



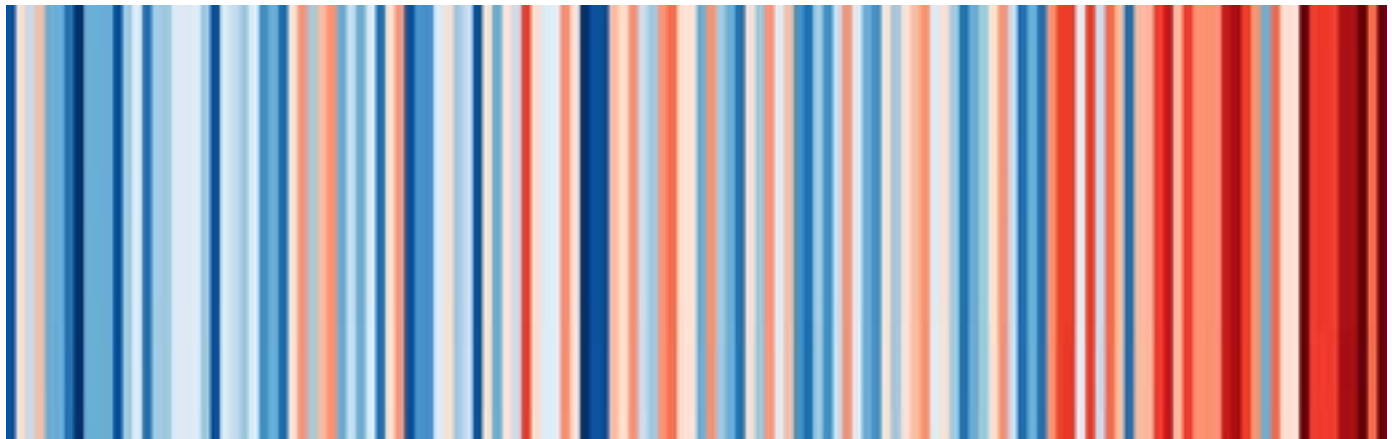
Klimareport Schleswig-Holstein

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



Warming Stripes

▼ Die farbigen Streifen zeigen die jährliche Abweichung der Temperatur in Schleswig-Holstein vom Mittelwert 8,6 °C aus dem Zeitraum 1971 - 2000 für die Jahre 1881 bis 2022. Dabei steht jeder Streifen für ein Jahr. Die Abweichung wird in Kelvin (1 K entspricht 1 °C) angegeben. Die Grafik wurde von Ed Hawkins entwickelt (Quelle: <https://showyourstripes.info/>, Datenquelle: Deutscher Wetterdienst).





Inhalt

Grußwort.....	4
Vorwort	6
Immer in Veränderung: Wetter und Klima	8
Klima, Klimavariabilität und Extreme	10
Klimamodelle	12
Klimawandel und Klimaprojektionen.....	14
Das Klima in Schleswig-Holstein heute und morgen.....	18
Temperatur	20
Niederschlag	24
Bodenwasserhaushalt im Dürrejahr 2018.....	28
Sonnenschein	34
Wind.....	36
Meeresspiegel.....	38
Meerestemperaturen	40
Extremereignisse	44
Phänologie	50
Arten und Lebensräume im Klimawandel	52
Wald im Klimawandel.....	56
Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima	60
Begriffskompass Klima.....	62
Präsenz in der Fläche.....	64
Weblinks	66
Impressum	67



Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser,

längst ist der Klimawandel auch in Schleswig-Holstein angekommen: Jahr für Jahr werden seine Auswirkungen und Folgen immer deutlicher. Wir müssen entschlossen und massiv gegen den Wandel unseres Klimas kämpfen und uns auf die nicht zu vermeidenden Folgen einstellen.

In den vorangegangenen zehntausend Jahren lag die Konzentration des Treibhausgases CO₂ in der Atmosphäre annähernd konstant bei etwa 280 ppm (parts per million, Teilchen pro Million). Mit dem Beginn der Industrialisierung zum Ende des 19. Jahrhunderts hat die Konzentration der Treibhausgase durch das Verbrennen von fossilen Energieträgern wie Erdöl, Kohle und Erdgas stark zugenommen. Die Konzentration des Treibhausgases CO₂ in der Atmosphäre hat 2022 den erschreckenden Wert von 420 ppm erreicht.

Neben den fraglos notwendigen politischen Veränderungen der Rahmenbedingungen kann jede und jeder mit seinem persönlichen Verhalten einen Beitrag leisten, um dem Überhitzen der Erde etwas entgegenzusetzen: Dazu gehört etwa die bewusste Entscheidung für ÖPNV oder Rad und ressourcenschonendere Konsumgewohnheiten.

Als Land zwischen Nord- und Ostsee hat der Meeresspiegelanstieg als Folge des Klimawandels hierzulande eine besondere Tragweite. Er konfrontiert die Küstenregionen mit ganz konkreten Gefahren. Die Sturmflut im Oktober 2023 hat gezeigt, dass auch an der sonst so ruhigen Ostsee der steigende Meeresspiegel und die sich ändernden klimatischen Bedingungen massive Auswirkungen haben.

Ein Zuviel an Wasser ist dabei genauso schädlich wie ein Zuwenig: Auch in Schleswig-Holstein wachsen die Risiken durch Hitze und Dürre weiter an. Große Temperaturanstiege und häufigere Dürreperioden – wie die im Jahr 2018 – werden tiefgreifende Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft haben.

Der vorliegende Bericht beschreibt eindrücklich den Klimawandel und dessen Auswirkungen in verschiedenen Schlüsselbereichen des Landes Schleswig-Holstein. Er ist Beleg dafür, wie wichtig ambitionierter Klimaschutz und Klimaanpassungsmaßnahmen sind – besonders für Schleswig-Holstein.

Es geht um nichts weniger als die Freiheit künftiger Generationen, ein gutes Leben führen zu können.

Tobias Goldschmidt

Minister für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein





Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende aktualisierte Auflage des Klimareports Schleswig-Holstein fasst das derzeitige Wissen über das Klima in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in kurzer und prägnanter Form zusammen. Damit haben Sie die Möglichkeit, sich einen fundierten Überblick über die vergangene und zukünftig zu erwartende Klimaentwicklung im nördlichsten Bundesland Deutschlands zu verschaffen.

In Norddeutschland ist der Klimawandel vielfältig sichtbar. 15 der 20 wärmsten Jahre seit Beginn der flächendeckend verfügbaren Klimadaten im Jahr 1881 traten in Schleswig-Holstein im 21. Jahrhundert auf. Die Jahre 2014 und 2020 waren mit einem Jahresmittel von 10,5 °C die bisher wärmsten Jahre und lagen damit mehr als zwei Grad über dem vieljährigen Jahresmittel des international gültigen Referenzzeitraums 1961 – 1990. Sogar gegenüber dem neuen, nochmals um ein Grad wärmeren, Vergleichszeitraum 1991 – 2020 liegen seit 2014 alle Jahre deutlich über der vieljährigen Durchschnittstemperatur. Im Sommer 2022 wurde in Grambek, 30 Kilometer südlich von Lübeck, mit 39,1 °C ein neuer Temperaturrekord in Schleswig-Holstein vom DWD gemessen.

Der in 2021/2022 veröffentlichte 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) lässt bis Ende dieses Jahrhunderts eine weitere deutliche Klimaerwärmung erwarten. Der Klimawandel stellt für jeden von uns eine bedeutende Herausforderung dar, zum Beispiel durch vermehrt auftretende Tage mit starker Wärmebelastung oder durch eine steigende Häufigkeit und Intensität von extremen Witterungsereignissen wie längeren Dürreperioden oder lokal auftretenden Starkniederschlagsereignissen.

Der internationale Rahmen für den Umgang mit dem Klimawandel wurde auf der UN-Klimakonferenz COP21 im Jahr 2015 in Paris vereinbart und zuletzt 2022 im ägyptischen Scharm el-Sheikh gemeinschaftlich bekräftigt. Eine Voraussetzung für die Umsetzung der von den Vertragsstaaten der UN Klimarahmenkonvention vereinbarten Ziele ist ein detailliertes Verständnis des aktuellen Standes der Klimaentwicklung. Um die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen sind umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Die Neuauflage des Klimareports Schleswig-Holstein stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Erarbeitung von regionalen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel und an seine erwarteten Folgen im nördlichsten deutschen Bundesland dar.

Tobias Fuchs

Vorstand Klima und Umwelt des Deutschen Wetterdienstes



Liebe Leserinnen und Leser,

im ersten Klimareport Schleswig-Holsteins aus dem Jahr 2017 haben der Deutsche Wetterdienst (DWD) und das damalige Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) eine zusammenfassende Grundlage über die regionalen Veränderungen des Klimas und die damit verbundenen Auswirkungen auf Schleswig-Holstein vorgelegt. Mit der aktualisierten Auflage gehen wir nicht nur auf die neuen Erkenntnisse der Klimaforschung ein, sondern wir erweitern den Blick auf die Folgen für unser Land. Deshalb stellt der Bericht den Bodenwasserhaushalt in Dürrejahre dar und betrachtet die Auswirkungen des Klimawandels im Wald sowie für Arten und Lebensräume. Die Darlegung der Klimadaten und die Beschreibung der in Schleswig-Holstein eingetretenen oder erwarteten Folgen machen noch einmal deutlich, dass der Klimawandel auch vor Schleswig-Holstein nicht Halt macht.

Unser aller Handeln muss davon geprägt sein, die nachteilige Beeinflussung von Faktoren, die den Klimawandel vorantreiben, zu verringern und zielgerichtet auch zu verhindern. Daneben werden wir aber auch Schritte zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels ergreifen müssen, denn als Bundesland zwischen den Meeren trifft uns der Anstieg des Meeresspiegels besonders.

Dies wird nicht nur Auswirkungen auf die Küstenregionen haben, sondern auch die Entwässerung zahlreicher tiefliegender Gebiete im Land betreffen. Der Bericht zeigt den Anstieg der Durchschnittstemperatur, gleichzeitig treten verlängerte Perioden der Trockenheit auf. Dies hat Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf das Pflanzenwachstum.

Die vielen Gesichtspunkte sind bei der Erarbeitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu berücksichtigen. Der Klimareport stellt den aktuellen Erkenntnisstand dar und bildet eine Grundlage bei der Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen.

Matthias Hoppe-Kossak

Direktor des Landesamtes für Umwelt Schleswig-Holstein

Immer in Veränderung: Wetter und Klima

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



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

Deutschland liegt klimatisch im Übergangsbereich zwischen dem maritimen Klima Westeuropas und dem kontinentalen Klima in Osteuropa. Damit gehört das Land laut effektiver Klimaklassifikation nach Wladimir Köppen zur warmgemäßigten Klimazone der mittleren Breiten. Das Klima Mitteleuropas wird geprägt durch den wechselnden Einfluss zwischen feuchten, gemäßigt temperierten Luftmassen und trockener, im Sommer heißer, im Winter kalter, kontinentaler Luft. Die großräumige Zirkulation bestimmt, welche Luftmasse dominiert. Dementsprechend können die Jahreszeiten in einzelnen Jahren sehr unterschiedlich ausfallen. Daraus resultiert die Variabilität des Klimas in Schleswig-Holstein. Den dominierenden Einfluss stellt die Nähe zum Meer dar. Die hohe Wärmekapazität des Wassers sorgt für relativ milde Winter und mäßig warme Sommer.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) beobachtet an vielen Orten das Wetter, teilweise seit mehr als 100 Jahren. Registriert werden Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenschein und vieles mehr. Die Beobachtungswerte variieren von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr. Neben diesen Variationen können durch die Aufzeichnungen der Messsysteme des DWD auch langfristige Änderungen erkannt werden. Demnach ist es in Schleswig-Holstein seit 1881 etwa 1,6 °C wärmer geworden. Gleichzeitig nahm die Anzahl der Frost- und Eistage ab und die der Sommertage und Heißen Tage zu.

Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 zugenommen. Dieses gilt insbesondere für den Herbst und den Winter. Im Jahr 2022 wurden im Flächenmittel etwa 750 Liter pro Quadratmeter (l/m^2) registriert. Die Niederschlagsmenge $1 l/m^2$ entspricht der Niederschlagshöhe 1 mm. Innerhalb der letzten 142 Jahre stieg die durchschnittliche Jahresmenge um $123 l/m^2$ an. Die Anzahl der Tage pro Jahr mit $10 l/m^2$ oder mehr hat sich seit 1951 bis 2022 um etwa zweieinhalb Tage erhöht.



Erfasst wird des Weiteren die Höhe des Meeresspiegels. Auch hier ist eine Änderung zu beobachten. Der Meeresspiegel ist in den letzten 100 Jahren um etwa 24 cm in der Deutschen Bucht und um etwa 14 bis 20 cm an der deutschen Ostseeküste gestiegen.

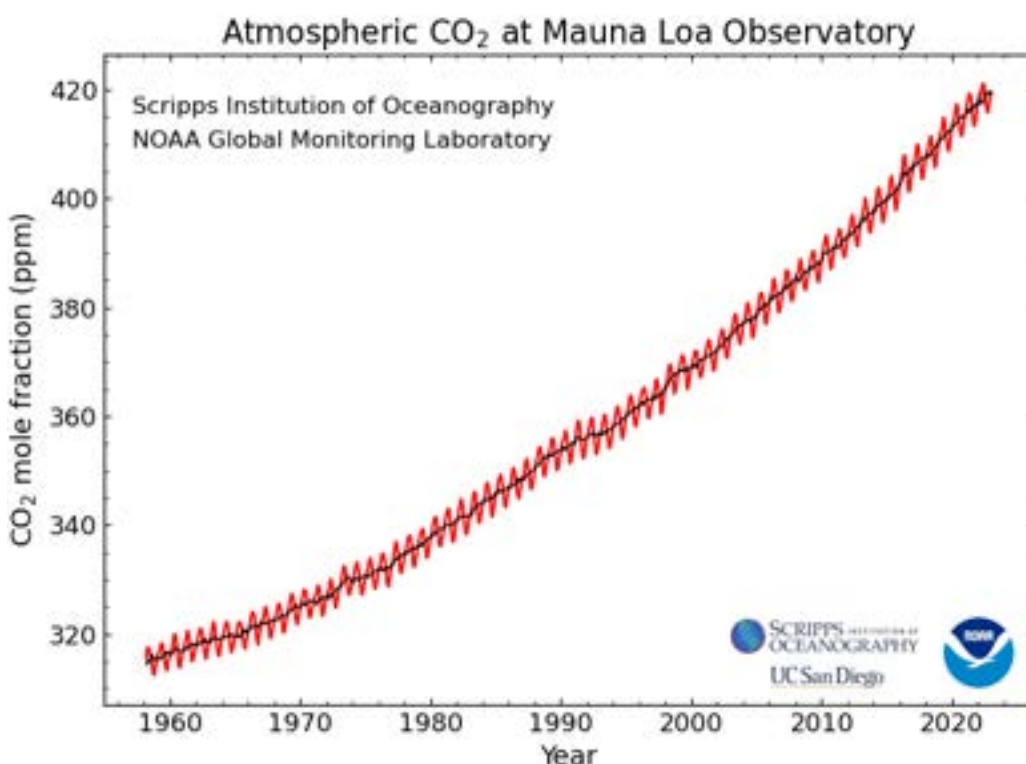
Hat der Mensch einen Einfluss auf das Klima?

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

Mit Hilfe von Klimamodellen haben Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen die Auswirkungen auf das globale und regionale Klima auf der Basis von Szenarien untersucht. Für Schleswig-Holstein ergibt sich je nach gewähltem Szenario eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 1 °C bis hin zu knapp 4 °C in den kommenden 80 Jahren. Eine Änderung von nur 1 °C ist laut den Klimamodellen nur bei deutlicher Reduktion der Emission von Treibhausgasen möglich. Bei weiterem Wirtschaftswachstum und weiterhin hohen Treibhausgasemissionen ist derzeit eine Änderung von 3 bis 4 °C zu erwarten. Damit wird die Anzahl der Frost- und Eistage weiter abnehmen, während die Zahl der Sommertage und heißen Tage deutlich zunehmen wird.

Im Zusammenhang mit der Temperaturzunahme werden sehr wahrscheinlich die jährlichen Niederschlagsmengen insgesamt weiter zunehmen. Auch die Anzahl der Tage mit mindestens 10 l/m² wird sich nach den Ergebnissen der Klimaprojektionen erhöhen.

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



◀ Mittlere Konzentration des atmosphärischen CO₂, gemessen am Mauna Loa Observatorium (Hawaii, USA). Die Daten bilden die weltweit längste Reihe direkter Kohlenstoffdioxidmessungen. 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 die Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschieden langen Zeiträumen ablaufen. Das Wetter beschreibt den kurzfristigen Zustand der Atmosphäre, die Witterung eine Phase von Wochen bis zu mehreren Monaten und das Klima die Zeitspanne von Jahrzehnten bis hin zu geologischen Zeitaltern.

Was ist Klima?

Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert „Klima“ wissenschaftlich präzise als „Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können“. „Klima“, vom altgriechischen Wort *klíma* für „ich neige“ stammend, spielt auf die Konstellation der Erde im Sonnensystem an, auf die Neigung der Erdachse, den variierenden Abstand unseres Planeten zur Sonne und den damit zusammenhängenden markanten Schwankungen der meteorologischen Bedingungen. Das Klima war in der Vergangenheit nie konstant. Aus der Erdgeschichte sind Kaltzeiten und Warmzeiten bekannt.

Das Klima ist auch immer auf einen Ort bezogen. Das Klima von Helgoland unterscheidet sich beispielsweise von dem von Lübeck. Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden entsprechend den Vorgaben der WMO Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert.

Klimavariabilität

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

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

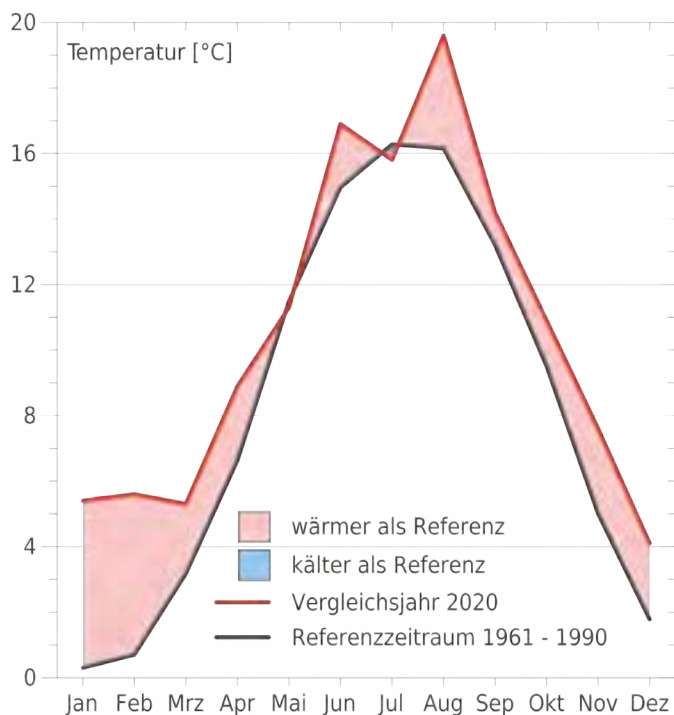


▲ Messfeld der Wetterstation Quickborn. Hier werden unter anderem Luft- und bodennahe Temperaturen sowie Niederschlag, Wind und der Bedeckungsgrad des Himmels gemessen.



Klimatrend

Von einem Klimatrend sprechen wir, wenn innerhalb einiger Jahrzehnte verstärkt eine Veränderung, z. B. zu häufigeren positiven Temperaturabweichungen, festzustellen ist oder bisher beobachtete Schwankungsbreiten betragsmäßig zunehmend überschritten werden. Die Änderungsrichtung kann durchaus kurzzeitig unterbrochen oder abgemildert sein. Entscheidend ist, dass die zu beobachtende Änderungsrichtung über einen langen Zeitraum anhält. Solche langfristigen Änderungen können natürliche Ursachen



▲ Monatsmitteltemperaturen in Schleswig-Holstein. 2020 war eines der wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf Mai und Juli wiesen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen gegenüber der Referenzperiode 1961 - 1990 auf (Datenbasis: Gebietsmittelwerte).

haben, wie beispielsweise 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 am Neujahrstag wären jedoch außergewöhnlich und somit ein Extremereignis.

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

2020 war in Schleswig-Holstein eines der wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf Mai und Juli wiesen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen auf als während der international gültigen Referenzperiode 1961 - 1990 (siehe Abbildung links unten), (Datenbasis: Gebietsmittelwerte).

▼ Auch im nördlichsten Bundesland ist Weinanbau längst möglich. Hier zu sehen in der Holsteinischen Schweiz nahe Plön.



Klimamodelle

Die beobachteten Klimaschwankungen und -trends der Vergangenheit einfach in die Zukunft zu übertragen ist im Hinblick auf den Klimawandel nicht sinnvoll. Zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklungen werden daher Klimamodelle genutzt. Sie dienen als computergestützte Werkzeuge zur vereinfachten Beschreibung von komplexen Erscheinungen, die in der Natur ablaufen.



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

Für die Modellierung werden die Atmosphäre und die Ozeane der Erde mit einem dreidimensionalen Gitternetz überzogen. Die Auflösung (Gitterpunktabstand) globaler Klimamodelle ist sehr grob, damit sie innerhalb einer akzeptablen Rechenzeit über viele Jahre gerechnet werden können. Obwohl diese Modelle die grundlegende großräumige Variabilität des Klimas beschreiben, reicht die Auflösung nicht aus, um Unterschiede in den Ausprägungen des Klimawandels

einer bestimmten Region der Erde (z. B. Deutschland) detailliert darzustellen. Hierfür werden regionale Klimamodelle eingesetzt, deren Gitterpunkte ein erheblich engmaschigeres Netz bilden als diejenigen der globalen Klimamodelle. Die regionalen Modelle werden an den seitlichen Rändern von den globalen Modellen gesteuert.

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

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

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



▲ Globales Klimamodell (sehr grob) $1,875^\circ$ (ca. 200 km)



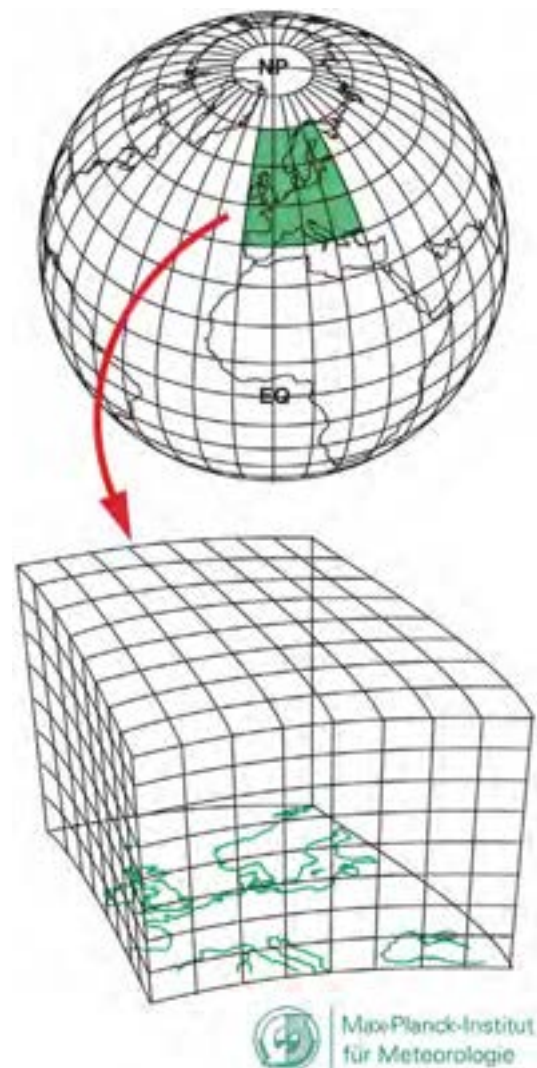
▲ Regionales Klimamodell (grob) $0,44^\circ$ (ca. 50 km)



▲ Regionales Klimamodell (fein) $0,11^\circ$ (ca. 12,5 km)

Viele Modelle, viele Ergebnisse

Weltweit werden von einer Vielzahl von Forschungsgruppen Klimamodelle mehr oder weniger unabhängig voneinander entwickelt. Einzelne Modellkomponenten werden dadurch unterschiedlich beschrieben, was wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Ursache hierfür sind die für die Entwicklung eines Modells notwendigen vereinfachten Grundannahmen gegenüber den in der Natur ablaufenden Prozessen. Die vorhandene Bandbreite des Ensembles (entsprechend einer Gruppe von Klimaprojektionen) ist ein wichtiger Hinweis auf die Güte des Verständnisses der unterschiedlichen Wechselwirkungen auf der Erde. Je größer die Bandbreite ist, desto vorsichtiger sollten Aussagen zum Beispiel über beschriebene Änderungssignale formuliert werden.



