umwelt.niedersachsen.de>

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

