

Klimareport Hessen

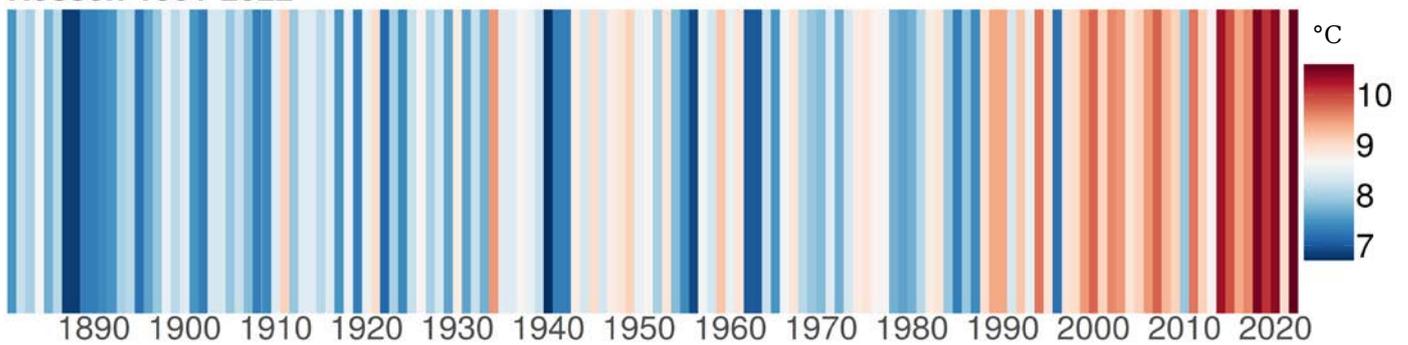
**Das Klima in Hessen - gestern,
heute und in der Zukunft**



▼ "Warming Stripes"

Die farbigen Streifen auf der Titelseite visualisieren die Durchschnittstemperaturen für Hessen zwischen 1881 und 2022; jeder Streifen steht für ein Jahr. Die Grafik wurde von Ed Hawkins entwickelt.

Hessen 1881-2022



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

Inhalt

Vorwort	4
Immer in Bewegung: Wetter und Klima	6
Klima, Klimavariabilität und Extreme	8
Klimamodelle	11
Klimawandel und Klimaprojektionen	13
Das Klima in Hessen heute und morgen	15
Temperatur	17
Niederschlag	23
Schneebedeckung	30
Sonnenschein	32
Wind	35
Verdunstung	37
Wasserbilanz	38
Phänologie	40
Extremereignisse	42
Begriffskompass Klima	64
HLNUG - Informationen	66
DWD - Präsenz in der Fläche	67
Weblinks	69
Impressum	71

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende 1. Auflage des Klimareports Hessen fasst das derzeitige Wissen über das Klima in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in kurzer und prägnanter Form zusammen. Er soll Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, die Möglichkeit geben, sich einen fundierten Überblick über die vergangene und zukünftig zu erwartende Klimaentwicklung in Hessen zu verschaffen.

Die 5 wärmsten Jahre seit 1881 – ab diesem Jahr sind Klimadaten flächendeckend verfügbar – traten in Hessen während der letzten Dekade auf. Das Jahr 2022 war dabei mit einem Jahresmittel der Lufttemperatur von 10,6°C das bisher wärmste Jahr in Hessen, gefolgt von den Jahren 2018 mit 10,5°C, 2020 mit 10,4 °C und 2014 mit 10,3°C, die damit mehr als zwei Grad über dem vieljährigen Mittel der Referenzperiode 1961-1990 lagen.

Der 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) lässt bis Ende dieses Jahrhunderts eine weitere deutliche Klimaänderung erwarten. Der Klimawandel stellt für jeden von uns eine große Herausforderung dar, zum Beispiel durch vermehrt auftretende Tage mit starker Wärmebelastung oder durch eine steigende Häufigkeit von extremen Witterungsereignissen wie längeren Trockenperioden oder lokal auftretenden Starkniederschlagsereignissen mit hohem Schadenspotential.

Der internationale Rahmen für den Umgang mit dem Klimawandel wurde auf der UN-Klimakonferenz COP21 im Jahr 2015 in Paris vereinbart. Eine Voraussetzung für die Umsetzung der dort definierten Ziele ist ein detailliertes Verständnis zum aktuellen Stand der Klimaentwicklung. Um die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, sind umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen auch auf Bundeslandebene notwendig. Der Klimareport Hessen stellt wesentliche Informationen zum Klimawandel zur Verfügung und schafft damit die Voraussetzung für eine erfolgreiche Erarbeitung von Entwicklungsstrategien zur Anpassung an den Klimawandel und seinen Folgen im Bundesland Hessen.



Tobias Fuchs

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



Liebe Leserinnen und Leser,

der Klimawandel findet bereits statt, weltweit und auch in Hessen. Schon jetzt können wir Klimaveränderungen messen und Folgen des Klimawandels in Hessen beobachten.

Die Jahre 2018, 2019, 2020 und 2022 waren alle sehr warm und trocken. Folgen waren Ernteaussfälle, massive Waldschäden, zu warme und zu trockene Gewässer und daraus resultierende Schäden für Menschen, Tiere und Pflanzen. Paradoxerweise gab es in diesen Trockenjahren auch viele Starkregenereignisse: lokal begrenzte intensive Schauer oder Gewitter, die ganze Orte oder Ortsteile unter Wasser gesetzt und Böden erodiert haben. All das sind schon heute Folgen des Klimawandels und Vorboten von Entwicklungen, die sich mit fortschreitender Erwärmung noch verstärken werden.

Wie stark sich der Klimawandel entwickeln wird, hängt von den Treibhausgasemissionen ab, die wir – weltweit, aber auch in Hessen – noch ausstoßen werden. Ambitionierter Klimaschutz ist notwendig, um den Klimawandel auf ein handhabbares Maß zu begrenzen. Klar ist aber auch, dass wir uns schon jetzt an ein verändertes Klima anpassen müssen.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat im Jahr 2008 als erstes deutsches Bundesland ein Fachzentrum Klimawandel gegründet. Wir unterstützen Kommunen beim Schutz vor Starkregen, bei der Vorbereitung auf Hitzeperioden und bei der Planung von Krisenstäben für Extremwetter. Wir erstellen Listen klimaresilienter Stadtbäume und Handlungsleitfäden für klimarobuste Gewerbegebiete. Wir beraten und unterstützen Politik, Wirtschaft und Gesellschaft dabei, der Herausforderung Klimawandel zu begegnen. Sie finden vielfältige Unterstützungsangebote auf unseren Webseiten, die am Ende dieses Berichts verlinkt sind.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre, die Sie dabei unterstützt, kompetent und faktenbasiert über den Klimawandel zu sprechen. Mit diesem Report und den Informationen auf unseren Webseiten möchten wir Sie dazu anregen, selbst Maßnahmen zum Schutz des Klimas und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln und umzusetzen. Denn Klimaschutz und Klimaanpassung sind nur gemeinsam möglich.

Thomas Schmid

Prof. Dr. Thomas Schmid
Präsident der HLNUG

Immer in Bewegung: Wetter und Klima

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



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 der Atmosphäre bestimmt, welche Luftmasse dominiert. Dementsprechend können die Jahreszeiten in einzelnen Jahren sehr unterschiedlich ausfallen.

Daraus resultiert die Variabilität des Klimas in Hessen. Die Beobachtungswerte der Klimaelemente variieren von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr. Neben diesen Variationen können durch die Aufzeichnungen der Messsysteme langfristige

Änderungen erkannt werden. So ist es in Hessen seit Vorliegen landesweiter Mittelwerte 1881 etwa 1,7 °C wärmer geworden. Gleichzeitig nahm die Anzahl der Frost- und Eistage ab und die der Sommer- und heißen Tage sowie der Tropennächte zu.

Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 leicht zugenommen, unterliegt aber von Jahr zu Jahr und im Vergleich der Jahrzehnte starken Schwankungen. In der Jahressumme wurden bis 2022 etwa 8 Prozent mehr als gegen Ende des 19. Jahrhunderts aufgezeichnet.

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 untersucht die Wissenschaft die Auswirkungen auf das globale und regionale Klima auf der Basis von Szenarien. Für Hessen wird - je nach gewähltem Szenario - eine deutliche Erhöhung der Jahresmitteltemperatur in den nächsten 100 Jahren projiziert, zusätzlich zum bereits jetzt höheren Temperaturniveau, im Vergleich zur vorindustriellen Zeit.

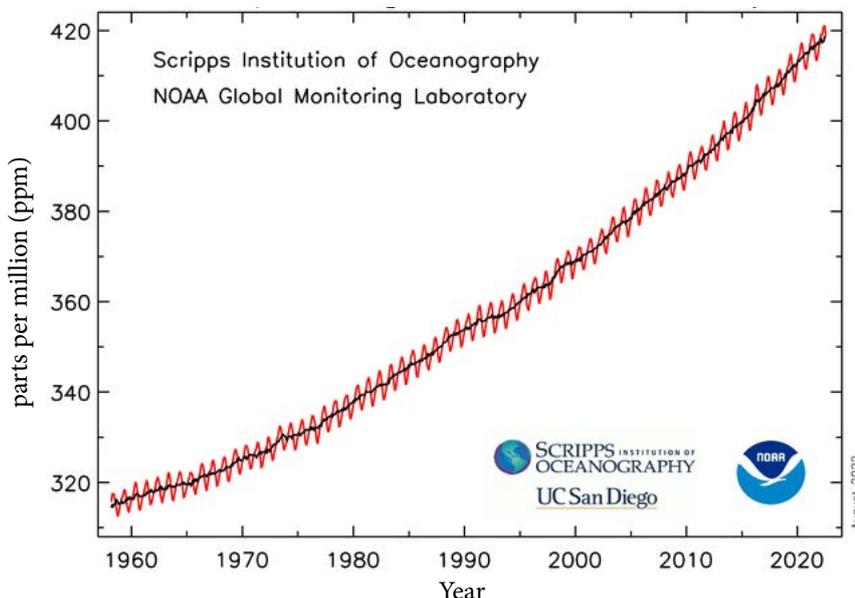
Bei einer deutlichen Reduktion des Treibhausgasausstoßes kann der gegenüber den heutigen Verhältnissen zusätzliche Anstieg in Hessen auf ca. 1 °C begrenzt werden. Bei weiterhin hohen Emissionen sind Änderungen im Bereich von 3 bis 5 °C zu erwarten. Damit einhergehend nimmt künftig die Anzahl der Frost- und Eistage noch weiter ab, während die Zahl der Sommer- und heißen Tage sowie der Tropennächte (deutlich) zunimmt.

Verbunden mit der Temperaturzunahme werden sehr wahrscheinlich die jährlichen Niederschlagsmengen weiter zunehmen. Dabei wird vor allem der Zeitraum Oktober bis Mai feuchter, während von Juni bis September eher weniger Niederschlag zu erwarten ist. Die Anzahl der Tage mit hohen Tagesniederschlägen (10 Liter Niederschlag je Quadratmeter und mehr) wird sich nach den Ergebnissen der Klimaprojektionen jedoch ganzjährig erhöhen.



Detaillierte Informationen zu vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Klimaentwicklungen auf lokaler, regionaler und Bundeslandebene für Hessen finden Sie im Klimaportal Hessen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (<https://klimaportal.hlnug.de>).

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



◀ *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 verstehen 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 Zeiträumen.

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 die 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 im Knüllgebirge ist beispielsweise ein anderes als das des Rheintals. Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden entsprechend der Vorgaben der WMO Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert.

Klimavariabilität

Das Klima ist als Summe von Wetter und Witterung sehr variabel. Es ist nicht ausreichend, das Klima allein mit Hilfe von Mittelwerten 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. Einzelne Jahre oder Jahreszeiten unterscheiden sich. So gibt es beispielsweise 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.



◀ Messfeld des Deutschen Wetterdienstes in Geisenheim



Klimatrend

Von einem Klimatrend sprechen wir, wenn sich die Klimatelemente langfristig, das heißt über mehrere Jahrzehnte, systematisch ändern. Das ist beispielsweise der Fall, wenn häufiger positive Temperaturabweichungen verzeichnet werden oder wenn sich bisher beobachtete Schwankungsbreiten vermehrt vergrößern. Die Änderungsrichtung kann durchaus kurzzeitig unterbrochen oder abgemildert sein, entscheidend ist, dass die zu beobachtende Änderungsrichtung über einen langen Zeitraum anhält. Solche langfristigen Änderungen können natürliche Ursachen haben, wie z. B. Veränderungen der Erdbahnparameter oder der Sonnenaktivität. Aber auch der Mensch greift mit seinen Aktivitäten in das Klimasystem ein.

Extremereignisse

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

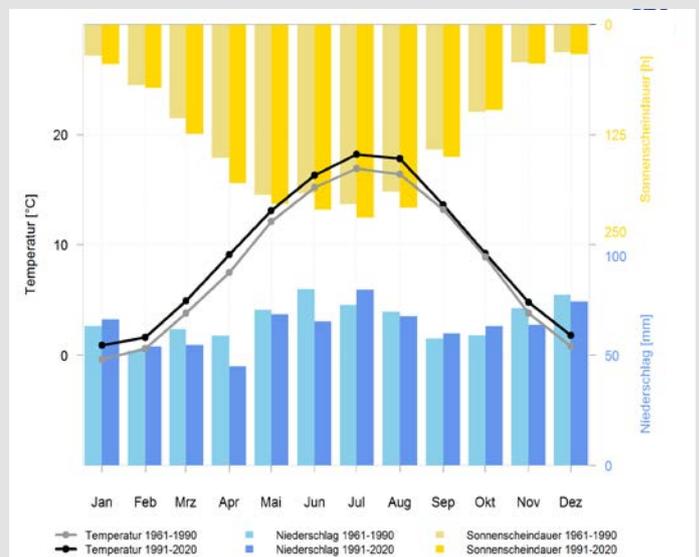
Extremereignis werden. Es kann ein auf einen Tag bezogenes Ereignis sein, wie eine Orkanböe, ein längerfristiges Ereignis, wie eine langanhaltende Trockenheit oder ein für den Zeitpunkt im Jahr sehr untypisches Ereignis. So ist beispielsweise eine Temperatur von 20 °C an einem Julitag nicht ungewöhnlich, 20 °C an Silvester (wie 2022 tatsächlich beobachtet) sind 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 solcher extremen Wetterereignisse ist ein wesentlicher Schwerpunkt in der aktuellen Klimaforschung.

Hessen

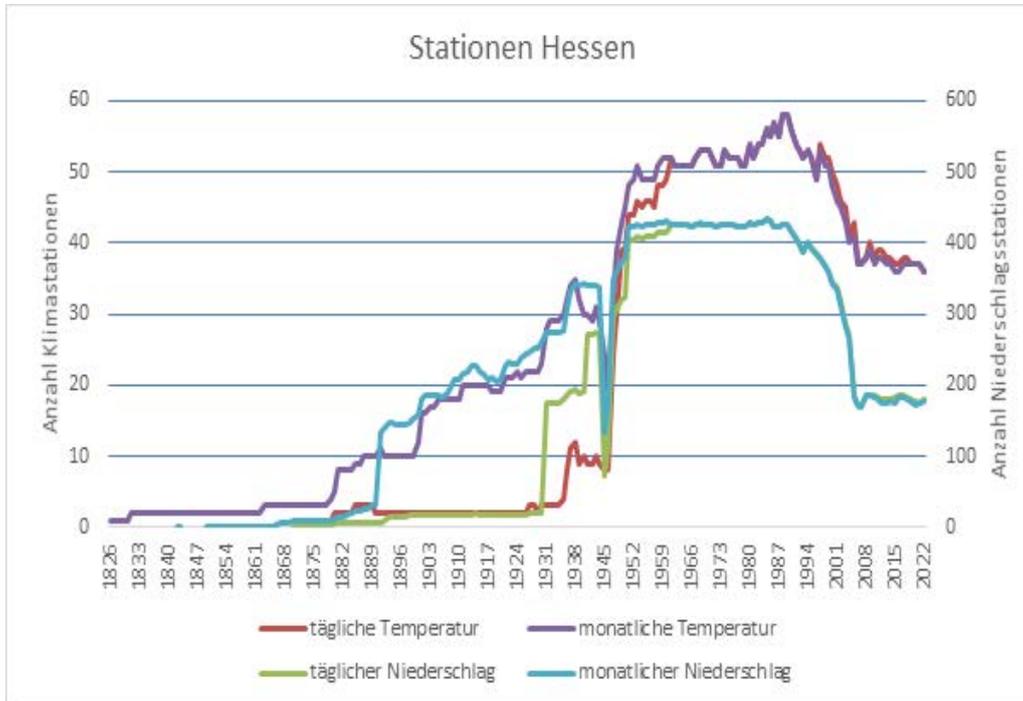
Klimadiagramm Hessen

Vergleich der Perioden 1961-1990 und 1991-2020



► Die Abbildung zeigt die vieljährigen Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer im Vergleich der Perioden 1961-1990 und 1991-2020. Temperatur und Sonnenscheindauer sind in fast allen Monaten angestiegen. Die Anzahl der Monate mit geringerer bzw. höherer Niederschlagsmenge hält sich ungefähr die Waage.

Klimadaten der Vergangenheit



◀ Die Anzahl der für Hessen monatlich bzw. täglich vorliegenden Stationsmessungen für Temperatur (linke Skala) und Niederschlag (rechte Skala) stieg vom 19. Jahrhundert bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich an. Sie erreichte in der Spitze knapp 60 Klima- und reichlich 400 Niederschlagsstationen. In den vergangenen Jahrzehnten nahm die Anzahl der Stationsstandorte wieder ab, auch bedingt durch die Verfügbarkeit neuer Datenerfassungsmethoden (z.B. Satelliten- und Radardaten)

Der Deutsche Wetterdienst beobachtet das Wetter an vielen Orten in Hessen. Teilweise werden seit mehr als 100 Jahren meteorologische Aufzeichnungen vorgenommen. Für die Innenstadt von Frankfurt am Main liegen sogar Temperaturdaten bis zurück ins Jahr 1758 vor. Früher wurden die Messungen täglich mehrfach durch einen Beobachter durchgeführt. Inzwischen erfassen und speichern automatische Sensoren die meteorologischen Elemente in hoher zeitlicher Auflösung. An einer Klimastation werden mehrere Größen gemessen: neben der Lufttemperatur auch die Bodentemperatur, die Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck und seine Änderung, der Niederschlag, die Schneehöhe, die Sonnenscheindauer und der Wind (Stärke und Richtung). An einigen dieser Stationen kommen weitere Parameter wie z. B. Sichtweite, Höhe der Wolkenuntergrenze, Wetterzustand (Schnee, Regen, Nebel etc.), verschiedene Strahlungsparameter und z. T. auch Radioaktivität in Luft und Wasser hinzu.

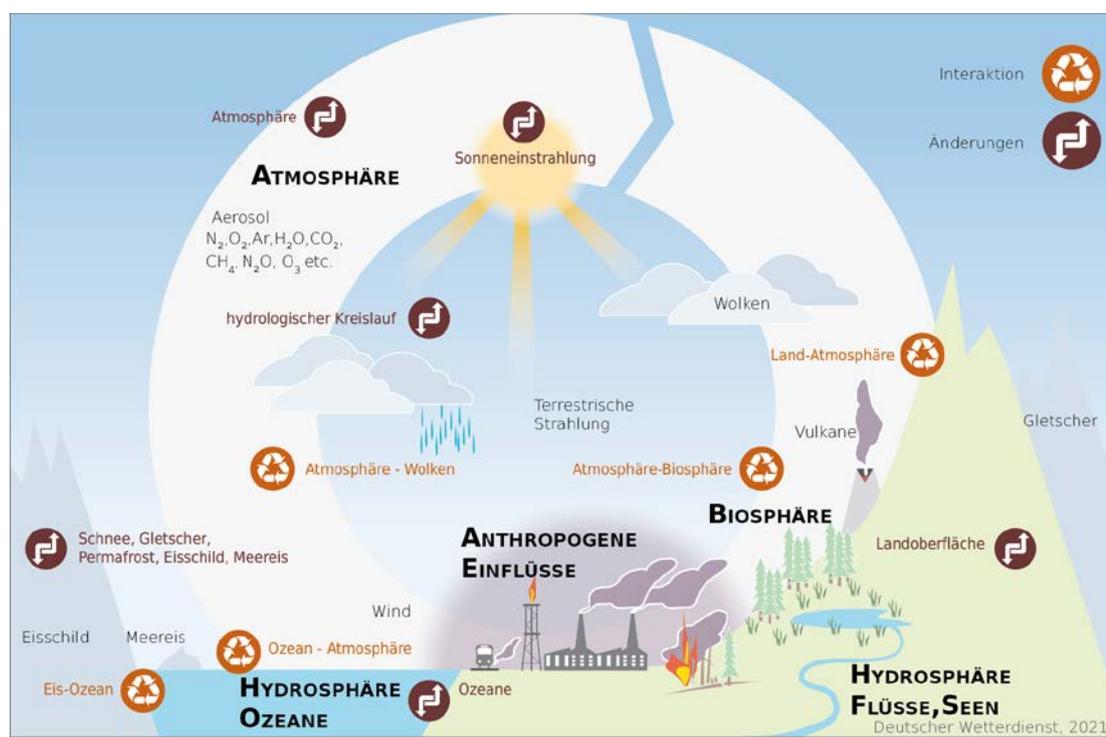
Seit dem Jahr 1901 liegen in Hessen Messdaten von mindestens 15 Klimastationen vor. Diese Zahl stieg bis 1950 auf über 50 Stationen an. Seit 1988, als ein Maximum von 61 Stationen erreicht wurde, ist die Zahl der Klimastationen kontinuierlich zurückgegangen (2022: 36 Stationen). Ein Grund dafür ist, dass die punktuellen Messungen an Stationen zunehmend durch flächenhafte Messverfahren wie z. B. Radar oder Satellitendaten ersetzt werden.

Zusätzlich gibt es eine große Zahl von reinen Niederschlagsmessstellen, da der Niederschlag eine viel höhere räumliche Variabilität aufweist als z. B. die Temperatur. Seit dem Jahr 1891 liegen Messdaten von mehr als 150 Niederschlagsstationen in Hessen vor. Diese Zahl stieg bis ca. 1950 auf über 400 Niederschlagsstationen an, ging dann aber insbesondere nach 1990 wieder deutlich zurück. 2022 lag die Anzahl der Niederschlagsmessstellen bei 178. Auch hier werden zunehmend flächenhafte Informationen (Radar- und Satellitendaten) verwendet. Da diese jedoch anhand der Bodenmessungen kalibriert werden müssen, ist eine ausreichende Anzahl an Niederschlagsstationen weiterhin essentiell.

Im Klimaportal Hessen (<https://klimaportal.hlnug.de/wetterextreme> (Bereich „Wetterextreme in Hessen“)) werden die Daten von ca. 80 Klimastationen und ca. 300 Niederschlagsstationen in Hessen und seiner Umgebung ausgewertet. Berücksichtigt sind alle noch aktiven Stationen, für die lange Messzeitreihen von ca. 30 bis max. 200 Jahren verfügbar sind. 31 tagesaktuelle Diagramme analysieren vergangene und gegenwärtige Entwicklungen und Extremereignisse von Temperatur, Niederschlag und weiteren Klimaelementen.

Klimamodelle

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



▲ In einem Klimamodell werden die wesentlichen Prozesse und Wechselwirkungen in der Natur mit Näherungsformeln beschrieben. Einige der Wechselwirkungen sind hier schematisch dargestellt.

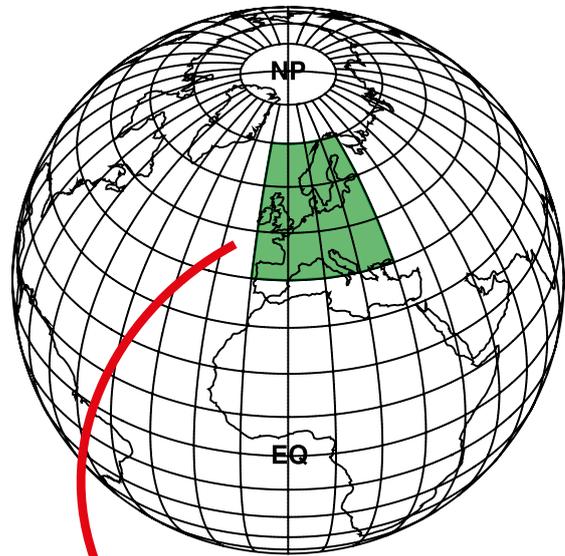
Die Welt als Gitter

In einem Klimamodell wird eine Vielzahl an Komponenten des Klimasystems zusammengefasst, um alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre unseres Planeten Erde und ihre Wechselwirkung miteinander zu beschreiben. Eine Eins-zu-eins-Umsetzung aller in der Realität ablaufenden Prozesse in Klimamodellen ist jedoch nicht möglich. Zum einen sind nicht alle Prozesse in der Natur hinreichend bekannt. Zum anderen erfordert dies einen extrem hohen Aufwand an Computerressourcen. Daher bezeichnet man die Modellergebnisse als Simulation der realen Abläufe im Klimasystem.

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

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

► 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)

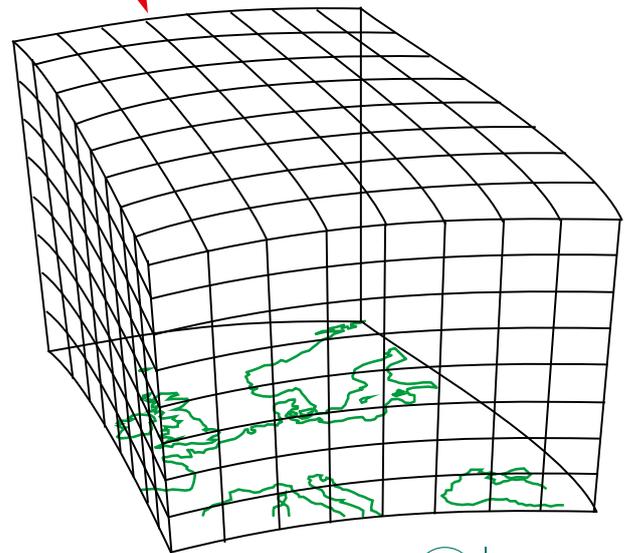


Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Gitterweite von 12,5 und 3 km vor. Das bedeutet zum Beispiel, dass die simulierte Temperatur nur alle 12,5 km einen anderen Wert annehmen kann. Eine belastbare Aussage ist für eine einzelne Gitterzelle aus der Klimasimulation nicht möglich. Es müssen immer mehrere Gitterzellen zusammengefasst werden. Üblicherweise werden dafür die Nachbargitterzellen eingebunden, so dass die Analyse letztendlich auf drei mal drei Gitterzellen beruht. Bei einer Modellauflösung von beispielsweise 12,5 km sind daher nur Aussagen für eine Region von etwa 37,5 km x 37,5 km möglich.

Viele Modelle, viele Ergebnisse

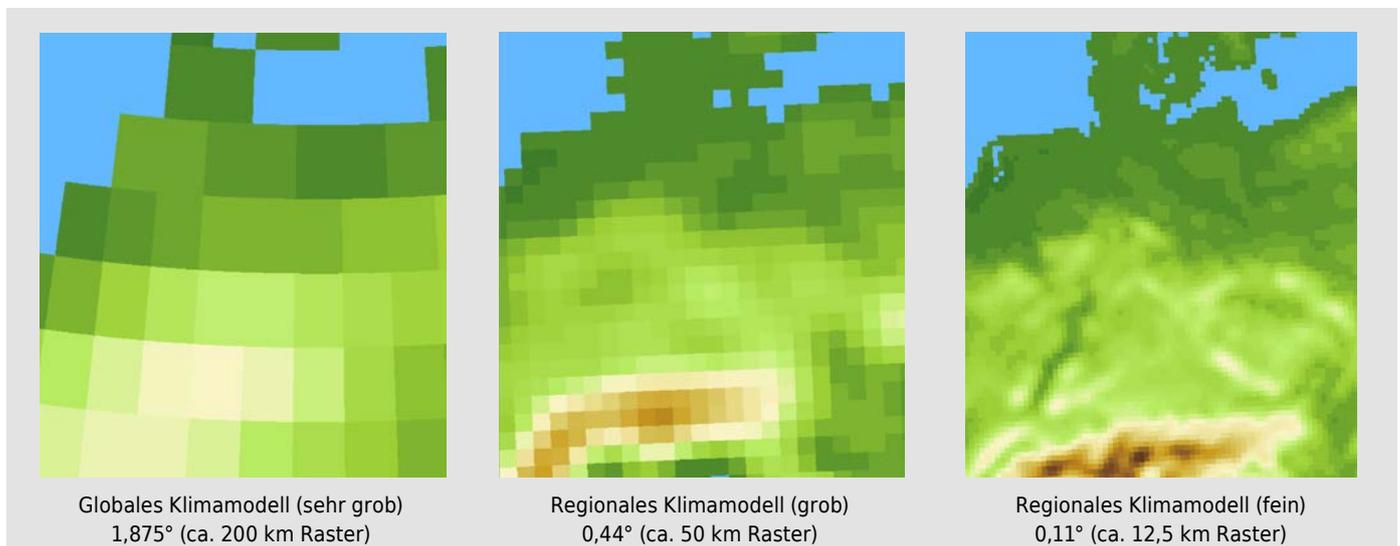
Weltweit werden von einer Vielzahl von Forschungsgruppen Klimamodelle mehr oder weniger unabhängig voneinander entwickelt. Einzelne Modellkomponenten und Prozesse werden dadurch unterschiedlich beschrieben, was wiederum zu etwas unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Ursache hierfür sind die für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

Liegt eine Vielzahl an Klimasimulationen vor, so wird hierfür der Begriff Ensemble genutzt. Die vorhandene Bandbreite des Ensembles (=Gruppe von Klimasimulationen) ist ein wichtiger Hinweis auf die Güte des Verständnisses der in der Natur ablaufenden Prozesse. Je größer die Bandbreite ist, desto vorsichtiger sollten Aussagen zum Beispiel über beschriebene Änderungssignale formuliert werden.



 Max-Planck-Institut für Meteorologie

▼ 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.





Klimawandel und Klimaprojektionen

Der Begriff Klimawandel beschreibt eine Änderung der vorhandenen klimatischen Verhältnisse an einem Ort oder auf der gesamten Erde. Der aktuell 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:

- Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen unter anderem große Mengen an Kohlendioxid, das direkt in die Atmosphäre entweicht.
- Durch Abholzung, Aufforstung und Versiegelung verändert der Mensch die Landoberfläche 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 (veröffentlicht 2013) des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung) wurden vier repräsentative Szenarien oder „Konzentrationspfade“ (engl. Representative Concentration Pathways - RCPs) ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Szenarien, die den Verlauf von Treibhausgaskonzentrationen und den Einfluss von Aerosolen (kleinen Partikeln in der Atmosphäre wie z. B. Rußflocken) gemeinsam als Strahlungsantrieb beschreiben. Der Begriff Strahlungsantrieb ist vereinfacht als „zusätzliche/erhöhte“ Energiezufuhr für die Erde zu verstehen.

Die Szenarien werden RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 genannt. Hierbei steht die jeweilige Zahl (z. B. 8.5) für die „zusätzliche“ der Erde zur Verfügung stehende Energie von 8,5 W/m² 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. Die politischen Ziele der Weltgemeinschaft (1,5°- und 2°-Ziel) beziehen sich auf diesen Zustand (im Weiteren vorindustrielles Niveau genannt).

Für den 6. Sachstandsbericht (veröffentlicht 2021) wurden die vorhandenen Szenarien weiterentwickelt. Die möglichen ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklungspfade (Englisch: Shared Socioeconomic Pathways - SSP), die zu den unterschiedlichen RCP-Szenarien führen könnten, werden mit sogenannten Narrativen beschrieben. Diese Narrative beinhalten die sozioökonomischen, demographischen, technologischen, politischen, institutionellen und Lebensstil-Trends. Es werden fünf Entwicklungspfade (SSP1 bis SSP5) genutzt.

Regionale Datensätze für die SSP+RCP-Szenarien liegen aktuell noch zu wenige vor. Daher werden in diesem Bericht die regionalen Ergebnisse auf der Basis der RCP vorgestellt.

Wie entwickelt sich unsere Emissions-Zukunft?