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

Klimawandel und Klimaprojektionen

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



Klimafaktor Mensch

Der Mensch wirkt auf vielfältige Weise auf das Klima ein. Wesentlich sind zwei Bereiche: Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen unter anderem große Mengen an Kohlenstoffdioxid, das direkt in die Atmosphäre entweicht. Durch Abholzung, Aufforstung und Versiegelung verändert der Mensch die Landnutzung auf der regionalen und globalen Skala. Nur unter der gemeinsamen Berücksichtigung der natürlichen Einflüsse sowie derjenigen, die auf den Menschen zurückzuführen sind, können die beobachteten Änderungen des globalen Klimas erklärt werden.

Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte im Detail zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einfluss-

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

Die Szenarien werden RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 genannt. Hierbei steht die jeweilige Zahl (z. B. 8.5) für die „zusätzliche“ der Erde zur Verfügung stehende Energie von $8,5 \text{ W/m}^2$ im Jahr 2100 gegenüber der solaren Einstrahlung in den Jahren 1861 - 1880. Dieser Zeitraum repräsentiert den Zustand des Klimas, bevor der Mensch wesentlichen Einfluss auf die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre genommen hat (nachfolgend vorindustrielles Niveau genannt). Für den 6. Sachstandsbericht wurden die vorhandenen Szenarien weiterentwickelt. Die möglichen ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs), die zu den unterschiedlichen RCP-Pfaden führen könnten, werden mit sogenannten Narrativen beschrieben. Diese Narrative beinhalten die sozioökonomischen, demographischen, technologischen, politischen, institutionellen und Lebensstil-Trends. Genutzt werden fünf Entwicklungspfade (SSP1 bis SSP5).

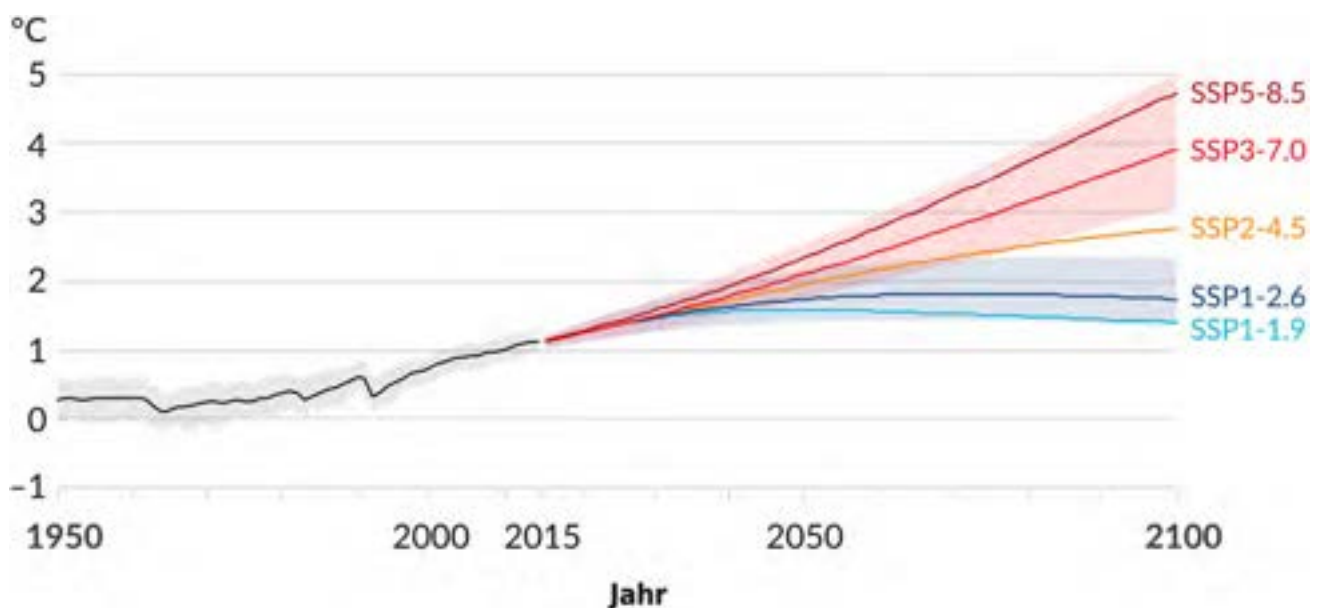
Diese SSPs beschreiben einen nachhaltigen (SSP1) und einen mittleren (SSP2) Weg sowie einen Weg regionaler Rivalitäten (SSP3) und einen fossiler Entwicklung (SSP5). Die beiden Szenarienprojekte wurden so konzipiert, dass sie sich gegenseitig ergänzen. Die RCPs legen Pfade für die Treibhausgaskonzentrationen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



▲ Blick von der Lübecker Bucht aus ins Landesinnere. Im Vordergrund liegt die über 300 Meter lange Seebrücke von Kellenhusen.

SSPs hingegen geben die Bühne vor, auf der Emissionsreduzierungen erreicht oder nicht erreicht werden könnten. Ein Klimaszenario ist daher immer eine Kombination aus einem RCP und einem SSP.

Beispiele für diese Kombinationen sind SSP1-1.9 oder SSP5-8.5. Dabei kann meist mehr als ein SSP zu einer Entwicklung eines RCP führen. Regionale Datensätze für die SSP- und RCP-Szenarien liegen aktuell noch zu wenige vor. Daher werden in diesem Bericht die regionalen Ergebnisse auf Basis der RCPs vorgestellt.



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

In Kombination mit den RCPs werden im 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates fünf dieser Szenarien mit höherer Priorität betrachtet: SSP1-1.9 und SSP1-2.6 sind Szenarien, welche einen Pfad wählen, der die globale Erwärmung entsprechend des Pariser Klimaabkommens bis zum Jahr 2100 auf unter 1,5 °C bzw. 2 °C über dem vorindustriellen Niveau begrenzt. Die Szenarien SSP2-4.5 und SSP3-7.0 beschreiben unterschiedliche, moderate Emissionswege. Die stärkste Beeinflussung durch den Menschen wird durch das SSP5-8.5-Szenario dargestellt. Hier wird davon ausgegangen, dass jeder weitere Gewinn an Lebensstandard durch die Nutzung fossiler Energieträger erreicht wird.

Wie entwickelt sich unsere Emissions-Zukunft?

In diesem Klimareport werden Ergebnisse von Simulationsrechnungen für Schleswig-Holstein auf Basis eines Klimaschutz-Szenarios (RCP2.6) und eines Weiter-wie-bisher-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 Niveau beträgt. Dafür wird ein Szenarien-Verlauf angenommen, der mit einer sehr starken und sehr schnellen Reduktion der Emission von Treibhausgasen gegenüber dem heutigen Zustand verbunden ist. Der Höchstwert des Strahlungsantriebes wird vor dem



▲ Schnee auf Helgoland. In Zukunft noch seltener?

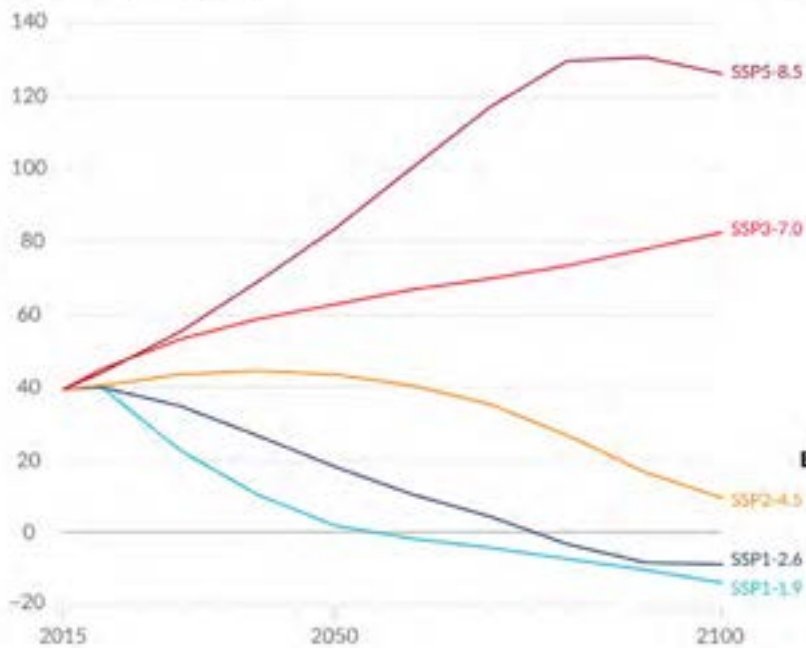
Jahr 2050 mit 3,0 W/m² erreicht. Danach sinkt er kontinuierlich auf 2,6 W/m² im Jahr 2100 (siehe Abbildung zu den jährlichen Emissionen). Hierzu ist ein Wandel zu einer Welt notwendig, deren Energieversorgung nicht mehr auf der Verbrennung von fossilen Kohlenstoffvorräten basiert. Noch vor dem Jahr 2080 dürfen keine wesentlichen Emissionen von Treibhausgasen mehr vorhanden sein (Null-Emission).

Das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) beschreibt eine Welt, in der die Energieversorgung im Wesentlichen auf der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte beruht. Der Ausstoß von Treibhausgasen wird

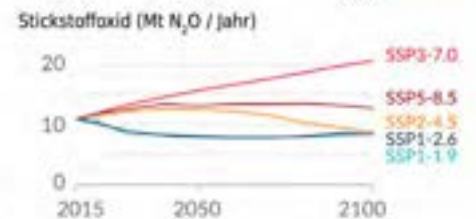
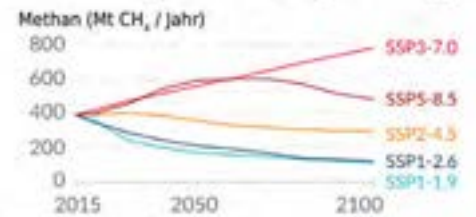
▼ Der Südstrand der Insel Fehmarn ist nicht nur im Sommer ein beliebtes Touristenziel. Auch hier werden im Zuge des Klimawandels weiter steigende Temperaturen erwartet.



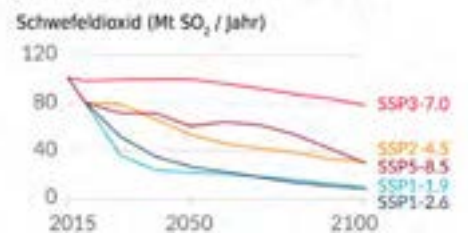
Kohlendioxid (Gt CO₂ / Jahr)



Ausgewählte Beiträge von Nicht-CO₂-Treibhausgasen



Ein Luftschadstoff- und Aerosolbeitrag



▲ Jährliche Emissionen über den Zeitraum 2015 bis 2100. Dargestellt sind die Emissionsverläufe für Kohlendioxid (CO₂, Gt CO₂ pro Jahr, linke Seite), sowie für Methan (CH₄, Mt CH₄ pro Jahr, rechte Seite oben) und Stickstoffoxide (N₂O, Mt N₂O pro Jahr, rechte Seite Mitte) und Schwefeldioxid (SO₂, Mt SO₂ pro Jahr, rechte Seite unten) (Quelle: IPCC AR6 Technical Summary, 2021, Fig. TS.4).

sich gegenüber heute mit einem stetigen Anstieg des Strahlungsantriebes bis hin zum Jahr 2100 erhöhen.

Zu Vergleichszwecken wird häufig ein weiteres Szenario erwähnt, das SRES-Szenario A1B. Es beschreibt eine Welt mit starkem ökonomischem Wachstum und einer Bevölkerungszunahme bis zur Mitte des Jahrhunderts sowie einem Rückgang danach. Auf diesem Szenario bauen die Klimaprojektionen des 4. Sachstandsberichts des IPCC auf. Ein Teil der in den letzten Jahren veröffentlichten Publikationen zum Klimawandel basiert auf diesem Szenario.

Was wäre wenn? - Klimaprojektionen

Wird ein globales Klimamodell dazu genutzt, den möglichen Klimawandel auf Basis eines Szenarios zu berechnen, so erfolgt das im Rahmen einer Klimaprojektion. Eine Klimaprojektion darf nicht mit einer Vorhersage verwechselt werden. Sie ist eine „Was wäre wenn“-Rechnung auf der Basis des gewählten Szenarios. Die Klimaprojektionen für die verschiedenen Szenarien helfen, die zu erwartenden Klimaveränderungen in eine Bandbreite einzuordnen, zum Beispiel durch die Frage: 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 32 Klimaprojektionen verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen. Um den Unterschied zwischen dem heutigen und einem zukünftigen Zustand zu berechnen, werden jeweils zwei 30-Jahres-Zeiträume genutzt. Für jeden Zeitraum wird ein mittlerer Zustand berechnet. Als Bezugszeitraum für das beobachtete Klima dienen die Jahre 1971 bis 2000 aus den Modellen. Für die Zukunft werden zwei Zeiträume analysiert. Sie werden im Weiteren kurzfristiger und langfristiger Planungshorizont genannt. Der kurzfristige Planungshorizont beschreibt den mittleren Zustand der Jahre 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 Schleswig-Holstein heute und morgen

In Deutschland finden wir unterschiedliche Klimaverhältnisse vor. Diese werden einerseits bestimmt durch den Übergang vom maritimen zum kontinentalen Einfluss und andererseits durch die naturräumlichen Strukturen, die im Wesentlichen durch das Relief geprägt sind. Für Deutschland wurden insgesamt zwölf klimatisch unterschiedliche Modellregionen definiert. Für jede Modellregion wurden die Klimaparameter bestimmt und Klimaprojektionen durchgeführt. Nähere Informationen dazu gibt es im Nationalen Klimareport des DWD.



Schleswig-Holstein ist ein Teil der Modellregion „Nordwestdeutsches Tiefland“, die sich von den Küsten bis zu den Mittelgebirgen erstreckt. Sie ist von der Meeresnähe und der niedrigen Geländehöhe geprägt. Die Klimaverhältnisse in einer Region lassen sich am besten durch Flächenmittelwerte charakterisieren.

▼ Lübeck im Winter.



Mittels mathematischer Methoden werden dafür die Messwerte der Stationen innerhalb dieses Gebietes zu Gebietsmittelwerten flächig interpoliert. Die folgenden Klimadiagramme zeigen die Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der international gültigen Referenzperiode 1961 – 1990

▼ Kartenausschnitt der Modellregion Schleswig-Holstein und Hamburg und Lage der Hauptstadt Kiel sowie der Orte Lübeck und List.

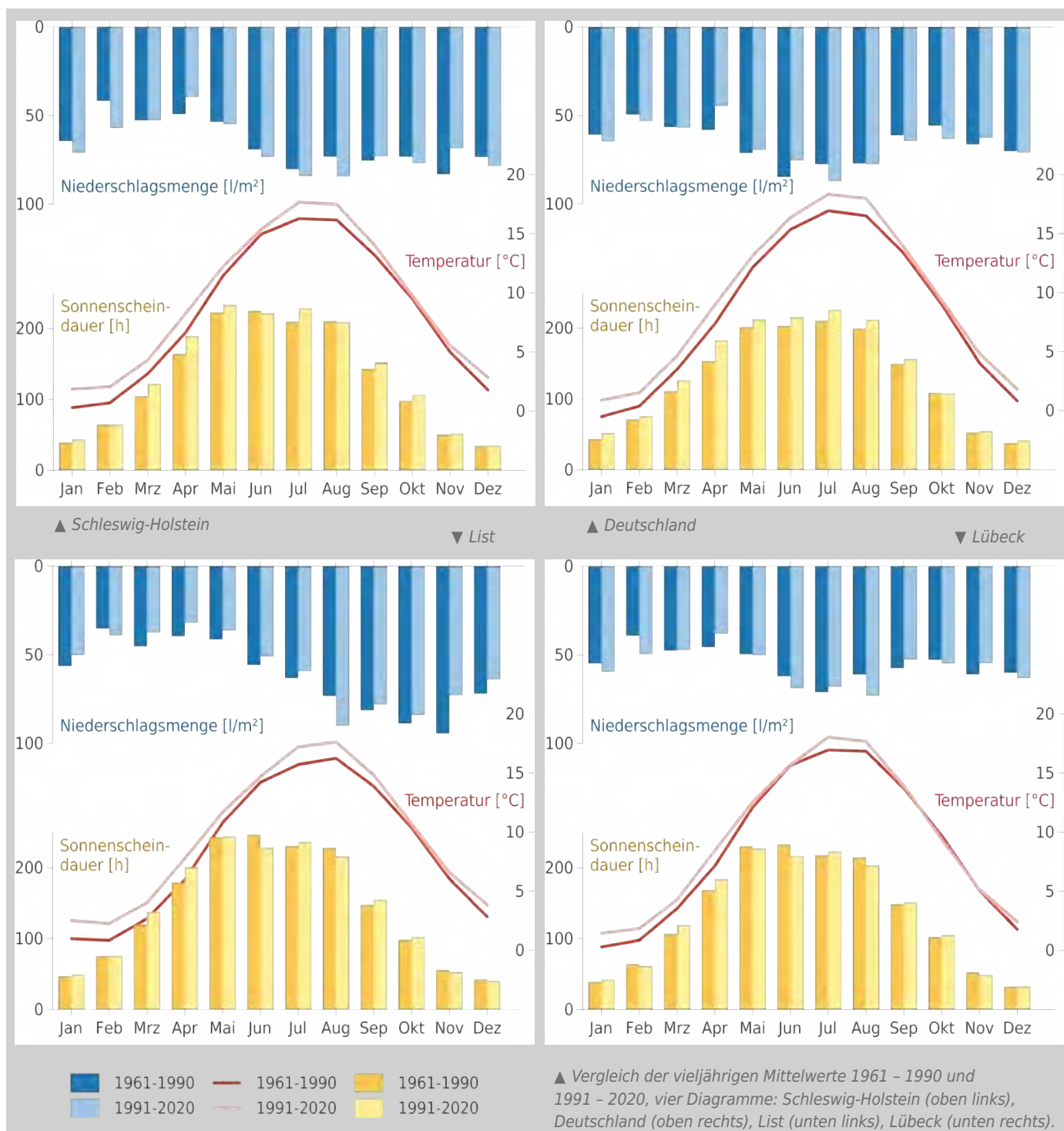


sowie dem aktuellen 30-Jahreszeitraum 1991 - 2020 im Vergleich. Auf dieser Seite sind Diagramme für Schleswig-Holstein und für Deutschland denen von zwei Orten in Schleswig-Holstein gegenübergestellt.

Selbstverständlich kann das Klima einzelner Orte in einer Region sehr unterschiedlich sein und vom Flächenmittel abweichen. Dies ist gut zu sehen an den Klimadiagrammen der Orte List und Lübeck. Während List aufgrund der Lage an der Nordsee höhere Niederschläge verzeichnet, macht sich in Lübeck ein leichter

kontinentaler Einfluss unter anderem durch niedrigere Wintertemperaturen bemerkbar.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Veränderungen des Klimas in Schleswig-Holstein in der Vergangenheit und mögliche zukünftige Entwicklungen beleuchtet. In diesem Bericht werden Projektionen für das Gebiet „Schleswig-Holstein mit Hamburg“ dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden u. a. die Parameter Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer betrachtet.



Temperatur

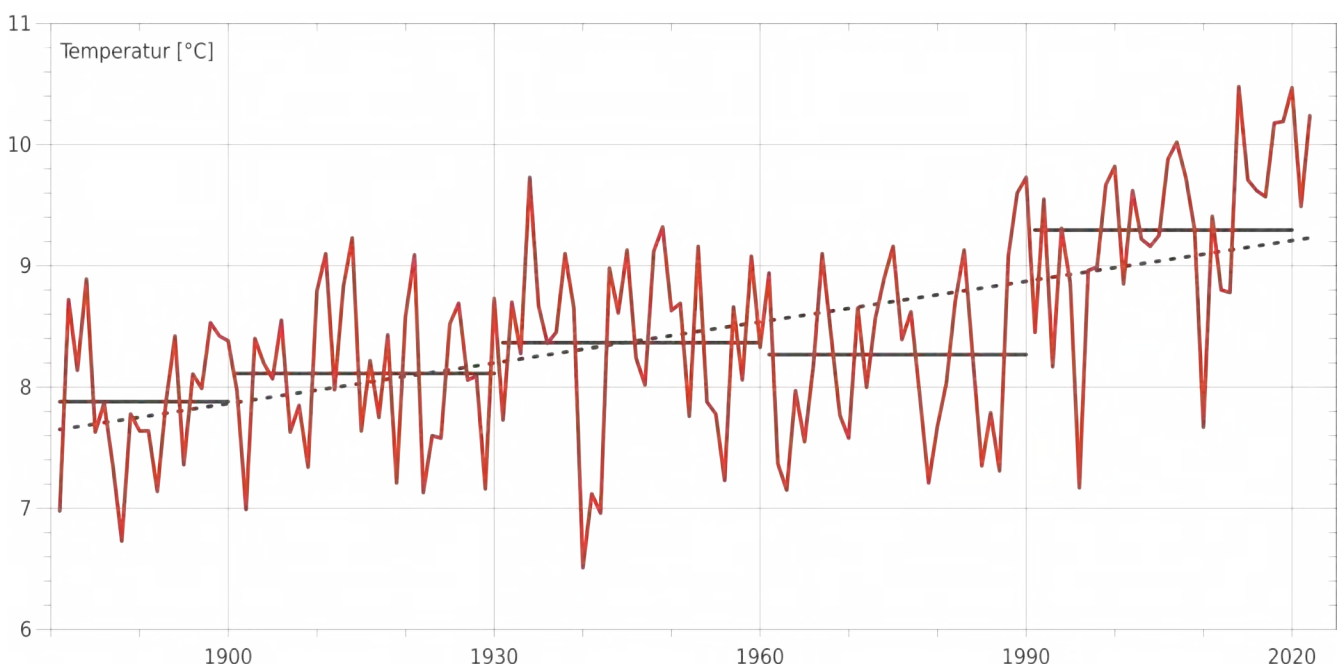
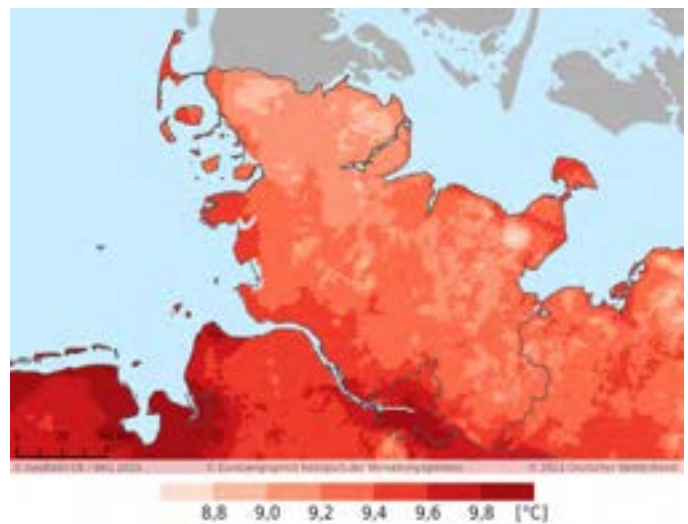
Die Jahresdurchschnittstemperatur in Schleswig-Holstein beträgt 9,3 °C für die Referenzperiode 1991 – 2020. Höhere Durchschnittstemperaturen gibt es entlang der Westküste, der Elbe und im Küstenbereich von Ostholstein, kühlere Bedingungen herrschen auf der Geest und im Hügelland.