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

Das **Klimaschutz-Szenario (RCP2.6)** basiert auf Annahmen, die der 2-Grad-Obergrenze entsprechen. Ziel ist eine Welt, in der im Jahr 2100 die globale Erwärmung nicht mehr als 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitraum (1861-1880) beträgt. Dafür wird ein Szenarien-Verlauf angenommen, der mit einer sehr starken und sehr schnellen Reduktion der Emission von Treibhausgasen gegenüber dem heutigen Zustand verbunden ist. Der Höchstwert des Strahlungsantriebes wird vor dem Jahr 2050 (3,0 W/m²) erreicht. Von da an sinkt er kontinuierlich auf den Wert 2,6 W/m² im Jahr 2100. Hierzu ist ein Wandel hin zu einer Welt notwendig, deren Energieversorgung nicht mehr auf der Verbrennung von fossilen Kohlenstoffvorräten basiert. Das Maximum weltweiter Emissionen von Treibhausgasen muss dafür in den nächsten Jahren liegen. Noch vor dem Jahr 2080 dürfen keine wesentlichen Emissionen von Treibhausgasen mehr vorhanden sein (Null-Emission).

Das **Kein Klimaschutz-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.

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 stellen also eine Bandbreite möglicher Klimaänderungen dar. Der Erfolg - oder Misserfolg - der globalen Klimaschutzbemühungen entscheidet darüber, wie sich unser Klima im Rahmen dieser Bandbreite verändern wird.

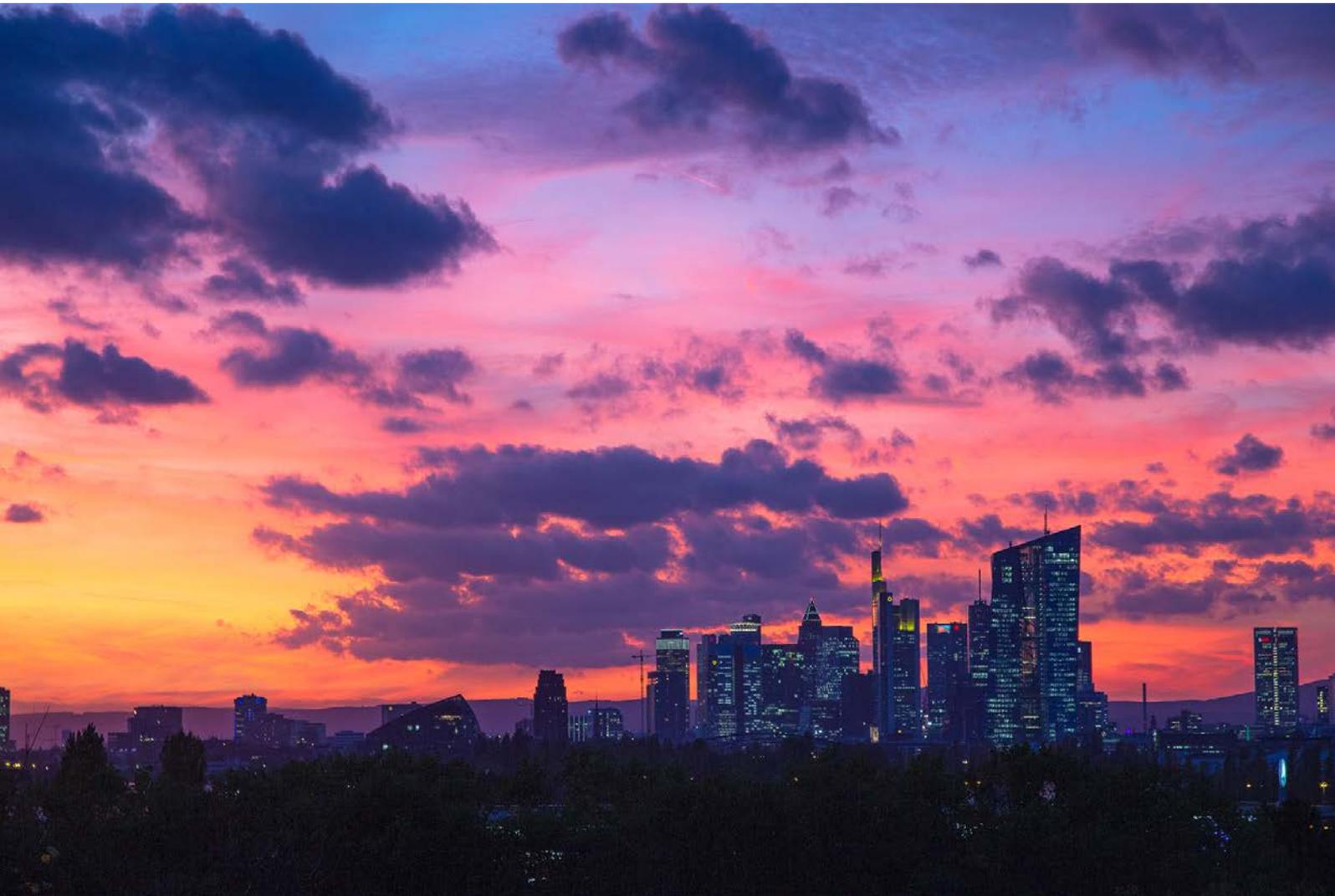
Zum Beispiel, welches sind die minimal zu erwartenden Änderungen, welches die maximalen? Letztendlich werden die realen Veränderungen wahrscheinlich innerhalb dieser Bandbreite liegen. Für diesen Bericht werden Ergebnisse von 11 Klimaprojektionen für RCP2.6 bzw. 26 Klimaprojektionen für RCP8.5 verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen.

Die verwendeten Klimaprojektionen basieren auf den oben beschriebenen regionalen Klimaprojektionen mit der Gitterweite von etwa 12,5 km. Sie wurde zusätzlich bias-adjustiert und auf ein Gitter mit 5 km Gitterweite herunterskaliert (Krähenmann et al. 2021). Um den Unterschied zwischen dem heutigen und einem zukünftigen Zustand zu berechnen, werden jeweils zwei 30-Jahres-Zeiträume miteinander verglichen.

Als Bezugszeitraum für das beobachtete Klima dienen die Jahre 1971 bis 2000 aus den Modellen. In Deutschland gibt es flächendeckende Aufzeichnungen seit 1881, weshalb die Änderung der Temperatur ab diesem Zeitpunkt angegeben werden kann. Der Zeitraum 1881 bis 1910 wird als frühindustriell definiert.

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

Das Klima in Hessen heute und morgen



Deutschland und damit auch Hessen gehören zur Klimazone des warm-gemäßigten Regenklimas der mittleren Breiten. Mit überwiegend westlichen Winden wird das ganze Jahr über feuchte Luft vom Atlantik herangeführt, die zu Niederschlägen führt. Durch die topografische Struktur Hessens mit seinen Erhebungen und Mittelgebirgen, die verschiedene Landschaften einschließen, wird das Klima stark strukturiert. Für die Temperatur sind die Abhängigkeit von der Geländehöhe und der Abstand zum Meer (Kontinentalität) die dominierenden Einflüsse. Der ozeanische Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt, sorgt für relativ

milde Winter und zumeist mäßig warme Sommer.

Für den Niederschlag ist die Lage der Erhebungen relativ zur Haupt-Windrichtung von Bedeutung, denn im Luv der Berge wird durch die erzwungene Hebung der Luft verstärkt Wolkenbildung und Niederschlag ausgelöst, während sich die Wolken im Lee der Gebirge durch das Absinken der Luft auflösen, so dass relativ trockene Gebiete entstehen. Das Rhein-Main-Gebiet und das hessische Ried im Süden Hessens stellen niedrig gelegene Gebiete dar, die urban bzw. landwirtschaftlich geprägt sind.

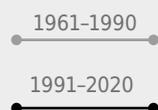
Die Klimadiagramme zeigen die Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der international festgelegten Klimareferenzperiode 1961 bis 1990 im Vergleich zur aktuellen Klimaperiode 1991 bis 2020 für zwei hessische Klimastationen. Die Flughafenstation von Frankfurt am Main ist aufgrund ihrer Lage im Rhein-Main-Gebiet durch milde Winter und warme Sommer geprägt. Die umgebenden Mittelgebirge (insbes. der Taunus) sorgen im Jahresdurchschnitt für relativ geringe Niederschlagsmengen mit einem Maximum im Sommer. Die Wasserkuppe stellt den höchsten Punkt Hessens

dar. Aufgrund ihrer Höhe von 950 m und auch der östlichen Lage sind die Winter kalt und die Sommer frisch, die Niederschläge verhältnismäßig hoch.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Veränderungen des Klimas in Hessen in der Vergangenheit und mögliche zukünftige Entwicklungen aufgezeigt.

Klimadiagramme hessischer Stationen

Temperatur [°C]



Sonnenscheindauer [h]

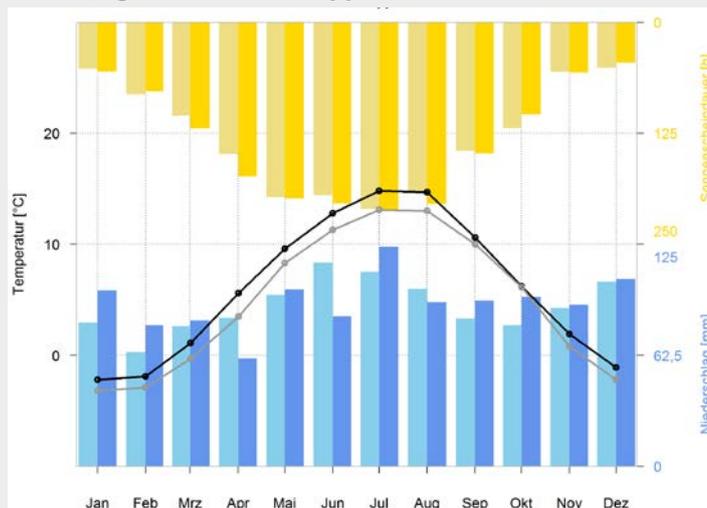


Niederschlag [l/m²]

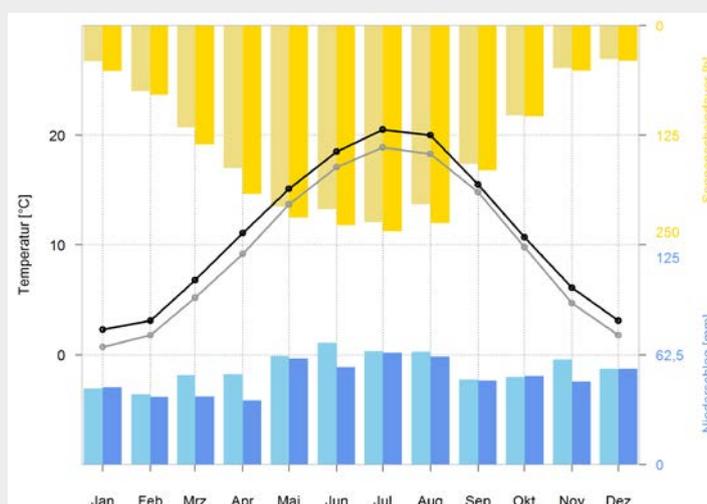


Die Abbildungen zeigen die vieljährigen Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer im Vergleich der Perioden 1961-1990 und 1991-2020 für die Stationen Wasserkuppe und Frankfurt/Main (Flughafen). Temperatur und Sonnenscheindauer sind in fast allen Monaten angestiegen. Auf der Wasserkuppe haben die Niederschläge in den meisten Monaten zugenommen, während sie in Frankfurt zumeist geringer geworden sind.

Klimadiagramm Wasserkuppe

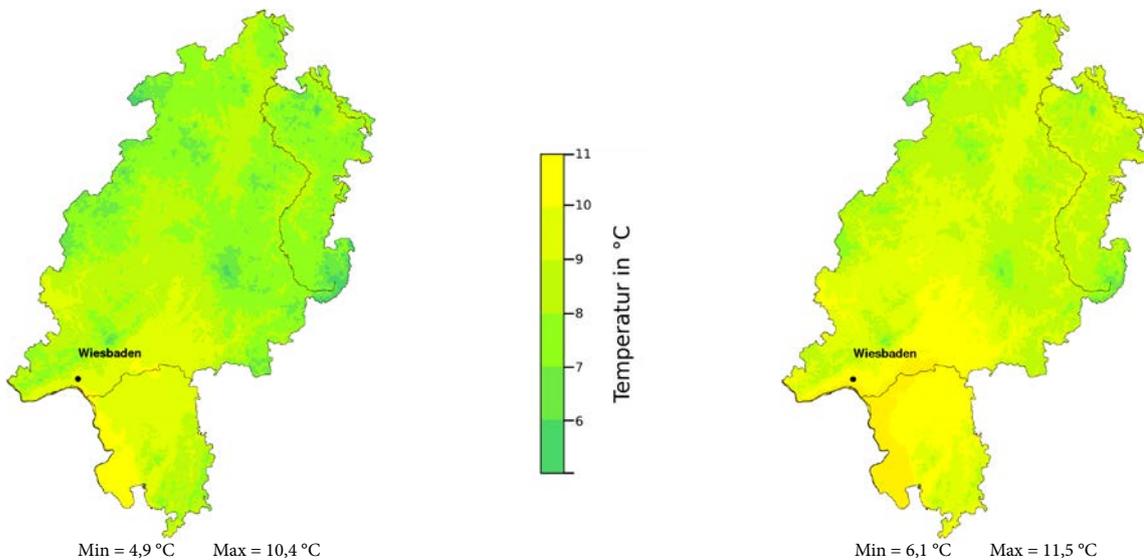


Klimadiagramm Frankfurt-Flughafen



Temperatur

Die Jahresdurchschnittstemperatur in Hessen beträgt für die Referenzperiode 1961–1990 8,2 °C. Im aktuellen 30-Jahres-Zeitraum 1991–2020 ist sie um 1,1 °C angestiegen. Höhere Durchschnittstemperaturen sind im Rhein-Main-Gebiet anzutreffen, in den Höhenlagen ist es deutlich kühler.

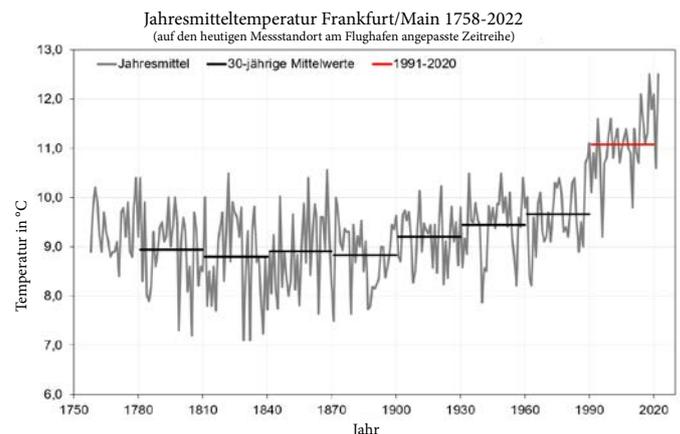


▲ Die Gegenüberstellung der Karten der jährlichen Temperaturverteilung für die Perioden 1961–1990 (links) und 1991–2020 (rechts) zeigt den flächendeckend beobachteten Temperaturanstieg in Hessen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Veränderungen der Lufttemperatur seit 1881

Der Deutsche Wetterdienst misst in Hessen derzeit an 36 Stationen die Lufttemperatur. Die im Mittel niedrigsten Werte werden in den Hochlagen der Mittelgebirge (kälteste Werte: Station Wasserkuppe/Rhön), die höchsten in den Niederungen Südhessens gemessen, v. a. im Rheintal. Von 1881 bis 2022 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur in Hessen um 1,7 °C angestiegen.

Besonders kalte oder warme Jahre treten normalerweise an (fast) allen Stationen in Hessen gleichzeitig auf, sodass die langzeitliche Entwicklung der Lufttemperatur flächendeckend sehr ähnlich verläuft. Sowohl auf den Internetseiten des DWD als auch im Klimaportal Hessen sind die Temperaturveränderungen für die hessischen Flächenmittelwerte sowie alle Standorte mit Messreihen ab ca. 30 Jahren Länge visualisiert. Zur Beurteilung klimatischer Veränderungen ist ein möglichst langer Blick zurück auf das Klima vergangener Zeiträume nötig. In Hessen liegt



▲ In Frankfurt/Main wird seit mehr als 250 Jahren die Temperatur gemessen. Aufgrund des Wachstums der Stadt und damit der zunehmenden Beeinflussung der Temperatur durch die Bebauung (Wärmeisoleffekt) wurden die offiziellen Messungen nach dem Zweiten Weltkrieg an den Flughafen Frankfurt/Main verlegt. Die hier gezeigte Messreihe setzt sich aus verschiedenen Messreihen zusammen, die auf den heutigen Messstandort am Flughafen angepasst wurden. Die Messreihe wurde dadurch um Effekte der Wärmeinsel bereinigt und zeigt regional repräsentative Veränderungen der Lufttemperatur. Die Abbildung zeigt die Veränderung der mittleren jährlichen Temperatur über die Zeit. Besonders bemerkenswert ist, dass die vergangenen 30 Jahre (1991–2020) im Mittel wärmer als das bis dato wärmste Einzeljahr waren.

die längste Messreihe der Lufttemperatur für die Stadt Frankfurt/Main vor. Die Abbildung zeigt den Verlauf der auf den heutigen Standort am Frankfurter Flughafen angepassten Reihe der Jahresmitteltemperaturen für einen Zeitraum von mehr als 2½ Jahrhunderten (1758–2022; graue Linie). Die schwarzen Linien beschreiben die jeweils gültigen 30-jährigen Mittelwerte (sog. Klimanormalperioden). Um den Einfluss der innerstädtischen Aufheizung (den sog. Wärmeinseleffekt) auf die Temperatur zu reduzieren, erfolgte im Jahre 1949 eine Verlagerung der Messungen von der Innenstadt zum Flughafen. Die Daten früherer Zeiträume bis zur Stationseröffnung am Flughafen wurden dabei mittels räumlicher Interpolation auf den heutigen Standort umgerechnet und enthalten daher die zusätzliche städtische Erwärmung nicht.

Um den Wärmeinseleffekt dennoch beobachten zu können, betreibt der DWD in Frankfurt am Main sowie in weiteren ausgewählten Städten Stadtklimastationen (www.dwd.de/waermeinsel). Im Vergleich zu den nahegelegenen Umlandstationen (wie in diesem Fall mit der Station Frankfurt-Flughafen) kann der urbane Effekt langfristig überwacht und der städtische Einfluss auf das lokale Klima untersucht werden.

Die Zeitreihe beinhaltet deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr für Frankfurt/Main-Flughafen – mit zu allen Zeiten vergleichsweise warmen und kühlen Jahren. Die Definition von „warm“ und „kalt“ ändert sich jedoch mit dem erlebten Empfinden: Während z.B. das Jahr 2010 mit einem Mittelwert von 9,8 °C jüngeren Menschen als sehr kalt vorkommen musste, wäre dieses Jahr noch vor ein paar Jahrzehnten als völlig normal empfunden worden. Bis in die Zeit des 2. Weltkrieges hätte dieses Jahr sogar zu den jeweils wärmsten Jahren einer

Jahr	Jahresmittel
2018	12,5 °C
2022	12,5 °C
2020	12,1 °C
2014	12,1 °C
2019	11,7 °C
1994	11,6 °C
2015	11,6 °C
2000	11,6 °C
2011	11,5 °C
2003	11,4 °C

Dekade gezählt. Gleichzeitig war das Jahr 2021 eines der kühlest der vergangenen 30 Jahre. Es wäre aber bis 1988 (zusammen mit dem Jahr 1868) das wärmste der gesamten Zeitreihe gewesen.

Bei Betrachtung der Frankfurter Zeitreihe fällt auf,

◀ Die 10 wärmsten Jahre in Frankfurt/Main-Flughafen seit 1758

dass die mittleren jährlichen Temperaturverhältnisse bis zum Ende des 19. Jahrhunderts weitgehend konstant blieben. Ab Beginn des 20. Jahrhunderts setzte eine zunächst moderate Erwärmung ein, die im Jahr 1988 abrupt in ein nachfolgend deutlich höheres Temperaturniveau mündete. Dieses wurde nur durch die Ausreißerjahre 1996 und 2010 deutlich unterschritten. Fast alle Jahre seit 1988 wiesen dagegen höhere Durchschnittstemperaturen als der bis dahin ermittelte Spitzenwert von 10,6 °C im Jahr 1868 auf. Die Jahre 2018 und 2022 waren mit einem Durchschnitt von 12,5 °C am wärmsten.

Die für Frankfurt beschriebenen Veränderungen ordnen sich in den in Hessen, Deutschland, Europa und den meisten Teilen der Welt beobachteten Temperaturanstieg ein. Nach aktuellen Analysen des IPCC AR6 Reports, veröffentlicht im August 2021, ist die global beobachtete Temperaturzunahme von Atmosphäre, Ozeanen und Landmassen zweifelsfrei auf menschliche Aktivitäten (Anstieg der atmosphärischen Treibhausgase) zurückzuführen. Dieser Trend ist von einer natürlichen Variabilität des Klimasystems überlagert, so dass es (auch in Hessen) immer wieder Zeiträume gab, in denen der Temperaturanstieg stagnierte oder die Temperatur sogar kurzfristig zurückging. Solche Rückgänge sind in der Regel Folge periodischer Schwankungen, die eng an die Zirkulation der Ozeane gekoppelt sind. Letztere überlagern den Einfluss der externen Klimaantriebe. Zu diesen zählen neben den natürlichen Faktoren wie Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität die vom Menschen verursachten Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, Landnutzungsänderungen und Luftverschmutzungen.

Saisonale und monatliche Entwicklungen

In Hessen ist der im langjährigen Mittel kälteste Monat der Januar. In den 141 Jahren von 1881–2022 war der Januar 70-mal der kälteste Wintermonat, gefolgt von Februar (41), Dezember (28), März (5) und November (1). Der Juli ist im langjährigen Mittel am wärmsten. In der Statistik der wärmsten Sommermonate führt er die Statistik in 82 Jahren an, gefolgt von August (45), Juni (20) und September (1).

Die Bandbreite der gemessenen Temperaturen variiert dabei beträchtlich innerhalb des Bundeslandes, wie der tabellarische Vergleich der Monatsmittelwerte der kältesten Station Hessens (Wasserkuppe) mit einem der wärmsten Standorte (Geisenheim) für den Zeitraum 1991-2020 verrät. Diese Werte sind gegenüber der Klimareferenzperiode 1961-1990 ganzjährig deutlich angestiegen. Der Anstieg ist besonders im April und in den Sommermonaten Juli und August ausgeprägt, zumal in diesen Monaten die typische Jahr-zu-Jahr-Variabilität gegenüber den ebenfalls wärmeren Wintermonaten deutlich schwächer ausfällt. Im April traten die fünf (mit Abstand) wärmsten Monate seit Aufzeichnungsbeginn 1881 alle seit dem Jahr 2007 auf. In Juli und August wurden vier der fünf wärmsten Monate seit 1994 bzw. sogar 2015 registriert. Weitere Informationen zur Entwicklung der monatlichen hessischen Flächenmittelwerte sind im Klimaportal Hessen <https://klimaportal.hlnug.de/witterungsbericht> (Bereich „Witterungsbericht Hessen“) dargestellt.

Veränderung von Kenntagen

Die Verwendung meteorologischer Kenntage wie Sommer- oder Frosttage stellt eine (gegenüber abstrakten Mittelwerten) intuitivere Herangehensweise an Veränderungen des heimischen Temperaturregimes dar. Die zugrundeliegenden Flächenmittelwerte für Hessen liegen seit 1951 vor. Ihre zeitliche

Entwicklung wird hier für (sehr) warme sommerliche sowie (sehr) kühle winterliche Temperaturverhältnisse gezeigt. Folgende Kenntage werden verwendet:

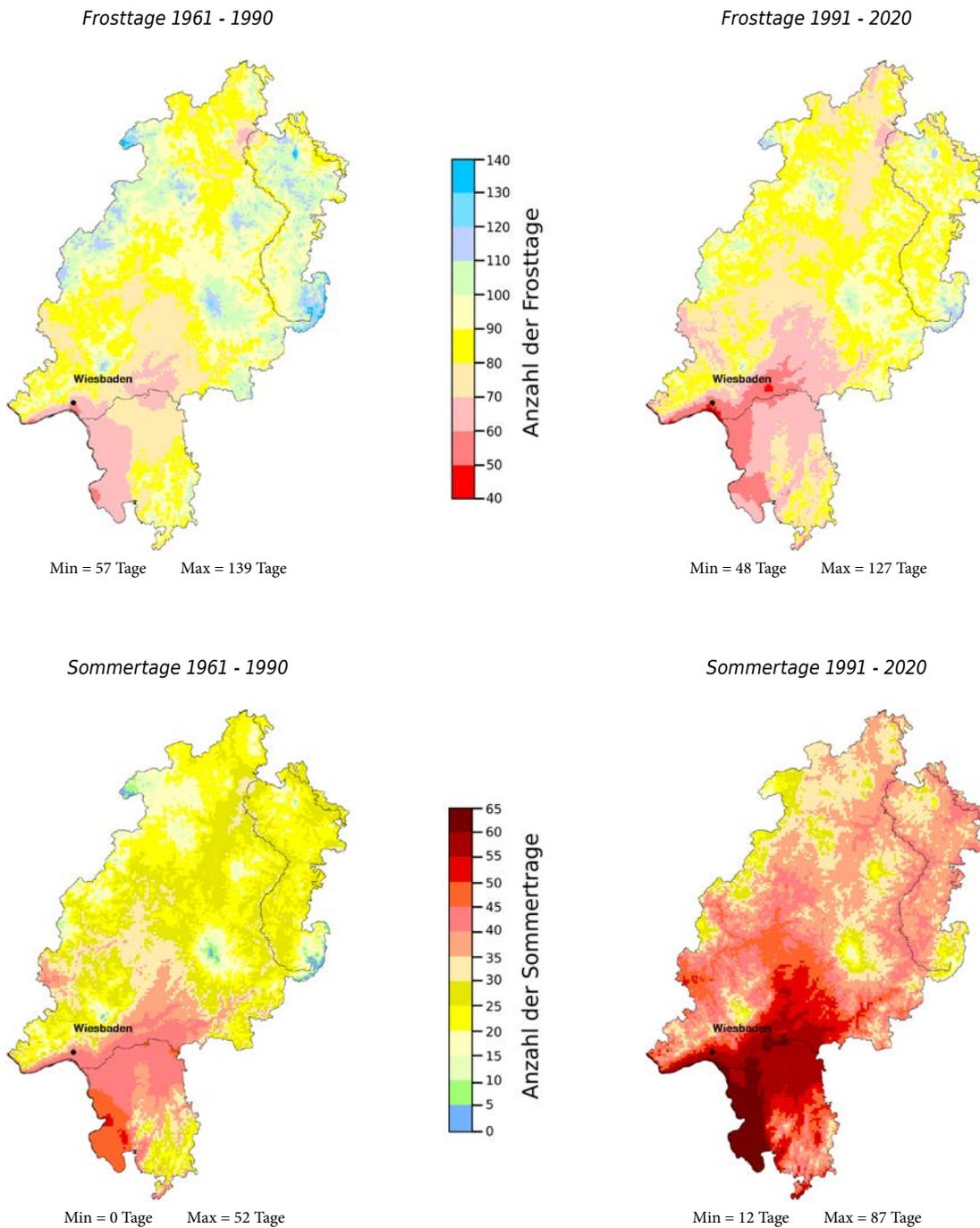
- Sommertag: die Höchsttemperatur des Tages erreicht oder überschreitet 25,0 °C
- Heißer Tag: die Höchsttemperatur des Tages erreicht oder überschreitet 30,0 °C
- Frosttag: die Tiefsttemperatur des Tages liegt unter 0,0 °C
- Eistag: die Höchsttemperatur des Tages liegt unter 0,0 °C

Die räumliche Verteilung von Frost- und Eistagen ist sehr ähnlich, ebenso die räumliche Verteilung von Sommertagen und Heißen Tagen. Daher werden in der folgenden Abbildung nur die Karten für Frost- und Sommertage gezeigt. Für alle Kenntage ergibt sich eine mit der mittleren jährlichen Lufttemperatur vergleichbare räumliche Verteilung. Die meisten kalten Kenntage (wie Frost- und Eistage) werden in den Hochlagen der Mittelgebirge sowie zusätzlich z. T. in Tälern und Flusstälern, in denen sich kalte Luftmassen sammeln können, beobachtet. Die meisten warmen Kenntage (wie Sommer- und Heiße Tage) treten im milden Rhein-Main-Gebiet auf. Die Anzahl kalter Kenntage ist hessenweit in den vergangenen Jahrzehnten zurückgegangen, während die Anzahl warmer Kenntage gleichzeitig deutlich anstieg.

Monat	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Hessen	0,9	1,6	4,9	9,1	13,1	16,3	18,2	17,8	13,6	9,2	4,8	1,8	9,3
	+1,3	+1,0	+1,1	+1,6	+1,0	+1,1	+1,3	+1,4	+0,4	+0,3	+1,0	+1,0	+1,1
Geisenheim	2,5	3,3	6,8	11,0	14,9	18,2	20,2	19,6	15,3	10,6	6,2	3,3	10,9
	+1,3	+1,0	+1,2	+1,6	+1,0	+1,2	+1,6	+1,5	+0,6	+0,6	+1,1	+1,0	+1,1
Wasserkuppe	-2,2	-1,9	1,1	5,6	9,6	12,8	14,8	14,7	10,6	6,2	1,9	-1,1	6,0
	+1,0	+1,0	+1,4	+2,1	+1,3	+1,5	+1,7	+1,7	+0,6	+0,1	+1,2	+1,1	+1,2

▲ Überall in Hessen ist es in den vergangenen 30 Jahren in fast allen Monaten deutlich wärmer geworden. Die Tabelle zeigt die Monatsmittelwerte von Hessen (Flächenmittel) sowie der Stationen Geisenheim und der Wasserkuppe (in °C) für den Zeitraum 1991-2020 und das Änderungssignal im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961-1990 (in °C).

Klimakentage in Hessen 1961 - 1990 und 1991 - 2020



Die Gegenüberstellung der Karten der mittleren Anzahl der Frosttage (oben) und Sommertage (unten) für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) zeigt den flächendeckend beobachteten deutlichen Rückgang kalter Tage, sowie den gleichzeitigen Anstieg warmer Tage in Hessen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Zukunft

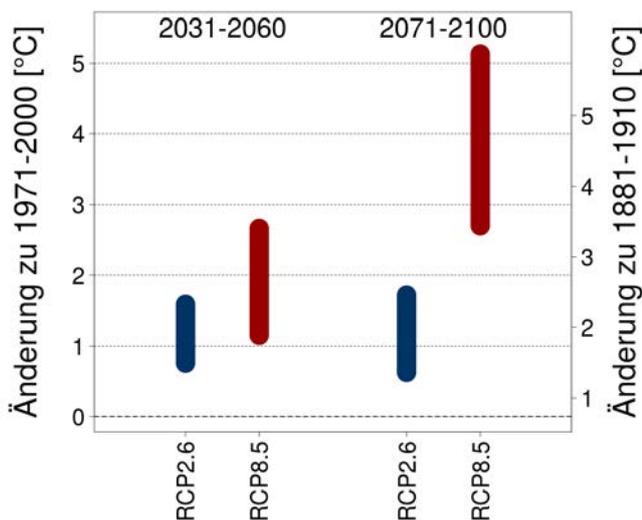
Im Rahmen der Pariser Klimakonferenz COP21 wurde im Aktionsplan das Ziel definiert die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C zu begrenzen. Die Zahl bezieht sich auf einen „vorindustriellen“ Zustand. Der für Hessen verwendete frühindustrielle Zustand (1881-1910) ist mit diesem Zustand vergleichbar.

Alle nachfolgenden Angaben beziehen sich auf den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Um einen Bezug zum Pariser Klimaabkommen auf der lokalen Skala zu erhalten, muss zu den Änderungswerten der mittleren Jahrestemperatur also die Klimaänderung zwischen dem frühindustriellen Zeitraum (1881 bis 1910) und dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 addiert werden. Dieser beträgt, über das Gebiet von Hessen gemittelt, 0,7 °C.

Ein weiterer Anstieg der Temperatur in Hessen ist zu erwarten. Für den kurzfristigen Planungshorizont (2031–2060) beträgt dieser Anstieg im Mittel etwa 1,1 °C für das Klimaschutz-Szenario und 1,9 °C für das Kein Klimaschutz-Szenario. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt im Klimaschutz-Szenario zwischen 0,8 und 1,6 °C und im Kein Klimaschutz-Szenario zwischen 1,2 und 2,7 °C.

Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem Klimaschutz-Szenario stagniert die Erwärmung bei 1,1 °C gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Erreicht wird diese Stabilisierung durch die sehr starke Reduktion der Treibhausgasemissionen innerhalb der Szenariendefinition. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden. Unter den Bedingungen des Kein Klimaschutz-Szenarios beträgt die Erwärmung im Mittel 3,9 °C. Die Bandbreite der Ergebnisse, unter diesem Szenario, liegt zwischen 2,7 und 5,1 °C.

Die Erwärmung ist in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Frühjahrs, hier fällt sie geringer aus. Mit den höheren Temperaturen geht eine markante Zunahme extremer Temperaturverhältnisse einher. Mit tiefen Temperaturen verbundene Extreme nehmen (wie auch bereits in der nahen Vergangenheit beobachtet) stark ab, während mit Wärme verbundene Extreme stark zunehmen. Dadurch nehmen auch Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen zu.



◀ Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresmitteltemperatur von Hessen. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2031-2060) und langfristigen (2071-2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971-2000. Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, blau) denen des Kein Klimaschutz-Szenarios (RCP8.5, rot) gegenübergestellt. Die dargestellten Balken zeigen die Bandbreite zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Bandbreite wird aus den vorliegenden 11 Klimaprojektionen für RCP2.6 bzw. 26 Klimaprojektionen für RCP8.5 ermittelt.

Jahreszeitliche Mittelwerte der Temperatur und erwartete Änderungen

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

▲ Saisonale und jährliche Mittelwerte der Lufttemperatur in Hessen für drei Referenzzeiträume der Vergangenheit (Spalten 2-4) sowie projizierte Ergebnisse für die Zukunft (Spalten 5-8). Die Spalten 5 und 6 zeigen die Änderung der Lufttemperatur (Median der Klimaprojektionsensembles) für den Zeitraum 2031-2060 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (fett gedruckt) für zwei Klimaszenarien (Klimaschutzszenario: RCP2.6 und Kein Klimaschutz-Szenario: RCP8.5). In Spalte 7 und 8 wird die gleiche Information für den Zeitraum 2071-2100 dargestellt.

Informationen zur globalen Temperaturentwicklung sind im "Nationalen Klimareport" zu finden (Link: https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.html?nn=16102)

KURZ NOTIERT

Beobachtung

- Ungebrochener Trend der Erwärmung in Hessen
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,7 °C seit 1881
- Änderung der Extreme: Mehr Sommertage und Heiße Tage, weniger Frost- und Eistage

Kurzfristiger Planungshorizont (2031-2060)

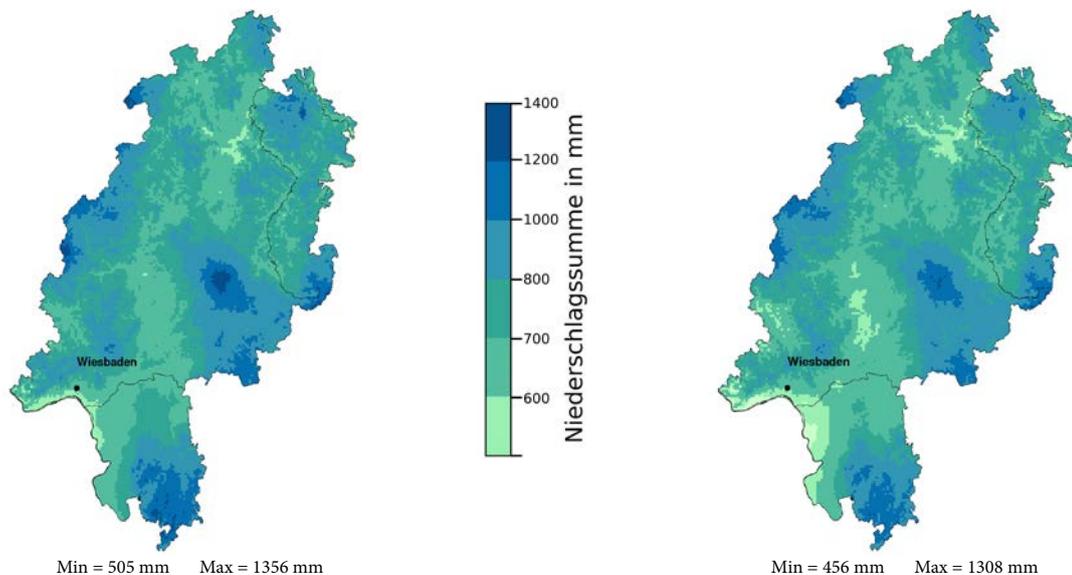
- Hessenweite mittlere Erwärmung um im Mittel 1,1 °C (Klimaschutz-Szenario), bzw. 1,9 °C (Kein Klimaschutz-Szenario) im Vergleich zur Periode 1971-2000

Langfristiger Planungshorizont (2071-2100)

- Beim Klimaschutz-Szenario Stabilisierung auf eine Erwärmung von 1,1 °C
- Beim Kein Klimaschutz-Szenario hessenweite mittlere Erwärmung um im Mittel 3,9 °C

Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung in Hessen wird durch den Wechsel maritim und kontinental geprägter Luftmassen bestimmt. In den Niederungen des Landes sind die niedrigsten, in den Mittelgebirgslagen die höchsten Jahresniederschlagshöhen zu beobachten.



▲ Die Gegenüberstellung der Karten der jährlichen Niederschlagssumme für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) zeigt ein ähnliches räumliches Bild, bei flächendeckend etwas niedrigeren Niederschlagsmengen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Da der Niederschlag räumlich sehr stark variiert, insbesondere im Mittelgebirgsraum und generell bei sommerlichen Gewittern, ist ein erheblich dichteres Messnetz als für die übrigen klimatologischen Parameter erforderlich. Der Deutsche Wetterdienst misst in Hessen an derzeit 178 Stationen den Niederschlag. Hinzu kommen Daten von gegenwärtig 69 Stationen aus dem Landesmessnetz des HLNUG. Die Nutzung von Radardaten ermöglicht eine flächendeckende Messung in hoher Auflösung, die insbesondere zur Detektion kleinräumiger Schauer- und Gewitterzellen nötig ist.

Im Jahresmittel sind die Niederungen in Hessen relativ trocken, besonders entlang des Rheins sowie entlang von Main, Fulda und Eder. Die Mittelgebirge – insbesondere Upland, Westerwald, Vogelsberg, Rhön, Spessart und Odenwald – sind durch hohe Niederschlagsmengen geprägt, da sie

quer zur Hauptwindrichtung liegen, womit sie ein besonders großes Hindernis für die Überströmung darstellen. Der etwa gleich hohe Taunus zeigt dagegen kaum erhöhten Niederschlag, da die Bergkette weitgehend parallel zur vorherrschenden mittleren Windrichtung (Südwest) liegt, wodurch der oben genannte Überströmungseffekt nur selten eintritt. Zusätzlich wirkt sich aus, ob in der betreffenden Windrichtung andere Gebirge vorgelagert sind. Ist dies der Fall, so hat sich üblicherweise ein Teil der Feuchtigkeit bereits dort abgeregnet. Der Taunus befindet sich bei Südwest-, West- und Nordwestwind im Lee von Hunsrück, Eifel und Westerwald, so dass dort bereits ein großer Teil der Feuchtigkeit abgeregnet ist. Im Fall von Odenwald und Spessart sind zwischen Hunsrück und Pfälzer Wald keine höheren Gebirge vorgelagert, so dass schon diese geringen Höhen den Niederschlag erheblich verstärken können.

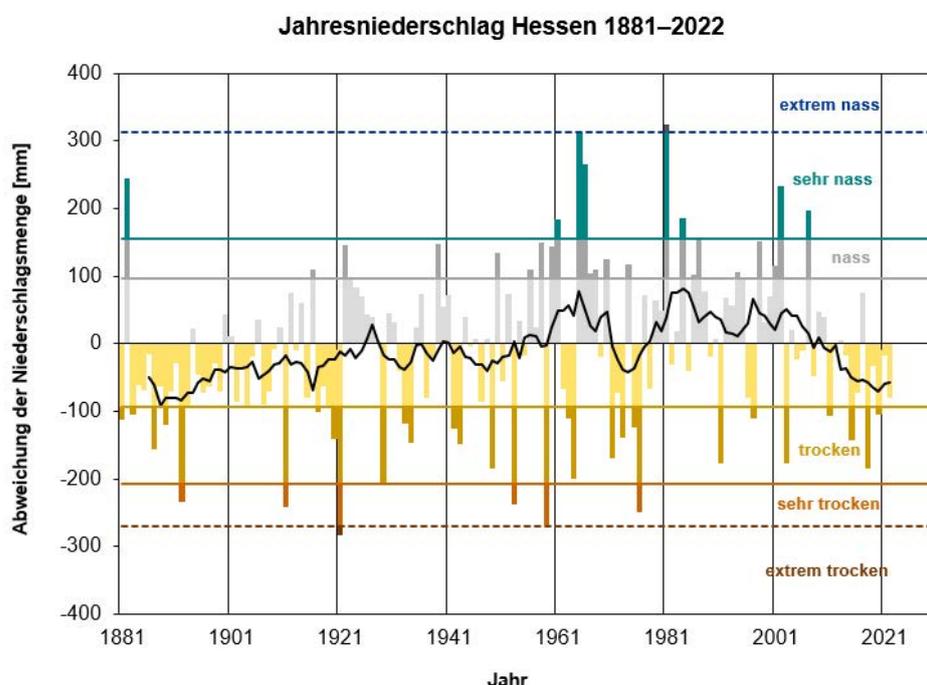
Im Vergleich der Jahrzehnte sowie der verschiedenen 30-jährigen Referenzperioden zeigen sich Schwankungen der Niederschlagsmengen, wobei die räumliche Verteilung von Gebieten mit vergleichsweise wenig, bzw. viel Niederschlag innerhalb von Hessen weitgehend konstant blieb. Im [Klimaportal Hessen](#) (Bereich „Wetterextreme in Hessen“) sind die Niederschlagsveränderungen für mehr als 300 Standorte mit langen Messreihen in und um Hessen visualisiert. Das Portal enthält ebenfalls Daten aus dem Landesmessnetz des HLNUG.

Langjährige Veränderungen des Niederschlags

Der Niederschlag ist in Raum und Zeit eine sehr veränderliche Größe. Das Gebietsmittel der Jahressummen des Niederschlags betrug für Hessen im Zeitraum 1961-1990 793 mm (entspricht 793 Litern je m²) und lag in der Periode 1991-2020 mit 761 mm geringfügig (-4%) niedriger.

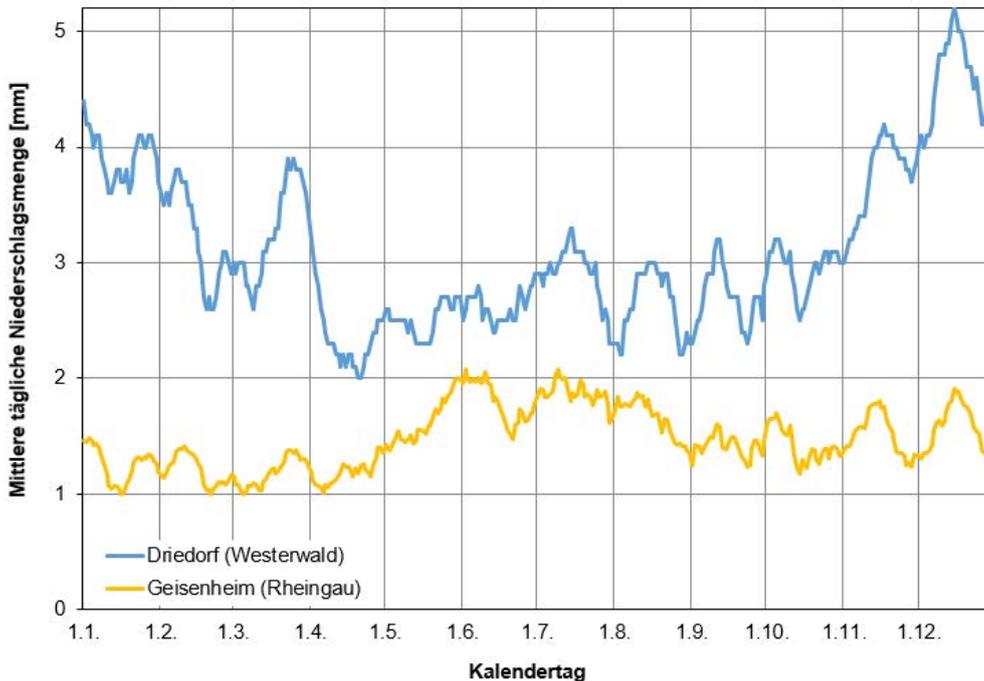
Seit Vorliegen von Gebietsmittelwerten (1881) hat der mittlere Jahresniederschlag in Hessen leicht zugenommen. Dieser Anstieg ist jedoch von starken jährlichen und moderaten dekadischen Variationen überlagert. So stieg die Niederschlagsmenge seit 1881 um ca. 8% an, während sie seit 1951 um ca. 3% zurückging. Die Abbildung zeigt die jährlichen Schwankungen als Abweichungen vom Mittel des Referenzzeitraumes 1961-1990 für das Bundesland Hessen.

Die beobachteten Extreme reichen von Jahren mit Niederschlagssummen von weniger als 500 mm (1921 und 1959) bis hin zu Jahren mit z. T. weit über 1.000 mm Jahressumme (1965, 1966 und 1981). Dabei können sehr feuchte Jahre wie 2002 und sehr trockene Jahre wie 2003 eng beieinanderliegen. Seit 2008 werden in Hessen eher unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen gemessen.



▲ Der Niederschlag hat in Hessen in den letzten 140 Jahren leicht zugenommen. Starke jährliche Schwankungen sind jedoch typisch für unser Klima. Die Abbildung zeigt die Abweichung der jährlichen Niederschlagssumme in Hessen vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1961-1990 sowie den gleitenden 11-jährlichen Mittelwert. Die Farbklassen kennzeichnen überdurchschnittlich trockene (gelb-bräunliche Farbtöne) bzw. feuchte Jahre (grün-bläuliche Farbtöne). Eine Abstufung erfolgt nach der Wiederkehrwahrscheinlichkeit bezogen auf das 20. Jahrhundert (1. Linie: 5 Jahre; 2. Linie: 20 Jahre; 3. Linie: 100 Jahre)

Jahresgang Niederschlagssummen



▲ Ein sommerliches Niederschlagsmaximum (wie hier sichtbar am Beispiel Geisenheim/Rheingau) ist typisch für die meisten Regionen Hessens. In höheren Lagen (wie hier sichtbar am Beispiel Driedorf/Westerwald) spielen die Winterniederschläge eine größere, insbesondere im Bergland häufig sogar dominierende Rolle. Die Abbildung zeigt das tägliche Niederschlagsmittel (als 11-tägiger gleitender Mittelwert) für den 60-jährigen Zeitraum 1961-2020.

Saisonale und monatliche Entwicklungen

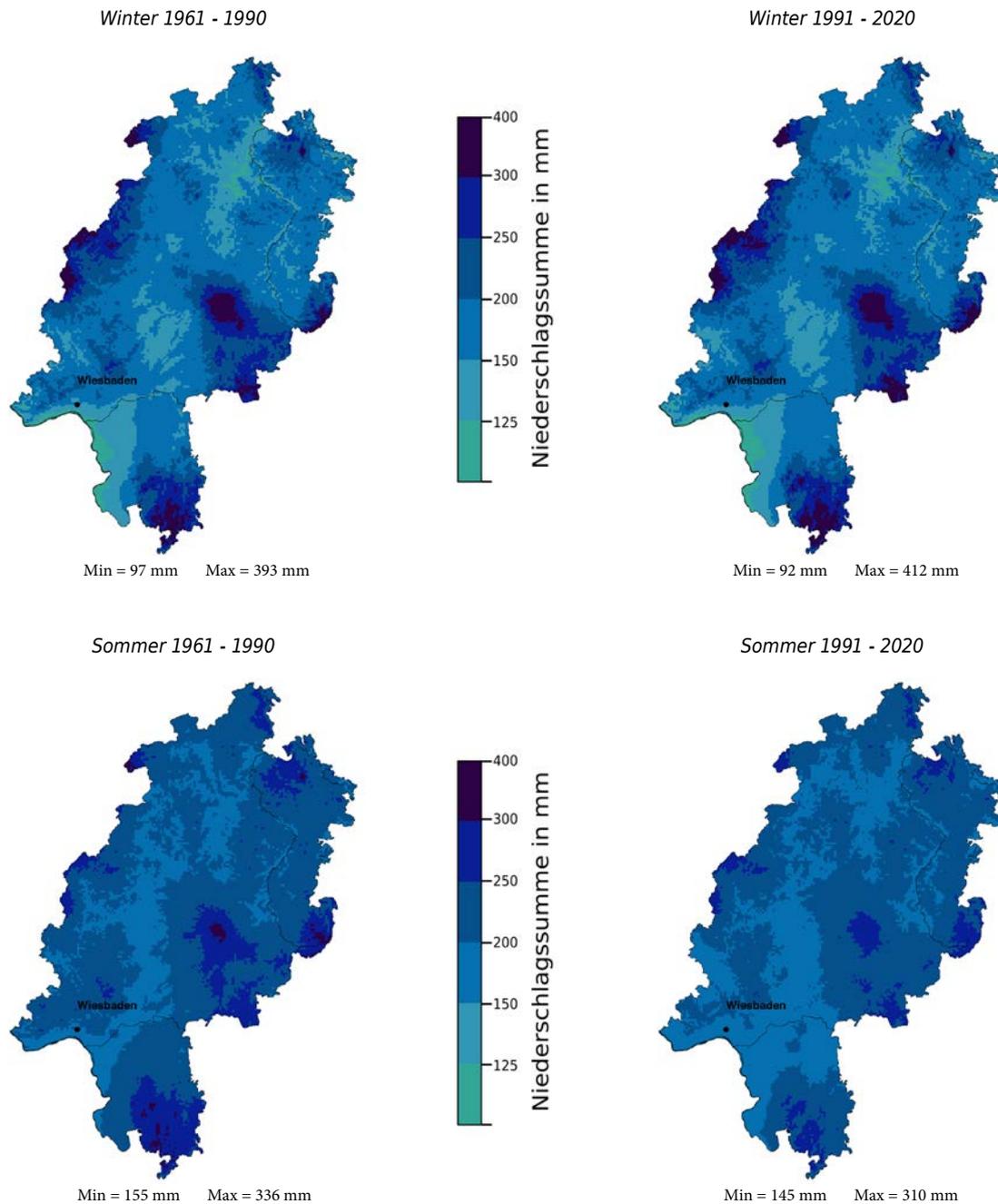
Im Mittel über Hessen werden die höchsten Niederschlagssummen in Sommer und Winter gemessen. Niedrigere Werte treten in den Übergangsjahreszeiten auf. In den meisten Gebieten ist das sommerliche Maximum größer als das winterliche, lediglich in den windzugewandten Staulagen Nordwesthessens sowie von Westerwald, Vogelsberg, Spessart, Rhön und Odenwald ist dies z. T. umgekehrt, da sich dort bei winterlichen Westwindwetterlagen die Wolken stauen und abregnen.

Die Abbildung zeigt die in Hessen möglichen verschiedenen Verläufe des Jahresgangs am Beispiel von zwei sehr unterschiedlichen Stationen: dem trockenen Geisenheim im Rheingau und dem niederschlagsreichen Driedorf im Westerwald. Aufgrund der von Jahr zu Jahr großen Schwankungsbreite der Niederschlagsverteilung wurden beide in diesem Report verwendeten Referenzperioden zu einer 60 Jahre umfassenden Reihe 1961-2020 zusammengefasst. In Geisenheim fällt von Ende Mai bis Mitte August der meiste Regen, während der Jahresbeginn (Januar bis April) recht niederschlagsarm ausfällt.

Das sommerliche Niederschlagsmaximum ist insbesondere auf Schauer und Gewitter zurückzuführen, die vor allem bei warmen, feuchten Wetterbedingungen auftreten. In Driedorf ist der Winterzeitraum (insbesondere der Dezember) hingegen deutlich nasser als andere Zeiträume im Jahr. Ein sommerliches Maximum wird hier nicht beobachtet.

Die unterschiedlichen Jahresgänge in den verschiedenen Regionen von Hessen führen in den einzelnen Monaten zu leichten Verschiebungen in der für den Jahreszeitraum gezeigten räumlichen Verteilung der Niederschläge. Insbesondere die anstaubedingten Maxima in den Bergregionen sind in den Wintermonaten deutlich stärker ausgeprägt als im Rest des Jahres. In den Karten für Winter und Sommer werden daher charakteristische räumliche Muster mit hohen Werten in den Höhenlagen (Upland, Westerwald, Vogelsberg, Spessart, Rhön, Odenwald, z. T. auch Taunus) und geringeren Werten in den niedriger gelegenen Regionen (insbesondere entlang von Rhein und Main, in der Wetterau und teilweise entlang der Flüsse Schwalm, Eder, Lahn und Fulda) beobachtet.

Niederschlagssummen in Hessen 1961 - 1990 und 1991 - 2020



▲ Die Karten stellen die Niederschlagssumme in Hessen für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) für Winter (oben) und Sommer (unten) dar. Sie zeigen ähnliche räumliche Muster in beiden Perioden. Im Winter verzeichnen die meisten Gebiete Hessens niedrigere Niederschlagsmengen als im Sommer, mit Ausnahme verschiedener Mittelgebirgsregionen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Monat	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Hessen	66	54	55	45	69	65	80	68	60	63	64	74	761
	+5	+3	-11	-24	-3	-18	+9	-3	+4	+7	-11	-4	-4
Geisenheim	39	34	36	31	50	49	57	48	43	45	43	50	526
	+2	-2	-3	-21	-4	-17	+1	-9	+6	+8	-12	+8	-4
Driedorf	124	95	97	61	72	71	95	84	83	93	103	137	1116
	+1	+8	-9	-23	-9	-17	+13	+7	+6	+2	-16	-1	-3

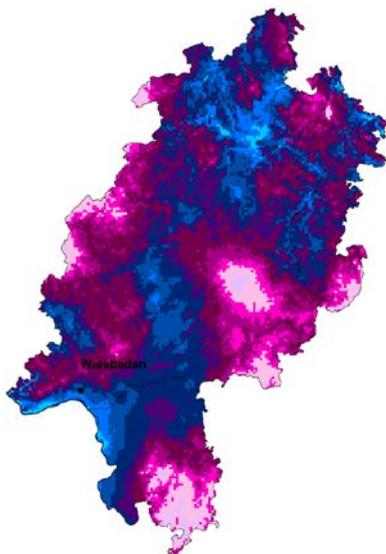
▲ Die Entwicklung der Niederschlagsmenge gestaltet sich je nach Monat unterschiedlich. Die Tabelle zeigt die Monatsmittelwerte von Hessen (Flächenmittel), Geisenheim/Rheingau und Driedorf/Westerwald (in mm) für den Zeitraum 1991-2020 und das Änderungssignal im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961-1990 (in %).

Seit 1881 hat der Niederschlag in Hessen im Winter und Frühling zugenommen. Im Sommer und Herbst ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Im Vergleich der 30-jährigen Referenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 (siehe Tabelle) ist die Niederschlagsmenge im Frühling deutlich und im Sommer etwas gesunken, während sie im Herbst und Winter gleich blieb. Dieser Rückgang ist vor allem in der sog. Vegetationsperiode 1 (April bis Juni) ausgeprägt, gerade dort, wo für das Pflanzenwachstum das meiste Wasser nötig ist. Am

stärksten betroffen ist der Monat mit dem stärksten Temperaturanstieg in Hessen, der April, der seit 2007 in fast jedem Jahr deutlich zu trocken war. Durchschnittlich fehlte seitdem mehr als ein Drittel des zuvor üblichen Monatsniederschlags. Deutlich geringere Niederschläge traten ebenfalls im Juni auf, auch März und November waren trockener als der frühere Referenzzeitraum. Juli, September und Oktober waren dagegen im Zeitraum 1991-2020 feuchter als zuvor.

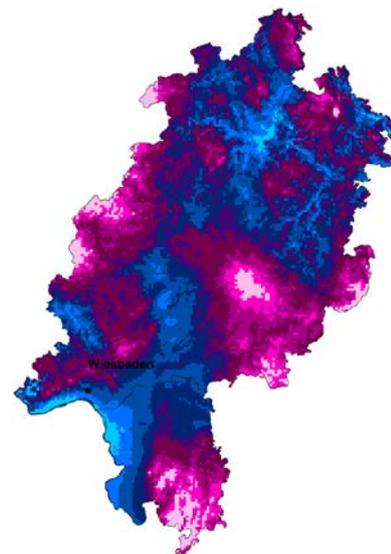
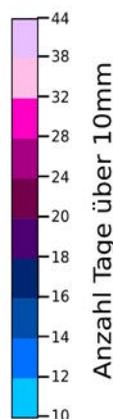
Veränderung von Kenntagen

Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm
1961 - 1990



Min = 10 Tage Max = 46 Tage

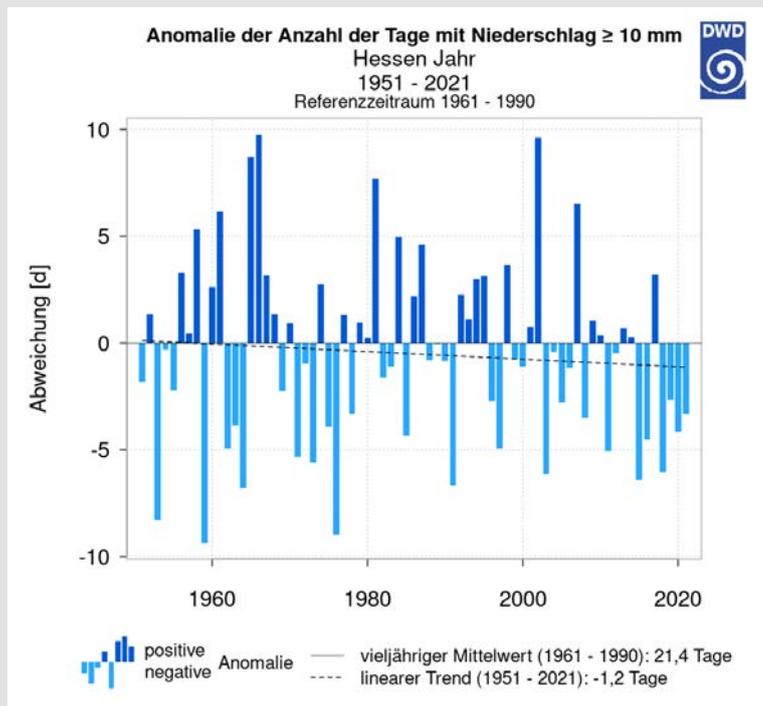
Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 10 mm
1991 - 2020



Min = 8 Tage Max = 45 Tage

▲ Die Verteilung der Tage mit einer Niederschlagsmenge von mehr als 10 mm zeigt für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) eine ähnliche räumliche Verteilung, mit in den meisten Gebieten etwas niedrigeren Werten in den vergangenen Jahrzehnten. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

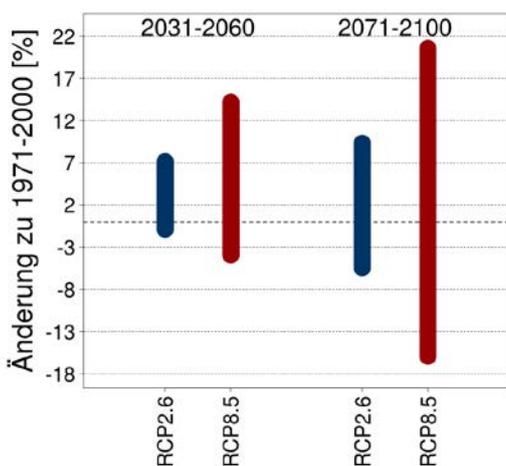
► Die Anzahl der Tage mit starken Niederschlägen von mehr als 10 mm unterliegt starken jährlichen Schwankungen. Sie ist im Zeitraum 1951-2020 im hessischen Flächenmittel leicht zurückgegangen.



Die Anzahl der Tage mit hohen Niederschlagsmengen unterliegt starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Klimatologisch ist ein leichter Rückgang der Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag zu verzeichnen. Aufgrund der starken räumlichen Niederschlags-

variabilität gibt es jedoch örtlich z. T. deutliche Unterschiede auch im Trendverhalten. Der Bereich "Extremereignisse" geht – unter Einbeziehung von räumlich höher auflösenden Radardaten – noch detaillierter auf das Thema Starkregen ein.

Zukunft



◀ Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresniederschlagssumme von Hessen. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2031-2060) und langfristigen (2071-2100) Planungshorizont, jeweils als Änderungssignal zum Bezugszeitraum 1971-2000. Es werden je Planungshorizont die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, blau) denen des Kein Klimaschutz-Szenarios (RCP8.5, rot) gegenübergestellt. Die dargestellten Balken zeigen die Bandbreite zwischen dem kleinsten und größten Änderungssignal innerhalb des betrachteten Szenarios. Die Bandbreite wird aus den vorliegenden 11 Klimaprojektionen für RCP2.6 bzw. 26 Klimaprojektionen für RCP8.5 ermittelt.

Jahreszeitliche Mittelwerte und erwartete Änderungen

Monat	1961-1990	1971-2000 Referenzperiode	1991-2020	2031-2060 (RCP2.6)	2031-2060 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	191 mm	180 mm	168 mm	+8 %	+7 %	+5 %	+10 %
Sommer	222 mm	208 mm	213 mm	-1 %	-3 %	-1 %	-11 %
Herbst	188 mm	196 mm	197 mm	+1 %	+3 %	+2 %	+3 %
Winter	193 mm	193 mm	195 mm	+8 %	+10 %	+3 %	+19 %
Jahr	794 mm	777 mm	773 mm	+4 %	+4 %	+2 %	+5 %

▲ Saisonale und jährliche Mittelwerte des Niederschlags in Hessen für drei Referenzzeiträume der Vergangenheit (Spalten 2-4) sowie projizierte Ergebnisse für die Zukunft (Spalten 5-8). Die Spalten 5 und 6 zeigen die Änderung des Niederschlags (Median der Klimaprojektionsensembles) für den Zeitraum 2031-2060 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (fett gedruckt) für 2 Klimaszenarien (Klimaschutzszenario: RCP2.6 und Kein Klimaschutz-Szenario: RCP8.5). In Spalte 7 und 8 wird die gleiche Information für den Zeitraum 2071-2100 dargestellt.

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2031-2060) ist für Hessen nicht zu erwarten. Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags um 4 %. Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen -1 % und +14 % Änderung. Sie ist überall in Hessen in etwa gleich stark ausgeprägt. Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass eine modellierte Änderung unterhalb von 10 % nicht von der natürlichen Klimavariabilität unterschieden werden kann. Diese Schwelle gilt auch für alle nachfolgenden Werte.

Für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) ist für Hessen beim Kein Klimaschutz-Szenario mit einer Zunahme des Jahresniederschlags um +5 % zu rechnen. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt im Klimaschutz-Szenario zwischen -5 und +9 % und im Kein Klimaschutz-Szenario zwischen -16 und +21 %. Diese Änderung wird für alle Teile Hessens als etwa gleich stark projiziert. Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 10 mm pro Tag ist für alle Regionen sowohl für den kurzfristigen Planungshorizont als auch für den langfristigen Planungshorizont mit einer Zunahme zu rechnen. Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Spannbreite innerhalb des Ensembles teilweise sehr groß, so dass die Resultate nur wenig belastbar sind.

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2031-2060 werden unter Verwendung beider RCP-Szenarien für den Winter Zunahmen der Niederschlagsmenge um etwa +9 % berechnet. Für den Sommer ist eine belastbare Richtungsaussage nicht möglich. Die Spannbreite der Ergebnisse liegt im Bereich von geringen Zunahmen bis hin zu einem leichten Rückgang. In den Übergangsjahreszeiten zeigen sich für diesen Planungshorizont Zunahmen der mittleren Nieder-

schlagssumme von +2 % (Herbst) bzw. +8 % (Frühjahr).