Veränderungen der Lufttemperatur seit 1881

In Schleswig-Holstein ist das Jahresmittel der Lufttemperatur seit 1881 bis heute um 1,6 °C gestiegen. Auch der vieljährige Mittelwert von 8,3 °C der Referenzperiode 1961 – 1990 ist mittlerweile auf 9,3 °C im aktuellen 30-Jahreszeitraum 1991 – 2020 angestiegen.

Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis 1910 blieb die Temperatur im Wesentlichen konstant (siehe Abbildung unten). Im Zeitraum 1910 bis 1950 und insbesondere im Zeitraum seit Mitte der 1980er Jahre ist ein verstärkter Anstieg der Temperatur zu beobachten. 2014 und 2020 waren mit 10,5 °C die bisher wärmsten Jahre in Schleswig-Holstein. In der Rangfolge der zwölf wärmsten Jahre stammen nur zwei Jahre aus der Zeit vor 2000. Die Klimavariabilität und der allmähliche Temperaturanstieg werden besonders deutlich, wenn die Jahresmittelwerte zu Dekadenmittelwerten zusammengefasst werden. Die Abweichung der Dekaden-

▼ Jahresmitteltemperatur in Schleswig-Holstein im Zeitraum 1991 – 2020 als Flächendarstellung der Rasterwerte (1 km x 1 km).



▲ Es ist wärmer geworden in Schleswig-Holstein: Jahresmittelwerte der Temperatur (Gebietsmittelwerte) von 1881 – 2022 (rote Kurve). Die gestrichelte Linie zeigt den linearen Trend an und die schwarzen horizontalen Linien die 30-jährigen Mittelwerte.

werte vom frühindustriellen Referenzzeitraum 1881 - 1910 zeigt die 1960er Jahre als letzte kühle Dekade, danach ist jede Dekade deutlich wärmer als die vorige. In Schleswig-Holstein war es in der letzten Dekade 2011 - 2020 1,8 °C wärmer als zu Beginn der Aufzeichnungen (siehe Abbildung Seite 22).

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

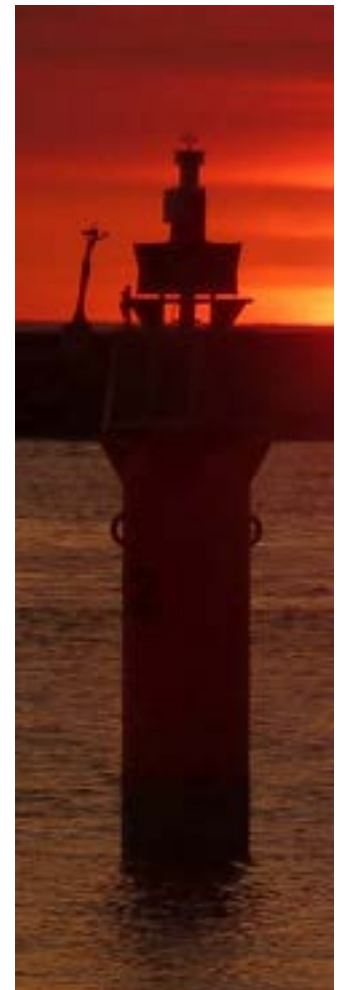
Ein Sommertag liegt dann vor, wenn die höchste Temperatur des Tages 25 °C erreicht bzw. überschreitet. Die Anzahl der Sommertage als 30-jähriges Flächenmittel stieg in Schleswig-Holstein von 15,1 Tagen in der Referenzperiode 1961 - 1990 auf 22,5 im Zeitraum 1991 - 2020, also um 7,4 Tage. Deutschlandweit liegen die Vergleichswerte bei 27,3 bzw. 39,8 Tagen, was einem Anstieg von 12,5 Tagen entspricht. Die geringere Anzahl in Schleswig-Holstein ist der nördlichen Lage, überdies zwischen zwei Meeren, geschuldet. Der lineare Trend der Sommertage von 1951 bis 2022 zeigt für Schleswig-Holstein ein Plus von 15 Tagen. Die höchste Anzahl wurde 2018 mit 46 Sommertagen registriert.

Die ausgleichend auf die Temperaturen wirkende Meeresnähe zeigt sich auch in der geringeren Anzahl

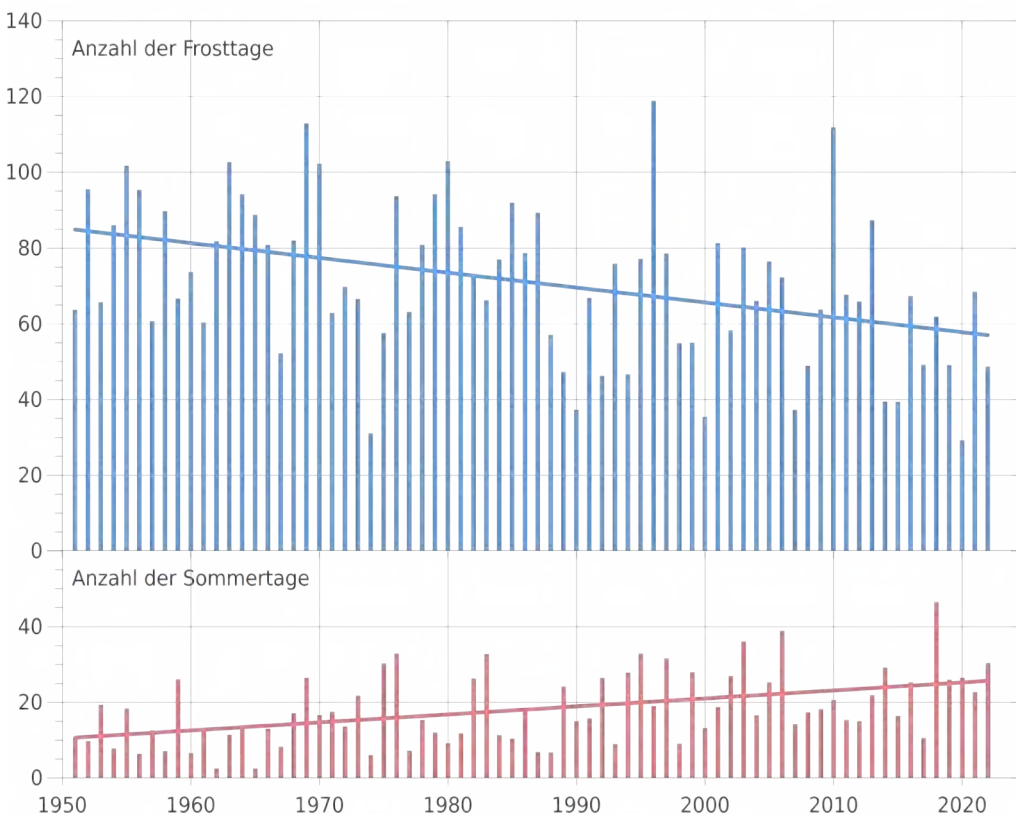
von Frosttagen im nördlichsten Bundesland im Vergleich zu Deutschland. Ein Tag wird zu einem Frosttag, wenn die tägliche Tiefsttemperatur 0 °C unterschreitet. So zählt Schleswig-Holstein für die Referenzperiode 1961 - 1990 im Mittel 76 Frosttage im Jahr, Deutschland dagegen 91. Die Anzahl der Frosttage ging in Schleswig-Holstein im Zeitraum 1991 - 2020 mit 12,4 Tagen stärker zurück als mit 9,5 Tagen deutschlandweit. Im Zeitraum 1951 bis 2022 ist im Trend ein Rückgang um 27,2 Frosttage für Schleswig-Holstein festzustellen.

Jahr	Temperatur [°C]
2014	10,48
2020	10,46
2022	10,24
2019	10,18
2018	10,18
2007	10,04
2006	9,88
2000	9,81
2008	9,74
1990	9,73
2015	9,71
1934	9,70

◀ Die zwölf wärmsten Jahre in Schleswig-Holstein seit 1881 (Gebietsmittelwerte).



◀ Die Zahl der Sommertage pro Jahr nimmt in Schleswig-Holstein zu, Frosttage werden seltener. Die Darstellung zeigt die Jahreswerte (Gebietsmittelwerte) von 1951 - 2022 sowie den jeweiligen linearen Trend.





Zukunft

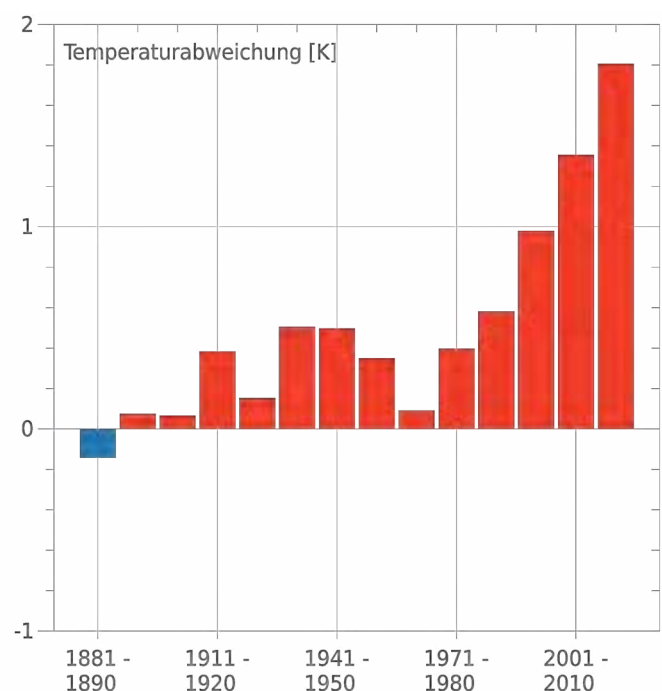
Ein weiterer Anstieg der Temperatur ist in Schleswig-Holstein zu erwarten. Für den kurzfristigen Planungshorizont (2031 - 2060) beträgt dieser Anstieg etwa 1,2 bis 1,9 °C, bezogen auf den Vergleichszeitraum 1971 - 2000. Der Unterschied zwischen den durch die beiden Szenarien (Klimaschutz-Szenario und Weiter-wie-Bisher-Szenario) projizierten Änderungen ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse für beide Szenarien liegt zwischen 0,7 und 2,5 °C.

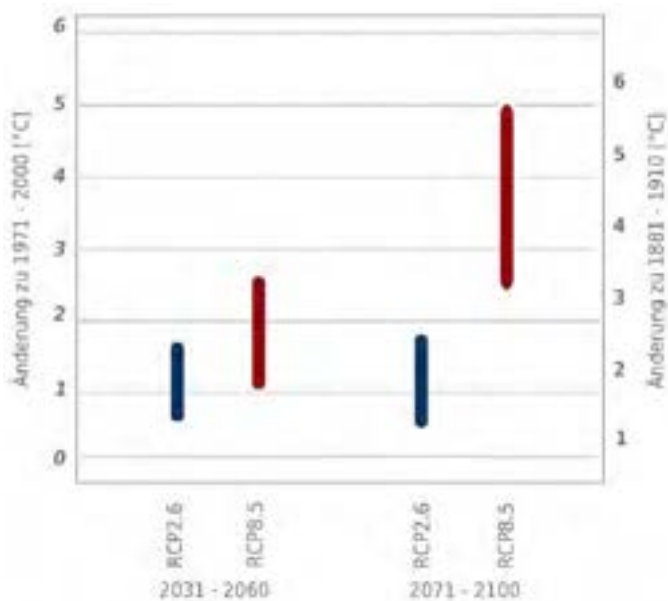
Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont (2071 - 2100) wird stark vom gewählten Szenario bestimmt. Basierend auf dem Klimaschutz-Szenario ist eine Erhöhung um 1,2 °C zu erwarten. Erreicht wird die Stabilisierung auf dem Niveau des kurzfristigen Planungshorizontes durch die sehr starke Reduktion der Treibhausgasemissionen innerhalb der Szenariendefinition. Die Änderung im Vergleich zum frühindustriellen Zustand beträgt damit allerdings bereits 2,0 °C. Unter den Bedingungen des Weiter-wie-bisher-Szenarios wird eine Erwärmung um etwa 3,6 °C erwartet, bezogen auf den Zeitraum 1971 - 2000. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,5 und 4,9 °C.

Die vorliegenden Ergebnisse des Weiter-wie-bisher-

Szenarios entsprechen in etwa den Ergebnissen der vorhandenen Klimaprojektionen auf der Basis des SRES-Szenarios A1B.

▼ Temperaturanstieg in Schleswig-Holstein: Abweichungen der Dekadenmittelwerte der Temperatur (Gebietsmittelwerte) zum Referenzzeitraum 1881 - 1910.





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

	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	2031-2060 (RCP2.6)	2031-2060 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	7,1	7,5	8,0	8,3	0,8	1,6	1,0	3,3
Sommer	15,8	16,1	16,5	16,8	1,1	1,9	1,1	3,4
Herbst	9,2	9,1	9,4	9,8	1,4	2,2	1,4	3,9
Winter	0,9	1,6	1,7	2,3	1,0	2,0	1,1	3,8
Jahr	8,3	8,6	8,9	9,3	1,2	1,9	1,2	3,6



Jahreszeitliche Unterschiede

Die Erwärmung ist in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Winters. Hier fällt sie etwas größer aus. Mit der Temperaturzunahme gehen auch markante Änderungen der Temperatur-extreme einher. Mit tiefen Temperaturen verbundene Extreme nehmen stark ab und mit Wärme verbundene Extreme nehmen stark zu. Dadurch steigt in Schleswig-Holstein die Wahrscheinlichkeit von Hitze-wellen. Die Andauer und die Stärke von Frostperioden gehen zurück.

▲ Jahreszeitliche und jährliche Mittelwerte der Lufttemperatur [°C] in Schleswig-Holstein für vier vieljährige historische Zeiträume (Spalten 1 – 4) sowie zukünftige Änderungen der Lufttemperatur [K] für jeweils zwei vieljährige Zeiträume für zwei Projektionsszenarien (Schleswig-Holstein mit Hamburg) (Spalten 5 – 8), bezogen auf den Referenzzeit-raum 1971 – 2000,.

FAKTEN:

Beobachtung

- Deutlicher Trend der Erwärmung in Schleswig-Holstein
- Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,6 °C seit 1881
- Änderung der Extreme: Mehr Sommertage und Heiße Tage, weniger Frost- und Eistage

Kurzfristiger Planungshorizont

- Landesweit Erwärmung um im Mittel 1,2 bis 1,9 °C

Langfristiger Planungshorizont

- Beim Klimaschutz-Szenario Stabilisierung auf eine Erwärmung um 1,2 °C
- Beim Weiter-wie-bisher-Szenario Erwärmung um im Mittel 3,6 °C



Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung in Schleswig-Holstein wird bestimmt durch den Wechsel atlantischer und kontinental geprägter Luftmassen. Die geringsten Niederschlagsmengen im Jahresverlauf werden im äußersten Osten, entlang einer Linie von Fehmarn über Lübeck bis Lauenburg an der Elbe beobachtet. Besonders viel Niederschlag fällt entlang der Geest.

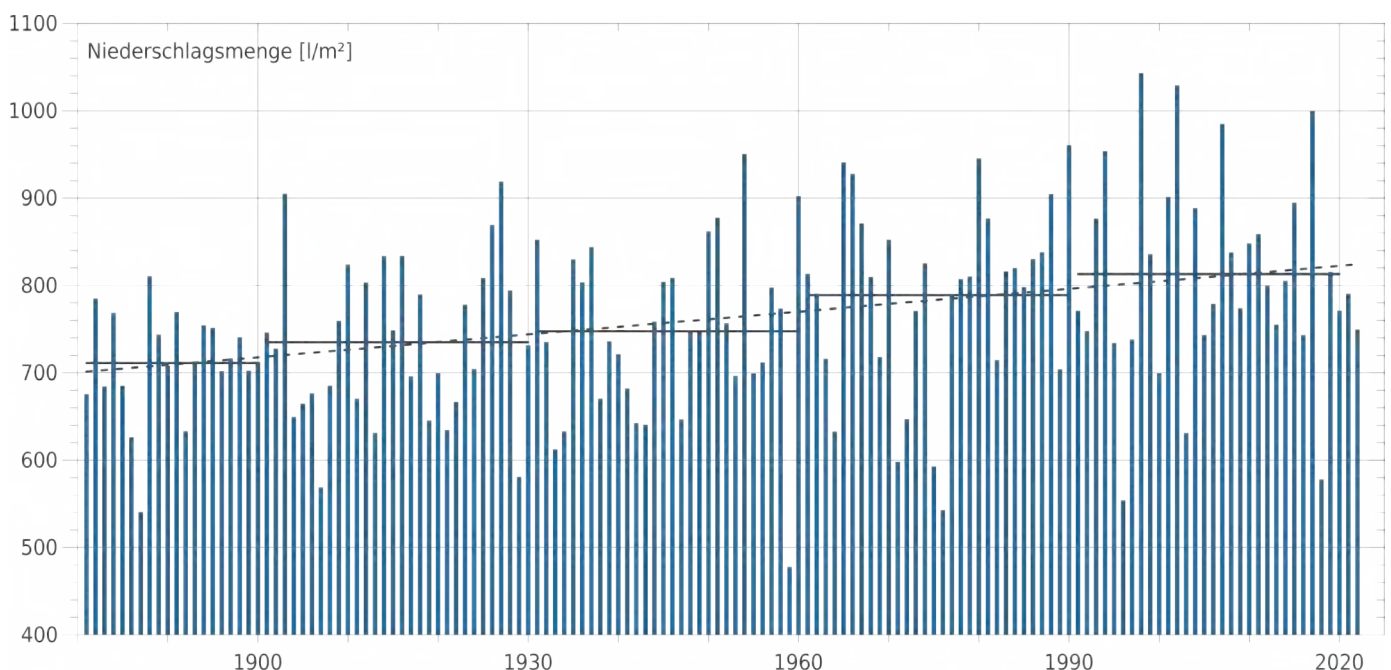
Veränderungen in der Niederschlagsmenge seit 1881

Der Niederschlag ist sowohl räumlich als auch über einen entsprechenden Zeitraum eine sehr veränderliche Größe. Das Gebietsmittel der Jahresmenge des Niederschlags für Schleswig-Holstein zeigt seit 1881 einen ansteigenden Trend, jedoch auch eine große Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr. Das zeigen die Extremwerte: Während die größte Menge in der Fläche 1998 bei 1043 l/m² lag, wurde im Jahr 1959 mit 478 l/m² weniger als die Hälfte von 1998 und damit zugleich der niedrigste Wert ermittelt. Das 30-jährige Mittel von 1961 - 1990 beträgt rund 789 l/m². Das Klimamittel für den aktuellen Referenzzeitraum 1991 - 2020 liegt mit gut 813 l/m² um etwa 3 % höher.

Im Trend zeigt sich für das nördlichste Bundesland seit 1881 bis heute ein Zuwachs in der Jahresmenge



▼ Es ist nasser geworden in Schleswig-Holstein: Zeitreihe der Jahresniederschlagsmenge in l/m² (Gebietsmittelwerte) von 1881 bis 2022. Die gestrichelte Linie zeigt den linearen Trend an und die schwarzen horizontalen Linien die 30-jährigen Mittelwerte.



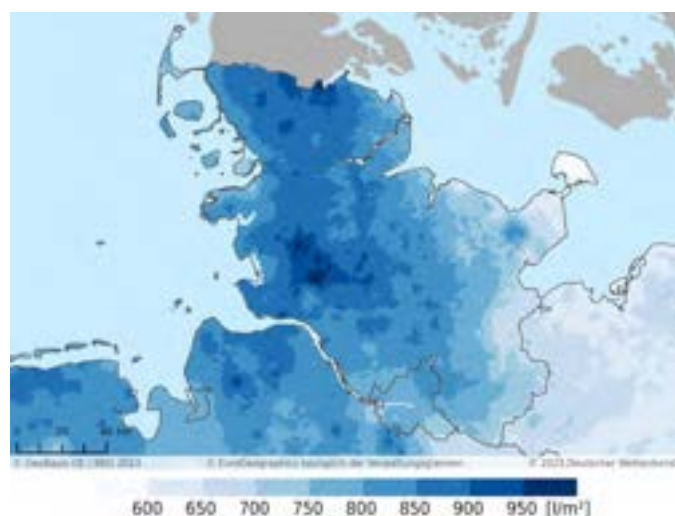


von gut 123 l/m^2 . Auf die Jahreszeiten bezogen tragen insbesondere der Winter und der Herbst zu dieser Zunahme bei, im Einzelnen etwa $+67 \text{ l/m}^2$ im Winter, $+30 \text{ l/m}^2$ im Herbst, $+12 \text{ l/m}^2$ im Sommer und $+14 \text{ l/m}^2$ im Frühjahr.

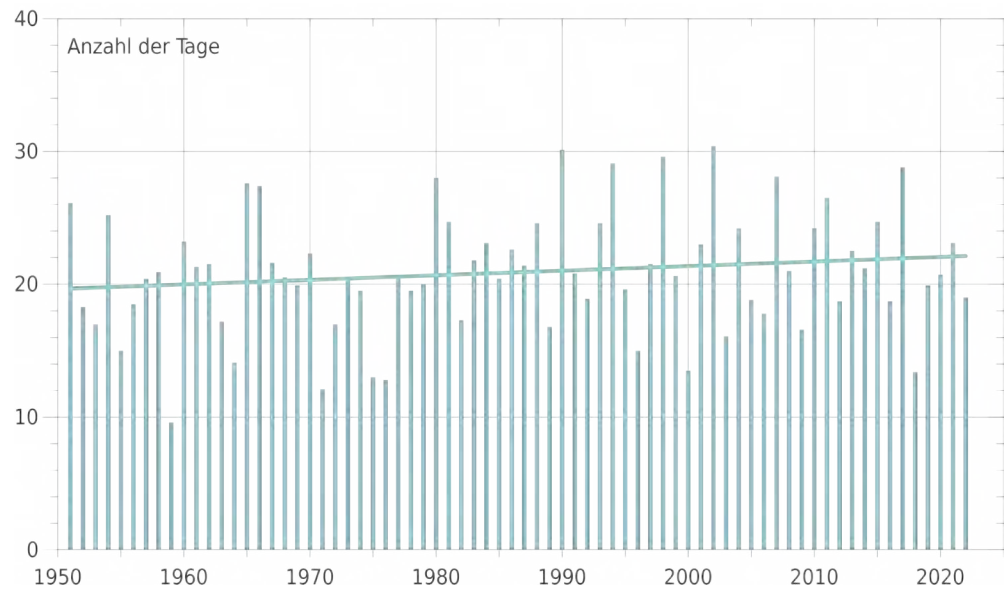
Die Niederschlagsmenge von Tag zu Tag zeigt sich sehr variabel zwischen den beiden Extremen zu wenig und zu viel. Große Niederschlagsmengen können durch den Kenntag mit einer Menge von mindestens 10 l/m^2 Niederschlag beschrieben werden. Im Mittel gab es im Zeitraum seit 1951 in Schleswig-Holstein an 21 Tagen pro Jahr eine Niederschlagsmenge von mindestens 10 l/m^2 . Die Anzahl zeigt große jährliche Schwankungen auf: Das Minimum von zehn Tagen trat 1959 auf, die größte Anzahl mit je 30 Tagen pro Jahr wurde 2002 und 1990 verzeichnet. Der lineare Trend weist eine Zunahme von 2,5 Tagen pro Jahr für den Zeitraum seit 1951 auf.