Im Frühjahr und im Herbst kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071-2100) +2 bis +10 %, im Winter bis zu +19 % betragen. Für den Sommer wird in diesem Planungshorizont eine Spanne von geringen Änderungen im Klimaschutz-Szenario (-1 %) bis hin zu Abnahmen der Niederschlagshöhe im Kein Klimaschutz-Szenario (-11 %) berechnet. Die Spannbreite liegt im Kein Klimaschutz-Szenario zwischen einer Zunahme um +8 % und einer Abnahme um -65 %.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

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

Kurzfristiger Planungshorizont (2031-2060)

- Keine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags (+4 % im Vergleich zur Periode 1971-2000)

Langfristiger Planungshorizont (2071-2100)

- Keine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags (Klimaschutz-Szenario +2 % und Kein Klimaschutz-Szenario +5 % im Vergleich zur Periode 1971-2000)

Für beide Planungshorizonte werden jeweils für die Wintermonate Zunahmen der Niederschlagsmenge und für den Sommer eine Spanne von keiner Änderung bis hin zu erheblichen Abnahmen im Kein Klimaschutz-Szenario simuliert.

Informationen zur globalen Niederschlagsentwicklung sind im "Nationalen Klimareport" zu finden (Link: https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.html?nn=16102)



Schneebedeckung

Die höchsten Schneehöhen sind in den Bergregionen Hessens zu finden, während sich insbesondere im Rhein-Main-Gebiet nur selten eine Schneedecke ausbildet. Schnee ist in den letzten Jahrzehnten in Hessen seltener geworden.

Räumliche Charakteristika der Schneebedeckung in Hessen

Das Vorhandensein einer Schneedecke und ihre Höhe wird in Hessen derzeit an den 178 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes gemessen. Räumlich hochaufgelöste Daten für Hessen liegen für diesen Klimaparameter nicht vor.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine länger andauernde Schneedecke ausbildet, nimmt mit der Höhenlage zu. Sie erreicht in den höchsten Lagen von Sauer- und Upland sowie der Rhön im Mittel im Februar ihre größte Ausdehnung. Im Flachland, insbesondere im Rhein-Main-Gebiet, bildet sich nur in strengen Wintern eine länger vorhandene Schneedecke aus. Häufig fällt der Schnee hier in Verbindung mit Wetterfronten aus westlicher Richtung, so dass der Schnee nach einiger Zeit oft in Regen übergeht und schon nach wenigen Stunden bis Tagen wieder geschmolzen ist.

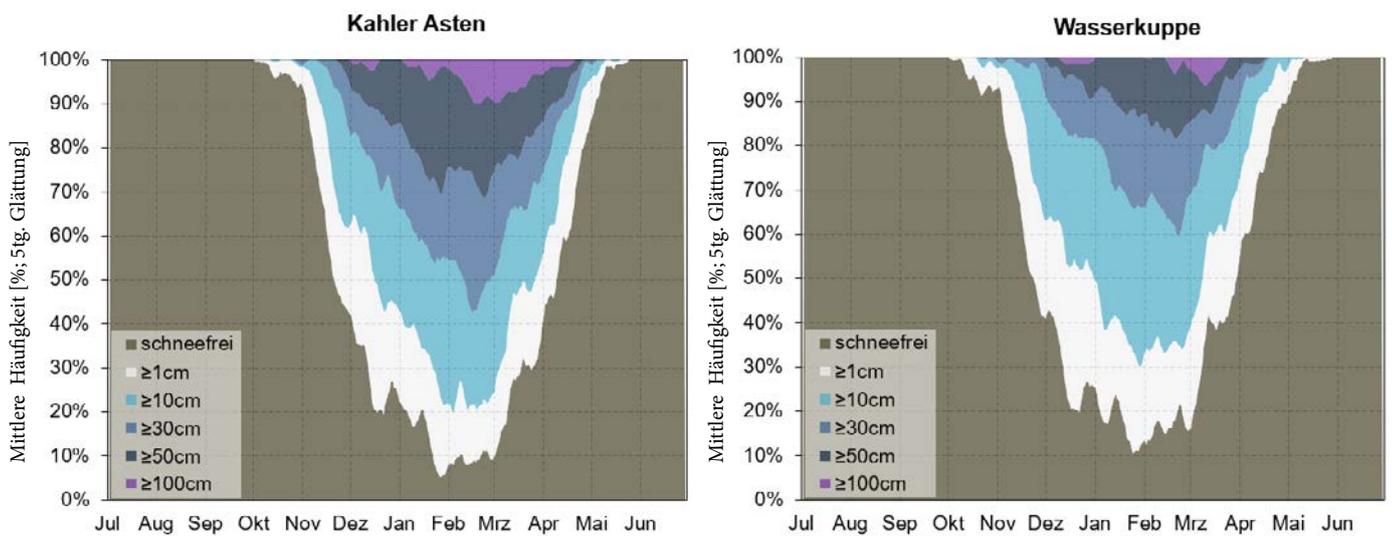
Hinsichtlich Ausprägung, Beständigkeit und Mächtigkeit der Schneehöhe konkurrieren insbesondere in den Mittelgebirgen bei gleicher Höhenlage zwei Effekte miteinander, die mit der von West nach Ost zunehmenden Kontinentalität in Verbindung stehen. So sind die mittleren Temperaturen im Westen zwar höher, die Niederschläge sind jedoch ebenfalls erhöht, so dass gerade in den wintertouristisch relevanten höchsten Lagen letzterer Effekt überwiegt, was z. B. dem an der hessischen Landesgrenze gelegenen Kahlen Asten (843 m) im Sauerland häufig deutlich höhere Schneehöhen als der über 100 m höheren Wasserkuppe (950 m) beschert. Im Zeitraum 1961-1990 war dieser

Effekt bei der maximalen jährlichen Schneehöhe mit 92 zu 62 cm sehr deutlich ausgeprägt, hat sich aufgrund der im Zeitraum 1991-2020 deutlich milderen Winter aber inzwischen fast aufgehoben (66 zu 60 cm). Auf dem auf ähnlicher Höhe wie der Kahle Asten gelegenen Kleinen Feldberg (826 m) liegt aufgrund der im Taunus nochmals geringeren Niederschlagsmengen (weniger Anstauereffekte, siehe Niederschlagskapitel) sogar noch einmal deutlich weniger Schnee, so dass hier inzwischen kaum noch Wintertourismus stattfindet.

Im Klimaportal Hessen <https://klimaportal.hlnug.de/wetterextreme> (Bereich „Wetterextreme in Hessen“) sind die Veränderungen der Schneehöhe und -bedeckung für mehr als 300 Standorte mit langen Messreihen in und um Hessen visualisiert.

Saisonale Charakteristika der Schneebedeckung

Im Wintertourismus sind insbesondere Schneehöhen von über 10 cm (z. T. auch 20 cm) für den Skilanglauf sowie 30 cm für den Abfahrtsskitourismus relevant. In der Abbildung ist ersichtlich, dass diese Schneehöhen selbst in den schneesichersten Lagen in vielen Wintern (schon immer) nicht oder nicht durchgehend erreicht werden – selbst auf dem Kahlen Asten und der Wasserkuppe war im hier dargestellten Zeitraum 1961-2020 in den Hauptwintermonaten Januar und Februar nur weniger als die Hälfte (Kahler Asten) bzw. ein Drittel (Wasserkuppe) der Zeit für Abfahrtsskilanglauf geeignet. Inzwischen ergeben sich noch seltener natürlich gute Bedingungen – hier wird durch technische Beschneigung inzwischen auch in Hessen häufig nachgeholfen.

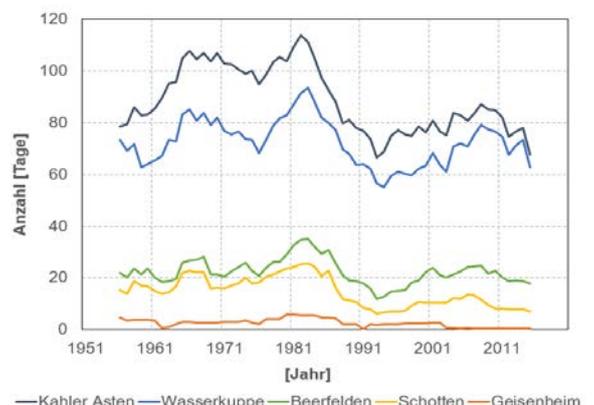
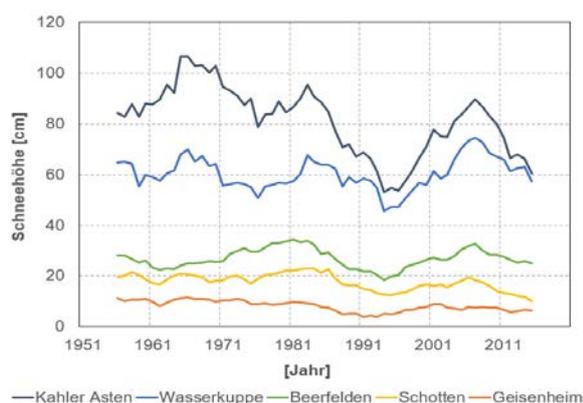


▲ In den höchsten Lagen der hessischen Mittelgebirge bildet sich im Dezember häufig eine beständige Schneedecke aus, die bis zum Februar an Mächtigkeit gewinnt und im März/April wieder abschmilzt. Die Abbildung zeigt die saisonale Verteilung der Schneebedeckung auf dem Kahlen Asten (links) und der Wasserkuppe (rechts) für den 60-jährigen Zeitraum 1961-2020 (5-tägig geglättete Daten).

Langjährige Veränderungen der Schneebedeckung

Die zwei unteren Abbildungen zeigen die Veränderung der mittleren Schneebedeckung für die maximale Schneehöhe des Winters sowie die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von ≥ 10 cm seit den 1950er Jahren. In den Höhenlagen haben sich die Schneeverhältnisse insbesondere in den westlichen Mittelgebirgen (hier abgebildet der Kahle Asten) verschlechtert, wo ein höheres Temperaturniveau verbunden mit rückläufigen winterlichen Niederschlagsmengen für deutlich niedrigere Schneehöhen sorgen. Auf der kontinentaler geprägten und etwas höher gelegenen

Wasserkuppe verzeichnet die maximale winterliche Schneehöhe keinen Trend, während die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von ≥ 10 cm bei (wie üblich) größeren dekadischen Schwankungen etwas zurückgeht. Die Schneeklimatologie beider Berge hat sich daher in den letzten Jahrzehnten angeglichen. Im Flach- und Hügelland wurden schon immer nur sporadisch größere Schneemengen gesichtet, aber auch hier ist auf niedrigerem Niveau ein weiterer Rückgang der Schneebedeckung zu vermenden. Insbesondere im Rhein-Main-Gebiet wird kaum noch eine nennenswerte Schneedecke verzeichnet.



▲ Die maximale winterliche Schneedecke (links) und die Anzahl der Tage mit ≥ 10 cm Schneehöhe (rechts) sind in den Höhenlagen der hessischen Mittelgebirge rückläufig. Besonders schneearm waren die Winter der 1990er Jahre, aber auch in den letzten Jahren fällt wieder wenig Schnee. Die Abbildungen zeigen einen Vergleich von fünf Stationen verschiedener Höhenlagen für den Zeitraum 1951-2020 (11-jährig geglättete Daten).

Zukunft

In der Zukunft ist mit einer weiteren Abnahme der Schneemenge zu rechnen. Zwar ist eine Erhöhung der Winterniederschläge projiziert, die steigenden Temperaturen reduzieren jedoch die Anzahl potentieller

Schneetage, unter Annahme beider Szenarien. Besonders deutlich wird der Rückgang der Anzahl potentieller Schneetage im langfristigen Planungshorizont (2071-2100) im Kein Klimaschutz-Szenario.

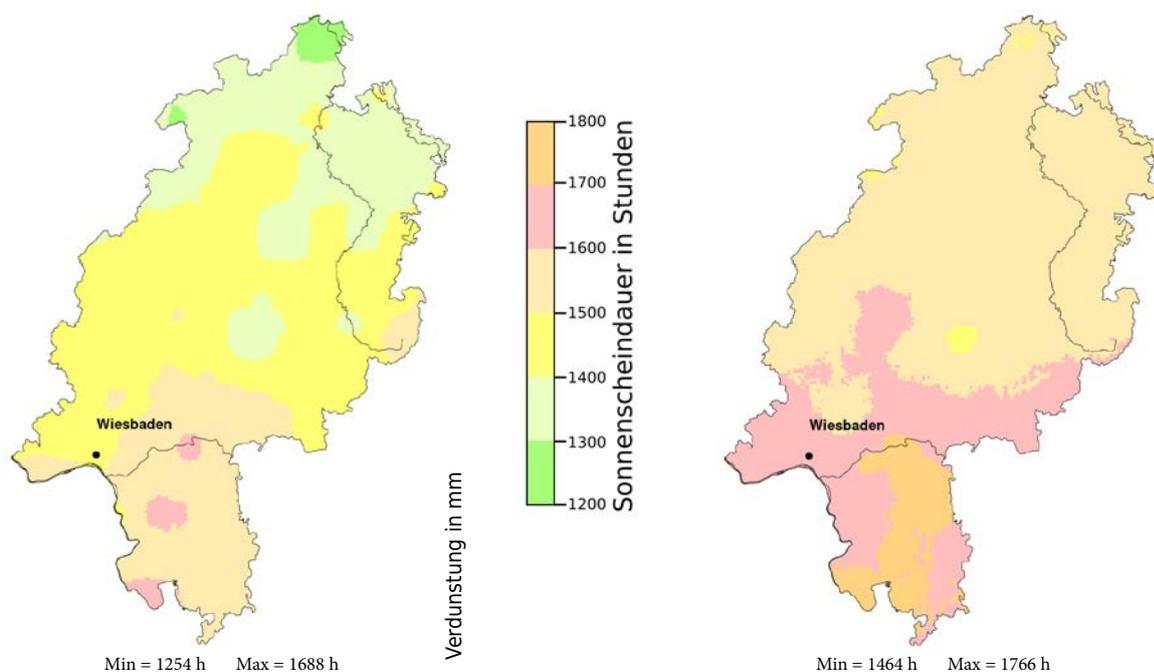
Sonnenschein

In Hessen scheint die Sonne ca. 1.500 Stunden im Jahr – am häufigsten von Mai bis August mit im Mittel sieben Stunden am Tag, am wenigsten von November bis Januar mit gerade einmal etwas mehr als einer Stunde. Südlich des Mains ist es am sonnigsten, am wenigsten scheint die Sonne in Nordhessen.

Vergangenheit und Gegenwart

Die räumliche Verteilung der Sonnenscheindauer in Hessen zeigt im Jahresmittel die höchsten Werte in Südhessen südlich des Mains (über 1.600 Sonnenstunden pro Jahr). Weniger Sonnenstunden treten in der

Nordhälfte auf (teilweise unter 1.400 Sonnenstunden). Die mittlere Anzahl von Sonnenstunden in Hessen zeigt jedoch auch dekadische Schwankungen und teilweise leichte Verschiebungen der räumlichen Muster.

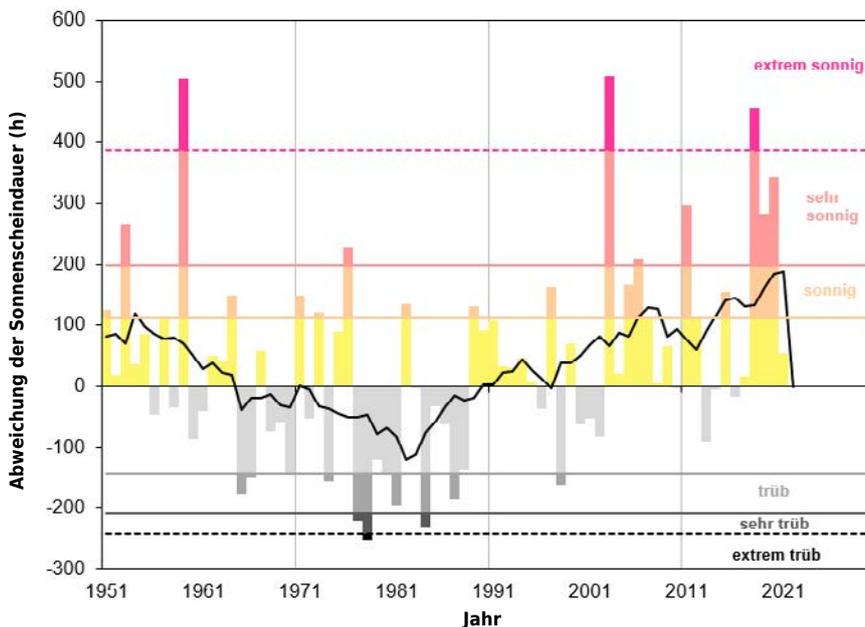


▲ Die Gegenüberstellung der Karten der jährlichen Verteilung der Sonnenscheindauer für die Perioden 1961-1990 und 1991-2020 zeigt den flächendeckend beobachteten Anstieg der Sonnenscheindauer in Hessen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Aus der Darstellung der Jahressummen (siehe Abbildung nächste Seite) lassen sich verschiedene Zeitabschnitte unterschiedlicher Sonnenscheindauer identifizieren: in den 1950er Jahren eine Phase höherer Jahreswerte, anschließend abnehmende Werte mit einem Minimum gegen Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre, danach wieder ansteigende Summen und nach dem Jahr 2003 sehr sonnige Jahre. Weltweit und auch in Hessen gab es zwischen den 1950er und 1990er Jahren eine Phase geringerer Sonneneinstrahlung. Dies ist auf den verstärkten Eintrag von Schwebeteilchen (Aerosolen) in die Erdatmosphäre

durch Industrie, Haushalte und Verkehr zurückzuführen. Diese führten zu einer stärkeren Trübung der Luft, wodurch weniger Sonnenschein am Erdboden ankam. Verbunden mit den Erfolgen der Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft nahm danach die den Boden erreichende Sonneneinstrahlung wieder zu. Die bisherigen jährlichen Gebietsmittel der Sonnenscheindauer in Hessen variieren zwischen 1247 Stunden (1978) und 2006 Stunden (im „Jahrhundertssommer“ 2003, gefolgt von den Jahren 1959 und 2022).

Jährliche Sonnenscheindauer 1951 - 2022

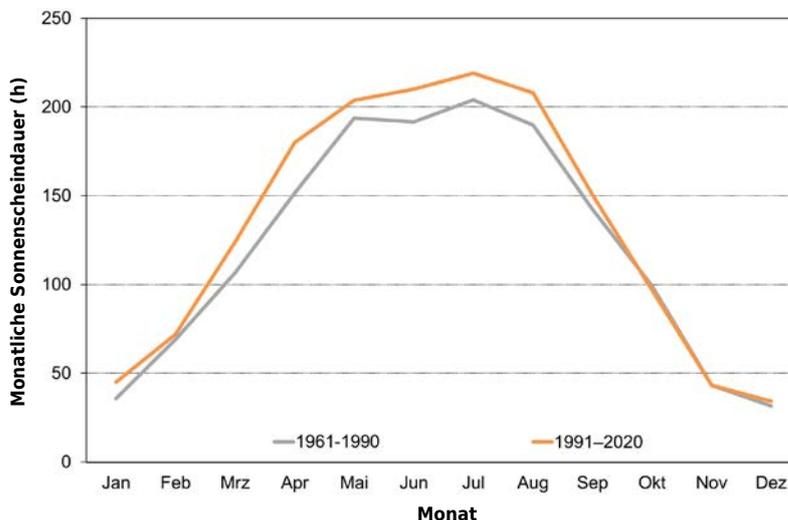


▲ Die Sonnenscheindauer in Hessen erreichte (auch in Verbindung mit zunehmender Luftverschmutzung und dadurch verstärkter Wolkenbildung) in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren ein Minimum, stieg in den folgenden Jahrzehnten jedoch deutlich an. Die Abbildung zeigt die Abweichung der jährlichen Sonnenscheindauer in Hessen vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1961-1990 sowie den gleitenden 11-jährlichen Mittelwert. Die Farbklassen kennzeichnen überdurchschnittlich sonnige (gelb-rötliche Farbtöne) bzw. trübe Jahre (grau-schwarze Farbtöne). Eine Abstufung erfolgt nach der Wiederkehrwahrscheinlichkeit bezogen auf die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts (1. Linie: 5 Jahre; 2. Linie: 20 Jahre; 3. Linie: 100 Jahre)

Bei Betrachtung der Jahreszeiten zeigen sich die niedrigsten Werte im Winter (im Mittel des Zeitraums 1991-2020 ca. 150 Sonnenstunden). Im Frühling werden über 500 Sonnenstunden, im Sommer über 600 Sonnenstunden und knapp 300 Sonnenstunden im Herbst beobachtet. Am wenigsten scheint die Sonne mit nur ca. 30 Stunden im Dezember, am meisten mit über 200 Stunden von Mai bis August. In den Monaten

April bis Oktober findet sich eine erhöhte Anzahl von Sonnenstunden in Südhessen, verglichen mit Nordhessen. Die Abbildung unten zeigt die monatliche Anzahl der Sonnenstunden im Vergleich der Zeiträume 1961-1990, charakterisiert durch verhältnismäßig wenig Sonnenschein und 1991-2020, wo die Sonne deutlich häufiger schien. Der Anstieg fällt insbesondere in den Monaten März bis August deutlich ins Auge.

Vergleich Sonnenscheindauer der beiden Perioden



► Die mittlere Sonnenscheindauer lag für Hessen in der aktuellen Klimaperiode 1991-2020 in fast allen Monaten z.T. deutlich höher als in der Referenzperiode 1961-1990. Die Abbildung zeigt die monatliche Sonnenscheindauer für beide 30-jährigen Referenzperioden.



Zukunft

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

Für beide Planungshorizonte - den kurzfristigen (2031-2060) sowie den langfristigen (2071-2100) - werden nur geringe, nicht signifikante Änderungen projiziert. Danach geht im Jahresverlauf die Sonnenscheindauer leicht zurück. Dieser Rückgang wurde vor allem für Winter und Frühjahr berechnet, während für den Herbst kein klares Änderungssignal erkennbar ist. Die Veränderungen im Sommer variieren zwischen den Modellen. Im Kein Klimaschutz-Szenario werden hier durch einzelne Projektionen auch Zunahmen der mittleren Tagessonnenscheindauer von bis zu einer Stunde projiziert.

KURZ NOTIERT

Beobachtung

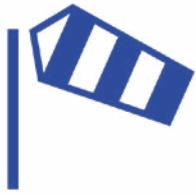
- Langfristige Schwankung der Sonnenscheindauer mit geringsten Werten in den 1960er und 1970er Jahren, danach wieder Zunahme der Sonnenstunden
- Längste Sonnenscheindauer in Südhessen, geringste in Nordhessen und im Vogelsberggebiet

Kurzfristiger Planungshorizont (2031-2060)

- Im Jahresmittel geringe, nicht signifikante Änderungen

Langfristiger Planungshorizont (2071-2100)

- Im Jahresmittel geringe, nicht signifikante Änderungen



Wind

Der Wind weht in Hessen besonders in höheren Lagen häufig kräftig, während im Flachland zumeist geringere Windgeschwindigkeiten gemessen werden. Sturmschäden können jedoch auch dort auftreten.

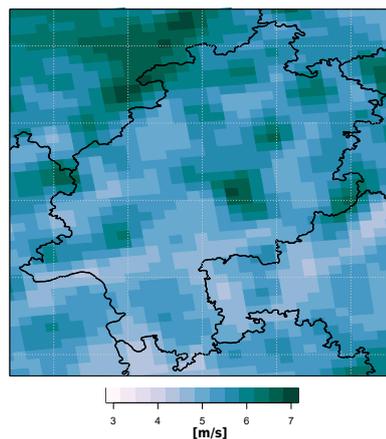
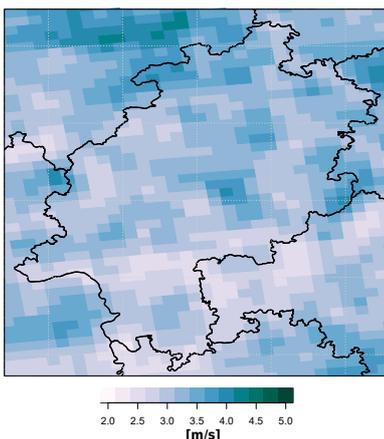
Vergangenheit und Gegenwart

Das bodennahe Windfeld wird stark durch die Topographie des Untergrundes beeinflusst: je unebener das Gelände, desto stärker bremst die Reibung die Windgeschwindigkeit. In flachem, ebenem Gelände oder über größeren Wasserflächen weht der Wind nahezu ungestört, so dass die Windgeschwindigkeit relativ hoch ist. In gebirgigem Gelände dagegen wirken sich Berge und Täler auf Windrichtung und -stärke aus. Tallagen führen in der Regel zu einer Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit und zu einer Kanalisierung und damit zu einer Beeinflussung der Windrichtung. Kuppen- und Kammlagen, Höhenrücken oder Berggipfel weisen gegenüber der Umgebung im Mittel höhere Windgeschwindigkeiten auf. Neben diesen großräumigen Abhängigkeiten wird die Windstärke durch die Unebenheit des Untergrundes (die sogenannte Rauigkeit) beeinflusst. Die Rauigkeit hängt von der Bodennutzung (Wald, Wiesen, Felder, Städte, etc.) ab. Allgemein gilt: Je größer die Rauigkeitselemente (z. B. Häuser, Bäume), desto stärker wird der Wind abgebremst. In einzelnen Fällen können aber Düsen- oder Eckeneffekte (z. B. in Straßenschluchten) die Windgeschwindigkeit auch lokal erhöhen.

Der Deutsche Wetterdienst misst an derzeit 20 Stationen in Hessen kontinuierlich Windrichtung und Windgeschwindigkeit, standardmäßig in 10 m Höhe über Grund, um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten. Dennoch reagiert der gemessene Wind, v. a. die Windgeschwindigkeit, empfindlich

auf Veränderungen im Umfeld der Messstation (z. B. wachsende Bäume) oder auf Änderungen des Messortes. Zusätzlich wurde seit der Jahrtausendwende eine Umstellung der Messinstrumente von sog. Schalen-Anemometern (drei waagrecht angeordneten Schalen, die durch den Wind angetrieben werden – je stärker der Wind weht, desto schneller drehen sie sich) auf deutlich präzisere und zeitlich höher auflösende Ultraschallgeräte für Windrichtung und -geschwindigkeit vorgenommen. Fast alle Windzeitreihen weisen demzufolge (häufig deutliche) Inhomogenitäten auf. Die zur Verfügung stehenden Zeitreihen umfassen außerdem nur wenige Jahrzehnte. Modellierungen der räumlichen Windverhältnisse stellen daher eine wichtige Ergänzung der Stationsmessungen dar und sind zur Beurteilung der Windgeschwindigkeit in größeren Höhen vor allem für Betreiber von Windkraftanlagen von hohem Wert. Datengrundlage der gezeigten Karten ist die regionale Reanalyse COSMO-REA6.

Räumlich treten die niedrigsten Windgeschwindigkeiten in Südhessen, besonders im Rhein-Main-Gebiet, an der hessischen Bergstraße sowie in einigen Flusstälern in Mittel- und Nordhessen auf. Die Rheinebene hat teilweise etwas höhere Windgeschwindigkeiten, weil sie relativ weit und eben ist. Im Odenwald sind trotz der Höhenlage die mittleren Windgeschwindigkeiten verhältnismäßig gering. Die höchsten Windgeschwindigkeiten findet man in Hessen auf den Höhen der Mittelgebirge in Mittel- und Nordhessen, besonders in der Rhön, auf dem Vogelsberg und im Upland.



◀ Die beiden Karten zeigen die modellierte mittlere Windgeschwindigkeit in Hessen für den Zeitraum 1995-2018 für 10 m (links) und 100 m (rechts) über Grund in m/s. Die 100 m Höhe wird als exemplarische Höhe für Windkraftanlagen verwendet. Die Verteilung bestätigt höhere Windgeschwindigkeiten über Mittelgebirgen und höher als ihre Umgebung gelegenen Gebieten, während Täler zumeist schwächere Windgeschwindigkeiten aufweisen.

Jahresgang Windgeschwindigkeit



▲ Die Abbildung stellt den Jahresgang der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit (im 60-jährigen Zeitraum 1961-2020) für zwei ausgewählte Standorte in Hessen dar. Auf der exponiert gelegenen Wasserkuppe werden die höchsten Windgeschwindigkeiten Hessens gemessen, während die Station Gießen einen Eindruck der Windgeschwindigkeiten im hessischen Flachland vermittelt.

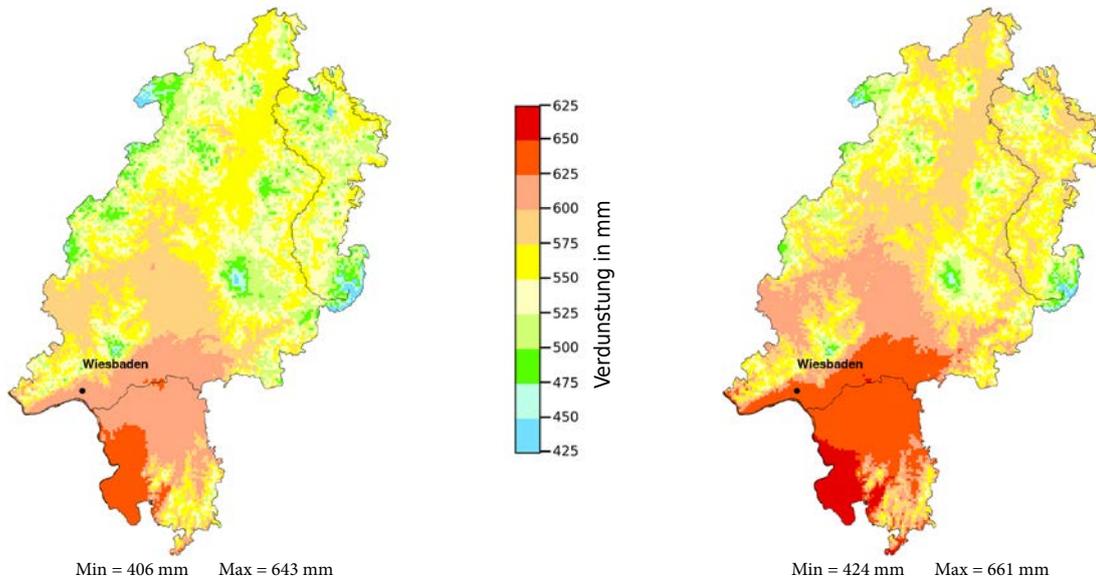
Zeitlich treten die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten (und Windböen) im Winterhalbjahr von Oktober bis März in Verbindung mit vom Atlantik durchziehenden Tiefausläufern auf. Wie auf der Abbildung ersichtlich, kommen auf der Wasserkuppe die im Mittel höchsten Windgeschwindigkeiten von November bis Anfang Februar vor. Im hessischen Flachland treten die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten zumeist zwischen Dezember und März auf. Im Sommerhalbjahr von April bis September sind die mittleren Windgeschwindigkeiten (gerade in höheren Lagen deutlich) niedriger, da auch die atlantischen Tiefdrucksysteme nicht mehr so stark sind. Die niedrigsten mittleren Windgeschwindigkeiten werden auf der Wasserkuppe von Mitte Mai bis in den August hinein gemessen. Im Flachland ist der Zeitraum von August bis Oktober vergleichsweise windarm.

Zukunft

Die Klimaprojektionen zeigen keine deutlichen Änderungen in der mittleren und extremen bodennahen Windgeschwindigkeit und die räumliche Verteilung bleibt ähnlich der des Referenzzeitraumes. Es sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Szenarien erkennbar.

Verdunstung

Bei hohem Sonnenstand verdunstet in Hessen im Sommerhalbjahr viel Wasser, während die Verdunstungsraten bei niedrigem Sonnenstand im Winterhalbjahr gering sind. Durch die bereits messbare Erwärmung steigt die Verdunstung ganzjährig deutlich an.



▲ Die Gegenüberstellung der Karten der jährlichen Verteilung der Grasreferenzverdunstung für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) zeigt eine Zunahme des verdunstenden Wassers in Hessen. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².

Bei der Verdunstung (Fachausdruck: Evapotranspiration = Evaporation von Wasserflächen oder feuchtem Boden + Transpiration von Pflanzen) wird zwischen der potentiellen, also maximal möglichen Verdunstung und der aktuellen Verdunstung unterschieden. Die potentielle Verdunstung entspricht dabei der Verdunstung über einer offenen Wasserfläche. Sie wird hauptsächlich durch die zur Verdunstung verfügbare Energie bestimmt, also durch Globalstrahlung und Temperatur als wesentliche klimatologische Einflussgrößen.

Die Verdunstung wird, wie der Niederschlag, in mm angegeben, wobei 1 mm = 1 Liter je m² entspricht. Analog zum Niederschlag, wo die Angabe in mm anzeigt, wie hoch das Wasser auf der Fläche stehen würde, wenn nichts abfließen oder versickern würde, beschreibt die Angabe in mm bei der Verdunstung, wie weit eine offene Wasserfläche aufgrund der Verdunstung absinken würde.

Die aktuelle Verdunstung kann maximal so groß sein wie die potentielle Verdunstung. Sie lässt sich nur punktuell mit relativ großem Aufwand bestimmen, da sie von der Bodenbeschaffenheit, der Art des Bewuchses und vom Wasservorrat im Boden abhängt. Als ein Maß für den räumlichen

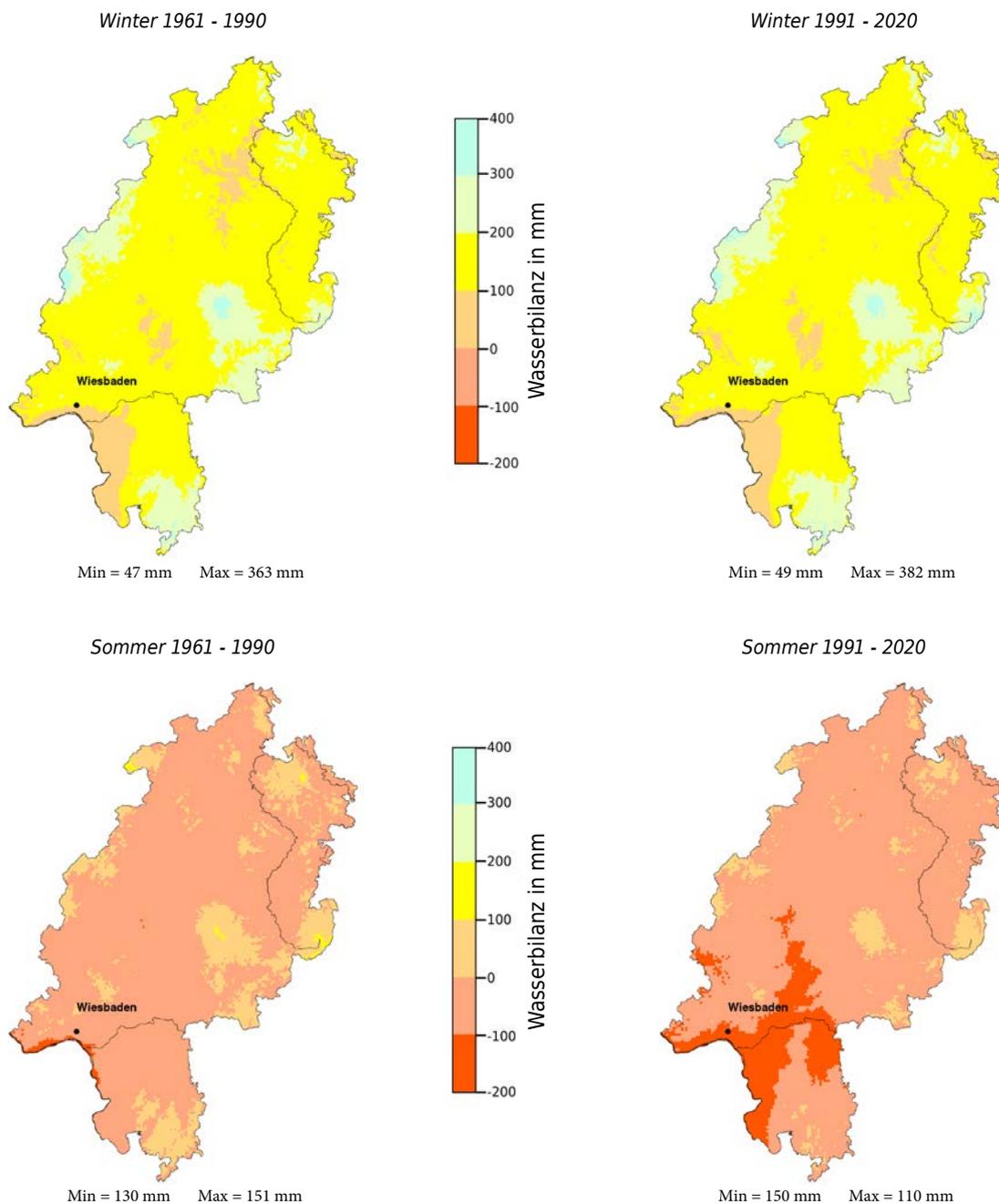
Vergleich hat sich die sogenannte Grasreferenzverdunstung bewährt, die die Verdunstung einer standardisierten Grasdecke in standardisiertem Boden bei optimaler Wasserversorgung angibt.

Die Karten der mittleren jährlichen Grasreferenzverdunstung zeigen aufgrund des Einflusses der Temperatur einen relativ deutlichen Zusammenhang mit dem Relief, wobei in den höheren Lagen der Mittelgebirge teilweise Werte von weniger als 450 mm pro Jahr auftreten. In den Niederungen findet sich ein Nord-Süd-Gradient mit Werten unter 600 mm pro Jahr in Nordhessen und über 600 mm pro Jahr im Flachland Südhessens.

Diese Struktur zeigt sich aufgrund der starken Jahresgänge bei Strahlung und Temperatur vor allem im Sommerhalbjahr. Von Mai bis August verdunsten im hessischen Mittel über 80 mm pro Monat und auch in den Mittelgebirgen übersteigen die Werte 60 mm. Von November bis Februar werden hingegen nur sehr geringe Verdunstungswerte (10 - 20 mm pro Monat im hessischen Mittel) und dabei auch nur sehr geringe räumliche Unterschiede erreicht. Die Verdunstung wird infolge des Klimawandels und der damit verbundenen Erwärmung weiter zunehmen, was insbesondere in den Sommermonaten ausgeprägt sein wird.

Wasserbilanz

Im Sommerhalbjahr verdunstet vor allem im hessischen Flachland mehr Wasser als Niederschlag vom Himmel kommt – die Wasserbilanz ist häufig negativ. Im Winterhalbjahr hingegen werden Hessens Bodenwasserspeicher aufgefüllt, da es deutlich mehr regnet oder schneit als Wasser verdunstet.



▲ Die Karten stellen die Wasserbilanz in Hessen für die Perioden 1961-1990 (links) und 1991-2020 (rechts) für Winter (oben) und Sommer (unten) dar. Im Winter fällt in allen Gebieten mehr Niederschlag als verdunstet. Im Sommer verdunstet in den meisten Gebieten Hessens mehr Wasser als durch Regen hinzukommt – mit Ausnahme der meisten Mittelgebirgsregionen. Der Effekt der zunehmenden Verdunstung durch die Erwärmung im Zuge des Klimawandels ist besonders im Sommerhalbjahr deutlich sichtbar. Die Abbildung basiert auf Rasterwerten mit einer Auflösung von 1 km².



Die Wasserbilanz ist die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung, sie wird wie diese beiden Größen in mm angegeben. Die Wasserbilanz wird für jeden Rasterpunkt aus den Rasterfeldern der beiden Basisparameter Niederschlag und Verdunstung bestimmt. Als Maß für die Verdunstung wird hier die Grasreferenzverdunstung benutzt. Dabei ist zu beachten, dass die tatsächliche Verdunstung in Trockenperioden geringer ist, da der Vegetation in dieser Zeit nicht so viel Wasser zur Verfügung steht wie in der Berechnung angenommen wird (siehe Verdunstung). Daraus folgt, dass die Wasserbilanz insbesondere in Trockenperioden etwas zu negativ dargestellt wird. Wenn die Wasserbilanz negativ ist, bedeutet das, dass mehr Wasser verdunstet als durch Niederschlag an dieser Stelle fällt. Das Wasser, das die Pflanzen verdunsten, kommt dann entweder aus dem Grundwasser oder aus Bewässerung.

Der ausgeprägte Jahresgang der Verdunstung spiegelt sich auch in der Wasserbilanz wider. In den Monaten April bis August ist die Wasserbilanz in den meisten

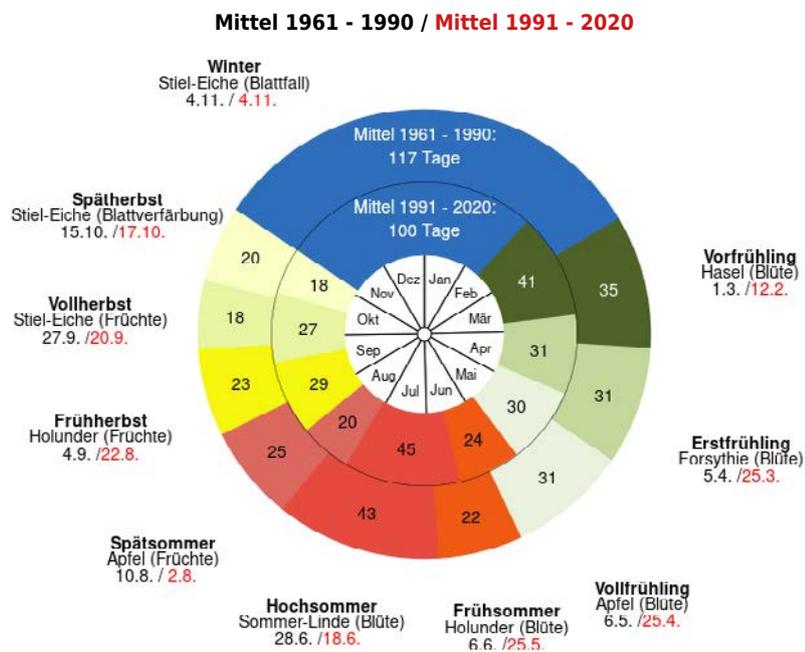
Gebieten Hessens im Mittel negativ (es verdunstet mehr Wasser, als Niederschlag hinzukommt), während sie im übrigen Jahr fast überall im Mittel positiv ist.

Im Rhein-Main-Gebiet treten ganzjährig die niedrigsten Werte der Wasserbilanz auf. In der Jahresbilanz ist sie hier negativ, während fast alle anderen Gebiete Hessens eine positive Wasserbilanz aufweisen. Von April bis September wird im Rhein-Main-Gebiet ein Niederschlagsdefizit beobachtet, wobei im Sommer monatliche Werte von -40 mm unterschritten werden. Auf den Höhen der Mittelgebirge, besonders im Vogelsberg und in der Rhön, bleibt die Wasserbilanz aufgrund höherer Niederschläge bei gleichzeitig geringerer Verdunstung in allen Monaten des Jahres positiv, wobei in den Wintermonaten monatliche Überschüsse von z. T. mehr als 100 mm auftreten. Schon beim Vergleich der Perioden 1961-1990 und 1991-2020 ist der Effekt der zunehmenden Verdunstung und der damit verbundenen Abnahme der Wasserbilanz durch die Erwärmung im Zuge des Klimawandels vor allem im Sommerhalbjahr deutlich sichtbar.

Phänologie

Die Witterungs- und Klimaverhältnisse beeinflussen Wachstum und Entwicklung von Pflanzen. Die Wissenschaft, die sich damit beschäftigt, wird als Phänologie (griech.: „Lehre von den Erscheinungen“) bezeichnet. Daten pflanzenphänologischer Beobachtungen zählen zu den wertvollsten Anzeigern von Veränderungen in den Umweltbedingungen und werden weltweit seit Jahrhunderten erhoben. Sie zeigen schon jetzt deutliche Folgen des Klimawandels in Hessen.

Phänologische Jahreszeiten in Hessen



In Hessen verfügt der DWD derzeit über knapp 100 ehrenamtliche phänologische Beobachterinnen und Beobachter (deutschlandweit 1100 bis 1200 Personen), die mit ihrer Arbeit die Datengrundlage für die Beschreibung der Entwicklungen in der Pflanzenwelt liefern. Hintergründe hierzu sind unter www.dwd.de/phaenologie zu finden. Die frühesten Eintrittstermine phänologischer Entwicklungsphasen werden bis in den Sommer hinein im wärmeren Süden des Landes beobachtet. In der Zeit wandert der Entwicklungsfortschritt mit etwa 40 km je Tag in Richtung Norden und Nordosten, wobei in den Mittelgebirgslagen mit zunehmender Höhe eine Verzögerung gesehen wird, während in urbanen Regionen durch städtische Wärmeinseleffekte die Entwicklung beschleunigt ist. So kann man zum Beispiel

im Frankfurter Stadtteil Bergen-Enkheim ähnlich frühe Eintrittstermine phänologischer Entwicklungsphasen beobachten wie sonst in der süddeutschen Kaiserstuhlregion. Im Herbst sind die frühesten Eintrittstermine im kühleren Norden, die spätesten im wärmeren Süden des Landes Hessen festzustellen.

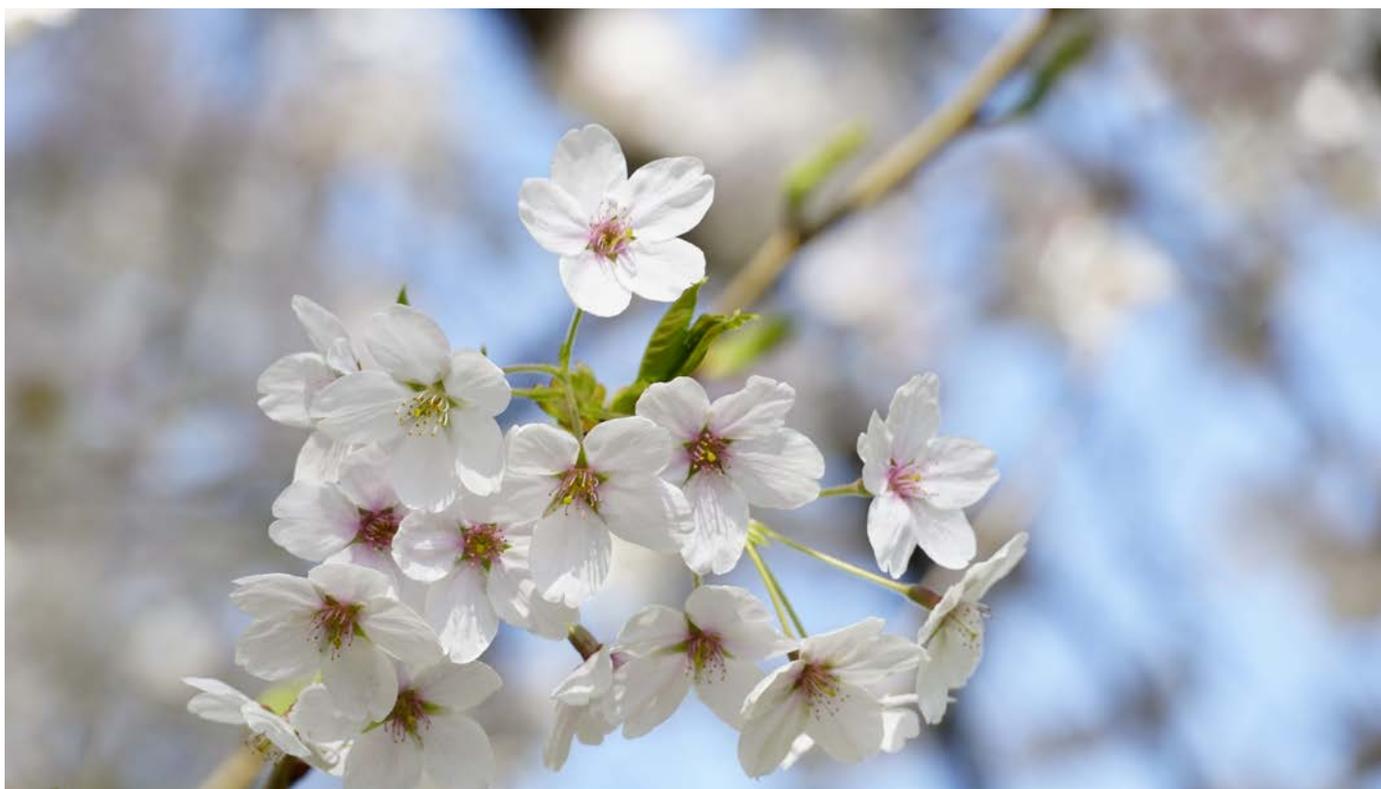
Vergleichbar mit den europaweit beobachtbaren Veränderungen des Eintrittstermins von phänologischen Entwicklungsphasen haben sich diese Termine mit dem fortschreitenden Klimawandel auch in Hessen geändert. In der Abbildung sind die mittleren Starttermine und die mittlere Dauer der 10 phänologischen Jahreszeiten im Vergleich zwischen der Klimareferenzperiode 1961-1990 und der nachfolgenden dreißigjährigen Referenzperiode 1991 bis 2020 dargestellt.

Die deutlichsten Unterschiede sind als Verfrüfung der Eintrittstermine von Vorfrühling bis zum Vollherbst zu erkennen. Je nach phänologischer Jahreszeit beträgt die Verfrüfung zwischen einer und mehr als zwei Wochen. Beim Beginn des Spätherbstes und des Winters zeigen sich demgegenüber kaum Veränderungen, so dass für die Zeit des phänologischen Winters eine Verkürzung um 17 Tage auf nur noch 100 Tage festzustellen ist. Diese Verfrüfung der Entwicklung ist maßgeblich auf das erhöhte mittlere Temperaturniveau zurückzuführen. Die geringen Veränderungen zum Ende der jährlichen pflanzlichen Entwicklungsprozesse signalisieren, dass dann der Einfluss einer meteorologischen Steuerung der Entwicklungsprozesse in den Hintergrund tritt und andere abiotische Faktoren (u. a. Tageslänge) wirksamer sind.

Der Vorfrühling wird knapp eine Woche länger, zeigt aber dadurch ein höheres Risiko für Frost oder zumindest Frost in Bodennähe. Eine stärkere Frostgefährdung muss durch die Verfrüfung der Entwicklung bis in den Vollfrühling hinein befürchtet werden und kann insbesondere bei Obst oder temperatursensiblen Dauerkulturen in Einzeljahren zu kritischen Situationen führen. Zwischen Erstfrühling und Hochsommer ändert sich die Länge der phänologischen Jahreszeiten wenig, d. h. alle Phasen verlagern sich relativ gleichmäßig nach vorn. Diese Entwicklungsphasen sind hauptsächlich temperaturgesteuert und zeigen im Mittel kaum Abhängigkeiten von Bodenwasserhaushaltsgrößen, weil in

der Zeit im Mittel ausreichend Bodenwasser für die Pflanzenentwicklung zur Verfügung steht. Ein Signal für eine trockenheitsbedingte Beschleunigung der Reifeprozesse ist in der deutlichen Verkürzung des Spätsommers erkennbar. Die Verlängerung von Früh- und Vollherbst kann durch die Kombination aus erhöhtem Temperaturniveau und allmählich wieder ansteigenden Bodenwassergehalten erklärt werden.

Die sich in den phänologischen Jahreszeiten am Beispiel der wildwachsenden Vegetation sowie von Forst- und Obstgehölzen zeigenden Veränderungen können auch bei Entwicklungsphasen landwirtschaftlicher Kulturpflanzenarten nachvollzogen werden, wobei hier insbesondere bei Aussaat- und Ernteterminen direkte menschliche Eingriffe bemerkbar sind. Die Wirkung der natürlichen Steuerung der Phaseneintrittstermine und Phasenlänge zeigen sich bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzenarten insbesondere vom Beginn des Längenwachstums bis zum Eintritt der Reifephase, wobei auch hier durch Nährstoffmanagement und Pflanzenschutz menschlicher Einfluss auf die Entwicklung genommen werden kann. Andererseits zeigt das Jahr 2021 beispielhaft, wie das Erreichen meteorologisch determinierter Kippunkte (hier der gebietsweise Übergang zur Notreife im Getreide durch Hitze Mitte Juni) Entwicklungsprozesse irreversibel beschleunigen oder sogar abbrechen kann und damit die Ertragsentwicklung wirksam beeinflusst.



Extremereignisse

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



Extrem = selten

Extremereignisse sind sehr selten auftretende Ereignisse. Sie sind gekennzeichnet durch stark vom üblichen Zustand abweichende Verhältnisse. Es gab sie in Vergangenheit und Gegenwart, und es wird sie auch in Zukunft geben. Extreme Beispiele aus der entfernten Vergangenheit im deutschsprachigen Raum sind zum Beispiel:

- Das katastrophale Magdalenen-Hochwasser im Juli 1342, das für bis heute unerreichte Wasserstände an vielen deutschen und mitteleuropäischen Flüssen sorgte
- Das extrem trocken-heiße Jahr 1540, das Felder und Bäume vertrocknen ließ, aber auch einen Jahrtausendwein ermöglichte
- Lange Perioden mit sehr kalten Wintern in Europa, wie im Zeitraum des sog. Maunder-Minimums in den letzten Jahrzehnten des 17. Jahrhunderts
- Extrem kalte Einzelwinter wie in den Jahren 1708/09, 1739/40 und 1829/30, als West- und Mitteleuropa in Eis und Schnee erstarrten
- Frost und Schneefälle, die extrem früh oder spät im Jahr auftraten
- „Das Jahr ohne Sommer“ 1816 nach dem Ausbruch des Vulkans Tambora
- Herbst- und Winterstürme mit großen Sturmschäden (und Sturmfluten an Nord- und Ostsee)
- Extreme Gewitterereignisse und schwere Tornados vergangener Jahrhunderte

Auch in der nahen Vergangenheit konnten wir Extremereignisse beobachten. Das waren beispielsweise die extremen Hochwasser der Jahre 2002, 2013 und 2021, ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, die Hitzeereignisse der Jahre 2003, 2018, 2019 und 2022 sowie die Stürme Lothar (1999), Kyrill (2007) und Friederike (2018).

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

Dennoch belegt die so genannte Attributionsforschung in den letzten Jahren immer besser, dass bestimmte Wetter- und Witterungsextreme häufiger werden, und dass dies direkt mit dem vom Menschen verursachten Klimawandel zu tun hat. Die Attributionsforschung vergleicht in sehr vielen Klimamodellsimulationen die Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Extremereignisse unter vorindustriellen Klimabedingungen und unter heutigen oder möglichen zukünftigen Bedingungen. Daraus kann abgeleitet werden, ob ein Ereignis (wie z. B. die Flutkatastrophe 2021 an Ahr und Erft) durch den heute schon eingetretenen Klimawandel wahrscheinlicher geworden ist, als es früher gewesen wäre. Für die Flutkatastrophe im Sommer 2021 ergab die Untersuchung, dass sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Niederschlagsereignis auftritt, um einen Faktor zwischen 1,2 und 9 erhöht hat, im Vergleich zu einem um 1,2 °C kühleren Klima (<https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>).

Dies betraf in Hessen in der jüngeren Vergangenheit vor allem Hitze-, Dürre- und Starkregenereignisse, denen daher in der Attributionsforschung besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Sommerhitze

Die mittlere Lufttemperatur hat in den letzten Jahrzehnten in allen Jahreszeiten zugenommen. Damit zusammenhängend traten vor allem in den Jahren seit dem Sommer 2003 deutlich mehr Tage mit sehr hohen Temperaturen und intensivere Hitzeperioden auf. Ein extremes Beispiel dafür sind die im Sommer 2019 an vielen Stationen – auch in Hessen – gemessenen Temperaturen von über 40 °C, die in der Fläche in den vergangenen Jahrhunderten in Deutschland noch nicht aufgetreten waren.

Um extreme Temperaturereignisse wie z. B. die Hitzesommer der vergangenen Jahre klimatologisch

sinnvoll bewerten zu können, müssen solche Ereignisse unter Nutzung möglichst langer Zeitreihen statistisch eingeordnet werden. Hierfür werden klimatologische Kennwerte herangezogen, mit denen Andauer, Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen beschrieben werden können.

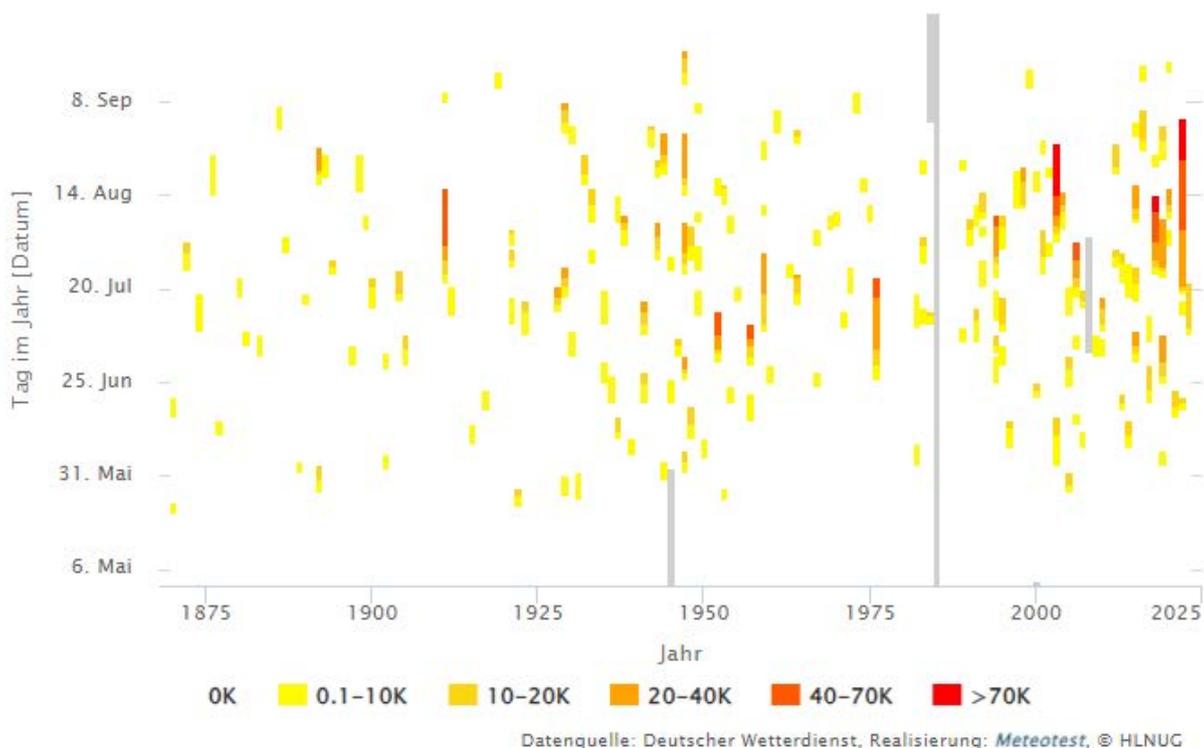
Für Hessen wurden die Hitzeperioden nach der Definition von Kysely analysiert. In dieser für Mitteleuropa gebräuchlichen Herangehensweise wird eine Hitzewelle festgestellt, sobald an mindestens drei Tagen in Folge die Maximaltemperatur 30 °C überschreitet. Sie hält so lange an, wie die mittlere Maximaltemperatur über die gesamte Periode über 30 °C bleibt und an keinem Tag eine Maximaltemperatur von 25 °C unterschritten wird.

Extrem starke Hitzewellen traten im 20. Jahrhundert vor allem in den Jahren 1911, 1947 und 1976 auf. Die Häufigkeit und auch Intensität solcher Ereignisse nahm jedoch vor allem seit dem „Jahrhundertsommer“ 2003 deutlich zu, so dass viele der vergangenen Jahre durch sehr ausgeprägte sommerliche Hitzewellen geprägt waren. Diese gipfelten (vorläufig) in dem außergewöhnlich langanhaltenden Sommer 2018 mit sommerlicher Wärme und Hitze von April bis Oktober, den extrem intensiven Hitzewellen des Jahres 2019 sowie der rekordlangen Hitzewelle des Sommers 2022. Im Jahr 2018 wurden an fast allen hessischen Wetterstationen die meisten Sommertage (Temperaturmaximum über 25 °C) seit Aufzeichnungsbeginn gemessen. Im Jahr 2019 hingegen wurde an den meisten Stationen die bisher höchste gemessene Temperatur (zum Teil deutlich) übertroffen.

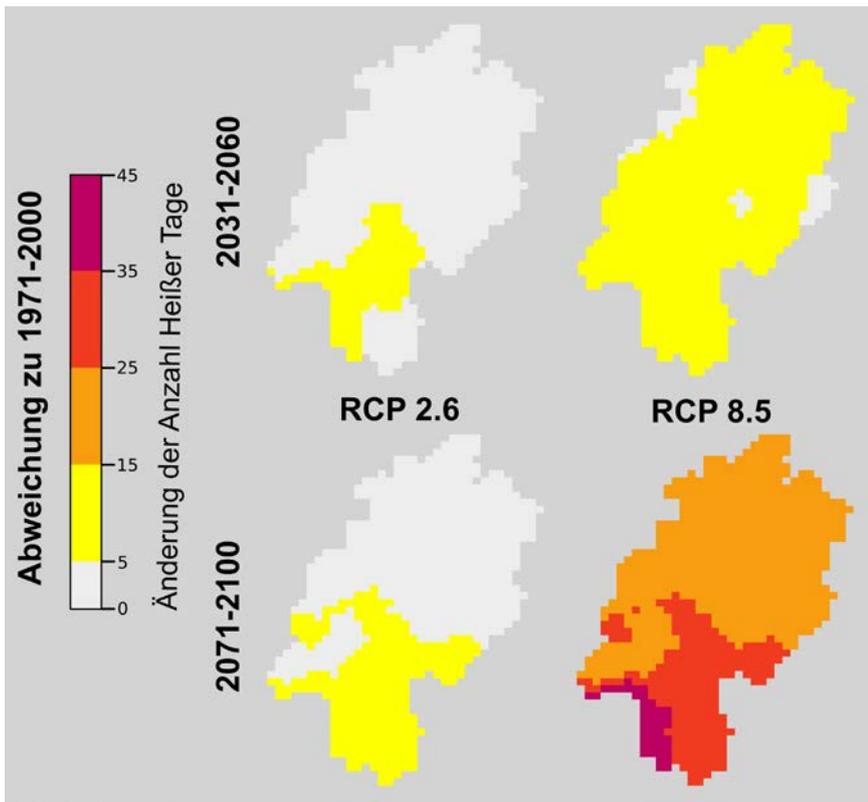
Aufgrund der festgestellten und weiter fortschreitenden Erwärmung ist es sehr wahrscheinlich, dass hohe Temperaturen und höhere Temperaturextreme künftig vermehrt auftreten werden. Seit dem Jahr 2003 sind sogenannte blockierende Wetterlagen in Verbindung mit stabilen Hochdruckgebieten über Mitteleuropa vermehrt aufgetreten. Während solcher Wetterlagen werden atlantische Tiefausläufer weit um ein mächtiges Hochdruckgebiet geleitet, welches im Sommer durch wolkenarmes, sonniges und trockenes Wetter charakterisiert ist und den Boden großflächig austrocknen lässt. Trockene Böden vermindern die Wolkenbildung, die Wetterlage stabilisiert sich und die Luft wird immer heißer und trockener. Diese „positiven Rückkopplungen“ ermöglichen intensive, häufig langanhaltende Hitzeperioden.

Für eine weitere Verstärkung zukünftiger sommerlicher Hitzebelastung geben die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen klare Indizien. Eine belastbare Abschätzung, welche Spitzentemperaturen zukünftig auftreten können, gibt es aber bisher noch nicht. Ein Indikator für Hitzebelastung sind die Heißen Tage (Tage mit einer Maximumtemperatur von mindestens 30 °C). In beiden zukünftigen Planungshorizonten ist mit mehr Heißen

Tagen zu rechnen. Im Kein Klimaschutz-Szenario bis 2071-2100 nimmt die Hitzebelastung jedoch wesentlich stärker zu. Vor allem im südlichen Hessen und am Rhein, die schon heute die wärmsten Regionen Hessens sind, kann sich die Anzahl der Heißen Tage um über einen Monat erhöhen.