Eine Auswertung über Starkniederschlagsmengen bei einer Niederschlagsdauer von 15 Minuten und einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren deutet statistisch für Schleswig-Holstein bei einem Vergleich der Zeiträume 1951 - 1980 gegenüber 1991 - 2020 ebenfalls auf eine leichte Zunahme hin. Starkniederschläge, ins-

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



▲ Durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge in Schleswig-Holstein im Zeitraum 1991 - 2020 als Flächendarstellung der Rasterwerte ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$).



▲ Anzahl der Tage mit mindestens 10 l/m² Niederschlag (Gebietsmittelwerte) von 1951 bis 2022.

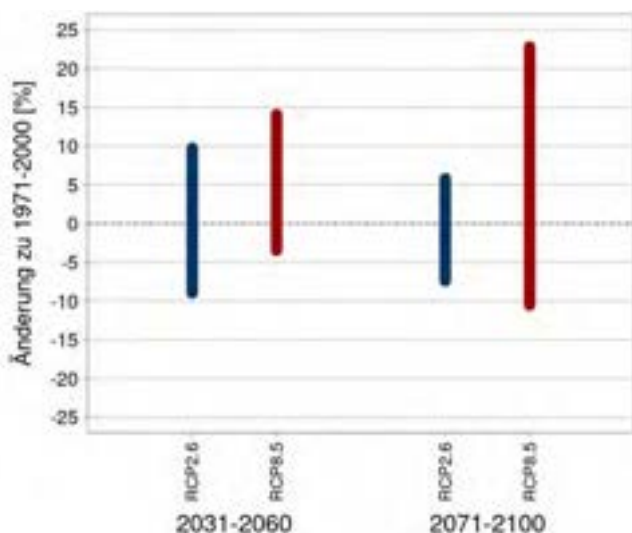
Zukunft

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahresmenge des Niederschlags im kurzfristigen Planungshorizont (2031 - 2060) ist für Schleswig-Holstein nicht zu erwarten. Berechnet wird eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags von 4 bis 6 %. Der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen -9 % und +14 % Änderung. 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 Schleswig-Holstein mit einer Zunahme des

Jahresniederschlags um 9 % beim Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) zu rechnen. Beim Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) zeigt sich keine Änderung im Jahresniederschlag.

Bezüglich der Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 10 l/m² pro Tag ist sowohl für den kurzfristigen Planungshorizont als auch für den langfristigen Planungshorizont mit einer Zunahme zu rechnen. Ein weniger ausgeprägter Anstieg wird für die Tage mit Niederschlag von 20 l/m² und mehr projiziert. Jedoch ist bei Starkniederschlägen die Bandbreite innerhalb des Ensembles teilweise sehr groß. Aus diesem Grund sind die Resultate nur wenig belastbar.



◀ Bandbreite der vorhandenen Klimaprojektionen für die Jahresniederschlagsmenge von Schleswig-Holstein mit Hamburg. Dargestellt sind die vorliegenden Änderungssignale für den kurzfristigen (2031 - 2060) und langfristigen (2071 - 2100) Planungshorizont in ihrer gesamten Bandbreite, jeweils relativ zum Bezugszeitraum 1971 - 2000. Je Planungshorizont werden die Ergebnisse für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6, blau) denen des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, rot) gegenübergestellt. Je länger die Symbole, desto größer ist die Bandbreite der Projektion. Die Bandbreite wird aus dem DWD-Referenz-Ensemble ermittelt (elf Klimaprojektionsmodelle für RCP2.6, 21 Modelle für RCP8.5).



▲ Gewitterwolken über Lübeck.

	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	2031-2060 (RCP2.6)	2031-2060 (RCP8.5)	2071-2100 (RCP2.6)	2071-2100 (RCP8.5)
Frühjahr	155	152	158	147	10	11	4	13
Sommer	222	215	237	242	1	0	-4	-7
Herbst	232	228	230	218	2	6	1	10
Winter	178	190	195	206	4	13	1	15
Jahr	788	784	820	813	4	6	1	9
	l/m ²	l/m ²	l/m ²	l/m ²	%	%	%	%

Jahreszeitliche Unterschiede

Für den kurzfristigen Planungshorizont 2031 bis 2060 werden unter Verwendung der betrachteten RCP-Szenarien für den Winter Zunahmen der Niederschlagsmenge um 4 bis 13 % berechnet. In den Sommermonaten werden sich die Niederschlagsmengen nach aktuellem Kenntnisstand in der Gesamtheit kaum verändern. Die Bandbreite aller Modelle ist mit Ergebnissen von -20 bis +18 % recht groß. In den Übergangsjahreszeiten zeigen sich für diesen Planungshorizont Zunahmen der mittleren Niederschlagsmenge von bis zu 6 % (Herbst) bzw. bis zu 11 % (Frühjahr).

Im Frühjahr und im Herbst kann die Änderung für den langfristigen Planungshorizont (2071 - 2100) +1 bis +13 %, wohingegen die Änderung im Winter bis zu +15 % betragen kann. Für den Sommer werden in diesem Planungshorizont im Mittel über beide Szenarien Abnahmen der Niederschlagshöhe berechnet. Die Abnahme ist beim Weiter-wie-bisher-Szenario (-7 %) stärker ausgeprägt als beim Klimaschutz-Szenario (-4 %). Die Bandbreite aller Modelle liegt im Weiter-wie-bisher-Szenario zwischen einer Zunahme um 19 % und einer Abnahme um 53 %.

▲ Jahreszeitliche und jährliche Niederschlagsmengen für vier vieljährige Zeiträume historisch (Schleswig-Holstein) und zukünftige prozentuale Änderungen der Niederschlagsmengen (bezogen auf den Referenzzeitraum 1971 - 2000) für jeweils zwei vieljährige Zeiträume für zwei Projektionsszenarien (Schleswig-Holstein mit Hamburg).

FAKTEN:

Beobachtung

- Zunahme der Jahresniederschlagsmenge um ca. 123 l/m² seit 1881
- Deutliche Niederschlagszunahme im Winter und Herbst
- Leichter Anstieg der Häufigkeit von Starkregenereignissen

Kurzfristiger Planungshorizont

- Keine deutliche Änderung der mittleren Jahresmenge des Niederschlags (4 - 6 %)

Langfristiger Planungshorizont

- Im Weiter-wie-bisher-Szenario Zunahme des Jahresniederschlags um 9 %



Bodenwasserhaushalt im Dürrejahr 2018

Beitrag des Landesamtes für Umwelt (LfU)

Im Zuge des Klimawandels wird verstärkt über erhöhte Temperaturen und über Dürreperioden mit geringen Niederschlägen berichtet. Im letzten Jahrzehnt gehörten dazu die Jahre 2014, 2020 und 2022. Wie sich die zum Teil drastisch sinkenden Niederschläge auf den Bodenwasserhaushalt und auf die Erträge ausgewirkt haben, soll am Beispiel des Dürrejahres 2018 erläutert werden.

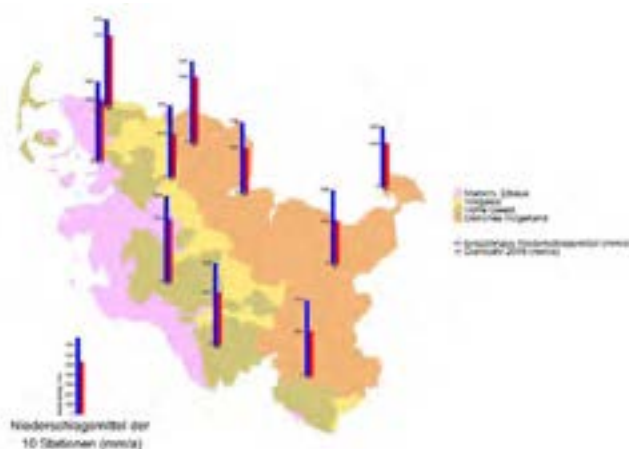
Niederschlagsverteilung in Schleswig-Holstein

Für das Jahr 2018 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) festgestellt, dass in Deutschland durchschnittlich 200 mm Niederschlag weniger als im langjährigen Mittel gefallen sind (Meinert et al. 2018 und 2019). In Schleswig-Holstein fielen im Jahr 2018 insgesamt 578 mm Niederschlag und somit 235 mm weniger als im langjährigen Gebietsmittel (Zeitraum von 1991 bis 2020) von 813 mm, https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/recent/).

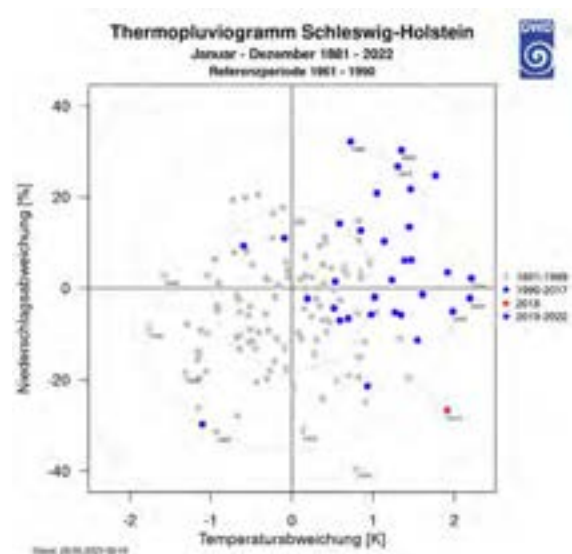
Die an den zehn Niederschlagsstationen ermittelte Niederschlagsverteilung zeigt deutliche regionale Unterschiede (siehe unten). Im von der Nordsee beeinflussten Westen des Landes waren 2018 die Niederschlagsmengen am höchsten und der Rückgang gegenüber dem langjährigen Mittel am niedrigsten. Im

Osten des Landes werden im langjährigen Mittel sowie im Dürrejahr 2018 die niedrigsten Niederschlagsmengen verzeichnet. Die Abnahme der Niederschlagsmengen nimmt nach Südost zu. Im Vergleich zum langjährigen Mittel der betrachteten zehn Niederschlagsstationen fielen im Jahr 2018 zwischen 58 und 82 % der Niederschläge.

Dennoch war das Jahr 2018 weder das trockenste noch das wärmste Jahr seit 1881, aber es erwies sich in Betrachtung beider Elemente als ein deutlich extremes Jahr, siehe Thermopluviogramm. Dieses zeigt ebenfalls die generelle Temperaturzunahme, die seit 1990 beobachtbar ist, denn die meisten blauen Punkte haben eine positive Temperaturabweichung.



▲ Niederschläge im langjährigen Mittel (blaue Balken) im Vergleich zum Dürrejahr 2018 (rote Balken) in mm/a ermittelt an den Niederschlagsstationen des Depositionsmessnetzes Schleswig-Holstein. Die unterschiedlichen Farben der Kartengrundlage spiegeln die Hauptnaturräume in Schleswig-Holstein wider.



▲ Thermopluviogramm (= Vergleich der Temperatur- und Niederschlagsabweichungen) der Jahreswerte von Schleswig-Holstein.

Definition von Dürre

In Abhängigkeit von der Fragestellung werden unterschiedliche Formen von Dürre definiert. Dazu gehören die meteorologische, die landwirtschaftliche, die hydrologische sowie die sozioökonomische Dürre (Ziese, 2022). Den meisten Definitionen ist gemeinsam, dass die in einem definierten Zeitraum gefallenen Niederschläge in einer Region mit dem langjährigen Mittel verglichen werden.

Dürre stellt ein Wetterextrem dar, das durch **extreme Trockenheit und Wassermangel** gekennzeichnet ist. Dürre kann durch weniger Niederschlag bzw. durch eine höhere Verdunstung als Folge erhöhter Temperaturen oder verstärkter Evapotranspiration verursacht sein (**meteorologische Dürre**). Bei einer negativen Niederschlagsentwicklung wird ab einer bestimmten Intensität von Dürre gesprochen. Zur Kennzeichnung der Dürre werden unterschiedliche Indizes verwendet. Im Gegensatz zu dem am weitesten verbreiteten Index, dem SPI (Standardized Precipitation Index), werden die anderen Indizes um Parameter wie Verdunstung bzw. Temperatur erweitert (Ziese, 2022).

Nachfolgend steht die **landwirtschaftliche Dürre**, die als ein länger andauernder Mangel an Wasser mit negativen Auswirkungen für die Ernte und für das Pflanzenwachstum definiert wird, im Mittelpunkt der Betrachtung. Zur Kennzeichnung der Auswirkungen von Trockenheit und Dürre im Zusammenhang mit dem Bodenwasserhaushalt erweist sich die nutzbare Feldkapazität (nFK) als Bewertungsparameter geeigneter als der SPI. Die nFK gibt an, wieviel nutzbare Bodenfeuchte (in Volumenprozent) für Pflanzen im Boden enthalten ist (Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden, 2005). Da es keine flächendeckenden Bodenfeuchtemessungen gibt, wird die Bodenfeuchte in der Regel über Modelle berechnet, in denen verschiedene Bodeneigenschaften berücksichtigt werden. Beim Dürremonitor des Forschungszentrums Leipzig (UFZ) wird die hydrologische Dürre über den Bodenwassergehalt abgeleitet. Hierbei wird ein modellierter Bodenfeuchtegehalt (Mittelwert von 30 Tagen) für einen bestimmten Tag mit dem langjährigen Bodenfeuchtwert für den Zeitraum von 1951 bis 2015 am jeweiligen Ort verglichen. Liegt der berechnete Bodenfeuchtwert innerhalb der ersten 20 Perzentile des langjährigen Mittels, wird dieser Zustand als Dürre bezeichnet. Der so definierte Bodenfeuchtezustand ist abhängig von der Jahreszeit und berücksichtigt keine für die Pflanzen kritischen Bodenfeuchtezustände.

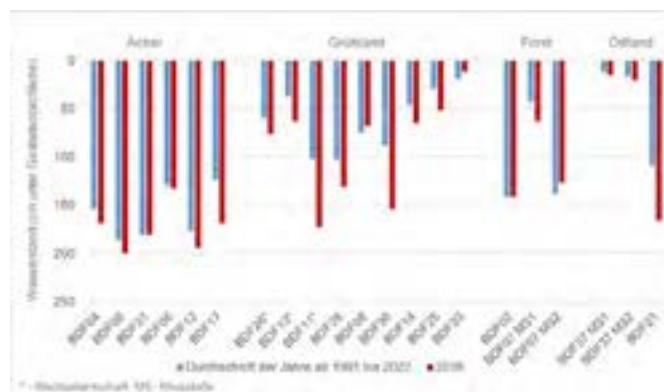
Entwicklung der oberflächennahen Grundwasserstände im Dürrejahr 2018

Im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung wurde zwischen 1991 und 1993 mit der Messung der oberflächennahen Grundwasserstände im 14-tägigen Rhythmus begonnen. Drei Messstellen wurden später (2003 bzw. 2015) in das Messprogramm aufgenommen (LLUR, 2020). Für Vergleichszwecke mit dem Dürrejahr 2018 liegen Messergebnisse der oberflächennahen Grundwasserstände in Böden von insgesamt 21 Messstellen vor.

Die im Untersuchungsprogramm betrachteten Messstellen sind in Böden aus sandigen, lehmigen, tonigen und moorigen Ausgangsmaterialien mit ihrer unterschiedlich hohen Durchlässigkeit für Wasser installiert.

Im Dürrejahr 2018 waren an 16 der 21 Messstellen die Grundwasserstände deutlich tiefer als im langjährigen Mittel (siehe Abbildung rechts). Die Auswirkungen der Dürre im Jahr 2018 auf die Grundwasserstände waren vom Standort sowie von der Bodennutzung abhängig. An zwei Messstellen (BDF02 und BDF31) veränderten sich die Wasserstände im Dürrejahr 2018 im Vergleich zum langjährigem Mittel nicht. An drei Messstellen (BDF08, BDF33 und BDF07 MS2) wurden im Dürrejahr entgegen des Trends höhere Wasserstände als im langjährigen Mittel gemessen. Hier wirkten sich

standörtliche Gegebenheiten, wie z. B. eine Reduktion der Entwässerungs- und Gräbenpflegemaßnahmen stärker als die Witterungsverhältnisse auf die Höhe der Wasserstände aus. Diese Entkoppelung der Grundwasserstände von den Niederschlägen ist lokal begrenzt und konnte landesweit unter verschiedenen Nutzungsformen festgestellt werden. Im Norden war davon ein Waldstandort (BDF07 MS2) sowie ein Grünlandstandort (BDF08), im Westen ein Baumschulstandort (BDF31) und im Süden ein Grünlandstandort (BDF33) der Boden-Dauerbeobachtung in Schleswig-Holstein betroffen.



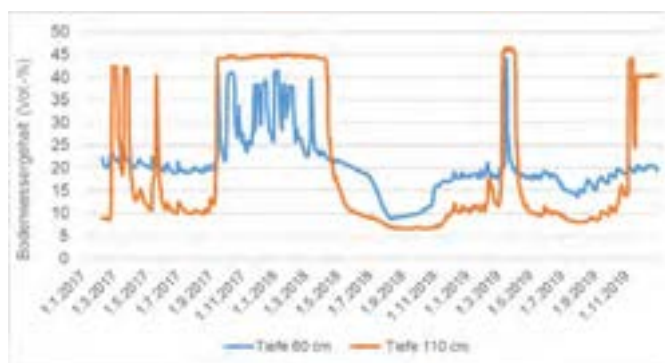
▲ Oberflächennahe Grundwasserstände im Dürrejahr 2018 an den Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) im Vergleich zum langjährigen Mittel der jeweiligen Messstelle.

Bodenwassergehalte und Wasserspannung

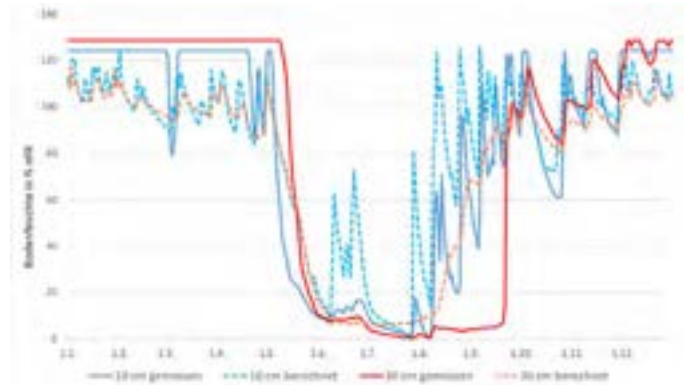
Jahr 2017 wurde im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung mit der Erfassung zeitlich hochaufgelöster Daten (stündliche Messungen) der Bodenwassergehalte, der Wasserspannung und der Bodentemperatur in den Tiefen von 60 cm und 110 cm unter Geländeoberflächen (GOF) begonnen (LLUR, 2020). Für das Dürrejahr 2018 liegen nur von einem Ackerstandort aus Sand mit einem Ortstein als Staukörper Ergebnisse dieser Bodenwasserhaushaltsparameter vor. Im Vergleich zum langjährigen Mittel von 730 mm/a sind im Dürrejahr 2018 nur 443 mm Niederschlag an dem Standort in Schuby gefallen (siehe Niederschlagsverteilung). Mit den Niederschlägen sanken auch die Bodenwassergehalte (siehe Abbildung unten).

Jahr 2018 sind beim sandigen Ackerstandort in der Vorgeest die Bodenwassergehalte in beiden Tiefen stark abgesunken (siehe Abbildung unten). Während der Winter normalfeucht war, lagen im Boden jahreszeit-typische Bodenwassergehalte vor. Die verminderten Frühjahrs- und Sommerniederschläge führten 2018 zu geringeren Bodenwassergehalten (im Vergleich zu 2017 und 2019). Neben der Intensität der Austrocknung war im Dürrejahr 2018 die Dauer der geringen Bodenwassergehalte deutlich länger als in den Vergleichsjahren. Die Grundwasserstände waren um 14 cm tiefer als im langjährigen Mittel (siehe BDF09 in Abbildung Oberflächennahe Wasserstände).

Die Universität Köln hat in unmittelbarer Nähe der Boden-Dauerbeobachtungsfläche im Speicherkoog (siehe BDF21 in Abbildung Oberflächennahe Grundwasserstände) im Westen Schleswig-Holsteins auf einer Sukzessionsfläche in einem grundwasserbeeinflussten und kalkhaltigen Boden aus lehmig-schluffigen Marschenablagerungen im Zeitraum



▲ Bodenwassergehalte im Dürrejahr 2018 im Vergleich zu den Jahren 2017 und 2019 in einem Ackerstandort aus Sand in der Vorgeest in Schuby (BDF09).



▲ Vergleich zwischen gemessener und berechneter Bodenfeuchte unter Gras in den obersten Bodenschichten aus dem Jahr 2018 in einem Boden aus lehmig-schluffigen Marschenablagerungen im Speicherkoog (BDF21).

zwischen 2010 und 2021 in den Tiefen von 10 cm, 20 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm sowie 150 cm unter GOF täglich Bodenwassergehalte und Wasserspannung erfasst (Dorau und Mansfeldt, 2022). Die um 303 mm geringeren Niederschläge im Dürrejahr 2018 gegenüber dem langjährigen Mittel von 829 mm (siehe Niederschlagsverteilung) verursachten deutlich niedrigere Bodenfeuchtehalte, welche im Vergleich zu anderen Jahren länger anhielten.

Die beiden Beispiele zeigen, dass sowohl in einem Ackerstandort aus Sand mit geringem Wasserhaltevermögen sowie auf einer Sukzessionsfläche aus lehmig-schluffigen Marschenablagerungen mit einem hohen Wasserhaltevermögen die verminderten Niederschläge sich bis in tiefere Bodenbereiche auf den Bodenwasserhaushalt auswirkten. Vergleichbare Beobachtungen konnten an zwei anderen Standorten der Boden-Dauerbeobachtung in den vergleichbar warmen Jahren 2020 bzw. 2022 festgestellt werden.

Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Bodenwassergehalten

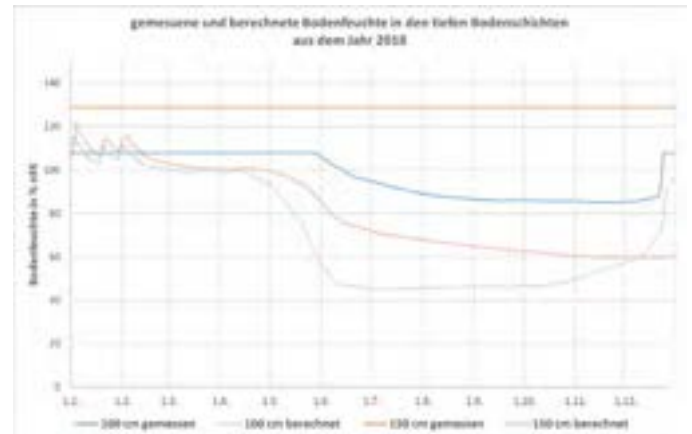
Der DWD stellt mit dem Bodenfeuchteviewer tagesgenaue modellierte Bodenfeuchtwerte bundesweit für verschiedene Kulturen für mehrere Bodenschichten von 10 cm bis zu einer Tiefe vom 200 cm unter GOF zur Verfügung (www.dwd.de/Bodenfeuchteviewer). Bei den Berechnungen wird der Bodentyp aus der Bodenübersichtskarte (BÜK) im Maßstab 1:1.000.000 (BGR, 2007) entnommen. Bei den Berechnungen werden weder die nutzungsdifferenzierte BÜK noch der Grundwasserstand berücksichtigt (BGR - BÜK1000 - Nutzungsdifferenzierte BÜK1000 (bund.de)). Die Ergebnisse werden aus Gründen der Vergleichbarkeit als Bodenwassergehalte in Prozent der nutzbaren

Feldkapazität (nFK) dargestellt. Ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Bodenwassergehalten für die grundwasserfernen oberen Bodenschichten aus Marschenablagerungen auf einer Sukzessionsfläche zeigt die Abbildung.

Obwohl der aufgrund der Maßstabebene im Modell angenommene Boden nicht den lokalen Gegebenheiten entspricht, ist der Verlauf der Bodenfeuchte in 10 und 30 cm Tiefe vergleichbar. Allerdings zeigen die modellierten Werte deutlich kurzfristig schwankendere Werte als die Messwerte. Die Bodenfeuchten liegen in beiden Tiefen in etwa auf gleichem Niveau. Lediglich in 30 cm Tiefe wird der Modellboden wieder schneller aufgefüllt. Der Boden im Speicherkoog (BDF21) entstand aus dünnen schluff-lehmigen und feinsandigen Wechsellagen. Dieser Bodenaufbau scheint hinsichtlich des Wasserhaltevermögens anders als der Modellboden zu reagieren. Diese standörtlichen Eigenschaften lassen sich im Modell nur schwer abbilden.

In den tieferen Bodenschichten, die stärker vom Grundwasser beeinflusst werden, zeigt der in Abbildung rechts dargestellte Vergleich deutliche Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Bodenfeuchtegehalten.

Bis in den Mai hinein waren Grundwasserstände von 50 cm vor Ort anzutreffen und fielen zum August hin auf unter 250 cm ab. Ein Absinken der gemessenen Bodenfeuchtwerte in 150 cm Tiefe war nicht zu beobachten und in 100 cm nur gering ausgeprägt, was



▲ Vergleich zwischen gemessener und berechneter Bodenfeuchte unter Gras in den tiefen vom Grundwasser beeinflussten Bodenschichten aus dem Jahr 2018 in einem Boden aus lehmig-schluffigen Marschenablagerungen im Speicherkoog (BDF21).

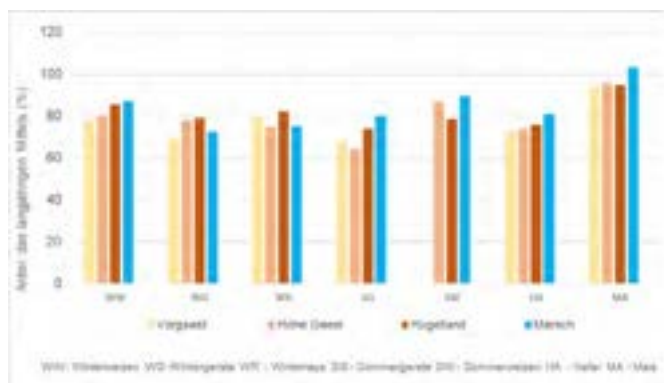
wahrscheinlich auf die Nachlieferung vom Wasser durch den kapillaren Aufstieg zurückzuführen ist. Die berechneten Bodenfeuchtwerte fielen aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser in beiden Tiefen sehr viel stärker ab. Dieses Beispiel zeigt, dass bei den Berechnungen die Grundwasserstände berücksichtigt werden müssen. Räumlich-kleinskalige Grundwasserschwankungen können im Modell keine Berücksichtigung finden, aber machen deutlich, dass lokale Einflüsse zu den modellhaften Aussagen ins Verhältnis gesetzt werden müssen.



Ertragsentwicklung im Dürrejahr 2018

Trotz der im Vergleich zu anderen Bundesländern noch relativ hohen Niederschläge zeigte sich 2018 auch in Schleswig-Holstein ein markanter Ertragsrückgang.

Die Höhe der Ertragsrückgänge im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1991 bis 2022 war einerseits von den angebauten Kulturen und andererseits von den standörtlichen Verhältnissen, die unter anderem durch den Hauptnaturraum charakterisiert werden, abhängig (siehe Abbildung unten).



▲ Prozentualer Anteil der Erträge im Dürrejahr 2018 im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1991 bis 2022 für unterschiedliche Kulturen und in den vier Hauptnaturräumen in Schleswig-Holstein (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2023).

Im Dürrejahr 2018 fielen bei Sommergerste und Hafer die Ertragseinbußen als Folge der Trockenheit während der Hauptwachstumsperiode dieser beiden Kulturen am stärksten aus (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2023; vgl. Abbildung oben). Die geringen Erträge bei der Wintergerste, insbesondere in der Vorgeest mit den vorwiegend sandigen Böden, sind darauf zurückzuführen, dass das Jahr 2017 sehr nass war, was die Auflauf- und Wachstumsbedingungen stark erschwerte. Die trockenen Bedingungen zum Ende der Vegetationsperiode der Wintergerste in 2018 (Mai und Juni) trugen ebenfalls zum deutlichen Rückgang der Erträge bei. Beim Mais handelt es sich um eine C4-Pflanze, die an hohe Temperaturen angepasst ist. Zudem wird Mais häufig auf grundwasserbeeinflussten Standorten angebaut, wo Wasser mittels kapillaren Aufstiegs aus tieferen Bodenschichten in die Wurzelzone aufsteigen kann, so dass hier die Ertragsrückstände als Folge der Dürre im Vergleich zu anderen Kulturen relativ gering ausfielen. In den Marschen mit schluffig-tonigen Böden mit häufigem Grundwassereinfluss sowie in lehmigen Böden im östlichen Hügelland mit relativ

hoher Wasserhaltekapazität waren die Ertragsrückgänge als Folge zu geringer Bodenfeuchte nicht so stark wie in den sandigen Böden der Vorgeest und der Hohen Geest ausgefallen.

Zunehmende Trockenheit bzw. Dürreperioden führen zu Ertragsrückgängen, insbesondere auf grundwasserfernen und sandigen Böden. Regionale Unterschiede sind daher nicht nur auf die unterschiedliche Niederschlagsverteilung, sondern auch auf die unterschiedlichen Bodeneigenschaften in den Landschaftsräumen zurückzuführen.

Schlussbetrachtung

Im Dürrejahr 2018 fielen in Schleswig-Holstein, verglichen mit dem langjährigen Mittel, 235 mm Niederschlag weniger. Mit einem Niederschlagsrückgang von circa 40 % war der Osten des Landes am stärksten betroffen. Die niedrigeren Niederschlagsmengen in 2018 führten in der Regel zu deutlich tieferen Grundwasserständen in oberflächennahen Grundwasserleitern, wie Ergebnisse der Boden-Dauerbeobachtung in der Abbildung mit den oberflächennahen Grundwasserständen zeigen. Messungen der Bodenwassergerhalte zeigen, dass im Dürrejahr 2018 in den warmen



Monaten auch tiefere Bodenschichten intensiver austrockneten und dass die Austrocknung, im Vergleich zu anderen Jahren, deutlich länger anhielt.

Eine Gegenüberstellung gemessener und berechneter Bodenwassergehalte an zwei grundwasserbeeinflussten Standorten mit unterschiedlichen Wasserhaltevermögen zeigt, dass in Perioden hoher Wassersättigung die gemessenen mit den berechneten Bodenwassergehalten relativ gut übereinstimmen. Wird in trockenen Perioden in Böden durch den kapillaren Aufstieg Wasser in den oberflächennahen Bereich nachgeliefert, können die berechneten von den gemessenen Bodenwassergehalten stark abweichen. Unterschiede im Aufbau des tatsächlichen Bodens wie z. B. dünne Wechsellagen von Schluff und Feinsand (BDF21) im Vergleich zum angenommenen Modellboden können ebenfalls zu Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Bodenfeuchtegehalten führen. Die Berücksichtigung des Grundwassereinflusses sowie der standortspezifischen Besonderheiten erweist sich im Modell als schwierig realisierbar. Eine diesbezügliche Optimierung des Modells ist aber dringend zu empfehlen.

Als Folge deutlich verminderter Niederschläge im Dürrejahr 2018 sanken landesweit die Ernteerträge im Vergleich zum langjährigen Mittel bei allen sieben betrachteten Ackerfrüchten um ca. 20 % (1991 bis 2022). Die Ertragsrückgänge fielen am stärksten beim Sommergetreide wie Sommergerste und Hafer und teilweise bei der Wintergerste im Hauptnaturraum Vorgeest aus (-40 %), dagegen war Mais am ertragsstabilsten. Außerdem zeigte das Dürrejahr 2018, dass Gebiete mit vorwiegend sandigen und grundwasserfernen Böden am stärksten von den Ertragsrückgängen als Folge verminderter Niederschläge betroffen waren, wozu die Vorgeest und teilweise Hohe Geest gehören. Lehmige und tonig-schluffige sowie grundwasserbeeinflusste Böden konnten die Trockenperioden besser kompensieren.

Die landwirtschaftliche Nutzung auf sandigen und grundwasserfernen Böden kann sich vor dem Hintergrund des Klimawandels mit steigenden Temperaturen und sinkenden Niederschlagsmengen zunehmend ertragsunsicherer erweisen. Eine klimaangepasste Bewirtschaftung (Mischkulturanbau, intensivierte Humuswirtschaft, Agroforestry/Knicks, vermehrter Einsatz von tiefwurzelnden Kulturen) und der Anbau von trockenheitstoleranteren Sorten sind Zukunftsoptionen für die Landwirtschaft.



Literatur

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung (2005). Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Auflage.

BGR (Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2007): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000), Hannover.

BGR - BÜK1000 - Nutzungsdifferenzierte BÜK1000 (bund.de).

Deutscher Wetterdienst: Bodenfeuchteviewer (Kurzlink: Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Bodenfeuchteviewer (dwd.de)).

Dorau, C. und Mansfeldt, T. (2022): Vulnerability of diked marsh ecosystems under climate change, *Climatic Change*.

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ (o. J.): Dürremonitoring: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>.

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) (2020): Boden-Dauerbeobachtung in Schleswig-Holstein Boden - lebendig, unverzichtbar und stark unter Druck. www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/B/boden/Downloads/broschuereBodendauerbeobachtung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Meinert, T. und Schube, C. (2018): Die Trockenheit in Deutschland 2018 aus agrarmeteorologischer Sicht. Deutscher Wetterdienst.

Meinert, T., Becker, A., Bissolli, P., Daßler, J., Breidenbach, J. N. und Ziese, M. (2019): Ursachen und Folgen der Trockenheit in Deutschland und Europa ab Juni 2019. Deutscher Wetterdienst.

Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2023): Ertragsermittlung der Jahre 1991 bis 2022.

Ziese, M. (2022): Der Dürreindex des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie (GPCC-DI). Deutscher Wetterdienst.

Sonnenschein

In Schleswig-Holstein scheint die Sonne im Mittel 1657 Stunden im Jahr, bezogen auf den Zeitraum 1991 - 2020. Recht sonnig ist es im Allgemeinen an den Küsten von Nord- und Ostsee, besonders viel Sonnenschein wird auf Sylt und auf Fehmarn registriert, am wenigsten Sonne gibt es im Binnenland von Schleswig-Holstein.

Vergangenheit und Gegenwart

Die Zeitreihe der Jahressummen der Sonnenscheindauer in Schleswig-Holstein seit 1951 lässt sich in drei Zeitabschnitte einteilen: Von 1951 bis 1976 eine Phase höherer Jahreswerte, anschließend bis etwa zur Jahrtausendwende vermehrt geringere Jahressummen und dann wieder ansteigend. Zwischen etwa 1950 und 1980 gab es weltweit eine Phase zurückgehender Sonneneinstrahlung, die u. a. einer verstärkten Luftverschmutzung zugeschrieben wird. Der vieljährige Mittelwert 1961 - 1990 liegt bei 1567 Stunden.

Die bisherigen jährlichen Gebietsmittel der Sonnenscheindauer in Schleswig-Holstein variierten zwischen 1329 Stunden (1987) und 2084 Stunden (1959). In dieser Zeitreihe gibt es kein weiteres Jahr, in dem nochmals 2000 Stunden überschritten wurden. Auch die „Sonnenjahre“ 2003, 2018 und 2022 mit über 1900 Stunden blieben unter der 2000er Marke.

Der vieljährige Mittelwert 1991 - 2020 des Gebietsmittels für die Sonnenscheindauer beträgt 1657 Stunden, das

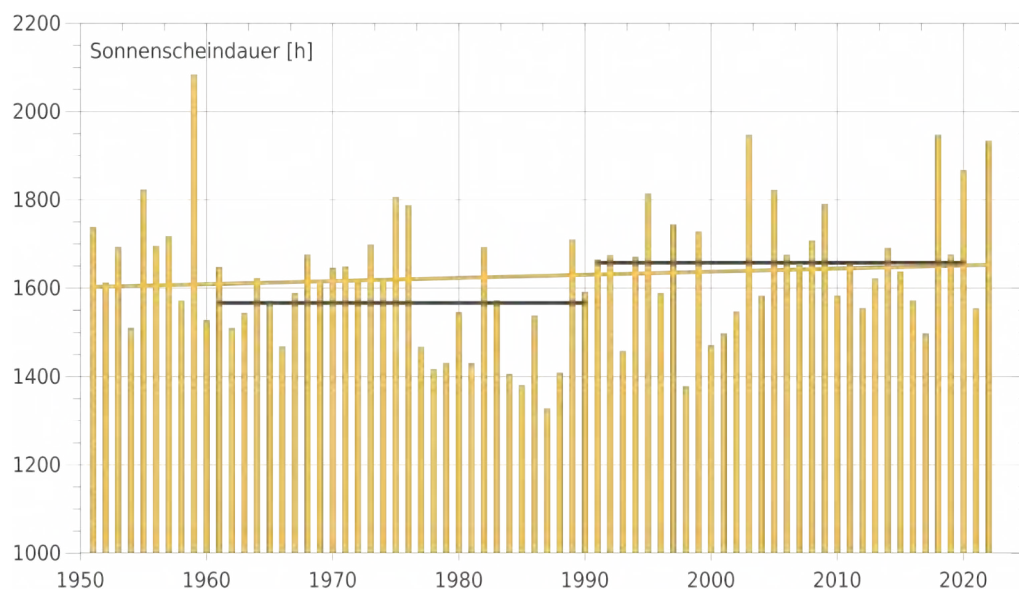
entspricht einer täglichen durchschnittlichen Sonnenscheindauer von 272 Minuten. Im Januar und Februar gibt es mit unter 85 Minuten täglich am wenigsten Sonne, während die Sonne von Mai bis August im Durchschnitt täglich 400 bis 450 Minuten scheint. Die mittlere tägliche Sonnenscheindauer war 1961 - 1990 mit 257 Minuten noch 15 Minuten geringer als im aktuellen Zeitraum. Bei einer jahreszeitlichen Betrachtung zeigen vor

allem das Frühjahr (+35 Minuten), aber auch der Sommer (+9 Minuten) und der Herbst (+13 Minuten) eine Zunahme der durchschnittlichen täglichen Sonnenscheindauer, während der Winter (+2 Minuten) kaum Änderungen aufweist.

Globalstrahlung

Mit der Globalstrahlung steht ein weiterer meteorologischer Parameter zur Verfügung, um die Sonnenstrahlung zu beschreiben. Die Globalstrahlung setzt sich zusammen aus der direkten, schattengebenden Sonnenstrahlung, und der in der Atmosphäre gestreuten, diffusen Sonnenstrahlung. Die Karte der Globalstrahlung für Schleswig-Holstein zeigt hohe Jahresmittelwerte ($> 1060 \text{ kWh/m}^2$) auf den nordfriesischen Inseln, der Halbinsel Eiderstedt und auf Fehmarn. Niedrige Werte ($< 1010 \text{ kWh/m}^2$) werden auf der Schleswig-Holsteinischen Geest, aber auch in Angeln und im Hamburger Umland gemessen. Als natürliche Quelle für erneuerbare Energien spielt die Nutzung der Globalstrahlung eine zunehmend wichtige Rolle.

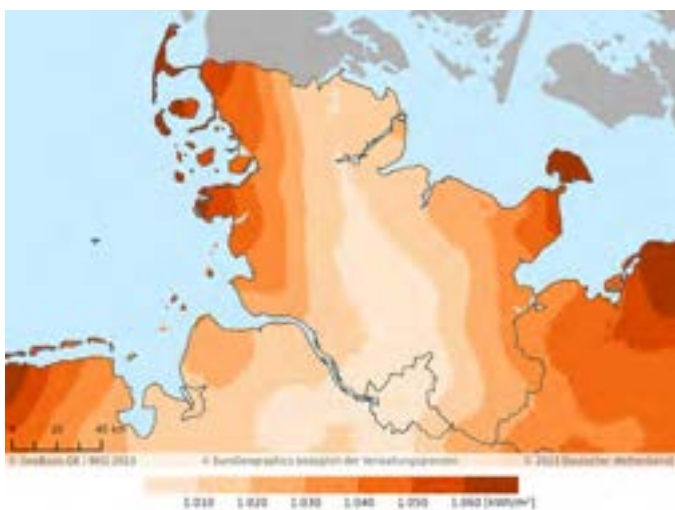
▼ Jahressummen der Sonnenscheindauer (Gebietsmittelwerte) in Schleswig-Holstein von 1951 - 2022. Die gelbe Linie zeigt den linearen Trend und die schwarzen horizontalen Linien die 30-jährigen Mittelwerte.





UV-Index

Das Zusammenspiel von Sonnenstrahlung und Atmosphäre hat die Entstehung von Leben auf der Erde erst ermöglicht. Ein Zuviel an Strahlung kann allerdings für alle Lebewesen gefährlich werden. Daher erstellt der Deutsche Wetterdienst in den Sommermonaten täglich Vorhersagen des UV-Indexes. Diese Maßzahl gibt die Stärke der UV-Strahlung der Sonne an. Je höher der Index-Wert ist, desto schädlicher ist die Strahlung. Ein Zuviel an Sonnenstrahlung verursacht akute Schäden, wie z. B. Sonnenbrand und Hitzschlag, und hat auch langfristige gesundheitliche Folgen, wie z. B. Hautalterung und Hautkrebs. Ab einem UV-Index von 3 sind Schutzmaßnahmen erforderlich, z. B. Sonnencreme, Sonnenbrille und Kopfbedeckung. Ab einem UV-Index von 6 besteht eine hohe, ab 8 eine sehr hohe gesundheitliche Gefährdung.



▲ Mittlere Jahressummen (kWh/m^2) der Globalstrahlung in Schleswig-Holstein (Zeitraum 1991 - 2020), basierend auf Bodenmessungen und Satellitendaten.

Zukunft

Die Sonnenscheindauer wird in den Klimamodellen nicht direkt berechnet, sondern indirekt aus der kurzwelligen Strahlung abgeleitet. Die Strahlung ist unmittelbar 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 Temperaturentwicklungen.

Weder für den kurzfristigen noch für den langfristigen Planungshorizont können derzeit belastbare Aussagen für die zu erwartenden Änderungen der Sonnenscheindauer gemacht werden. Allerdings zeigen alle Klimamodelle, dass für beide Szenarien die Änderungen lediglich in der Größenordnung von wenigen Minuten pro Tag liegen.

FAKTEN:

Beobachtung

- Durchschnittlich 272 Minuten Sonnenschein pro Tag im Zeitraum 1991 - 2020
- Leichter Anstieg der Sonnenscheindauer in Schleswig-Holstein seit 1951
- Große Variabilität von Jahr zu Jahr

Kurzfristiger Planungshorizont

- Änderungen wahrscheinlich nur gering

Langfristiger Planungshorizont

- Änderungen wahrscheinlich nur gering



Wind

Die Verteilung der Windgeschwindigkeit in Schleswig-Holstein ist geprägt von der Lage zwischen zwei Meeren: Die höchsten Werte zeigen sich entlang der Nordseeküste, gefolgt von der Ostseeküste. Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten werden auf der Geest und im Südosten gemessen.

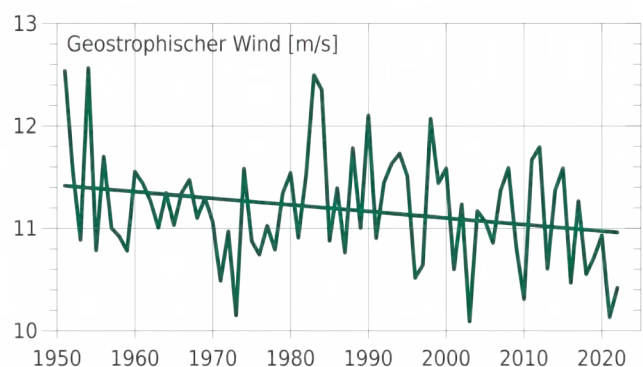


Windverhältnisse in der Vergangenheit und der Gegenwart

Standardmäßig wird der Wind in 10 Meter Höhe über Grund gemessen, um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten. Trotzdem reagiert der gemessene Wind, insbesondere die Windgeschwindigkeit, empfindlich auf Veränderungen im Umfeld der Messstation (z. B. wachsende Bäume) oder auf Änderungen des Messortes. Fast alle Windzeitreihen weisen Inhomogenitäten auf. Die zur Verfügung stehenden Zeitreihen umfassen häufig nur einige Jahrzehnte.

Eine Möglichkeit, trotzdem Aussagen über die Entwicklung der Windgeschwindigkeit zu machen, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes. Dieser beruht auf Luftdruckdifferenzen und ist eng mit dem „wahren“ Wind gekoppelt. Betrachtet man den geostrophischen Wind, der aus den Luftdruckdaten von Hamburg, Emden und List auf Sylt für die Deutsche Bucht berechnet wurde, zeigen sich Abschnitte mit höheren oder niedrigeren Windgeschwindigkeiten,

sogenannte multidekadische Schwankungen. Für die gesamte Zeitreihe ist ein schwacher, leicht abfallender Trend zu sehen. Deutlich erkennbar sind windreiche Perioden in den 1950er sowie in den 1980er und in 1990er Jahren. Im Jahr 2022 betrug der Jahresmittelwert des geostrophischen Windes 10,4 m/s.



▲ Jahresmittel des geostrophischen Windes in m/s, berechnet aus den Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List. Dargestellt ist der Zeitraum 1951 - 2022.