▲ Hitzeperioden sind in Hessen (wie hier sichtbar am Beispiel der Station Frankfurt/Main Innenstadt seit dem Jahr 1870) vor allem seit den 1990er Jahren an allen Klimastationen häufiger, länger andauernd und auch intensiver geworden. Die Abbildung zeigt die Dauer, zeitliche Lage innerhalb eines Jahres sowie die Intensität (als farbliche Abstufung der Temperatursumme von gelb bis rot; graue Linien stellen fehlende Werte dar); Angaben in Kelvin (K, 1 K entspricht 1 °C). Je roter die Farbe im Diagramm, desto intensiver war die Hitzewelle. In Frankfurt/Main trat die mit Abstand längste und intensivste Hitzewelle im Jahr 2022 auf. Quelle: „Klimaportal Hessen“

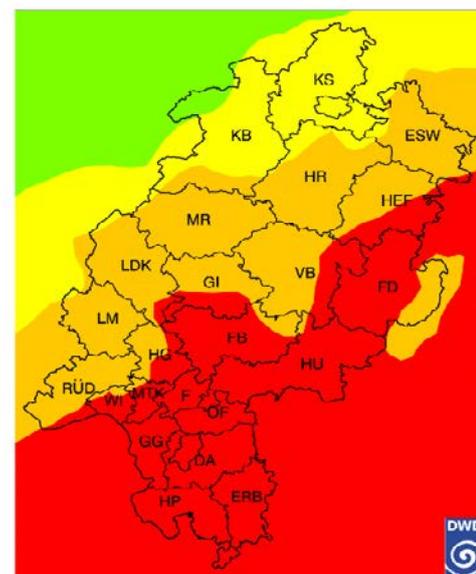


◀ Projizierte Änderung der Anzahl der Heißen Tage in Hessen. Abgebildet ist der Ensemble-Median für den kurzfristigen (oben) und langfristigen (unten) Planungshorizont, sowie für das Klimaschutz-Szenario (RCP 2.6, links) und das Kein Klimaschutz-Szenario (RCP 8.5, rechts).

Die Zunahme von Anzahl und Intensität von Hitzewellen stellt eine gesundheitliche Belastung der Bevölkerung dar. Neben hitzebedingter Sterblichkeit treten während Hitzewellen auch Erkrankungen auf, die durch Hitze verursacht oder verstärkt werden. Risikogruppen sind vor allem ältere Menschen, chronisch Kranke, Schwangere, Säuglinge und kleine Kinder. Durch angepasstes Verhalten können hitzebedingte Beschwerden vermieden bzw. verringert werden. Daher stellt der DWD Vorhersagen zum thermischen Gefahrenindex auf Landkreisebene bereit (<http://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrenindizesthermisch/gefahrenindizesthermisch>). Dieser beruht auf der Bewertung der meteorologischen Umgebungsbedingungen (mittels der „Gefühlten Temperatur“) und weist auf das gesundheitliche Gefährdungspotenzial hin, das aufgrund der im Freien auftretenden thermischen Bedingungen erwartet wird.

Neben dem thermischen Gefahrenindex veröffentlicht der DWD spezielle Hitzewarnungen auf Landkreisebene (www.dwd.de/warnungen). Die Hitzewarnungen unterscheiden sich vom Gefahrenindex insofern, dass sie nur dann herausgegeben werden, wenn eine starke Wärmebelastung für mindestens zwei Tage in Folge vorhergesagt wird und eine ausreichende nächtliche Auskühlung der Wohnräume nicht mehr gewährleistet ist. Dabei wird in zwei Stufen vor starker und extremer Wärmebelastung in Abhängigkeit von der zu erwartenden „Gefühlten Temperatur“ gewarnt.

Vorhersage für Hessen, 19.06.22 15 Uhr MEZ



▲ Die Abbildung zeigt ein Beispiel für eine Vorhersage des Thermischen Gefahrenindex für Hessen

Winterkälte



Kalte Winter und winterliche Kälteperioden traten in den letzten Jahrzehnten immer seltener auf. Meist waren die Winter eher mild. Die letzten nennenswerten kalten Temperaturen oder Kältewellen wurden in den Jahren 2009 bis 2012 beobachtet, blieben jedoch im Vergleich zu den in vergangenen Jahrzehnten (bis in die 1980er Jahre) und Jahrhunderten beobachteten Kälteextremen sehr moderat. Der Februar 2021 brachte in Nordhessen einige sehr kalte Nächte, die an der Station Sontra (Aufzeichnungen seit 1961) mit einem Tiefstwert von $-25,6\text{ °C}$ sogar einen neuen Stationsrekord ergaben.

Im 20. Jahrhundert kamen sehr kalte Winter vor allem im Zeitraum von 1929 bis 1963 vor, hier fror (zum letzten Mal) auch der Rhein nochmals an einigen Stellen zu. Dies war in den häufiger kalten Wintern der Jahrhunderte zuvor noch regelmäßiger beobachtet worden. Neben der Erwärmung durch den Klimawandel tragen hierzu aber auch warme Abwässer aus Kraftwerken und Industrieanlagen bei. Seit dem extrem kalten Winter 1962/63, – also seit mehr als 60 Jahren – wurden beispielsweise im Rhein-Main-Gebiet keine sehr kalten Winter mit einem Mittelwert von deutlich unter 0 °C mehr beobachtet. In Frankfurt/Main lagen die mittleren Wintertemperaturen seit dem Jahr 1986 immer im positiven Bereich. Das Potenzial für Ausreißer liegt seitdem eher auf der warmen Seite.

Es soll kurz auf zwei außergewöhnliche Extreme des 20. Jahrhunderts eingegangen werden. Der Februar 1956 brachte nach einem zuvor milden Winter über Wochen hinweg extrem eisige Temperaturen. Die den ganzen Monat anhaltende Kältewelle brachte selbst in der Innenstadt von Frankfurt am Main 21 Tage mit Tiefsttemperaturen von unter -10 °C , davon 15 am Stück. Am 1. Februar wurden $-19,3\text{ °C}$ gemessen. Um den Monatsanfang und um die Monatsmitte sanken die Temperaturen vielerorts in Hessen (selbst im Rheintal) unter -20 °C und es wurden örtlich neue Kälterekorde aufgestellt. An dieser Stelle muss jedoch auch erwähnt werden, dass Temperaturen unter -20 °C in der „Kleinen Eiszeit“ bis Ende des 19. Jahrhundert auch im Rhein-Main Gebiet recht häufig vorkamen. Temperaturen von z. T. deutlich unter -25 °C traten in der (damals auch kleineren) Stadt Frankfurt zeitlich bereits von Ende Dezember ($-25,5\text{ °C}$ am 30.12.1783) bis nach Mitte Februar ($-27,5\text{ °C}$ am 18.2.1827) auf.

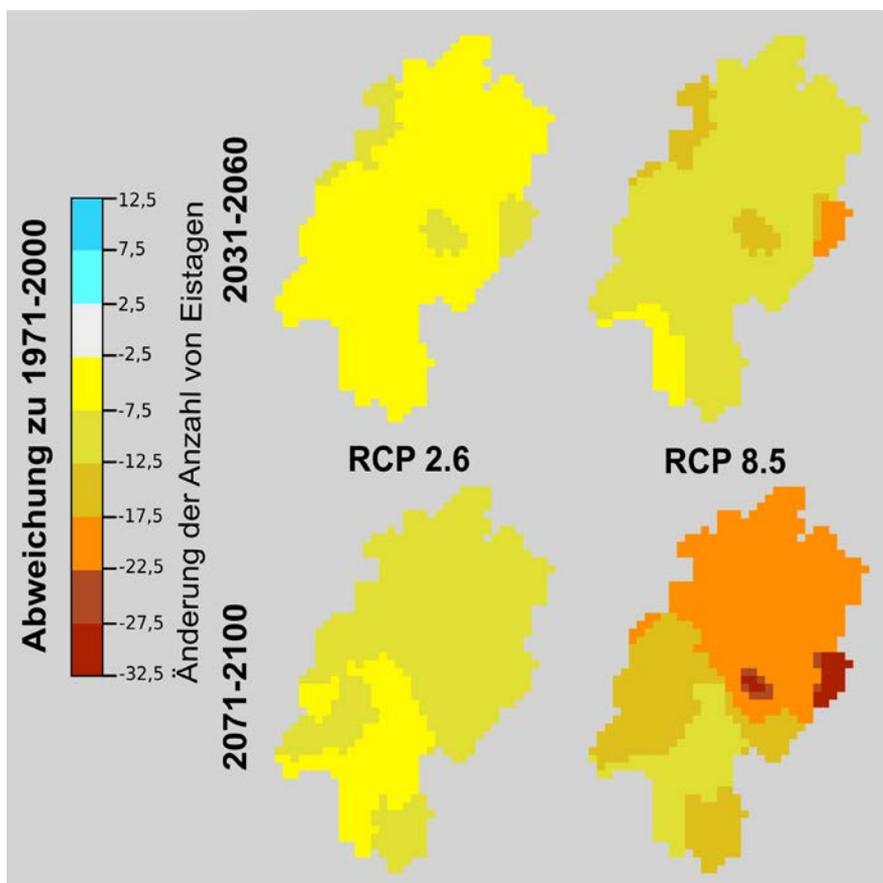
Der Winter 1962/63 war der kälteste seit Beginn der flächendeckenden Aufzeichnungen in Hessen im Jahr 1881. Kontinentale Luftmassen brachten beständig neue Kälte aus Osten heran, so dass der Winter ca. 6 °C kälter als im langjährigen Mittel (1961-1990) war. Die Temperaturen blieben auch in den Niederungen zumeist im Frostbereich, in der Frankfurter Innenstadt wurden 57 Eistage mit Tageshöchsttemperaturen von unter 0 °C registriert

und fast jeder Tag brachte Frost. In Fulda wurden am 17. Januar -27,5 °C gemessen. Insgesamt zeichnete sich der Winter jedoch eher durch seine beständige Kälte als durch einzelne extreme Kältewellen aus.

Bleiben Kälteextreme nun aus? Sie sind auf jeden Fall deutlich unwahrscheinlicher geworden. Einzelne Kältewellen brachten jedoch auch in den letzten Jahren an einigen Stellen in Europa, Deutschland und Hessen punktuell extreme Kälte. Die letzten (im Mittel) kälteren Winter liegen allerdings inzwischen eine Dekade zurück. Entscheidend für die weitere Entwicklung ist vor allem der Zustand und Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation. Diese wird vor allem von der Stärke der Druckzentren über dem Atlantik – Azorenhoch und Islandtief – bestimmt, dazu kommt als weiterer Gegenspieler das Hochdruckgebiet über Sibirien/Russland. Je nach Stärke und Position dieser Druckzentren gelangt Hessen in den Einflussbereich eher warmer oder kalter Luftmassen. All diese haben sich aufgrund des Klimawandels und seines generell höheren Temperaturniveaus

erwärmt, dabei sind die Temperaturunterschiede zwischen Süd- und Nordeuropa im Winter jedoch so groß, dass selbst geringere Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung Auswirkungen auf das Wetter in Hessen haben. Diese Veränderungen werden wiederum auch durch eine zunehmend eisfreie Arktis moduliert, die den erwähnten Temperaturgradienten abschwächt. Welche Auswirkungen dies alles auf Hessen hat, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Die Klimaprojektionen zeigen für die Zukunft unter Annahme beider Szenarien sowohl im kurzfristigen als auch im langfristigen Planungshorizont eine deutliche (weitere) Abnahme der Anzahl von Eistagen (Tage mit einer Maximumtemperatur unter 0°C). Diese Abnahme ist in den Mittelgebirgen, in denen generell mehr Eistage auftreten als im Tiefland, am stärksten und im Kein Klimaschutz-Szenario deutlich stärker als im Klimaschutzszenario. Im Kein Klimaschutz-Szenario ist zum Ende des Jahrhunderts damit zu rechnen, dass auch in den Hochlagen der Mittelgebirge keine längeren Frostperioden mehr auftreten.



◀ Projizierte Änderung der Anzahl der Eistage in Hessen. Abgebildet ist der Ensemble-Median für den kurzfristigen (oben) und langfristigen (unten) Planungshorizont, sowie für das Klimaschutz-Szenario (RCP 2.6, links) und das Kein Klimaschutz-Szenario (RCP 8.5, rechts).



Niederschlag

Niederschlagsextreme sind auf unterschiedlichen Zeitskalen relevant und führen zu einer Vielzahl von Herausforderungen. Kurze, heftige Starkregenfälle können Straßen oder Feldfurchen innerhalb kürzester Zeit (Minuten bis Stunden) in rauschende Wasserströme verwandeln. Sie führen zu lokalen, häufig sehr plötzlich auftretenden Überflutungen, dazu kommt in Städten und Dörfern eine Überlastung der Kanalisation. Im ländlichen Raum sorgen Starkregenfälle zusätzlich für erosionsbedingte Schäden durch Abtrag fruchtbaren Bodens auf den Feldern und Eintrag desselben in Siedlungsräume. Medial viel beachtete Beispiele waren die Starkregenfälle von Münster am 29. Juli 2014, die Sturzfluten von Braunsbach am 29. Mai und von Simbach am 1. Juni 2016 sowie die Überflutungen am 29. Juni 2017 in Berlin, die zu überall großen Schäden führten.

Langanhaltende Regenfälle führen zwar ebenfalls zu lokalen Überschwemmungen, die größten Schäden treten hier hingegen vor allem im Zusammenhang mit Flusshochwassern auf. Genannt werden sollen die großen Winterhochwasser des Rheins im Dezember 1993 und im Januar 1995 (ausgelöst durch Dauerregen und Schneeschmelze in Süddeutschland/Alpenraum) sowie von Elbe und Donau im August 2002 und im Juni 2013. Mitte Juli 2021 verursachten langanhaltende Regenfälle, kombiniert mit eingelagerten Starkniederschlägen, katastrophale Überschwemmungen mit mindestens 186 Todesfällen in Teilen Nordrhein-Westfalens und von Rheinland-Pfalz. Neben dem Wasser als direkte Ursache für Schäden und menschliches Leid waren in allen Fällen zusätzlich die mitgeführten Sedimente schadensträchtig, die in Form von Schlamm häufig zu irreparablen Verschmutzungen führen (dies trifft auch auf Starkregenereignisse zu). Ist dieser erst einmal hart geworden, und dies passiert nach nur wenigen Stunden, ist seine Entfernung noch ungleich mühsamer. Hinzu kommen gerade bei länger andauernden Ereignissen Gefahren durch Hangrutschungen. Damit große Niederschlagsmengen abregnen, müssen mehrere meteorologische Ursachen aufeinandertreffen. Lokale Hebungsprozesse führen zu einem Ausfallen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit. Dabei gilt: je wärmer die Luftmasse ist, desto mehr Wasser

kann sie aufnehmen. Die sog. Clausius-Clapeyron-Beziehung gibt an, dass die Luft je 1 Grad Temperaturzunahme ca. 7 Prozent mehr Wasser aufnehmen kann. Dies ist der Grund dafür, dass extreme Niederschläge (pro Zeiteinheit) im Sommer deutlich stärker als im Winter ausfallen können. In Hessen treten extreme Niederschläge daher in den meisten Gebieten zumeist zwischen Mai und August auf. Und dies ist auch der Grund dafür, dass mit zunehmendem Klimawandel die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen zunehmen wird.

Weiterhin muss die Großwetterlage eine stetige Zufuhr weiterer warmer und feuchter Luftmassen gewährleisten. Dabei bewegen sich die Luftmassen über Stunden und im Extremfall Tage nur sehr langsam oder überhaupt nicht, so dass der gesamte Niederschlag über einem Gebiet niedergeht, anstatt weiterzuziehen. In Hessen werden extrem ergiebige Niederschläge meist durch Tiefdrucksysteme verursacht, die sich nur sehr langsam verlagern und nicht abschwächen. Dadurch entstehen quasi-stationäre Luftmassengrenzen, an denen immer wieder intensive Niederschläge fallen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die (in diesem Fall immer wieder gleiche) Abfolge von Ereignissen. So ist es möglich, dass sich wie im Frühsommer der Jahre 2016 und 2018 eine über viele Tage stabile Strömungssituation einstellt, die als regionaler Auslöser für eine Abfolge extremer Niederschläge wirkt.

Niederschlag (mm)	Datum	Messstation
168,0	18.07.1994	Wächtersbach
162,3	03.11.1940	Lautertal-Eichelhain
161,0	17.09.2006	Haiger
156,0	15.07.1965	Diemelstadt-Rhoden
155,5	18.07.1994	Sinntal-Weiperz
151,2	17.09.2006	Angelburg-Frechenhausen
150,0	20.06.1992	Bad Soden-Salmünster
140,4	07.08.2018	Kirchhain
137,3	17.09.2006	Eschenburg-Hirzenhain
136,2	18.07.1994	Steinau-Seidenroth

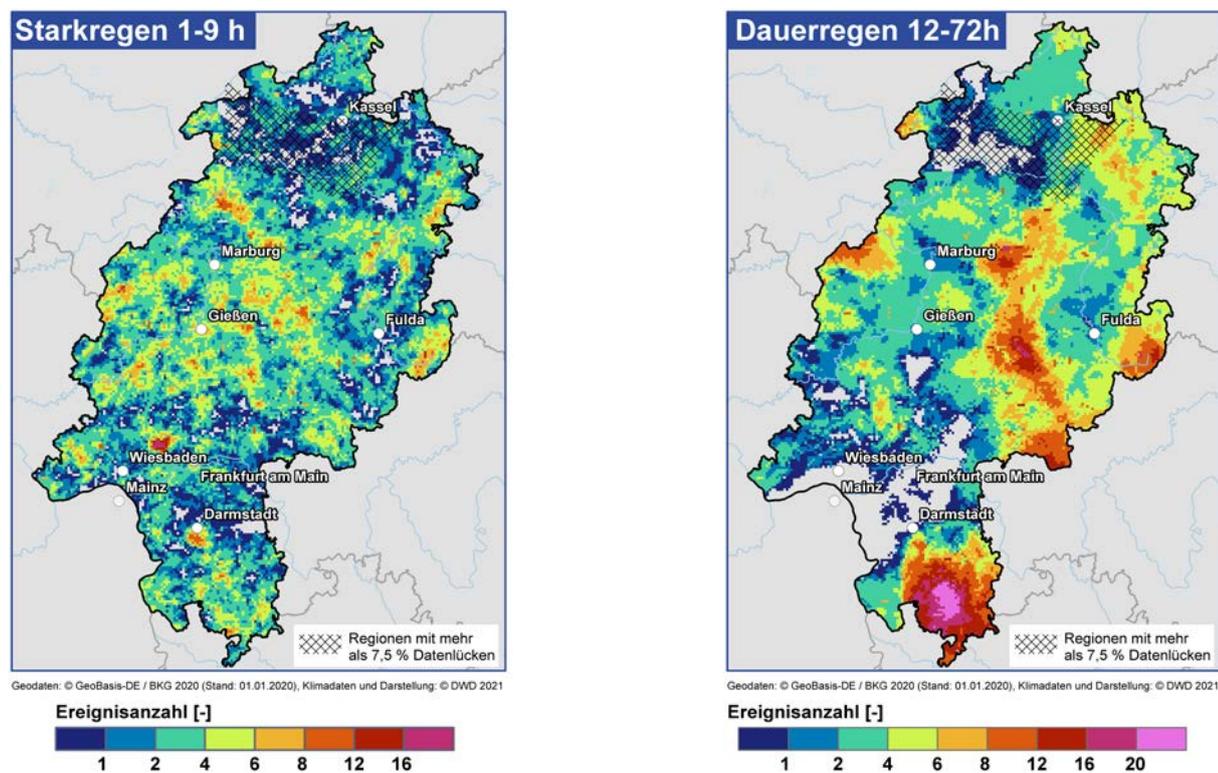
▲ Tabelle: Top 10 der maximalen Tagesniederschlagssummen an hessischen Stationen (DWD und HLNUG-Landesmessnetz)

Für Deutschland liegen seit Mitte des Jahres 2000 flächendeckend radarbasierte Niederschlagsdaten vor (basierend auf 17 C-Band Wetterradarsystemen des DWD). Aufgrund der geringen Länge der Zeitreihen sind die statistischen Analysen derzeit noch mit Unsicherheiten behaftet und durch die kurzfristige Variabilität des Niederschlagsgeschehens beeinflusst. Insbesondere zur Untersuchung lokaler, häufig nur kurzzeitig andauernder Starkniederschlagsereignisse ist die Radarmessung jedoch von größtem Wert, da die stärksten Niederschlagsintensitäten (oder auch das gesamte Ereignis) von den Wetter- und Niederschlagsstationen häufig nicht erfasst werden. Radardaten ermöglichen darüber hinaus die Analyse charakteristischer Eigenschaften wie z. B. Größe und Andauer eines Extremereignisses. Der Deutsche Wetterdienst publizierte hierzu einen Ereigniskatalog, der alle Stark- und Dauerregenereignisse der letzten 20 Jahre auflistet und mit umfangreichen Attributen verknüpft (Lengfeld et al. 2021).

Die Definition eines Ereignisses erfolgt über ein zweistufiges Verfahren. Im ersten Schritt werden für Dauerstufen (Zeitintervalle, über welche die Niederschlagsmengen summiert werden) zwischen einer und 72 Stunden alle Rasterpixel, deren Niederschlagssummen einen definierten Schwellenwert überschreiten und die zusätzlich eine zusammenhängende Fläche einer Mindestgröße bilden, zu sogenannten Objekten zusammengefasst. Als Schwellenwert dient die Niederschlagsintensität der Warnstufe 3 vor Unwetter des DWD. Ein Niederschlagsereignis kann in verschiedenen Dauerstufen extreme Werte ausbilden, also durch mehrere Objekte definiert sein. Im zweiten Schritt werden daher zeitlich und räumlich abhängige Objekte verglichen, um das extremste Objekt auszuwählen. Als Maß gilt hierbei eine Kombination aus der mittleren Niederschlagsintensität (ausgedrückt durch die statistische Wiederkehrzeit) und der Fläche des Objekts ($E_{T,A}$). Das Objekt mit der höchsten Extremität repräsentiert schließlich das Ereignis.

Ereignisanzahl in Hessen, 2001 - 2020 (nach CatRaRE W3 $E_{T,A}$ Katalog)

(auf Basis der stündlichen Niederschlagszeitreihen der RADKLIM-Version 2017.002)



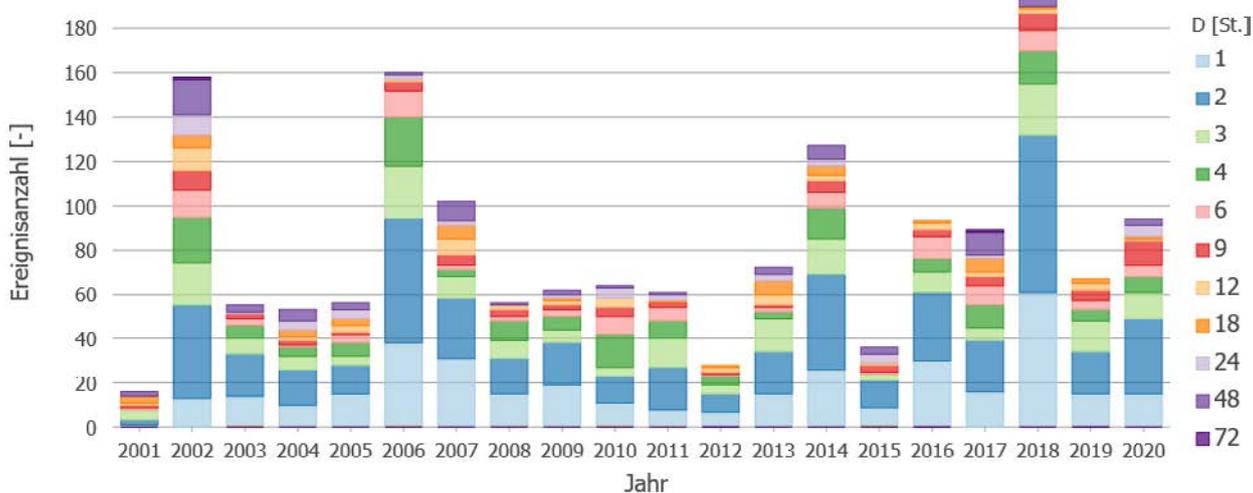
▲ Die Abbildung zeigt die Anzahl der Niederschlagsereignisse in Hessen für Stark- und Dauerregen für den Zeitraum 2001-2020. Gebiete ohne Farbgebung (grau) wiesen keine Ereignisse auf, während die Ergebnisse für die schraffierten Gebiete im Norden Hessens aufgrund signifikanter Ausfallzeiten des Niederschlagsradars nur eingeschränkt belastbar sind. Hier können die realen Werte auch höher sein als in der Karte dargestellt. Während Dauerregenereignisse vor allem in den höher gelegenen Regionen Hessens auftraten, ist die Verteilung der kürzeren Starkregenfälle an keine bestimmte Region gebunden.

Auftreten von Starkniederschlagsereignissen seit 2001

Jährliche Statistiken des Zeitraums 2001 bis 2020 zeigen starke Schwankungen in der Anzahl sowie der Flächenausdehnung extremer Niederschlagsereignisse in Hessen (bezogen auf alle Ereignisse mit mindestens einem Pixel innerhalb von Hessen). Kurze Ereignisse (blaue Farben) kommen am häufigsten vor, während die Ausdehnung bei langanhaltenden

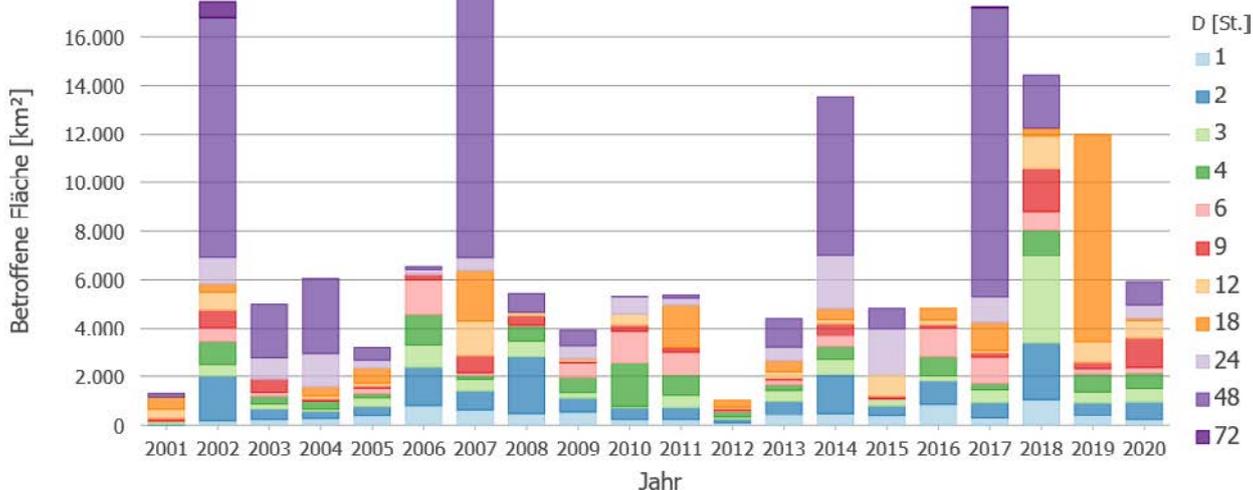
Starkniederschlagsereignissen (violette Farben) am größten ist. Das eigentlich sehr trockene Jahr 2018 weist die höchste Anzahl an Ereignissen auf, insbesondere im Bereich kurzer Ereignisse von ein bis zwei Stunden. Die Jahre 2002, 2006 und 2014 waren ebenfalls durch eine hohe Ereignisanzahl geprägt. Die betroffene Fläche war insbesondere in den Jahren 2002, 2007 und 2017 in Hessen hoch.

Jährliche Ereignisanzahl in Hessen, in Abhängigkeit der Dauerstufe (Katalog W3 ETA)



▲ Die jährliche Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Hessen - dargestellt für verschiedene Dauerstufen (in Stunden) - unterliegt deutlichen jährlichen Schwankungen.

Jährliche Ereignisfläche in Hessen, in Abhängigkeit der Dauerstufe (Katalog W3 ETA)

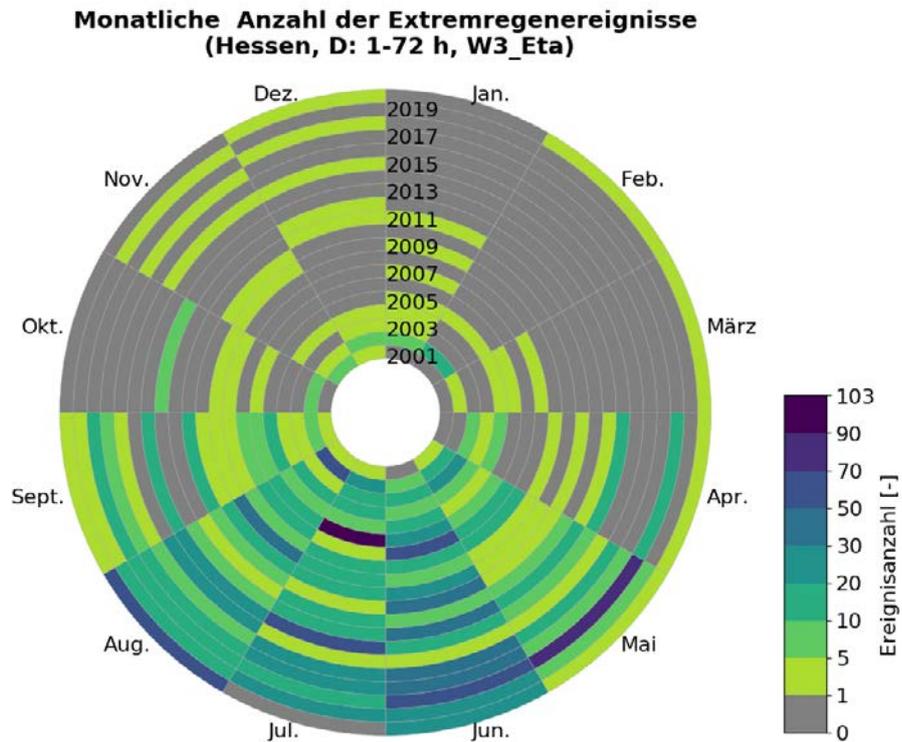


▲ Die jährliche Fläche extremer Niederschlagsereignisse in Hessen - dargestellt für verschiedene Dauerstufen (in Stunden) - unterliegt ebenfalls ausgeprägten jährlichen Schwankungen.

Jahresgang der Extremereignisse

Der Jahresgang, in Form der monatlichen Anzahl aller Extremereignisse in Hessen, zeigt eine deutliche Häufung in den Sommermonaten (Mai bis August/September), wobei einzelne (wenige) Ereignisse aber ganzjährig zu beobachten sind. Besonders hervorzuheben

sind der Juli 2006 sowie die Monate Mai und Juni des Jahres 2018, in denen nicht nur in Hessen, sondern in ganz Deutschland viele konvektive Ereignisse aufgetreten sind.

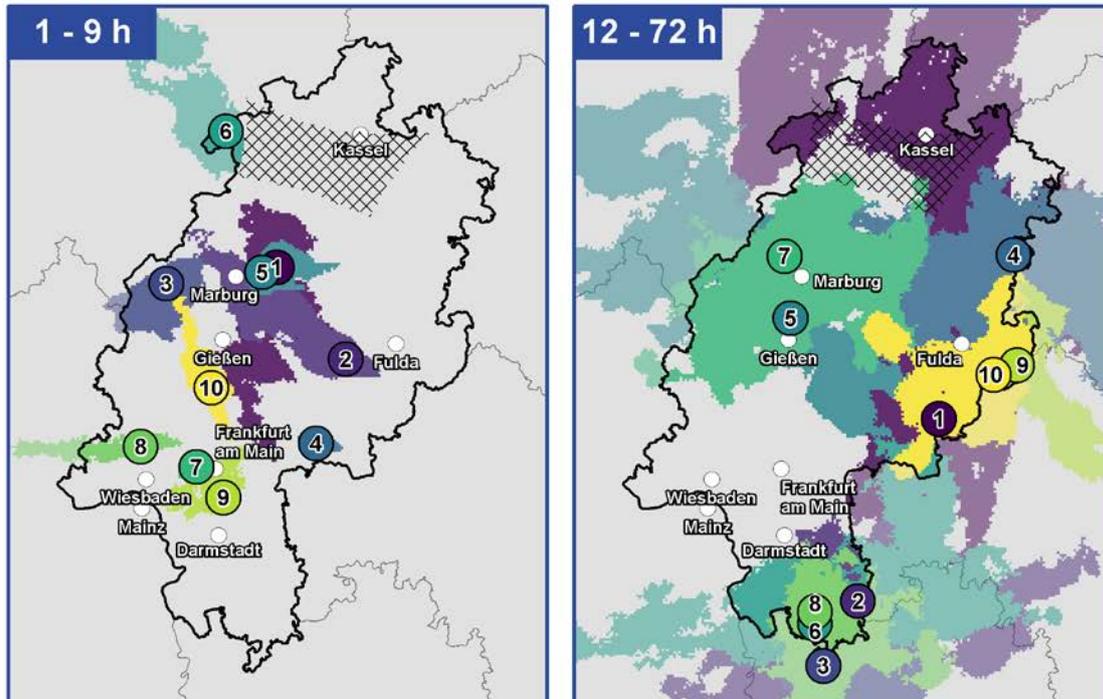


▲ Die Darstellung der Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in Hessen zeigt eine deutliche Häufung in den warmen Monaten Mai bis August.

Die Stärke und letztendlich Schadenswirkung eines extremen Niederschlagsereignisses hängt sowohl von der Niederschlagsmenge und -intensität als auch von der betroffenen Fläche ab. Die Extremität als kombinierte Maßzahl aus der mittleren Niederschlagsintensität (ausgedrückt über die Wiederkehrzeit) und der Fläche des Ereignisses erlaubt die Erstellung einer objektiven Rangfolge der in

Hessen innerhalb der letzten 20 Jahre aufgetretenen Niederschlagsereignisse. Zugrunde gelegt wurden hier alle Ereignisse, deren Niederschlagsmaximum in Hessen aufgetreten ist. Während die stärksten Dauerregenereignisse im Süden, aber auch im Norden und Osten des Bundeslandes aufgetreten sind, finden sich die TOP 10 der Starkregenereignisse kürzerer Andauern vor allem in der Mitte Hessens.

TOP 10 Ereignisse 2001 - 2020 (nach Extremität, CatRaRE W3 E_{T,A}Katalog)



Starkregen - Ereignisse (1 - 9 Std.)

Regionen mit mehr als 7,5 % Datenlücken

RANK	Date_START	Duration	Area	Area in HE	Eta	RRmax	RRmean	SRImax	SRImean	LKS_RRmax	GMD_RRmax
1	30.05.2008 16:50	2	2154	2154.0	41.46	97.6	42.38	10	5	Marburg-Biedenkopf	Kirchhain
2	13.05.2018 10:50	9	1527	1527.0	36.52	153.5	58.57	11	5	Vogelsbergkreis	Grebenhain
3	17.09.2006 14:50	6	859	767.3	36	111.3	61.61	10	6	Lahn-Dill-Kreis	Dillenburg
4	25.08.2006 12:50	1	98	98.0	30.92	201.2	78.52	12	9	Main-Kinzig-Kreis	Gelnhausen
5	07.08.2018 14:50	3	475	475.0	29.3	167.8	66.22	12	7	Marburg-Biedenkopf	Kirchhain
6	20.07.2014 21:50	9	1696	190.3	24.64	75.4	43.13	8	4	Waldeck-Frankenberg	Diemelsee
7	10.06.2007 15:50	3	174	174.0	22.54	140.1	65.62	11	7	Main-Taunus-Kreis	Sulzbach (Taunus)
8	22.06.2017 13:50	3	494	293.2	22.19	85.7	43.62	10	6	Rheingau-Taunus-Kreis	Idstein
9	21.06.2007 03:50	9	561	561.0	22.11	87.7	49.72	9	5	Offenbach	Dreieich
10	13.06.2020 17:50	9	527	527.0	22.03	106.2	55.49	10	5	Wetteraukreis	Butzbach

Dauerregen - Ereignisse (12 - 72 Std.)

RANK	Date_START	Duration	Area	Area in HE	Eta	RRmax	RRmean	SRImax	SRImean	LKS_RRmax	GMD_RRmax
1	20.05.2019 12:50	18	22325	9327.5	109.71	106.7	60.21	9	5	Main-Kinzig-Kreis	Steinau an der Straße
2	16.07.2002 03:50	48	12451	1661.1	71.41	147.9	75.45	8	4	Odenwaldkreis	Michelstadt
3	18.03.2002 19:50	72	3884	708.5	65.75	157.3	111.31	8	6	Bergstraße	Neckarsteinach
4	07.07.2014 13:50	48	11620	5711.5	64.06	114.1	72.92	7	4	Hersfeld-Rotenburg	Heringen (Werra)
5	08.08.2007 01:50	48	10706	3992.3	62.04	96.5	69.62	7	4	Gießen	Lollar
6	04.12.2011 07:50	18	8725	1966.1	53.33	95.6	54.89	7	4	Bergstraße	Wald-Michelbach
7	10.08.2017 05:50	48	6134	5641.3	48.16	116.2	70.42	8	4	Marburg-Biedenkopf	Wetter (Hessen)
8	13.09.2017 13:50	24	4643	1066.3	31.94	85	58.27	7	3	Bergstraße	Grasellenbach
9	26.09.2007 23:50	48	1966	519.2	29.16	97.5	68.25	7	4	Fulda	Gersfeld (Rhön)
10	28.05.2007 00:50	48	2940	2266.5	27	97.6	69.72	6	3	Fulda	Gersfeld (Rhön)

FELDERBESCHREIBUNG:

Start Time - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC (TT.MM.JJJJ hh:mm); Duration - Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses; Area - Gesamtfläche [km²] des Ereignisses (nach RADOLAN Projektion); Area in HE - Gesamtfläche in Hessen; Eta - Extremität; RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRImax/SRImean - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0, 12]); LKS_RRmax/GMD_RRmax - Landkreis/Gemeinde des Niederschlagsmaximums.

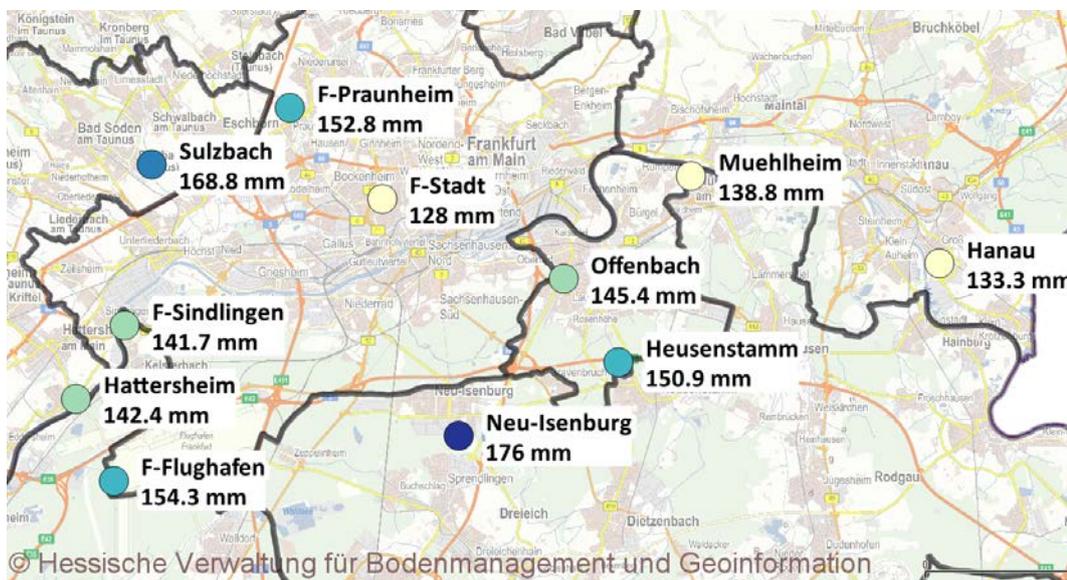
Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (CatRaRE Daten DOI: https://doi.org/10.5676/DWD/CatRaRE_W3_ETA_V2021.01); Geodaten: © GeoBasis-DE/BKG 2020 (Stand: 01.01.2020).

▲ Dargestellt sind die zehn extremsten Stark- und Dauerregenereignisse in Hessen (Lage des Pixels mit maximalem Niederschlagswert) zwischen 2001 und 2020. Das Ranking erfolgte nach der Extremität, einer Kombination aus Niederschlagsintensität und Fläche. Die Position des Zahlenkreises entspricht dem Ort des maximalen Niederschlags.

Dauerregen

Langanhaltende Niederschläge erreichen ihre höchste Intensität typischerweise in bergigen Regionen. Eines der in Hessen intensivsten Dauerregenereignisse der vergangenen Jahrzehnte betraf jedoch direkt das Rhein-Main-Gebiet. Am 9. und 10. August 1981 lag ein quasi-stationäres Niederschlagsband über der Mitte Deutschlands, aus dem es – vielerorts verstärkt durch eingelagerte kräftige Gewitterzellen – langanhaltend und ergiebig regnete. Der meiste Niederschlag fiel dabei in einem Streifen, der sich vom Frankfurter Raum bis ins östliche Thüringen hinein erstreckte. Die seit Aufzeichnungsbeginn höchsten 24-stündigen

Niederschlagsmengen fast aller im Frankfurter Raum gelegenen Stationen traten am 9. August 1981 auf. An drei Stationen wurden mehr als 100 mm Niederschlag gemessen (Frankfurt-Flughafen, Hattersheim und Neu-Isenburg), an allen Stationen der Region fielen mindestens 70 mm. Da sich die starken Niederschläge bis in den Folgetag (10. August) hinein erstreckten, kamen so im Raum Frankfurt in 48 Stunden zwischen 128 mm (Frankfurt-Stadt) und 176 mm Niederschlag (Neu-Isenburg) zusammen und führten zu großflächigen Überflutungen und Hochwasser sowohl an kleinen als auch größeren Flüssen.



◀ Die Abbildung zeigt die 48-stündige Summe der beobachteten Niederschlagsmenge im Raum Frankfurt/Main für die Dauerregenlage am 9./10. August 1981. Zu diesem Zeitpunkt lagen noch keine Radardaten vor. Fast alle Stationsrekorde der Region für Dauerregen stammen von diesem extremen Ereignis.



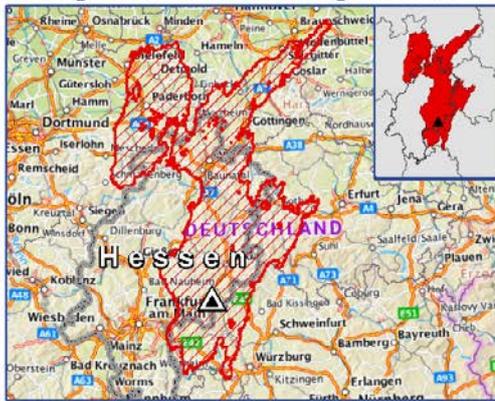
Starkregenereignis am 20. und 21. Mai 2019

Am 20. und 21. Mai 2019 fielen insbesondere im östlichen Teil von Hessen hohe Niederschlagsmengen, denen großflächig Wiederkehrzeiten von 20 bis zum Teil 100 Jahren zugeordnet werden können. Die höchsten erfassten Niederschlagsmengen wurden räumlich deutlich über das Bundesland verteilt in Schlüchtern-Herolz (94,9 mm), Hessisch Lichtenau (94,7 mm), Birx/Rhön (93,2 mm) und Schotten (90,7 mm) gemessen. Die intensivsten Niederschläge fielen in den Nachmittags- und Abendstunden des 20. Mai und schwächten sich in der

Nacht langsam ab. Ursächlich war (wie häufig bei solchen Ereignissen) ein Tiefdruckgebiet mit Zentrum über Mitteleuropa, welches über einen langen Zeitraum hinweg mäßige bis teilweise starke Niederschläge über der nördlichen Mitte Deutschlands verursachte. Die Folgen waren (wie auch bei dem zuvor beschriebenen Ereignis des Jahres 1981) großflächige Überschwemmungen, Hochwasser an Bächen, kleineren und größeren Flüssen sowie damit einhergehend z. T. hohe Sachschäden.

Dauerregen in Hessen am 20. - 21. Mai 2019 - Ereignisfallstudium

Ereigniszone und Niederschlagsmaximum



▲ Niederschlagsmaximum ▨ Ereigniszone

Start Time: 20.05.2019 12:50:00
 Dauerstufe: 18 h
 Fläche: 22325 km²
 RRmax / RRmean: 106.7 mm / 60.21 mm
 SRImax / SRImean: 9 / 5
 Tmax / Tmean: >> 100 Jahre / 20 Jahre
 Eta: 109.71

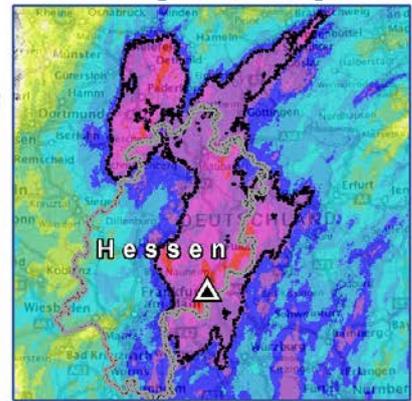
Ort des Niederschlagsmaximums:

Bundesland: Hessen
 Landkreis: Main-Kinzig-Kreis
 Gemeinde: Steinau an der Straße

Einwohnerzahl: 3647291
 Bebaute Fläche: 3 %
 Versiegelte Fläche: 3.4 %
 Minimale Höhe über Meeressniveau: 52 m
 Maximale Höhe über Meeressniveau: 949 m

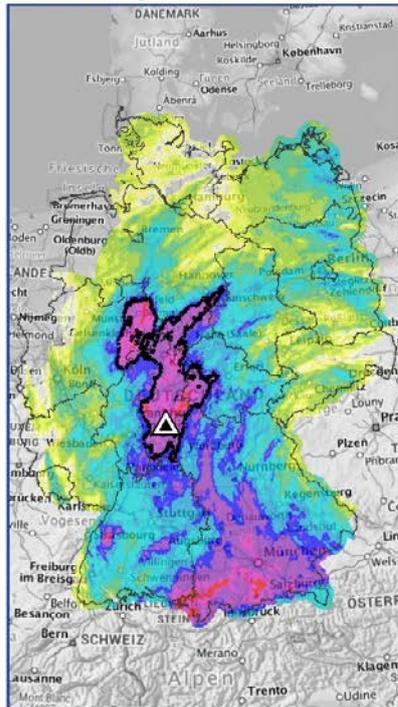
Wetterlage: XXZZF
 21d-Vorregenindex: 37 / 9.6 mm
 (Max / Mean)

Niederschlagssumme - Ereigniszone



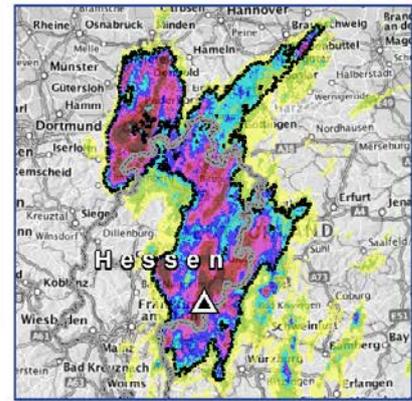
Niederschlagssumme [mm]
 0.1 0.5 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120

Niederschlagssumme - DEUTSCHLAND



Niederschlagssumme [mm]
 0.1 0.5 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120

Wiederkehrzeit nach RADKLIM



Wiederkehrzeit [Jahre]
 1 2 5 10 20 50 100

FELDERBESCHREIBUNG:

Start Time - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC (TT MM JJJJ hh:mm); Duration - Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses; Area - Gesamtfläche [km²] des Ereignisses (nach RADOLAN Projektion); RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRImax/SRImean - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0,12]); Tmax/Tmean - Maximale/Mittlere Wiederkehrzeit nach RADKLIM Daten; Eta - Extremität.

Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (CatRaRE W3 ETA v2021_01; RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002); Geodaten: © GeoBasis DE / BKG 2020 (Stand: 01.01.2020), Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open.pdf

▲ Steckbrief des Dauerregenereignisses vom 20./21. Mai 2019.

Gewittriger Starkregen

Die radarbasierte Niederschlagsklimatologie zeigt, dass in den letzten 20 Jahren in Hessen verbreitet extreme Starkniederschläge aufgetreten sind, auch abseits topografischer Erhebungen (welche zur Auslösung der Konvektion beitragen können). Eine potenzielle Starkregengefährdung besteht praktisch überall im Land. Die konkrete lokale Starkregengefahr eines jeden Ortes hängt darüber hinaus auch von den geografischen Gegebenheiten vor Ort ab, z. B. ob sich der Ort in einer Senke befindet oder ein hoher Versiegelungsgrad die Infiltration in den Boden unterbindet und somit den oberflächlichen Abfluss verstärkt.

Beispiele überörtlich relevanter konvektiver Ereignisse, die Starkregen, Hagel, heftige Windböen und z. T. auch Downbursts/Tornados in sich vereinigten, sind die Sommerunwetter im Rheingau in der Nacht zum 1. August 2017 und im Raum Offenbach am 18. August 2019. Die Gewitterzellen beider Ereignisse zogen schnell über das Land, so dass die Niederschlagsmengen mit bis zu 30 mm in einer Stunde noch überschaubar blieben. Schäden richteten hier vor allem die örtlich extremen Windböen und eingelagerte Hagelschauer an.

Langsam ziehende und daher länger über einem Ort befindliche oder sogar stationäre Zellen betreffen zumeist deutlich kleinere Gebiete, führen dort aber zu merklich höheren Niederschlagsmengen. Im Extremfall können alle Flächen – auch im Wald – den Extremniederschlag nicht zurückhalten. Auch Gräben, Rohre und Entwässerungsanlagen können dann keinen

Beitrag zum Rückhalt der Wassermassen mehr leisten. Zwei extreme Ereignisse sollen nachfolgend beschrieben werden (siehe auch detaillierte Steckbriefe der Ereignisse).

Ein bereits länger zurückliegendes, aber extrem plakatives Beispiel ist das Extremereignis vom Abend des 17. September 2006, das den Bereich zwischen Dillenburg, Haiger-Burbach und Frechenhausen im Lahn-Dill-Kreis betraf. Die Landesmessnetz-Station Haiger meldete an diesem Tag 161 mm Niederschlag, davon 150 mm innerhalb von nur vier Stunden und 94 mm innerhalb von einer Stunde. Auch einige andere Stationen erfassten mehr als 100 mm in wenigen Stunden (siehe Tabelle der hessenweiten Rekorde). Die betroffene Fläche extremer Niederschläge (definiert über die Überschreitung der Warnstufe 3 des Deutschen Wetterdienstes) betrug 859 Quadratkilometer und traf mehr als 160 000 Einwohner. Die Wiederkehrzeiten lagen großflächig über 100 Jahren.

Ursächlich waren Stauwirkungen der allgemein östlichen Strömung gegen die regionale Topografie und das Aufeinandertreffen mit einer westlichen Störung. Das Niederschlagsgeschehen hätte bei geringfügig anderen Ausgangsbedingungen und Strömungsrichtungen einige dutzend Kilometer weiter südlich oder nördlich auftreten oder auch ganz ausbleiben können. Die Starkniederschläge traten in einem eng begrenzten Gebiet auf, im nahegelegenen Raum Gießen-Marburg blieb es trocken. Es entstand ein hoher Sachschaden an privater und öffentlicher Infrastruktur.



◀ Folgen des Starkregenereignis vom 17. September 2006: Die Abbildung zeigt die Hochwassermarke an einem Haus in Haiger-Sechshelden am Kuhbach am Tag darauf. Lokal traten bis dahin nicht vorstellbare Überflutungshöhen und große Schäden auf.

Starkregen im Lahn-Dill-Kreis am 17. September 2006 - Ereignisfallstudium

Ereigniszone und Niederschlagsmaximum



Ereigniszone Niederschlagsmaximum

Start Time: 17.09.2006 14:50:00
 Dauerstufe: 6 h
 Fläche: 859 km²
 RRmax / RRmean: 111.3 mm / 61.61 mm
 SRImax / SRImean: 10 / 6
 Tmax / Tmean: >> 100 Jahre / > 100 Jahre
 Eta: 36

Ort des Niederschlagsmaximums:

Bundesland: Hessen
 Landkreis: Lahn-Dill-Kreis
 Gemeinde: Dillenburg

Einwohnerzahl: 167999
 Bebaute Fläche: 3.9 %
 Versiegelte Fläche: 4.1 %
 Minimale Höhe über Meeresniveau: 165 m
 Maximale Höhe über Meeresniveau: 667 m

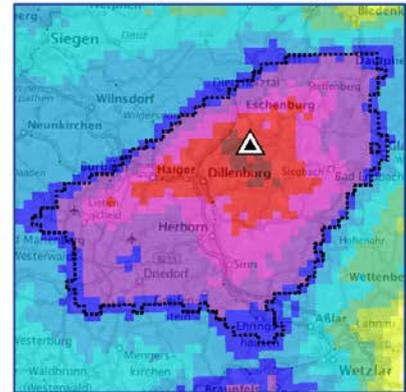
Wetterlage: XXZAF
 21d-Vorregenindex: 1 / 0.1 mm
 (Max / Mean)

Niederschlagssumme - HESSEN



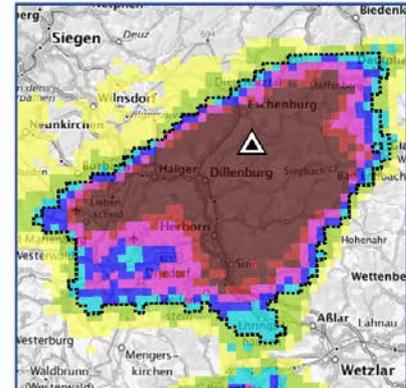
Niederschlagssumme [mm]
 0.1 0.5 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120

Niederschlagssumme - Ereigniszone



Niederschlagssumme [mm]
 0.1 0.5 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120

Wiederkehrzeit nach RADKLIM



Wiederkehrzeit [Jahre]
 1 2 5 10 20 50 100

FELDERBESCHREIBUNG:

Start Time - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC (TTMM.JJJJ hh:mm); Duration - Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses; Area - Gesamtfläche [km²] des Ereignisses (nach RADOLAN Projektion); RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRImax/SRImean - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0,12]); Tmax/Tmean - Maximale/Mittlere Wiederkehrzeit nach RADKLIM Daten; Eta - Extremität.

Klimadaten und Darstellung. © DWD 2021 (CatRaRE W3 ETA v2021_01; RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002), Geodaten: © GeoBasis-DE / BKG 2020 (Stand: 01.01.2020), Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open.pdf

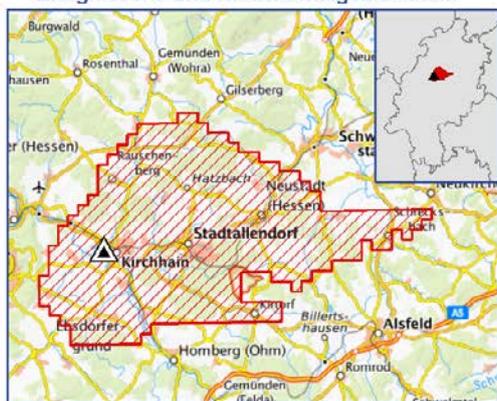
▲ Steckbrief des Starkregenereignisses vom 17. September 2006.

Ein extrem intensiver und örtlich begrenzter Starkniederschlag trat am 7. August 2018 im Bereich Kirchhain-Stadtallendorf auf. Die Landesmessnetz-Station Kirchhain meldete einen Tageswert von 140,4 mm und die Niederschlagsstation des DWD in Amöneburg-Rüdigerheim einen Wert von 118,5 mm, wobei ein Großteil des Niederschlags in nur zwei bis drei Stunden fiel. Die betroffene Fläche extremer Niederschläge (definiert über die Überschreitung der Warnstufe 3 des Deutschen Wetterdienstes) betrug 475 Quadratkilometer und traf mehr als 72.000 Einwohner. Auch bei diesem Ereignis lagen die Wiederkehrzeiten großflächig über 100 Jahren.

In einer südwestlichen Anströmung bildeten sich östlich von Marburg in den frühen Abendstunden kontinuierlich starke Gewitterzellen, die für die großen Niederschlagsmengen verantwortlich waren. Auch hier hätte das Niederschlagsgeschehen bei geringfügigen Änderungen der Ausgangsbedingungen oder Strömungsrichtung in einer anderen Region auftreten oder auch ganz ausbleiben können. Die Feuerwehr fuhr mehr als 500 Einsätze, insbesondere in Kirchhain traten hohe Sachschäden auf.

Starkregen in Kirchhain am 7. August 2018 - Ereignisfallstudium

Ereigniszone und Niederschlagsmaximum



Ereigniszone Niederschlagsmaximum

Start Time: 07.08.2018 14:50:00
 Dauerstufe: 3 h
 Fläche: 475 km²
 RRmax / RRmean: 167.8 mm / 66.22 mm
 SRImax / SRImean: 12 / 7
 Tmax / Tmean: >> 100 Jahre / > 100 Jahre
 Eta: 29.3

Ort des Niederschlagsmaximums:

Bundesland: Hessen
 Landkreis: Marburg-Biedenkopf
 Gemeinde: Kirchhain

Einwohnerzahl: 72326
 Bebaute Fläche: 2.6 %
 Versiegelte Fläche: 3.2 %
 Minimale Höhe über Meeresniveau: 189 m
 Maximale Höhe über Meeresniveau: 424 m

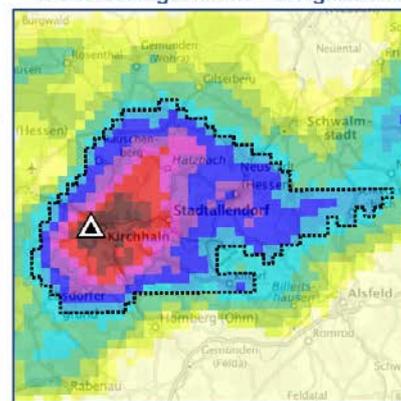
Wetterlage: SWZAF
 21d-Vorregenindex: 2 / 0.2 mm
 (Max / Mean)

Niederschlagssumme - HESSEN



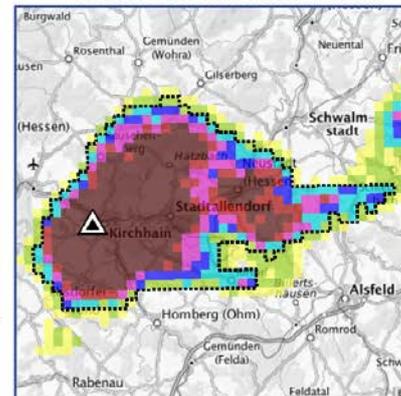
Niederschlagssumme [mm]
 0.1 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120 140

Niederschlagssumme - Ereigniszone



Niederschlagssumme [mm]
 0.1 1 2 5 10 20 30 40 60 80 100 120 140

Wiederkehrzeit nach RADKLIM



Wiederkehrzeit [Jahre]
 1 2 5 10 20 50 100

FELDERBESCHREIBUNG:

Start Time - Anfangszeitpunkt des Ereignisses in UTC (TT.MM.JJJJ hh:mm); Duration - Signifikante Dauerstufe [h] des Ereignisses; Area - Gesamtfläche [km²] des Ereignisses (nach RADOLAN Projektion); RRmax/RRmean - Maximaler/Mittlerer Niederschlag [mm]; SRImax/SRImean - Maximaler/Mittlerer Starkregenindex nach Schmitt (Wertebereich [0,12]); Tmax/Tmean - Maximale/Mittlere Wiederkehrzeit nach RADKLIM Daten; Eta - Extremität.

Klimadaten und Darstellung: © DWD 2021 (CatRaRE W3 ETA v2021_01; RADKLIM Daten DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002); Geodaten: © GeoBasis DE / BKG 2020 (Stand: 01.01.2020). Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_topfplus_Open.pdf

▲ Steckbrief des Starkregeneignisses vom 7. August 2018.

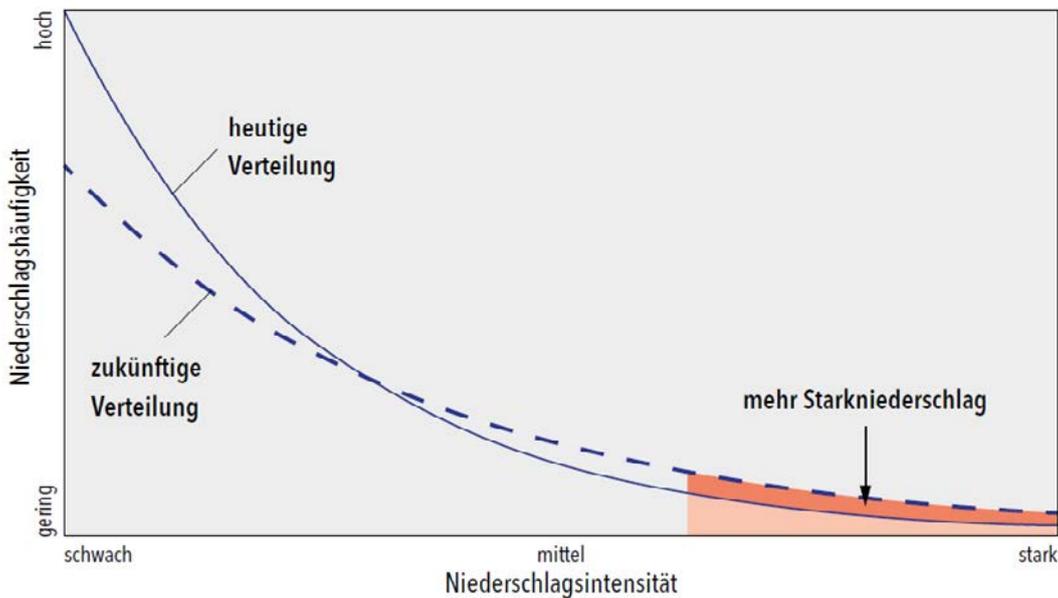
Zukunft:

In der Vergangenheit wurde in Deutschland und Hessen eine Zunahme der maximalen Tagesniederschläge im Winter beobachtet. Nach derzeitigem Wissensstand auf Grundlage regionaler Klimamodelle ist davon auszugehen, dass sich diese Entwicklung weiter fortsetzen wird. Für die Sommermonate zeigen die Klimaprojektionen dagegen keinen eindeutigen Trend, weder hinsichtlich einer Zu- noch einer Abnahme der maximalen Tagesniederschläge.

Durch den fortschreitenden Klimawandel und dem damit einhergehenden Temperaturanstieg ist jedoch zu erwarten, dass extreme, vor allem kurzzeitige, mit Gewittern einhergehende Starkregenereignisse zukünftig intensiver und ggf. auch häufiger werden. Wärmere

Luft kann mehr Wasserdampf als kältere Luft aufnehmen – pro 1 °C Temperaturerhöhung steigt die Menge enthaltener Wasserdampf in einer Wolke um im Mittel ca. 7 % an, wodurch aus solch einer Wolke dann auch mehr Niederschlag fallen kann.

Um die Entwicklung von Niederschlägen kurzer Zeitdauer einschätzen zu können, müssen sogenannte konvektionserlaubende Modelle herangezogen werden. Diese können einzelne Schauer und Gewitter modellieren. Erste derartige Projektionen sind für Deutschland mittlerweile verfügbar und deuten auf eine Intensivierung solcher kurzzeitigen Starkniederschläge hin. Um diese Aussagen zu festigen, müssen aber weitere solcher Simulationen ausgewertet werden.



◀ Mit zunehmendem Klimawandel steigt die Starkregengefahr an, da wärmere Luft mehr Feuchtigkeit als kühlere Luft aufnehmen kann. Eine Gewitterwolke enthält bei einer Lufttemperatur von 35 °C also mehr Wasser als bei 28 °C. Die schematische Abbildung zeigt die mit dem Klimawandel einhergehenden Veränderungen in der Verteilung der Niederschlagsintensität. HLNUG; Abbildung verändert nach IPCC (2013)

Sturm

Markante Sturmereignisse gehören zum hessischen Klima dazu und treten aller paar Jahre vor allem in den Herbst- und Wintermonaten auf, da die vom Nordatlantik nach Europa ziehenden Tiefdruckgebiete dann ihre größte Intensität entfalten können. Diese werden von den Temperaturunterschieden zwischen den kalten Polarregionen und den warmen Tropen angetrieben, die zu dieser Zeit am größten sind. In den letzten Jahren werden auftretende Sturmereignisse regelmäßig vor dem Hintergrund des Klimawandels diskutiert – werden Stürme häufiger oder stärker, oder schwächen sich solche Ereignisse mit abnehmenden Temperaturunterschieden zwischen Nord und Süd vielleicht sogar ab?