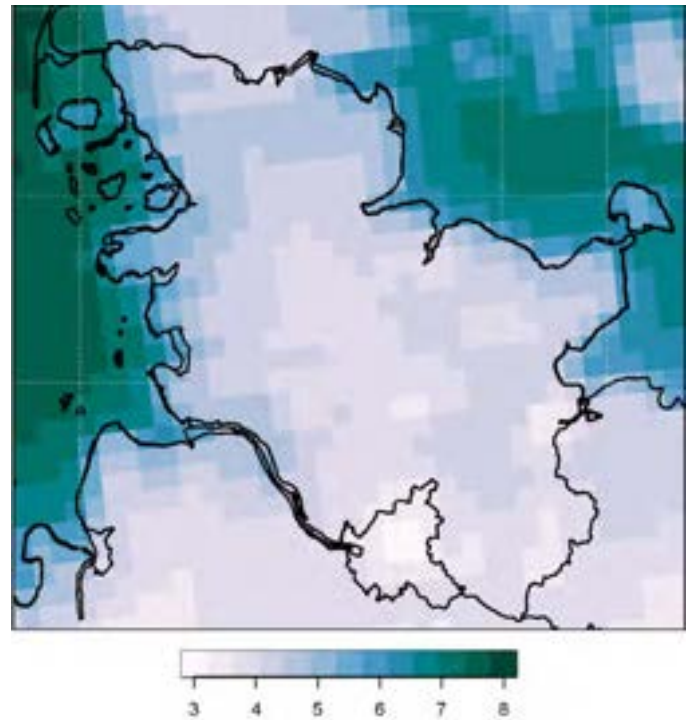
Sturmtage

Als Sturmtage werden die Tage gezählt, an denen Spitzenwindgeschwindigkeiten (Böen) von mindestens 8 Bft (62 bis 74 km/h) gemessen werden. In Schleswig-Holstein zeigen sich deutliche Unterschiede in den Häufigkeiten von Sturmtagen an den Küsten und im Binnenland.

An der Nordseeküste, z. B. an der Station List, wurden im Mittel jährlich 128 Sturmtage (Zeitraum 1961 - 1990) gezählt, während es in Schleswig lediglich 49 Sturmtage waren. Insbesondere nach 1996 zeigte sich die Periode 1991 - 2020 deutlich windärmer, in List gab es jährlich 105, in Schleswig 39 Sturmtage.

Zukunft

Klimaprojektionen zeigen für zukünftige Windverhältnisse bisher wenige Änderungen. Möglicherweise sind unauffällige Veränderungen aus den Modellen bislang noch nicht ablesbar.



▲ Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in m/s (10 m über Grund) in Schleswig-Holstein von 1995 bis 2018. Flächendarstellung der Rasterwerte (6 km x 6 km) aus Reanalysedaten des Modells COSMO-REA6.



FAKTEN:

Beobachtung

- Große regionale Unterschiede zwischen windreicher Nordseeküste und windschwächeren Regionen im Südosten des Bundeslandes
- Leicht abnehmender Trend in den Windgeschwindigkeiten seit 1951

Kurzfristiger Planungshorizont

- Wahrscheinlich keine oder kaum Änderungen

Langfristiger Planungshorizont

- Veränderung nicht ablesbar



Meeresspiegel

Beitrag des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Der globale Meeresspiegel ist seit dem Jahr 1900 um über 20 cm angestiegen. Die Anstiegsrate des Meeresspiegels beschleunigte sich dabei von 1,35 mm/Jahr für den Zeitraum von 1901 - 1990 auf 3,7 mm/Jahr für 2006 - 2018. An der Nordseeküste zeigen Pegelmessungen einen ähnlich hohen Anstieg von 2 - 4 mm/Jahr. Für die Zukunft sagen Klimamodelle einen weiteren Anstieg voraus. Neue Untersuchungen über Ozeanerwärmung und zu den Eisschilden in der Antarktis und Grönland lassen eine weitere Beschleunigung des Anstiegs als wahrscheinlich erscheinen.

Der Meeresspiegel - eine schwankende Größe

Die Veränderung des Meeresspiegels setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Die beiden wichtigsten sind die Ausdehnung des Meerwassers als Folge der globalen Erwärmung und die Zufuhr von Wasser in die Ozeane durch das weltweite Abschmelzen von Landgletschern und der großen Eisschilde in Grönland und der Antarktis. Beide Faktoren haben zum langfristigen Anstieg des globalen Meeresspiegels seit 1900 in etwa gleich viel beigetragen. Allerdings beschleunigte sich in den letzten 20 Jahren das Schmelzen von Gletschern und Eisschilden und führte so zu einem stärkeren Anstieg des Meeresspiegels. Regionale Unterschiede entstehen durch regional unterschiedliche Änderungen der Wassertemperatur und des Salzgehalts, die durch Strömungssysteme verteilt werden.

Während die oben beschriebenen Komponenten Auswirkungen auf den absoluten Meeresspiegelanstieg haben, misst man an Wasserstandspegeln nur die relative Meeresspiegeländerung. Diese setzt sich zusammen aus dem absoluten Meeresspiegelanstieg und der vertikalen Landbewegung am Pegelstandort. Als Ausgleichsbewegung nach der letzten Eiszeit heben sich weite Teile Skandinaviens seit Jahrtausenden an. Demgegenüber senkt sich ein Großteil der deutschen Nordseeküste. Für die schleswig-holsteinische Nordseeküste wird eine leichte Landhebung (unter 0,7 mm/Jahr), für die schleswig-holsteinische Ostseeküste demgegenüber eine leichte Landsenkung (für Kiel beispielsweise von -0,1 mm/Jahr) angenommen (IPCC, 2021). Diese Landbewegung muss bei der Bestimmung

des absoluten Meeresspiegelanstiegs aus Pegelmessungen mitberücksichtigt werden.

Beobachtete Meeresspiegeländerungen

Für die Deutsche Bucht gibt es Pegelaufzeichnungen, die bis 1843 (für Cuxhaven) zurückreichen (siehe Abbildung folgende Seite). Viele Pegel liegen aber erst frühestens ab den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts oder noch später vor. Für den relativen Meeresspiegelanstieg zeigen sie eine Spannweite von 1,7 bis 4,2 mm/Jahr. An der Ostküste Großbritanniens und der niederländischen Küste wie auch generell im Nordostatlantik treten ähnliche Anstiege (um 2 mm/Jahr) auf wie in der Deutschen Bucht.



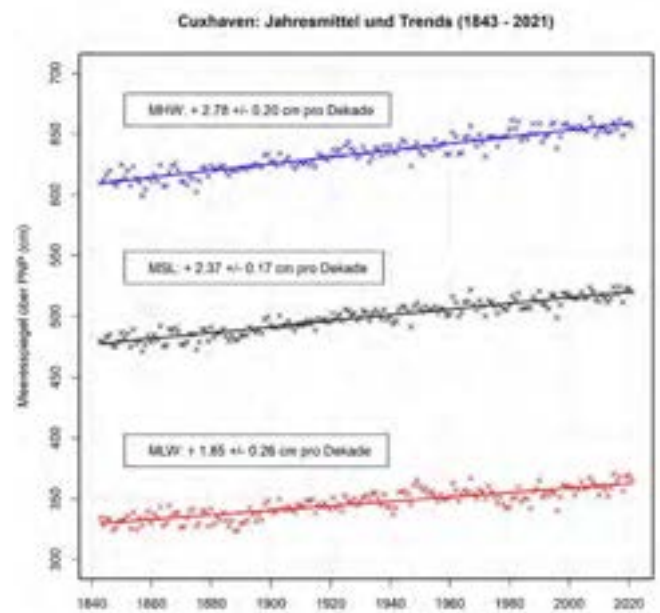
Der Pegel Cuxhaven gilt nicht nur wegen seiner Länge von fast 180 Jahren, sondern auch wegen seiner relativ hohen Korrelation mit anderen Pegelstandorten an der Küste als beispielhaft für die Deutsche Bucht. In der Abbildung rechts ist sowohl der mittlere Meeresspiegelanstieg von etwa 2,4 cm/Jahrzehnt sichtbar als auch, dass sich die gezeitenabhängigen Wasserstände in der Nordsee nicht parallel zum mittleren Anstieg des Meeresspiegels verändern. Beispielsweise steigen am Pegel Cuxhaven das mittlere Hochwasser stärker und das mittlere Niedrigwasser schwächer an als der mittlere Wasserstand. Als Ursache kommen sowohl Maßnahmen des Gewässerausbaus in der Elbe wie auch geänderte morphologische Verhältnisse im Bereich des Elbe-Weser-Dreiecks in Frage.

An der Ostsee steigt der absolute Meeresspiegel um etwa 1,4 bis 2,0 mm/Jahr an. Der relative Meeresspiegelanstieg an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste liegt dementsprechend in der gleichen Größenordnung.

Zukünftige Änderungen des Meeresspiegels

Im aktuellen 6. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change von 2021 werden für verschiedene Szenarien bzgl. der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration durchgehend Anstiege des Meeresspiegels bis 2100 und darüber hinaus prognostiziert.

Für das SSP1-2.6 (ein Szenario mit hohen Klimaschutzmaßnahmen, welches auf eine globale Mitteltemperatur 1,8 °C oberhalb des vorindustriellen Niveaus hinausläuft) ergibt sich ein wahrscheinlicher Anstieg des Meeresspiegels von 33 – 62 cm bis 2100 (relativ zum Mittel der Referenzperiode 1995 – 2014), für das SSP5-8.5 (mit quasi ungebremsten Treibhausgasemissionen) ein Anstieg von 63 – 101 cm. Diese Werte stammen aus Prozessen, deren Quantifizierung mindestens mit mittlerem Vertrauen betrachtet wird, also Prozessen, die sowohl recht gut verstanden als auch modellierbar erscheinen. Nicht berücksichtigt sind die Eisschildprozesse, die durch tiefe Unsicherheit gekennzeichnet sind. Beobachtungen an den Rändern der Eisschilde zeigen, dass erwärmtes Ozeanwasser die Eisschelfe zunehmend zerstört sowie den Kontakt zwischen Gletschern und dem unterlagernden Festgestein mehr und mehr aufschmilzt. Dieses führt dazu, dass die antarktischen Gletscher immer schneller ins Meer rutschen, was schon derzeit beobachtet werden kann. In der Konsequenz kann das den Meeresspiegelanstieg zukünftig in Größen beschleunigen, die deutlich über den oben angegebenen Werten liegen. Diese



▲ Jährliche Mittelwerte des mittleren Hochwassers (mean high water, MHW, in blau), des mittleren Niedrigwassers (mean low water, MLW, in rot) und des Mittelwassers (mean sea level, MSL, in schwarz)- Jeweils dargestellt ist auch der lineare Trend für den Pegel Cuxhaven. Daten ab 1843.

Prozesse könnten in einem Szenario mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und hohen Auswirkungen zu einem Meeresspiegelanstieg von bis zu 1,60 m bis 2100 führen.

Durch die große Wärmespeicherkapazität der Ozeane wird der Meeresspiegelanstieg, ungeachtet des weiteren Verlaufs der Erderwärmung, weit über das 21. Jahrhundert andauern. Verschiedene Projektionen ergeben wahrscheinliche Bandbreiten von 0,8 – 2,0 m (im SSP1-2.6) bis 1,7 – 4,0 m (im SSP5-8.5) bis zum Jahr 2300 (noch ohne Berücksichtigung der Möglichkeit beschleunigter Eisschildprozesse). Für die deutschen Küsten ist davon auszugehen, dass der absolute Meeresspiegelanstieg sich annähernd gleich entwickelt, wie die hier genannten globalen Mittelwerte.

Literatur

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Meerestemperaturen

Beitrag des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Schleswig-Holstein ist das Land zwischen den Meeren. Nord- und Ostsee spielen eine große Rolle für die Menschen in Schleswig-Holstein. Das gilt zum einen für die Freizeit beim Strandspaziergang, Sonnenbad oder Erfrischung im kühlen Nass. Zum anderen haben Nord- und Ostsee aber auch eine große wirtschaftliche Bedeutung für die Seefischerei, die Seeschifffahrt als Rückgrat des internationalen Logistik- und Transportwesens und nicht zuletzt in den letzten Jahrzehnten zunehmend auch im Bereich der Energiewirtschaft mit dem Ausbau der Offshore-Windenergie.

Die Nord- und Ostsee prägen aber auch das Wetter und Klima in Schleswig-Holstein. Der menschengemachte Klimawandel macht auch vor unseren Meeren nicht Halt.



Die Meerestemperatur - Langzeitmittel und Jahresgang

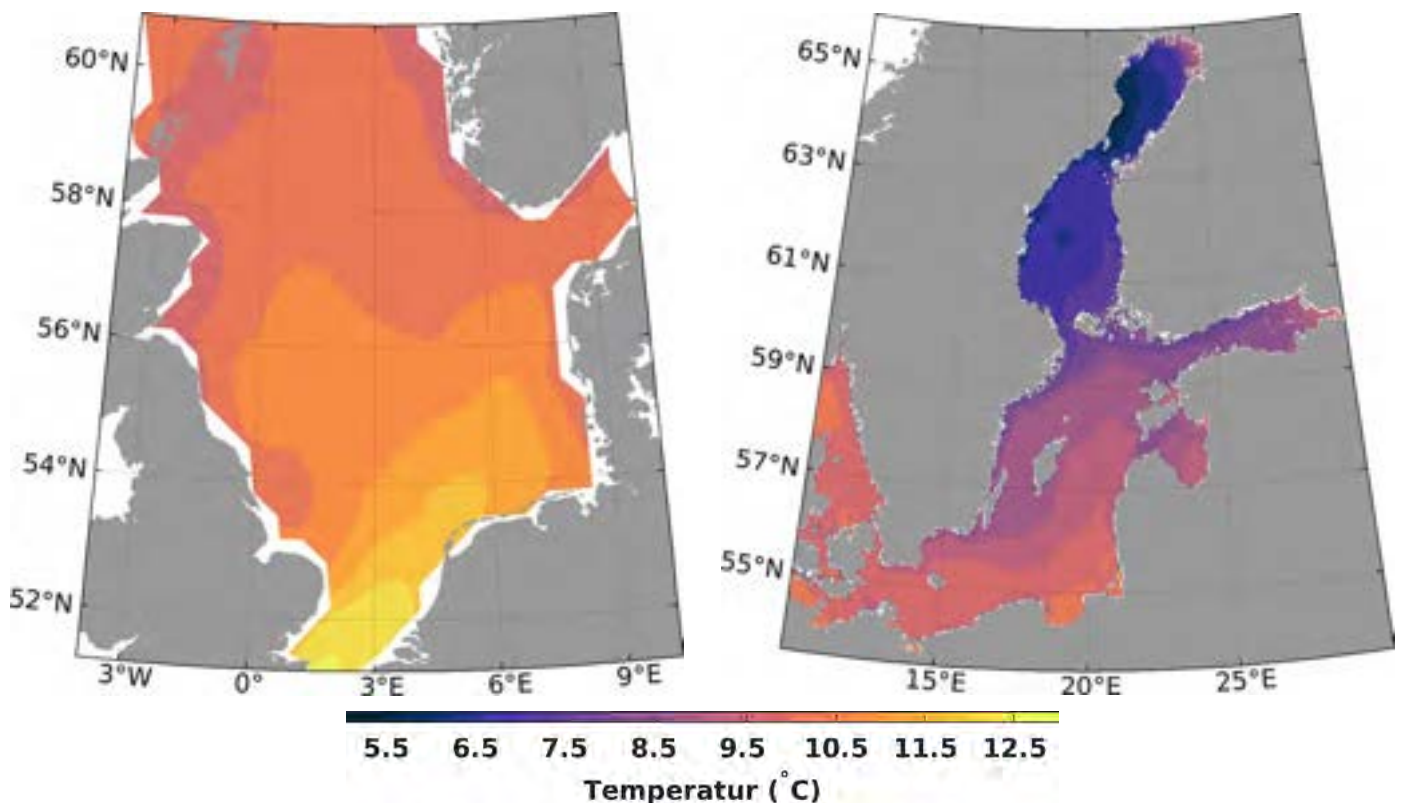
Wasser allgemein, und damit auch unsere Meere, hat eine hohe Wärmespeicherkapazität. Deswegen setzen Temperaturschwankungen und langzeitliche Veränderungen verzögert ein und fallen im Vergleich zur Atmosphäre gemäßigter aus, insbesondere in größeren Wassertiefen.

Die Nordsee ist ein Randmeer des Nordatlantiks, mit dem sie sowohl im Norden zwischen Schottland und Norwegen als auch im Süden über den Ärmelkanal verbunden ist. Wassermassen und damit auch Wärme können hier vergleichsweise frei ausgetauscht werden. Die Ostsee hingegen ist ein Binnenmeer, das nur über Skagerrak und Kattegat und die Meerengen um die dänischen Inseln mit der Nordsee verbunden ist. Der Austausch von Wassermassen mit der Nordsee geschieht hier nur ziemlich begrenzt. Weite Teile der Ostsee sind deutlich mehr von den sie umgebenden Landflächen und den einmündenden Flüssen beeinflusst als von der Nordsee.

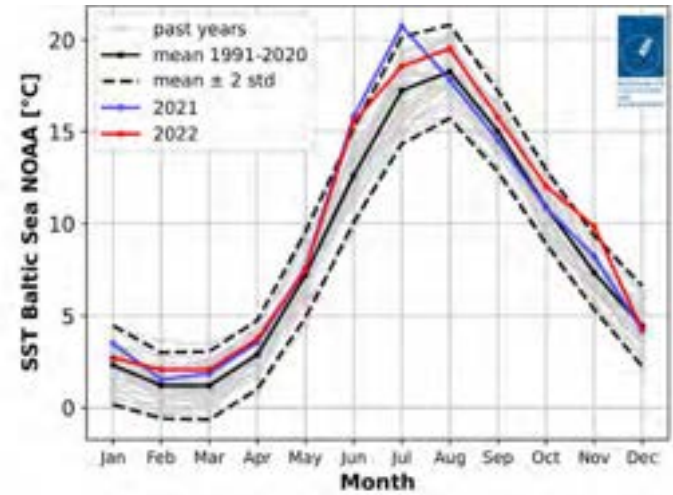
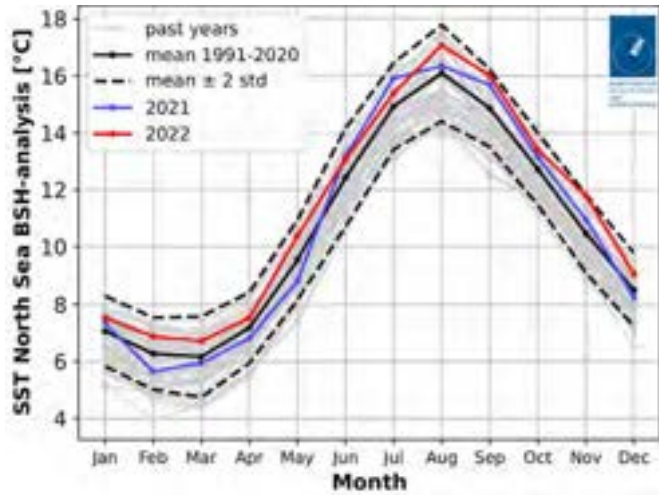
Das schlägt sich auch in der klimatologischen Verteilung der Meeresoberflächentemperatur nieder (siehe Abbildung). Im direkten Vergleich ist die Nordsee im Jahresmittel deutlich wärmer als die Ostsee. Im Langzeitmittel der Jahre 1991 - 2020 weist die Nord-



seeoberfläche eine Temperatur von bis zu 12 °C und mehr im Süden und immer noch um die 10 °C im Norden auf. In der Ostsee hingegen kennzeichnen Jahresmitteltemperaturen von um die 10 °C die wärmsten Bereiche entlang der dänischen, deutschen und polnischen Küste. Nach Norden und Osten wird es dann deutlich kälter, so dass im baltischen Meerbusen im Jahresmittel nur noch 6 - 7 °C zu beobachten sind.



▲ Langzeitmittel 1991 - 2020 der Meeresoberflächentemperatur von Nordsee (links) und Ostsee (rechts).



▲ Jahresgang des Flächenmittels der Oberflächentemperatur von Nord- (links) und Ostsee (rechts); vergangene Jahre als graue Linien, 2021 in blau, 2022 in rot, sowie Langzeitmittel 1991 - 2020 als schwarze Linie (mit Spannweite von zwei Standardabweichungen schwarz gestrichelt).

Auch hinsichtlich des Jahresgangs unterscheiden sich die beiden Meere spürbar voneinander (siehe Abbildung oben). Aufgrund des Austausches mit dem Nordatlantik fällt der Jahresgang in der Nordsee etwas schwächer aus als in der Ostsee.

Im Langzeitmittel der Jahre 1991 - 2020 sind die niedrigsten Oberflächentemperaturen der Nordsee (als Mittel über die gesamte Fläche der Nordsee) im Februar und März mit ca. 6 °C zu beobachten. Am wärmsten ist die Nordsee typischerweise im August mit ca. 16 °C im Mittel. Für die Ostsee schwankt das

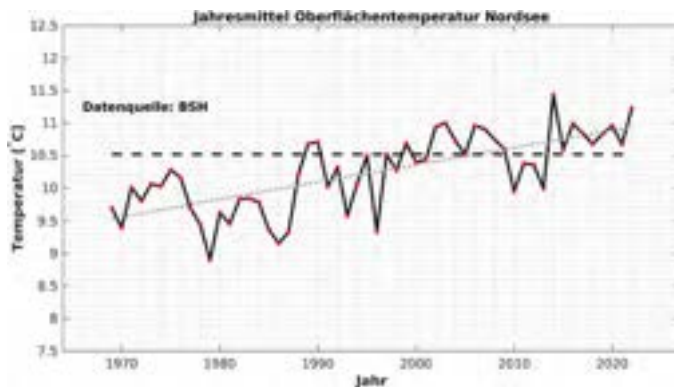
Flächenmittel der Oberflächentemperatur klimatologisch zwischen knapp 2 °C im Februar und März und knapp 18 °C im August. Nicht nur der Jahresgang ist in der Ostsee stärker ausgeprägt als in der Nordsee, sondern auch die Jahr-zu-Jahr-Variabilität. Auch dies ist in der Charakteristik der Ostsee als Binnenmeer gegenüber dem Randmeer Nordsee begründet.

Die Meeresoberflächentemperatur im Klimawandel

Die Jahre 2021 und 2022 waren über die meisten Monate hinweg wärmer als das Langzeitmittel der Periode 1991 - 2020 (siehe Abbildung Jahresgang des



▼ Zeitliche Entwicklung der jährlich und über die gesamte Fläche gemittelten Meeresoberflächentemperatur der Nordsee (links) und der Ostsee (rechts).

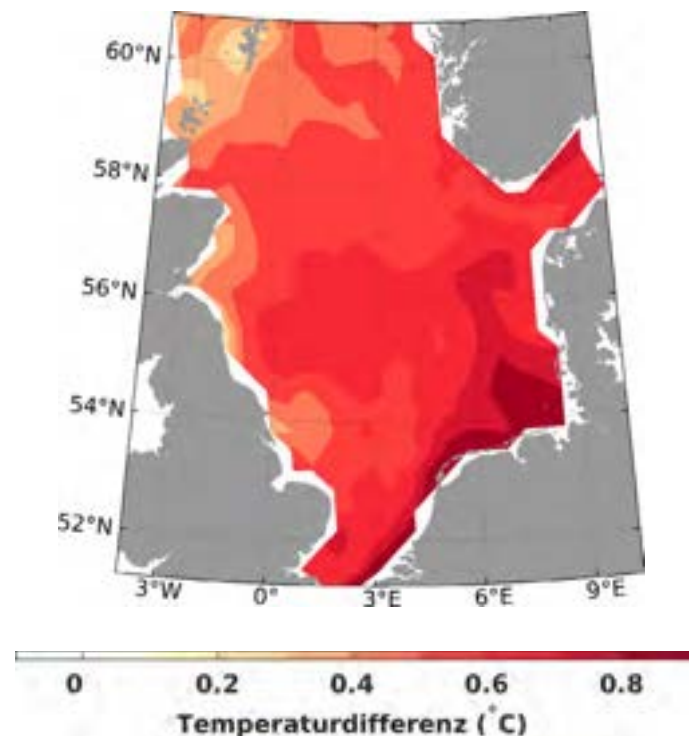


Flächenmittels). Dies ist bereits als ein Indikator für die seit Jahrzehnten beobachtete, menschlich verursachte Klimaerwärmung zu deuten. Klarer wird das noch, wenn man sich die langzeitliche Entwicklung der Jahresmittel der Meeresoberflächentemperatur von Nord- bzw. Ostsee anschaut (siehe Abbildungen oben). Für die Nordsee analysiert das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) die Nordseeoberflächentemperatur systematisch bereits seit 1968. Die entsprechende Zeitreihe der Jahresmittel ist geprägt von starken Jahr-zu-Jahr-Schwankungen, die aber eindeutig von einem langfristigen Erwärmungstrend überlagert ist. Über die gesamte Zeitreihe von 1969 bis 2022 hinweg zeigt sich eine signifikante Erwärmung von ca. 0,26 °C pro Jahrzehnt für die Nordsee. Für die Ostsee leistet das BSH eine flächendeckende Analyse erst seit der Wiedervereinigung 1990. Aber auch hier zeigt die Zeitreihe neben den Jahr-zu-Jahr-Schwankungen einen eindeutigen Erwärmungstrend von 0,58 °C pro Jahrzehnt (berechnet über den Zeitraum 1990 - 2022).

Der durch die Nordseeanalyse des BSH abgedeckte längere Zeitraum erlaubt hier auch einen differenzierteren Einblick in die beobachtete Erwärmung. Wenn man die Differenz zwischen dem Langzeitmittel des hier verwendeten Referenzzeitraums 1991 - 2020 und der Vergleichsperiode 1971 - 2000 betrachtet (siehe Abbildung rechts), wird offensichtlich, dass der Erwärmungstrend im südlichen Bereich, entlang der niederländischen Küste und in der Deutschen Bucht am stärksten ausgeprägt ist. Hier sehen wir im Vergleich dieser beiden um 20 Jahre verschobenen Perioden eine Temperaturdifferenz von bis zu 0,8 °C und mehr. Nach Nordwesten hin wird der Erwärmungstrend graduell schwächer, so dass im nördlichsten Bereich der Nordsee, nahe der Shetland-

Inseln, eine Temperaturdifferenz von „nur noch“ 0,2 bis 0,5 °C zu beobachten sind.

Eine Trendumkehr ist in den nächsten Jahrzehnten nicht zu erwarten. Die Menschen Schleswig-Holsteins müssen sich also darauf einstellen, dass sich die Meere vor ihrer Haustür weiterhin in ähnlichem Maß erwärmen, wie dies in den letzten Jahrzehnten zu beobachten war.



▲ Differenz des Langzeitmittels 1991 - 2020 der Meeresoberflächentemperatur der Nordsee zum Langzeitmittel der Vergleichsperiode 1971 - 2000.

Extremereignisse

Markante Situationen bleiben oftmals im Gedächtnis. Ein verheerender Orkan, extreme Hitze oder eine katastrophale Sturmflut: Extremereignisse verursachen oft menschliches Leid und richten große Zerstörungen an. Wie hat sich die Häufigkeit von Extremen in der Vergangenheit entwickelt und welche Veränderungen sind in Zukunft zu erwarten?

Extrem = selten

Extremereignisse sind sehr selten auftretende Ereignisse. Sie sind gekennzeichnet durch stark vom üblichen Zustand abweichende Verhältnisse. Bekannte Beispiele aus der entfernten Vergangenheit sind die 2. Marcellusflut am 15. Januar 1362, bei der Rungholt, eine Siedlung im nordfriesischen Gebiet, unterging, oder 1816, das Jahr ohne Sommer nach dem Ausbruch des Vulkans Tambora.

Auch aus der jüngeren Vergangenheit sind Extremereignisse bekannt. In vielen Köpfen sind beispielsweise noch die Hochwasser in den Jahren 2002 und 2013 entlang der Elbe verankert, beide ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen. In Erinnerung sind auch die bis dato einmalig lang andauernde Hitze im Juli 1994 oder die Stürme Anatol (1999) und Christian (2013) sowie das aufeinanderfolgende Sturmtrio Ylenia, Zeynep und Antonia im Februar 2022.

Damit steht berechtigterweise eine Frage im Raum: Was erwartet uns im Zuge des Klimawandels zukünftig noch alles? Aufgrund des seltenen Auftretens von Extremen sind statistische Analysen wenig belastbar.

Häufig wird ein Wiederkehrzeitraum von einmal in 100 Jahren betrachtet, das sogenannte Jahrhundertereignis. Die vorhandenen Messreihen sind häufig kaum länger. Die statistische Erfassung eines Ereignisses ist auf dieser Skala daher nicht einfach.

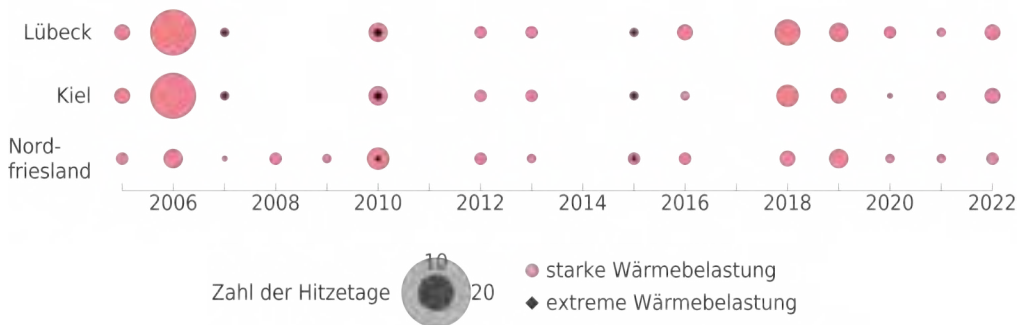
Temperatur

Die mittlere Temperatur ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen. In der Folge sind auch mehr Tage mit sehr hohen Temperaturen und Hitzeperioden aufgetreten. Beispiele dafür sind die im Bundesland verzeichneten Temperaturrekorde: Am 20. Juli 2022 wurden an der Station Grambek 39,1 °C und in Quickborn 38,4 °C gemessen. Bereits 30 Jahre zuvor, im August 1992, registrierte die DWD-Messstation in Lübeck-Blankensee 38,0 °C.

Um extreme Temperaturereignisse klimatologisch einordnen zu können, dient die Anzahl der heißen Tage (Höchsttemperatur mindestens 30 °C) als Anhaltspunkt. Sie ist seit 1951 von unter einem Tag pro Jahr auf über vier Tage pro Jahr in 2022 angestiegen. Das Maximum in Schleswig-Holstein wurde 1994 mit 11,4 Tagen verzeichnet, dicht gefolgt vom insgesamt sehr warmen Jahr 2018 mit 10,6 heißen Tagen.

▼ Mesozyklone über Norddeutschland im Juni 2019.





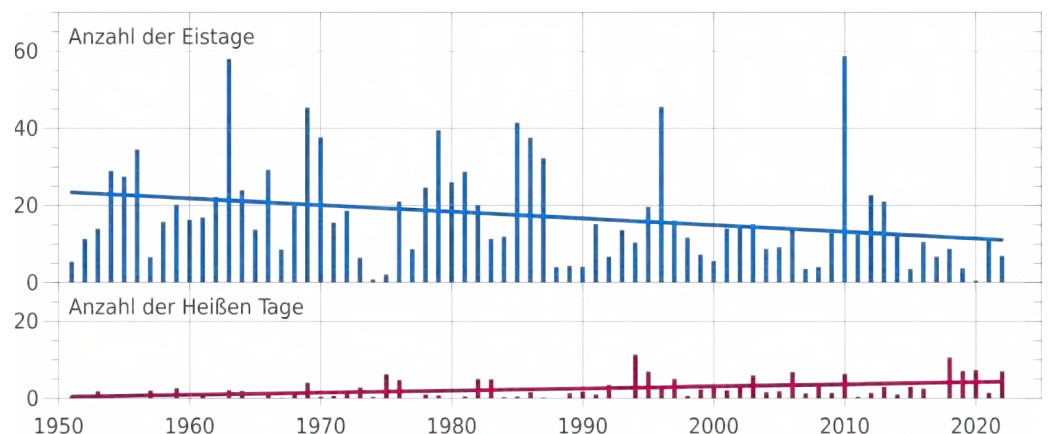
◀ Anzahl der vom DWD ausgegebenen Hitzewarnungen im Zeitraum 2005 bis 2022 für drei Landkreise in Schleswig-Holstein.

Mehrtägige Hitzeperioden können erhebliche negative Folgen für die Gesundheit haben. Seit 2005 betreibt der DWD ein Hitzewarnsystem, um die Auswirkungen möglichst gering zu halten. Wetterlagen, die hohe Temperaturen, hohe Luftfeuchte, geringe Windgeschwindigkeit, intensive Sonneneinstrahlung und geringe nächtliche Abkühlung aufweisen, können zu hitzebedingten Erkrankungen führen. Hitzewarnsysteme verwenden die aktuellen Wettervorhersagen, um Episoden mit hoher Wärmebelastung vorherzusagen. Gewarnt wird in zwei Stufen anhand der berechneten gefühlten Temperatur: Liegt sie an zwei Tagen in Folge über 32 °C und bleibt die Nacht dazwischen warm, wird vor starker Wärmebelastung gewarnt. Werden 38 °C überschritten, gibt der DWD eine Warnung vor extremer Hitzebelastung heraus. In den Jahren 2006 und 2018 wurden in Kiel und Lübeck die meisten Warnungen vor Wärmebelastung ausgesprochen. Aufgrund des kurzen Zeitraums ist in der Anzahl der Hitzewarnungen ein Trend bislang nicht ableitbar.

Durch die bereits vorhandene und weiter fortschreitende Erwärmung dürften hohe Temperaturen jenseits der 30-Grad-Marke auch in Schleswig-Holstein zukünftig noch häufiger auftreten. Sie werden

oft mit lang anhaltenden Hitzeperioden verbunden sein. Hierfür geben die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen klare Indizien. Eine belastbare Abschätzung, welche Spitzentemperatur zukünftig auftreten kann, gibt es bisher nicht.

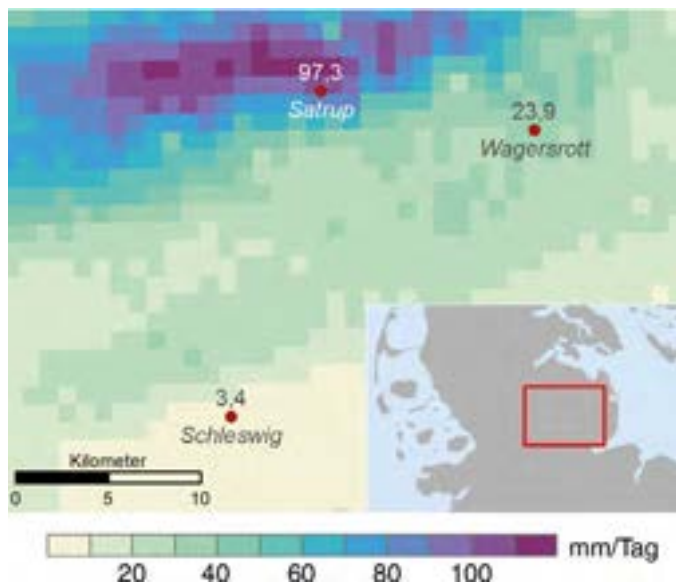
In Zeiten globaler Erwärmung stellt sich die Frage, wie die Chancen auf kalte Winter bei uns zukünftig stehen. In Norddeutschland werden sie hervorgerufen durch längere Witterungsperioden, die durch arktische oder eurasische Kaltluftzufuhr geprägt sind. Wie sich die Wahrscheinlichkeit für derartige Witterungssituationen vor dem Hintergrund eines häufiger eisfreien arktischen Küstengewässers entwickeln wird, ist Gegenstand aktueller Forschung. Grundsätzlich schwächt sich die Intensität solcher Witterungsverhältnisse durch die globale Erwärmung ab.



▲ Anzahl der Heißen Tage pro Jahr (Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C) und Anzahl der Eistage pro Jahr (Tageshöchsttemperatur < 0 °C), Gebietsmittelwerte von 1951 bis 2022.

Niederschlag

Das Wasser einer vollen Badewanne verteilt auf nur einen Quadratmeter: Soviel Niederschlag, $142,3 \text{ l/m}^2$, fiel im August 2007 binnen 24 Stunden in Oeversee-Frörup, südlich von Flensburg und westlich von Satrup gelegen, vom Himmel. Die Abbildung unten zeigt die zum Ereignis erstellte kombinierte Karte aus Mess- und Radardaten. Damit solch immense Mengen in so kurzer Zeit abregnen, müssen mehrere meteorologische Gegebenheiten aufeinandertreffen. Lokal braucht es starke Hebungsprozesse, die zu einem Ausfallen der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit führen. Dabei gilt: Je höher die Temperatur der Luftmasse, desto mehr Wasser kann enthalten sein. Die großräumige Wettersituation muss weiterhin für eine stetige Zufuhr weiterer warmer und feuchter Luftmassen sorgen.



▲ Starkregenereignis am 22.08.2007: In schwülwarmer Luft entwickelten sich Schauer und Gewitter, die räumlich eng begrenzt zu hohen Niederschlagsmengen führten. Die Bodenmessstationen liefern exakte Angaben zu den lokal gefallenen Regenmengen, Radarbilder zeigen die flächendeckende Verteilung des Niederschlags. Im Verfahren RADOLAN werden beide Informationen kombiniert. Punkte: Automatische Niederschlagsstationen, Tagesmenge des Niederschlags in mm; farbiges Raster: Tagesmenge des Niederschlags in mm aus RADOLAN. Größe der Rasterzellen: $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

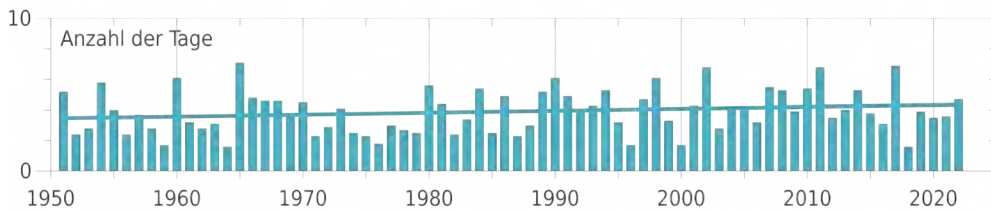
Der Forschungsbedarf im Themenbereich Starkniederschlag ist hoch, denn die Anforderungen an quantitative Angaben zu großen bis außergewöhnlichen Niederschlagsmengen für praxisrelevante Zielsetzungen sind im Zuge der Klimawandelthematik gestiegen. Die für unterschiedliche Anwendungen relevanten Starkniederschlagsereignisse können sowohl lokale Niederschläge kurzer Dauer und hoher

Intensität als auch über mehrere Stunden oder Tage anhaltende und ausgedehnte Niederschläge mit beträchtlichen Gesamtniederschlagsmengen sein. So wird für die Siedlungsentwässerung als wichtige Bezugsgröße unter anderem die Häufigkeit des Auftretens von Niederschlägen mit einer Andauer von 15 Minuten genutzt. Für das Risikomanagement von Flusshochwassern sind Niederschläge mit einer Dauerstufe von zwölf Stunden und mehr relevant. Der diagnostizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf zum Risikomanagement bei der Siedlungsentwässerung einerseits und dem Umgang mit Flusshochwassern andererseits muss weiter abgebaut werden.

Seit 2001 ist es möglich, durch Fernerkundungsmethoden, wie dem DWD-Weterradarverbund, den Niederschlag flächendeckend zu erfassen und damit auch die lokalen und kurzzeitig hohen Intensitäten des Niederschlags. Der Zeitraum von nunmehr 22 Jahren, in dem diese Daten erfasst werden, ist klimatologisch gesehen nach wie vor recht kurz. Die Analyse der Nutzbarkeit der Daten steht noch am Anfang.

Bis zum Jahr 2000 stellten die Messdaten der Bodenmessstationen die einzige, bekanntermaßen unzureichende Informationsquelle dar, um Starkregenereignisse zu erfassen. Zu einer Abschätzung der Entwicklung der Starkniederschläge kann der Kennwert mit einer Tagesmenge des Niederschlags von mindestens 20 l/m^2 herangezogen werden. Die Zeitreihe seit 1951 ist in der Abbildung auf der folgenden Seite zu sehen. Es wird angenommen, dass die Messung an einer Station einer Stichprobe entspricht. Verwendet man die Mittel aller Stationen, wie es bei der Bildung des Mittelwertes über die Fläche des Landes gemacht wird, so ist die Auswertung auf Basis der großen Menge der Stichprobenwerte statistisch belastbarer.





◀ Anzahl der Tage mit mindestens 20 l/m² Niederschlag (Gebietsmittelwerte) im Zeitraum 1951 bis 2022.

Die größte Anzahl derartiger Starkregenereignisse trat im Flächenmittel im Jahr 1965 mit sieben Tagen auf. Ausgewertet wurde der Zeitraum von 1951 bis 2022. Bisher ist in jedem Jahr mindestens ein Tag mit Starkregen aufgetreten. Der lineare Trend von 1951 bis heute von einem zusätzlichen Starkregentag ist nur begrenzt aussagefähig. In der Referenzperiode 1961 – 1990 wurden landesweit durchschnittlich 3,6 Tage pro Jahr beobachtet. Im neuen 30-Jahres-Zeitraum 1991 – 2020 stieg der Wert auf 4,2 Tage pro Jahr. Generell ist bei einem derart seltenen Ereignis Vorsicht bei der Interpretation geboten.

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



▲ Ausschnitt einer Relieffklassifikationskarte nach dem topographischen Klassifikationsindex für das Flachland am Beispiel Kiel. Blaue Farben kennzeichnen Senken, an die bei Starkregen erhöhte Anforderungen an die Entwässerung gestellt werden (Quelle: LLUR).

Generell aussagekräftigere Ergebnisse sind im Rahmen des Radarverbunds möglich. In einem mehrjährigen Projekt hat der DWD zusammen mit dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) deutschlandweit erstmals Starkregen-

und Schadendaten systematisch untersucht. Dafür wurden Niederschlagsmessungen aus 17 deutschlandweiten Radarstationen seit 2001 detailliert ausgewertet. So wurde es erstmalig möglich, mehr als 11000 Starkregenereignisse bundesweit zu identifizieren und zu katalogisieren.

Auswirkungen von Starkniederschlag

Schleswig-Holstein legt ein besonderes Augenmerk auf die Untersuchung von Starkniederschlagsereignissen. Diese Geschehnisse, die gerade in den Sommermonaten mit heftigen Gewittern auftreten, können wegen der Topografie des Landes schwere Überflutungen und damit große Schäden anrichten. Das Land ist hier in der Verantwortung für die Daseinsvorsorge und den vorbeugenden Katastrophenschutz.

Die Starkregenwarnungen des DWD sind eine wichtige Informationsquelle. Sie unterteilen sich in Warnungen vor markantem Wetter und Unwetterwarnungen. Eine Reihe von Faktoren beeinflusst die Auswirkungen intensiver Niederschläge. Zunächst können die Niederschläge vor Ort eine lokale Überflutung erzeugen. Die Dimensionen dieser Überflutungen werden entscheidend durch das Maß der baulichen Nutzung und der Versiegelung beeinflusst. Eine flächige Bebauung, die nicht mit einer großzügig dimensionierten Regensammlung und Regenrückhaltung ausgestattet ist, wird größere Schäden verzeichnen als dies auf nicht bebauten Flächen der Fall sein wird. Hinzu kommt die in weiten Teilen des Landes Schleswig-Holstein sehr flache und nur wenig höhenmäßig strukturierte Landschaft, die ein schnelles Abfließen von Starkregen nicht fördert, sondern das Wasser am Ort des Niederschlags hält.

Im oben erwähnten Projekt zusammen mit dem GDV zeigte sich: Extreme Regenfälle haben zwischen 2002 und 2017 fast 54000 Schäden an Wohngebäuden in Schleswig-Holstein verursacht. Am häufigsten waren Bewohner im Landkreis Rendsburg-Eckernförde betroffen: Hier wurden in dem Zeitraum 85 Starkregenereignisse gezählt, gefolgt vom Landkreis Dithmarschen mit 67 Ereignissen. Die Städte Kiel und Neumünster wurden wesentlich seltener von Starkregen heimgesucht (jeweils vier Ereignisse).

Jedoch liegt beispielsweise in Kiel die durchschnittliche Schadenssumme für den einzelnen Hausbesitzer pro Ereignis 30 % höher als im Landkreis Dithmarschen. Im Gesamtergebnis zeigte sich: Gerade die kurzen, heftigen Niederschläge verursachen besonders häufig hohe Schäden.

Diese extremen Niederschläge werden im Land schließlich über die Gewässer der Flussgebietsgemeinschaften Eider, Treene, Stör, Schwentine und Trave direkt in die Nord- und Ostsee sowie die Tideelbe abgeführt. Daher spielt für die Entwässerung der Niederungsgebiete der Außenwasserstand der Meere eine entscheidende Rolle. Bei einer Erhöhung des Meeresspiegels ist davon auszugehen, dass die Entwässerung der Niederungsgebiete im Freigefälle in Zukunft zusehends schwieriger wird und sich durch den ansteigenden Meeresspiegel auch binnenseitig eine Verstärkung des Hochwasserrisikos ergibt.

▼ *Deichsicherung an der Treene.*



Hagel

Hagelereignisse sind lokale und seltene Ereignisse, die aber hohe Schäden an der Infrastruktur und Verluste in der Landwirtschaft verursachen können. Durch die meist geringe Ausdehnung und die nur punktuelle Beobachtung konnten in der Vergangenheit nicht alle Ereignisse erfasst werden. Um diese Informationslücke zu schließen, werden die seit 2001 vorliegenden Radardaten genutzt. Die Ergebnisse zeigen im Süden Deutschlands eine höhere Anzahl von Hagelereignissen pro Jahr als im Norden. Auf Basis der vorhandenen Beobachtungsdaten ist es nicht möglich, Entwicklungstendenzen für die Änderung der Anzahl von Hagelereignissen zu bestimmen. Alternativ ist die Nutzung von Daten, die indirekt auf Hagelfall schließen lassen, möglich. Dies sind Konvektionsparameter, die das Potential für die Gewitter- und Hagelbildung beschreiben. Statistische Analysen der hagelrelevanten Konvektionsparameter zeigen für die vergangenen 20 bis 30 Jahre eine leichte Zunahme des Potentials.



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

Wind

Die „steife Brise“ gehört zum nördlichsten Bundesland wie die Berge zu Bayern. Sturm- und Orkanereignisse sorgen von Flensburg bis zur südlichen Landesgrenze für regelmäßige Gesprächsthemen. Mitte Februar 2022 beispielsweise kam es gleich zu drei Stürmen in Folge, Ylenia, Zeynep und Antonia. In Büsum im Kreis Dithmarschen registrierte der DWD eine Orkanböe von 143,3 km/h. Auch im Kreis Rendsburg-Eckernförde sowie auf Fehmarn wurden Orkanböen mit mehr als 140 km/h gemessen. Die Folge waren umgestürzte Bäume, hohe Sachschäden sowie unzählige Einsätze für Rettungsdienste und Feuerwehren in Schleswig-Holstein.