Antworten darauf sind sowohl für die Vergangenheit als auch die Zukunft nicht leicht zu finden. Die Windgeschwindigkeit wird an den meisten Standorten seit den 1950er oder 1960er Jahren erfasst. Sie wird (im Gegensatz zu allen anderen Elementen) standardmäßig in 10 m Höhe gemessen, um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten. Dennoch weisen alle Windzeitreihen Inhomogenitäten auf. Dies liegt zum einen daran, dass sich seit Messbeginn an fast allen Stationen das Umfeld der Messstationen verändert hat (z. B. durch wachsende Bäume in der Messumgebung) bzw. viele Stationen im Laufe der Zeit auch verlegt wurden. Zusätzlich wurden die Messmethoden verändert (siehe auch Kapitel „Wind“). Außerdem sind die vorhandenen Zeitreihen zu kurz, um Langzeittrends z. B. über 100 Jahre zu bestimmen – die besonders interessanten Stürme oder Orkane sind seltene Ereignisse und damit nur über sehr lange Zeitreihen zu bewerten.

Klimamodellprojektionen liefern keine eindeutigen Ergebnisse, wie sich die Windgeschwindigkeit in Hessen entwickelt. In den Modellen zeigen sich sowohl für die Vergangenheit als auch für die Zukunft multi-dekadische Schwankungen ohne Langzeittrend. Dies gilt ebenfalls für Stürme, auch bei ihnen ist für die Zukunft keine deutliche Änderung erkennbar.

Die stärksten beobachteten Stürme seit der Jahrtausendwende traten am 18. Januar der Jahre 2007 und 2018 auf und werden nachfolgend vorgestellt.

Der Orkan Kyrill zog vom Nordatlantik über die Britischen Inseln, die südliche Nordsee nach Deutschland und dann weiter Richtung Polen und das Baltikum. An diesem Tag wurden überall in Hessen schwere Sturmböen, verbreitet – insbesondere in Mittelhessen – sogar Orkanböen mit >117 km/h gemessen. Auf der Wasserkuppe wurde mit 172 km/h die mit Abstand höchste Windgeschwindigkeit seit dem dortigen Aufzeichnungsbeginn der Windgeschwindigkeit (1959) beobachtet. Kyrill sorgte in Deutschland und Hessen für massiven Windbruch in den Wäldern sowie Schäden im ländlichen und städtischen Bereich. Am späten Nachmittag dieses Tages, als der Sturm seinen Höhepunkt erreichte, stellte die Bahn erstmals in Deutschlands Nachkriegsgeschichte den gesamten Schienenverkehr ein.

18.1.2018: Orkan Friederike

Auf den Tag genau 11 Jahre nach Kyrill trat mit Friederike ein ähnlich schwerer Sturm (der stärkste seit Kyrill) in Hessen auf. Der Sturm hatte eine ähnliche Zugbahn wie Kyrill, das Sturmfeld von Friederike war jedoch insgesamt deutlich kleiner und beeinflusste vor allem Nord- und Mittelhessen – in Südhessen waren die Windgeschwindigkeiten zumeist geringer. Bis in den Raum Taunus – Frankfurt/Main traten schwere Sturmböen, zum Teil auch Orkanböen auf. Auch hier waren die Bäume in den genannten Regionen von massivem Windbruch betroffen.

Nachfolgende Tabelle listet eine Auswahl der schwersten Sturmereignisse in Hessen seit Kyrill im Jahr 2007 mitsamt den höchsten gemessenen Windgeschwindigkeiten im Flach-/Hügel- und Bergland auf. Aufgenommen wurden alle Ereignisse, an denen an mehreren Wetterstationen Orkan- oder orkanartige Böen im Flach- und Hügelland registriert wurden. Es fällt auf, dass in den vergangenen Jahren (seit 2018) eine Reihe signifikanter Ereignisse auftraten, während zwischen 2011 und 2017 nur ein Ereignis beobachtet wurde.

Tabelle: Schwerste Sturmereignisse in Hessen seit dem Jahr 2007

Datum & Orkan	Flach/Hügelland	höchste max. Windgeschwindigkeit	Bergland	
18.01.2007 Kyrill	Lautertal-Hörgenau	127 km/h	Wasserkuppe	172 km/h
01.03.2008 Emma	Alsfeld	114 km/h	Kahler Asten	128 km/h
28.02.2010 Zynthia	Lautertal-Hörgenau	125 km/h	Wasserkuppe	140 km/h
31.03.2015 Niklas	Neu-Ulrichstein	107 km/h	Wasserkuppe	118 km/h
18.01.2018 Friederike	Frankenberg-Geismar	134 km/h	Kahler Asten	142 km/h
04.03.2019 Bennet	Gießen-Wettenberg	110 km/h	Wasserkuppe	120 km/h
10.03.2019 Eberhard	Alsfeld	126 km/h	Kahler Asten	129 km/h
10.02.2020 Sabine	Eschwege-Eltmannshausen	112 km/h	Wasserkuppe	145 km/h
21.10.2021 Hendrik	Frankfurt/Main	105 km/h	Wasserkuppe	130 km/h
18.02.2022 Zeynep	Frankfurt/Main	122 km/h	Kahler Asten	127 km/h

Für die Bergstationen wurden Wasserkuppe, Kahler Asten und Kleiner Feldberg berücksichtigt.

Urbane Herausforderungen

Der menschengemachte Klimawandel wirkt sich bereits heute auf unser Leben in Hessen aus. Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Entwicklungen haben Auswirkungen auf nahezu alle Lebensbereiche. Sie beeinflussen Natur, Land- und Forstwirtschaft, aber auch (und besonders) in den Städten, wo die meisten von uns leben, haben die beschriebenen vergangenen und zukünftigen Klimaveränderungen Auswirkungen. So belasten vermehrte und intensivere Hitzeperioden unsere Gesundheit und die Kapazität unserer Gesundheitssysteme. Durch Starkereignisse besteht die Gefahr einer Überlastung der Kanalisation in den Städten, so dass Überflutungen auftreten. Auf landwirtschaftlichen Flächen kommt es vermehrt zu Erosionsschäden.

In verschiedenen Zusammenhängen stellen sich immer wieder die folgenden Fragen: Gibt es Gebiete mit einem besonders hoch ausgeprägten Betroffenheitsrisiko, und falls ja, welche Faktoren begünstigen eine starke Betroffenheit? Welche Maßnahmen können ergriffen werden, um Sach- und Personenschäden zu minimieren? In vielen schon einmal betroffenen Kommunen wird durch die umfangreiche Aufarbeitung vergangener Ereignisse und die Entwicklung von Vorsorgestrategien nach Antworten auf diese Fragen gesucht, um künftig besser vorbereitet zu sein.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) untersucht in verschiedenen Projekten die Auswirkungen des Klimawandels im urbanen Raum und entwickelt Konzepte, um sich an

diese beobachteten und projizierten Entwicklungen anzupassen. Nachfolgend sollen zwei vor kurzem abgeschlossene Projekte vorgestellt werden, die im Rahmen des KLIMPRAX-Konzeptes des Fachzentrums Klimawandel und Anpassung (KLIMPRAX: „Klimawandel in der Praxis“) klimatische Veränderungen bzw. Herausforderungen und ihre Auswirkungen vor allem in Siedlungsräumen untersucht und praxisnahe Anpassungsempfehlungen erarbeitet haben, um die hessischen Kommunen in ihren Planungsprozessen aktiv zu unterstützen.

Hitze in der Stadt

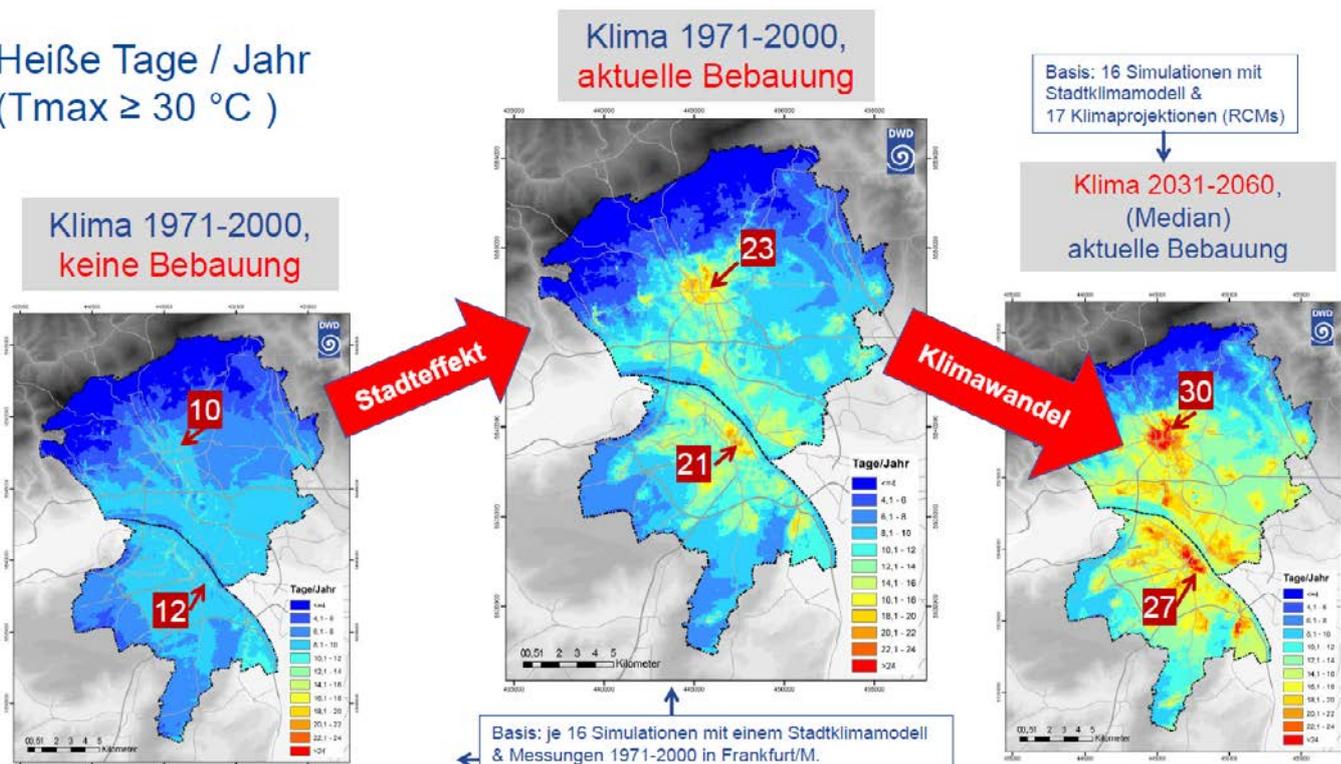
Ausgehend von der zunehmenden Hitzebelastung in Kommunen wurde im Projekt „KLIMPRAX-Stadtklima“ untersucht, wie stadtklimatische Belange besser in kommunale Planungsprozesse und Verwaltungsabläufe integriert werden können. Das Projekt wurde unter aktiver Beteiligung der Modellkommunen Wiesbaden und Mainz durchgeführt. Neben dem HLNUG waren der Deutsche Wetterdienst sowie von rheinland-pfälzischer Seite das Landesamt für Umwelt und das Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen beteiligt.

Für Untersuchungen des Stadtklimas und zukünftige Planungen sind ortsspezifische Kenntnisse unabdingbar. Planer müssen zum Beispiel wissen, in welchen Gebieten am Stadtrand oder im Umland Kaltluft entsteht und wo sich die Luftleitbahnen befinden, die diese Kaltluft in die Stadt hineintragen – nur so können diese bewahrt werden. Dieses Wissen ist gerade

vor dem Hintergrund einer in vielen Städten stattfindenden Nachverdichtung sowie der Neuerschließung und Bebauung von Wald oder Landwirtschaftsfläche in Hessen unerlässlich. Außerdem müssen die Planer

wissen, wo sich Wärmeinseln befinden und der Luftaustausch eingeschränkt ist, zum Beispiel um Konzepte für eine bessere Belüftung zu erstellen.

Heiße Tage / Jahr (Tmax ≥ 30 °C)



▲ Die Abbildungen zeigen die Auswirkungen von Stadteffekt und Klimawandel auf die Entwicklung der jährlichen Anzahl der „Heißen Tage“ mit einem Temperaturmaximum von 30°C oder mehr. Gegenüber einer unbebauten Landschaft (hypothetisch dargestellt im linken Bild) verdoppelt sich die Anzahl der Heißen Tage in den Bereichen der stark verdichteten Innenstädte von Wiesbaden und Mainz von ca. 10 auf ca. 20 (realitätsnahe Darstellung der gegenwärtigen Verhältnisse im mittleren Bild). Beide Innenstädte sind als „Wärmeinseln“ deutlich zu erkennen. Mit dem Klimawandel wird die Anzahl Heiße Tage in den nächsten Jahrzehnten in allen Gebieten zunehmen (rechtes Bild) - in den dicht bebauten Innenstadtbereichen verstärkt sich dieser Trend noch einmal. Die Stärke des Anstiegs hängt (vor allem in späteren Jahrzehnten) deutlich von der Entwicklung der anthropogenen Treibhausgasemissionen ab.

Vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft gewinnt auch das Thema „Hitze und Gesundheit“ an Bedeutung. Aufbauend auf der im Rahmen von KLIMPRAX-Stadtklima vorgenommenen Aufbereitung meteorologischer Daten - wie sie z. B. in obiger Abbildung dargestellt ist - können dann über weiterführende Analysen z. B. Orte besonders hoher Betroffenheit identifiziert werden, an welchen die Kommunen vorrangig handeln müssen. In diesen Gebieten besteht eine starke (sommerliche) Hitzebelastung, gleichzeitig leben dort besonders viele davon betroffene Menschen (untersucht für die Indikatoren Hochaltrigen-, Kinder- und Armutsdichte). Im Projekt wurden außerdem Empfehlungen erarbeitet, wie Kommunen die Hitze-

belastung der Bevölkerung reduzieren können. Ein wichtiges Ergebnis von KLIMPRAX-Stadtklima ist ein Methodenbaukasten, der den Kommunen bei der Bewertung von gegenwärtigen und zukünftigen Hitzebelastungen Hilfestellung leistet. Damit kann die Sensitivität der Bevölkerung erfasst und bewertet werden. Darüber hinaus werden die Kommunen dabei unterstützt, vor Ort sinnvolle Maßnahmen zur Klimaanpassung zu erarbeiten. Der Handlungsleitfaden mit allen Ergebnissen des Projektes sowie übersichtliche Broschüren und weitere Ergebnisdokumente sind auf der Projektwebsite verfügbar.

Link zum Projekt: www.hlnug.de/?id=10236

Urbane Sturzfluten

Gebiete, die von Starkregen betroffen sein können und außerhalb potenzieller Überschwemmungsflächen großer Flüsse liegen, wurden bisher nicht mit Risikokarten erfasst. Gerade sommerliche Gewitter können jedoch in kurzer Zeit (und häufig lokal begrenzt) enorme Regenmengen bringen, die die Entwässerungssysteme überfordern (sog. „urbane Sturzfluten“). Die Folgen solcher Starkregenereignisse sind umso stärker, je höher der durch Straßen, Häuser oder andere Bebauung versiegelte Anteil der Flächen ist. Zudem kann es auf landwirtschaftlichen Flächen zu Erosion kommen und die abgeschwemmten Böden in bebaute Gebiete transportiert werden.

Dies gilt besonders in Gegenden mit Hanglagen, die in bebaute Flächen münden. Im Projekt „KLIMPRAX – Starkregen und Katastrophenschutz für Kommunen“ (kurz: KLIMPRAX-Starkregen) wurden daher Hilfestellungen erarbeitet, die insbesondere Kommunen unterstützen sollen, Schäden durch Starkregen vorzubeugen.

Im Projekt wurde eine hessenweite Starkregen-Hinweiskarte erstellt, die eine erste Übersicht über die Gefährdungslage bei Starkregen gibt. Sie basiert auf Beobachtungen des Niederschlags, der örtlichen Topographie und dem urbanen Versiegelungsgrad. Zusätzlich ist die Vulnerabilität (kritische Infrastrukturen, Bevölkerungsdichte und Erosionsgefahr) enthalten. Sie hat eine relativ grobe Auflösung von 1 km², so dass für die Planung konkreter Maßnahmen zum Schutz vor Starkregenfolgen häufig eine höher aufgelöste Visualisierung der örtlichen Starkregengefährdung sinnvoll ist.

Die Starkregen-Hinweiskarte zeigt ein Starkregen-Gefahrenpotenzial. Auch wenn in einer Kommune noch keine Schäden durch Starkregen eingetreten sind, kann trotzdem eine Gefährdung in der Starkregen-Hinweiskarte aufgezeigt werden. Diese ergibt sich aus der Versiegelung und den überflutungsgefährdeten Flächen. Gleichzeitig kann eine Kommune, auch wenn sie bereits Schäden durch Starkregen hatte, trotzdem nur in einer mittleren Gefährdungsstufe eingeordnet sein.

Örtlich hochaufgelöste kommunale Fließpfadkarten sollen dabei helfen, gefährdete Gebiete in der Kommune selbst zu ermitteln. Solche Karten können durch die Kommunen beim HLNUG angefordert werden und eignen sich vor allem für kleinere Ortschaften oder Ortsteile (besonders im ländlichen Raum). Sie zeigen (in einer Auflösung von 1 m²) eine erste Übersicht der potenziellen Fließpfade, die das Regenwasser bei einem Starkregenereignis nehmen würde.

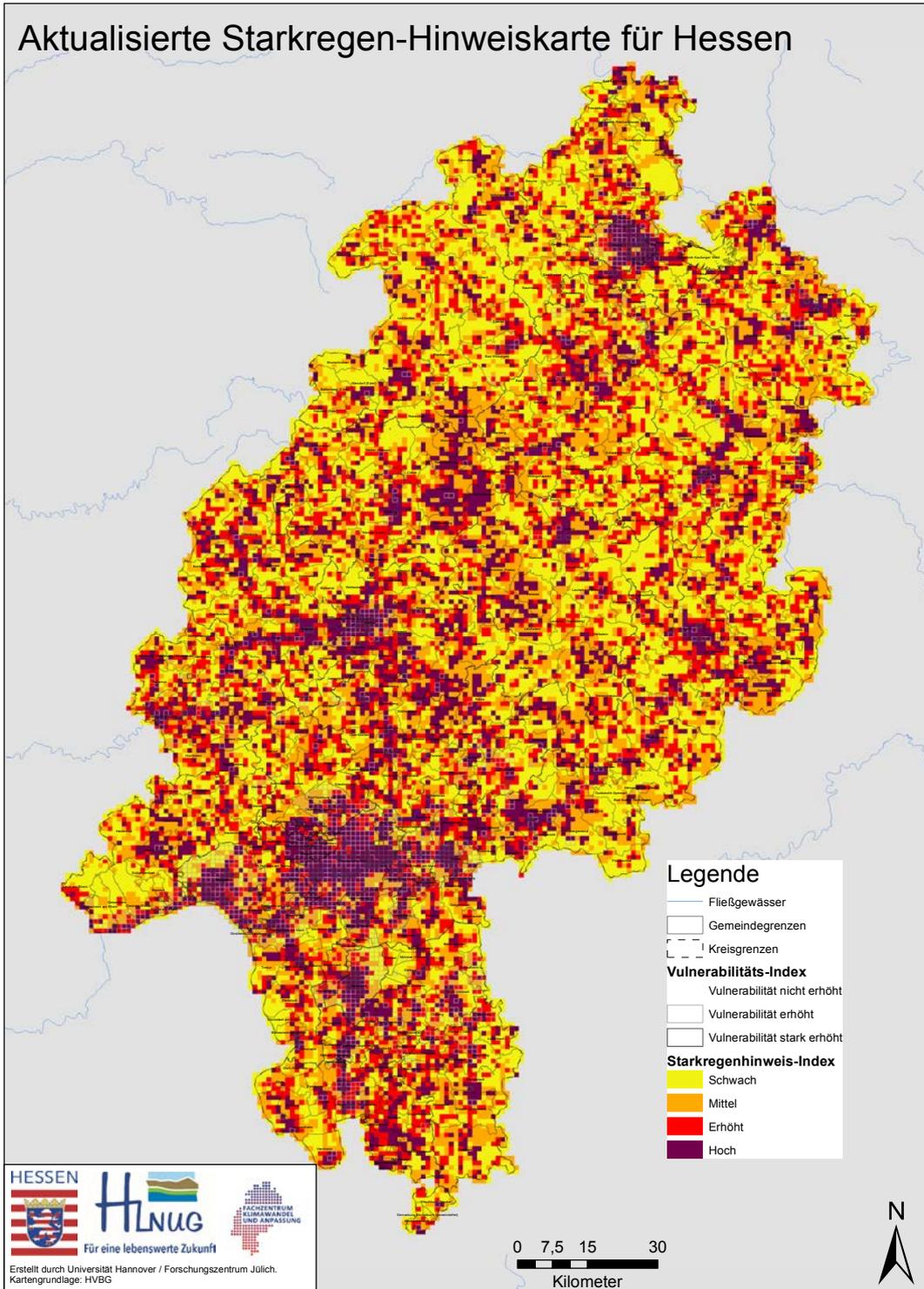
Einbezogen werden Hangneigungen in unterschiedlichen Abstufungen, Landnutzungen und Gebäudeinformationen. Die Fließpfade werden mit einem Puffer von 20 m dargestellt, um die Gefährdung von Gebäuden oder anderer Infrastruktur besser sichtbar zu machen. Die Wirkungen von Gräben, Durchlässen und der Kanalisation sind in der Regel nicht berücksichtigt, so dass diese Karten für städtisch geprägte Flächen nicht herangezogen werden sollten.

Je nach Gefährdungslage ist daher die zusätzliche Erstellung einer Starkregen-Gefahrenkarte empfehlenswert, die auf einer umfassenden Datengrundlage basiert. Diese kann bei Ingenieurbüros in Auftrag gegeben werden und basiert auf einer komplexen Modellierung des Abflussverhaltens bei Starkregen.

Hierzu stellt KLIMPRAX-Starkregen den Kommunen Hilfestellungen zur Ausschreibung solcher Karten, und für die Ingenieurhydrologie eine verbesserte Methodik zur Erstellung der Karten sowie Radarniederschlagsdaten über eine Sammlung von Beispielergebnissen zur Verfügung.

Link zum Projekt: www.hlnug.de/?id=11199

Aktualisierte Starkregen-Hinweiskarte für Hessen



▲ Die Abbildung zeigt die Starkregen-Hinweiskarte für Hessen. Der Starkregen-Index (Farbgebung) weist Gebiete aus, die entweder zwischen 2001 und 2020 überdurchschnittlich stark von Starkregenereignissen betroffen waren oder die aufgrund von Versiegelung und Überflutungsgefährdung überdurchschnittlich stark bedroht sind. Für 35 % der Landesfläche wird der Index schwach, für 25 % mittel, für 21 % erhöht und für 19 % hoch ausgewiesen. Die Klassen erhöht und hoch kommen dabei in allen Landesteilen vor. Hohe Gefährdungen durch Starkregen im urbanen Raum und gleichzeitig hohe Vulnerabilitäten ergeben sich vor allem großflächig im gesamten Rhein-Main-Gebiet, aber auch in allen städtisch geprägten Gebieten.

Begriffskompass Klima

► Bezugszeitraum/Bezugsperiode

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

Die Aussagen beschreiben immer die mittleren Verhältnisse über eine Zeitspanne von 30 Jahren.

► Frühindustrieller Zeitraum

Der Zeitraum 1881 bis 1910 wird als frühindustrieller Zeitraum definiert. Die Definition erfolgt in Anlehnung an die Definition eines vorindustriellen Zeitraums (1861-1880) durch die Pariser Klimakonferenz COP21.

► Gebietsmittelwerte

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

► Kenntage

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

► Klimaprojektion

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

► Klimavorhersage

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

► Perzentil

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

► Planungshorizonte

In diesem Bericht wird zwischen einem kurzfristigen und langfristigen Planungshorizont unterschieden. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt das Zeitfenster der Jahre 2031 bis 2060, 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. In diesem Bericht werden noch weitere Zeiträume betrachtet (1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Die Aussagen beschreiben immer die mittleren Verhältnisse über eine Zeitspanne von 30 Jahren.

► **Spannbreite**

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

► **Szenarien**

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

► **Begriffsbestimmung in der Klimamodellierung**

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

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

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

Der Grad der Übereinstimmung ist kursiv gesetzt.

Weitere Begriffserklärungen zu Wetter und Klima finden sie im Wetterlexikon auf der Webseite www.dwd.de/lexikon ►



Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie – Fachzentrum Kli- mawandel und Anpassung



Seit über 15 Jahren stehen die vielfältigen gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels in Hessen im Fokus der Arbeiten des Fachzentrums. In zahlreichen Projekten werden Klimaänderungen und deren Folgen in Hessen untersucht sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt. In den KLIMPRAX-Vorhaben (Klimawandel in der Praxis) ist das Ziel, mit den Zielgruppen gemeinsam praxisnahe Handlungshilfen zu entwickeln, um sich aktiv an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Zudem werden in verschiedenen Themenbereichen meist mehrjährige Projekte vergeben. Um drohende Beeinträchtigungen und Schäden zu begrenzen und gegebenenfalls positive Entwicklungen aufzuzeigen, müssen frühzeitig Anpassungsstrategien und -maßnahmen entwickelt werden. Dies geschieht insbesondere in Zusammenarbeit mit Kommunen und weiteren hessischen Multiplikatoren.



Aktuelles



Downloads

Weiterführende Informationen



© HLNUG

Klimaportal Hessen

Das Klimaportal Hessen stellt Klimaentwicklungen aus Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft für Temperatur, Niederschlag und andere Klimaelemente dar. Das Portal besteht aus den folgenden drei Komponenten:

- Witterungsbericht
- Wetterextreme
- Klima der Zukunft



© fotogestoeber /
Adobe Stock

Handlungshilfen

Sie brauchen konkrete Unterstützung bei der Anpassung an den Klimawandel? Dann schauen Sie in die Sammlung der Handlungshilfen, mit dem Sie aktiv bei dieser Aufgabe unterstützt werden.



Praxisprojekte des Fachzentrums Klimawandel und Anpassung KLIMawandel In der PRAXIS

KLIMPRAX Stadtklima	KLIMPRAX Starkregen	KLIMPRAX Stadtgrün	KLIMPRAX Planung und Bauen	KLIMPRAX Krisen- vorbereitung
Integration von klimatischen Belangen in die kommunale Planungspraxis	Unterstützung von Kommunen bei der Vorsorge vor Starkregen	Klimaangepasste Baumarten und Begrünungsmöglichkeiten für Kommunen	Hilfestellungen und Informationen für Handwerk und klimaangepasste Gewerbegebiete	Übungen zu Krisenfällen mit hessischen Verwaltungen, um fit für den Ernstfall zu werden
Abgeschlossen: 2019	Abgeschlossen: 2020	laufend	laufend	laufend

DWD-Präsenz in der Fläche

Unsere Ansprechpartner und Beratungsstellen

Klima und Umweltberatung



Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

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

Deutschland überregional:

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

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

Regionales Klimabüro Hamburg
Bernhard-Nocht-Straße 76
20359 Hamburg
☎ 0 69 / 80 62 - 60 22
✉ klima.hamburg@dwd.de

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

Regionales Klimabüro Potsdam
Güterfelder Damm 87-91
14532 Stahnsdorf
☎ 0 69 / 80 62 - 54 44
✉ klima.potsdam@dwd.de

Bayern

Regionales Klimabüro München
Helene-Weber-Allee 21
80637 München
☎ 0 69 / 80 62 - 92 25
✉ klima.muenchen@dwd.de

Baden-Württemberg

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

Agrarmeteorologie



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

Zentrum für Agrarmeteo-
rologische Forschung
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
☎ 0 531 / 2 52 05 - 39
✉ lw.braunschweig@dwd.de

Außenstelle
Weihenstephan
Alte Akademie Nr. 16
Weihenstephaner Berg
85354 Freising
☎ 0 8161 / 5 37 69 - 0
✉ lw.weihenstephan@dwd.de

Hydrometeorologie



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

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

Medizin- Meteorologie



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

Deutscher Klimadienst (DKD)



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

Weiterführende Literatur / Weblinks

Daten und Informationen zum Klimawandel



Klimadaten Deutschland

www.dwd.de/klimadaten



Informationen zum Stadtklima

www.dwd.de/stadtklima



Auswertungen zur Klimaentwicklung in Deutschland

www.dwd.de/zeitreihen



Deutscher Klimaatlas

www.dwd.de/klimaatlas



Fakten zum Klimawandel

www.klimafakten.de



SkepticalScience

<https://skepticalscience.com>



Das Deutsche Klimavorsorgeportal

www.klivportal.de



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

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



Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

www.kliwa.de



BMVI Expertennetzwerk

https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Home/home_node.html



Besondere Ereignisse

www.dwd.de/witterungsereignisse



Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021

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

Klimavorhersagen



Klimavorhersagen
www.dwd.de/klimavorhersagen

Sachstandsberichte des IPCC



6. Sachstandsbericht
www.de-ipcc.de/250.php

Phänologie



Informationen zur Phänologie
www.dwd.de/phaenologie

KOSTRA-DWD



Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD
www.dwd.de/kostra

Attribution



Informationen zur Attribution
www.dwd.de/attribution

Impressum

Der Klimareport Hessen ist eine gemeinsame Veröffentlichung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).

Autoren

Falk Böttcher, Karsten Friedrich, Petra Fuchs, Dr. Frank Kreienkamp, Nora Leps, Dr. Tanja Winterrath, Christine Zarda (HLNUG), Dr. Heike Hübener (HLNUG), Dr. Andreas Hoy (HLNUG)

Redaktion

Dr. Andreas Hoy (HLNUG), Petra Fuchs (DWD)

Online-Ausgabe

Dieses Heft liegt als digitales Dokument auf der Internetseite des DWD (www.dwd.de/klimareports) und der Homepage des HLNUG ([www.https://www.hlnug.de/?id=10062](https://www.hlnug.de/?id=10062))

Die Online-Ausgabe unterliegt der Lizenz
- <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Zitierhinweis

DWD und HLNUG (2024): Klimareport Hessen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main und Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden, Deutschland, 72 Seiten.

ISBN 978-3-88148-546-3 (Online)

Gestaltung und Satz

Udo Stadtmüller (Deutscher Wetterdienst)

Bildnachweis

Titelseite: links oben und unten Dr. Andreas Hoy HLNUG, **rechts oben und unten** Dr. Andreas Hoy HLNUG
S. 4: DWD; **S. 5:** DWD; **S. 6:** Mitte Pixabay/Karsten Bergmann; **S. 7:** rechts oben Fotolia/Gina Sanders; **S. 8:** Dr. Andreas Hoy HLNUG; **S. 9:** oben Creative Collection/Clemens Humeniuk; **S. 12:** rechts oben MPI-M; **S. 13:** oben links Creative Collection/Hendrik Fuchs; **S. 15:** DWD; **S. 32:** DWD; **S. 34:** DWD; **S. 36:** DWD; **S. 41:** DWD; **S. 43:** DWD; **S. 44:** DWD; **S. 48:** DWD; **S. 50:** DWD; **S. 55:** Mitte Creative Collection/Peter Kaschuba; **S. 57:** DWD; **S. 67:** Panthermedia / Vitaliy Pakhnyushchyy; **S. 68 v. l. n. r.:** Pigs CC-BY 2.0, Pixabay/PublicDomainPictures, Fotolia / makuba, DWD





Für eine lebenswerte Zukunft

**Hessisches Landesamt für Naturschutz,
Umwelt und Geologie**

Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Tel: +49 (0) 611 7 6939 - 0

E-Mail: fachzentrum.klimawandel@hlnug.hessen.de



Deutscher Wetterdienst

Klima- und Umweltberatung
Zentrales Klimabüro Offenbach am Main
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main

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

E-Mail: klima.offenbach@dwd.de

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