Markante Sturmereignisse wie 2022 beleben regelmäßig die Diskussion über mögliche Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Stürmen oder generell über Langzeittrends der Windgeschwindigkeit. Die

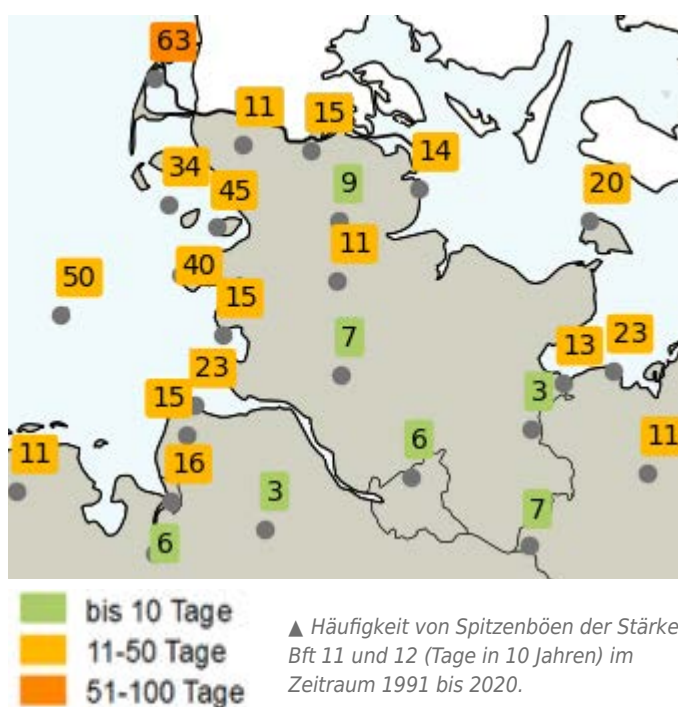
▼ *Sturmtief Felix im Januar 2015.*



Antwort darauf ist schwierig. Fast alle Windzeitreihen weisen Inhomogenitäten auf. Des Weiteren sind die zur Verfügung stehenden Zeitreihen meist nur einige Jahrzehnte lang - zu kurz, um Langzeittrends, über zum Beispiel 100 Jahre, bestimmen zu können. Stürme und Orkane von besonderem Interesse sind seltene Ereignisse und damit nur mit möglichst langen, homogenen Zeitreihen statistisch zu bewerten.

Um darzustellen, wie stark die Regionen in Schleswig-Holstein durch hohe Windgeschwindigkeiten gefährdet sind, wurden die Messungen an den Stationen des Windmessnetzes des DWD ausgewertet. Verwendet wurden die täglichen Windspitzen (höchster 3-Sekunden-Mittelwert des Tages) des Zeitraums 1991 - 2020.

Die untenstehende Karte zeigt die durchschnittliche Anzahl an Tagen von Spitzenböen der Stärke 11 und 12 Beaufort (Bft) (ab 103 km/h) über einen Zeitraum von zehn Jahren. Werden beispielsweise in zehn Jahren Windspitzen ab Bft 11 an durchschnittlich 21 Tagen registriert, so ist - statistisch gesehen - jedes Jahr mit zwei Ereignissen zu rechnen. In Schleswig-Holstein ist das Gebiet nördlich einer Linie Elb-/Travemündung stärker gefährdet als der Süden des Landes. Am häufigsten werden die höchsten Windspitzen an der Nordseeküste verzeichnet. Aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen ist für die Zukunft bei den Stürmen keine deutliche Änderung erkennbar.



Tornados



▲ Tornado über der Nordsee am 10.07.2007.

Kurzlebige, räumlich stark begrenzte, rotierende Luftmassen unter einer konvektiven Wolke mit Bodenkontakt, die hohe Schäden verursachen: Tornados gehören zu den gefährlichsten und intensivsten Wettererscheinungen, auch in Norddeutschland. Mittlerweile werden mehr Tornados entdeckt als vor 20 Jahren. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse auf eine zunehmende Gesamtanzahl zu. In einer hochtechnisierten, digitalen Welt ist es wesentlich einfacher, per Smartphone und Internet besondere Ereignisse schnell zu dokumentieren und weiterzubreiten.

Schwächere Tornados, die nur geringere Schäden verursachen, bleiben in vielen Fällen auch heute noch unentdeckt. In Schleswig-Holstein wurden seit 2000 im Mittel ein bis zwei Tornados pro Jahr über Land beobachtet und vier bis fünf Tornados über See (Wasserhosen). Stärkere Tornados mit großer Zerstörungskraft sind in Schleswig-Holstein selten. Anfang Juni 2016 wurden allerdings gleich mehrere Tornados in kurzer Zeit gesichtet und bestätigt. So beschrieben Augenzeugen am späten Nachmittag des 5. Juni gleich zwei Tornados etwa 2 km südöstlich von Jübeck in der Nähe der Autobahn A7. Nur wenige Minuten später wurde zwischen Handewitt und Wanderup, südwestlich von Flensburg, eine weitere Tornado-sichtung bestätigt. Einen Tag danach, am 6. Juni 2016, gab es auf einem Feld südöstlich von Niebüll bereits die nächste Beobachtung eines Tornados.

Auf Basis der vorliegenden regionalen Klimaprojektionen ist nicht abzuleiten, dass Tornados zukünftig häufiger auftreten werden. Aufgrund des zukünftig höheren Energiepotenzials ist jedoch eine Zunahme in der Intensität von Tornados denkbar.

Phänologie

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

Der Kreislauf der Natur als Klimaindikator

Phänologie beschreibt im Jahresverlauf periodisch wiederkehrende Erscheinungen in der Natur: das Aufblühen einer Pflanze, die Fruchtreife, den Brutbeginn von Vögeln und so weiter. Gerade Pflanzen eignen sich gut als sensibler Bioindikator für Klima- und Umweltveränderungen, da ihre Entwicklung direkt von sich verändernden Umweltbedingungen beeinflusst wird. Die Pflanzen der gemäßigten Breiten sind in ihrer Vegetationsrhythmik – Wachstumsperiode im Frühling und Sommer und Ruheperiode im Winter – an den jahreszeitlichen Wechsel ihrer Umweltbedingungen angepasst. Die Natur in Schleswig-Holstein zeigt bereits markante Auswirkungen auf die sich verändernden klimatischen Bedingungen. So haben sich beispielsweise die Eintrittszeiten nahezu aller phänologischen Jahreszeiten verschoben.

Phänologische Jahreszeiten

Der phänologische Kalender unterteilt sich in zehn physiologisch-biologisch begründete Jahreszeiten. Jeder phänologischen Jahreszeit werden bestimmte Zeigerpflanzen mit entsprechenden Entwicklungsphasen zugeordnet.

So beginnt das phänologische Jahr mit dem Vorfrühling, dessen Beginn von der Blüte der Gemeinen Hasel (*Corylus avellana*) eingeleitet wird. Im Zeitraum 1991 – 2020 war die mittlere Eintrittszeit des Vorfrühlings 18 Tage früher als in der Periode 1961 – 1990. Der Vorfrühling endet mit dem Beginn der Forsythienblüte (*Forsythia x intermedia*), die den Erstfrühling einläutet. Hier kann eine Verfrüherung der Eintrittszeit von 13 Tagen beobachtet werden.

Dem Erstfrühling folgt der Vollfrühling, welcher durch das Erblühen der ersten Apfelbäume (*Malus*) beginnt. Auch hier trat die Blüte zwischen 1991 und 2020 im Mittel zwölf Tage früher ein als in der Vergleichsperiode 1961 – 1990.



▲ Phänologische Uhr: Die verschiedenen Entwicklungsphasen der Pflanzen sind phänologischen Jahreszeiten zugeordnet. Die „Phänologische Uhr“ zeigt diese Jahreszeiten und ihre sogenannten Leitphasen (Mittelwerte für Schleswig-Holstein). Beim Vergleich der Zeiträume 1961 – 1990 (äußerer Ring) und 1991 – 2020 (innerer Ring) wird die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten deutlich.

Mit der Blüte des Schwarzen Holunders (*Sambucus nigra*) setzt der Frühsommer ein, dessen Eintrittszeit sich im Zeitraum 1991 – 2020 um elf Tage nach vorne verschoben hat. Der Hochsommer, welcher sich durch erste blühende Sommerlinden (*Tilia platyphyllos*) bemerkbar macht, weist eine Verfrüherung von neun Tagen auf. Nachdem bis zum Beginn des Hochsommers das Erblühen der Leitpflanzen als Indikator für den Beginn einer phänologischen Jahreszeit dient, rücken nun erste Früchte in den Fokus der Beobachtung. Die ersten frühreifenden Äpfel können zu Beginn des Spätsommers gepflückt werden. Diese phänologische Phase tritt im Mittel fünf Tage früher auf als im Referenzzeitraum. Beim Übergang zum Frühherbst wird nochmals der Schwarze Holunder als Leitpflanze herangezogen. Seine Früchte waren im Zeitraum 1991 – 2020 etwa zwölf Tage eher reif. Der Vollerbst beginnt mit den

ersten reifen Früchten der Stiel-Eiche (*Quercus robur*) und zeigt einen um eine Woche verfrühten Eintrittstermin für die Fruchtreife. Beginnen die Blätter der Stiel-Eiche sich zu verfärben, fängt der Spätherbst an. Dies ist, neben dem Beginn des phänologischen Winters, die einzige Phase, die eine Verspätung von vier Tagen aufzeigt. Der Grund hierfür ist, dass höhere Temperaturen im Herbst den Chlorophyllabbau im Blatt verlangsamen und damit zu einer späteren Blattverfärbung führen. Wirft die Stiel-Eiche ihre ersten Blätter ab, beginnt der phänologische Winter. Auch diese Phase hat sich um zwei Tage nach hinten verschoben.

Die Eintrittstermine der Frühjahrsphasen zeigen generell die stärksten Änderungen. Das liegt u. a. daran, dass diese Phasen wesentlich durch den Anstieg der Temperatur ausgelöst werden, während bei den späteren Phasen noch weitere Faktoren eine wichtige Rolle spielen.

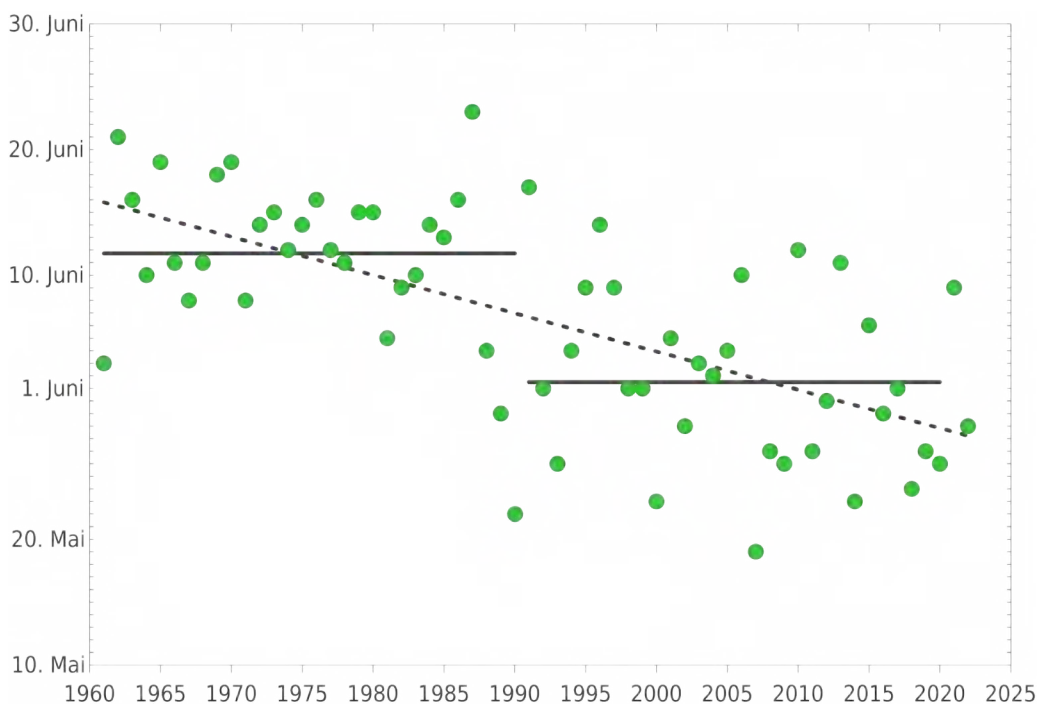
Lokale und zeitliche Unterschiede

Die oben beschriebenen Entwicklungen beziehen sich auf die mittleren Werte für Schleswig-Holstein über zwei lange Vergleichszeiträume. Da die phänologischen Jahreszeiten im engen Zusammenhang mit meteorologischen Größen wie der mittleren bodennahen Lufttemperatur und der Wasser- und Lichtverfügbarkeit stehen, kann es lokal und von Jahr zu Jahr zu Abweichungen hiervon kommen.

Entgegen des Trends der deutlich früheren Blüte des Schwarzen Holunders im Zeitraum 1991 - 2020, welche den Eintrittstermin des Frühsommers bestimmt, weist beispielsweise das Jahr 2021 eine um rund eine Woche spätere Blüte des Schwarzen Holunders auf, als das Mittel dieses Zeitraums. Eigene Beobachtungen vorort können also vom landesweiten Trend abweichen.

Allgemeiner Trend

Auch deutschlandweit lassen sich Verschiebungen der phänologischen Jahreszeiten feststellen. Bis auf die Eintrittstermine des phänologischen Spätherbstes und Winters, die keine markanten Veränderungen aufzeigen, rutschen alle phänologischen Jahreszeiten im Jahresverlauf nach vorne. Das führt dazu, dass sich der Zeitraum der Vegetationsruhe (Winter) verkürzt, im Vergleich der beiden betrachteten Zeiträume um durchschnittlich 20 Tage. Der gesamte Frühlingszeitraum (Vorfrühling bis Vollfrühling) war dagegen im Zeitraum 1991 - 2020 im Mittel um sieben Tage länger als im Zeitraum 1961 - 1990. Der Jahreszyklus der Pflanzen ist dahingehend optimiert, das Frostrisiko bei einer möglichst langen Wachstumsperiode gering zu halten. Ein im Jahr früher Anstieg der mittleren Tagestemperaturen verlängert zwar die Vegetationsperiode durch verfrühten Austrieb, ist aber auch möglicherweise mit einer erhöhten Spätfrostgefahr für die Pflanzen verbunden.



▼ Blüte Schwarzer Holunder.



▲ Eintrittstermine 1961 - 2022 der Leitphase der phänologischen Jahreszeit Frühsommer, die sich an dem Beginn der Blüte des Schwarzen Holunders orientiert.

Arten und Lebensräume im Klimawandel

Beitrag des Landesamtes für Umwelt (LfU)

Die direkten und indirekten Folgen des Klimawandels haben Auswirkungen auf die Vielfalt und Stabilität von Arten, Lebensgemeinschaften und Lebensräumen an Land, in Gewässern und in den Meeresökosystemen und fordern die Anpassungsfähigkeit aller biologischen Systeme. Dabei gibt es Gewinner und Verlierer.

In Schleswig-Holstein ist fast die Hälfte aller Tier- und Pflanzenarten auf den Roten Listen der gefährdeten Arten geführt. Für den Großteil der Arten und Lebensräume ist eine fortwährende Verschlechterung festzustellen. Die Ursachen sind vielfältig und der Klimawandel ist, z. B. durch die Verschiebung der phänologischen Phasen, eine davon (siehe Kapitel Phänologie). Darüber hinaus wird in Schleswig-Holstein kein Klimafolgenmonitoring durchgeführt. Dennoch gibt es Prognosen hinsichtlich der Klimafolgen für Lebensräume und einzelne Artengruppen.

Eine Vorhersage, ob bzw. welche Arten betroffen sein könnten, bleibt schwierig. Für Vögel, Libellen und Schmetterlinge gibt es allerdings inzwischen Hinweise, dass einzelne Arten bereits jetzt durch den Klimawandel gefährdet sind.

Pflanzengesellschaften

In einem Gutachten des Ökologiezentrums der Christian-Albrechts-Universität Kiel (Dierssen et al. 2007) wurden die Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf naturschutzfachlich relevante Lebens-

▼ Der Mooresee „Schwarze Kuhle“ gehört zu den Lebensräumen, die auf ausreichend Niederschläge und eine natürliche Hydrologie angewiesen sind.



räume und Pflanzenarten des Landes Schleswig-Holstein beleuchtet. Einige Beispiele hierfür sind in der Tabelle dargestellt.

Arten

Hinsichtlich der Klimawandelfolgen für Tierarten werden in den Roten Listen zu drei Artengruppen Angaben gemacht und zwar zu Schmetterlingen, Libellen und Vögeln.

Schmetterlinge

Für die heimischen Schmetterlingsarten sind laut Rote Liste „Schmetterlinge Schleswig-Holsteins“ (Kolligs 2021) Populationen mit geringen Populationsdichten, die zudem oftmals nur noch lokal vorkommen, vom Klimawandel, wie z. B. Extremwitterungsereignisse, bedroht. Anhaltende Trockenperioden haben zudem Folgen für Arten der sandigen Magerrasen und Dünen wie auch der Moore, da die für sie notwendige

Vegetation vertrocknet. Der Ausfall der Glockenheide hat z. B. dazu geführt, dass einige kleine Populationen des Hochmoor-Perlmutterfalters ausgestorben sind. Zumindest Küstenschmetterlinge sind noch nicht unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Mittelfristig werden Erwärmung und Meeresspiegelanstieg aber auch dort zu einem Lebensraumverlust führen und damit auch die an diese Lebensräume angepassten Schmetterlingsarten bedrohen. Weiter ist zu beobachten, dass einige Arten bereits zwei oder drei Generationen anstatt einer aufweisen. Auch die Flugzeiten sehr vieler Arten verschieben sich deutlich nach vorne. Es wandern zwar auch Arten, v. a. zuvor östlich verbreitete Arten, nach Schleswig-Holstein ein, aber dies sind ungefährdete und wenig spezialisierte Arten. Es ist somit oftmals eine Gemengelage aus Lebensraumverlust, Lebensraumzerschneidung und Klimawandel.

▼ Beispiele für Lebensraumtypen (LRT) aus Anhang I FFH-Richtlinie und ihre erwartete Reaktion auf den Klimawandel.

Auszugsliste (Beispiele)			
Lebensraumtypen aus Anhang I FFH-Richtlinie in Schleswig-Holstein			
EU-Nr.	Name	Beeinträchtigung durch den Klimawandel	Bewertung
1320	Schlickgrasbestände (<i>Spartinion</i>)	Durch den Klimawandel werden eher positive Auswirkungen erwartet, da sich die Art <i>S. anglica</i> an der nördlichen Arealgrenze befindet.	+
2320	Trockene Sandheiden mit <i>Calluna</i> und <i>Empetrum nigrum</i> auf Binnendünen	Aufgrund der derzeitigen klimabedingten Südgrenze des Areals und einer mit steigenden Temperaturen wachsenden Stickstoffsensitivität bei <i>Calluna vulgaris</i> wird mit einem Rückgang in Schleswig-Holstein gerechnet.	-
2330	Binnendünen mit offenen Grasflächen mit <i>Corynephorus</i> und <i>Agrostis</i>	Sofern keine Nährstoffe eingetragen werden, werden diese Lebensräume eher vom Klimawandel profitieren.	+
4010	Feuchte Heiden des nordatlantischen Raumes mit <i>Erica tetralix</i>	Durch den Klimawandel wird es wärmer und trockener und die Mooroberflächen werden sich zunehmend mit Gehölzen bestocken. Umso wichtiger wird es sein, die natürliche Hydrologie wieder herzustellen und Nährstoffeinträge zu vermeiden.	-
6510	Magere Flachland-Mähwiesen (<i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>)	Keine Beeinträchtigungen.	/
7120	Noch renaturierungsfähige degradierte Hochmoore	Durch den Klimawandel wird es wärmer und trockener und die Mooroberflächen werden sich zunehmend mit Gehölzen bestocken. Umso wichtiger wird es sein, die natürliche Hydrologie wieder herzustellen und Nährstoffeinträge zu vermeiden.	-
7230	Kalkreiche Niedermoore	Gefährdung durch sinkende Wasserstände.	-
8310	Nicht touristisch erschlossene Höhlen	Gefährdung durch Starkregenereignisse, die eine schnellere Auswaschung bewirken. Langfristig sind weitere Einstürze der Höhlen absehbar.	-
9110	Hainsimsen-Buchenschwamm (<i>Luzulo-Fagetum</i>)	In der Jungmoräne wird sich die Bodenversauerung abschwächen, ansonsten sind die klimabedingten Auswirkungen für die Waldbodenvegetation differenziert zu bewerten, je nach Standort.	/
91D0	Moorwälder	Sekundäre Moorwälder, die sich aufgrund der zunehmenden Sommertrockenheit möglicherweise noch stärker ausbreiten werden und die Moore zu einer noch stärkeren Kohlenstoffquelle werden lassen.	-



▲ Die Feuerlibelle gehört zu den Arten, die im Zuge des Klimawandels verstärkt nach Schleswig-Holstein einwandern.

Libellen

Auch für Libellen kann gemäß Rote Liste „Die Libellen Schleswig-Holsteins“ (Winkler et al. 2011) größtenteils nur prognostiziert werden, welche Libellenarten profitieren und welche verlieren werden. Zu den Gewinnern werden danach Arten mit folgenden Eigenschaften gehören:

- Anspruchslose Arten mit weiter Verbreitung
- Arten nährstoffreicher Gewässer
- An variable Umweltbedingungen angepasste Arten (r-Strategen)
- Wärmeliebende und temperaturtolerante Arten
- Ausbreitungsstarke Arten
- Arten mit kurzer Larvalentwicklungszeit

Positive Bestandsveränderungen lassen sich somit auch für Libellen nicht ausschließlich auf den Klimawandel zurückführen, sondern auch auf die generelle Anpassungsfähigkeit an veränderte Umweltbedingungen. Dieser Trend ist bereits heute bei der Großen Königslibelle (*Anax imperator*) und der Feuerlibelle (*Crocothemis erythraea*) deutlich sichtbar.

Durch den Klimawandel benachteiligt sein werden Arten mit folgenden Eigenschaften:

- Spezialisierte Arten mit lokalen Vorkommen
- Arten nährstoffarmer Gewässer
- An weitgehend konstante Umweltbedingungen angepasste Arten (k-Strategen)
- Nordische Arten, deren Larven auf eine Erhöhung

der Wassertemperatur sensibel reagieren

- Ausbreitungsschwache Arten
- Arten mit langer Larvalentwicklungszeit

Vor allem kleine Populationen sind durch vermehrte Starkregenereignisse und Trockenzeiten vom Aussterben bedroht.

Es gibt in Schleswig-Holstein allerdings auch Arten, die Eigenschaften aus beiden Gruppen aufweisen und für die hinsichtlich der Auswirkungen durch den Klimawandel keine Prognosen abgegeben werden können, z. B. die Kleine Pechlibelle (*Ischnura pumilio*).

Vögel

Die Rote Liste „Die Brutvögel Schleswig-Holsteins“ (Kieckbusch et al. 2021) hat in der abschließenden Gesamtbetrachtung auch die Klimafolgen bewertet. Die Vogelarten Schleswig-Holsteins sind an das in Schleswig-Holstein vorherrschende, meist milde und mit wenig Extremwetterereignissen, atlantisch geprägte Klima angepasst und konnten bislang den für die Bestandserhaltung ausreichenden Reproduktionserfolg erzielen. Entscheidend sind dabei die Bedingungen während der Brutzeit. Kurzzeitige Extremwetterlagen wie Hagelschauer, Starkregen und Hochwasserereignisse, aber auch mehrtägige oder sogar mehrere Wochen anhaltende Trockenheit oder Regenphasen können zum Verlust der Gelege oder Jungen führen.

Auch die Witterung im zurückliegenden Winter kann

Auswirkungen auf die darauffolgende Brutzeit haben. Zu geringe Winterniederschläge können dazu führen, dass Gewässer zu niedrige Wasserstände aufweisen oder trockenliegende Schilfsäume nicht mehr als Brutplatz geeignet sind. Auch können Kältewinter mit andauernder Eis- und Schneebedeckung zu Verlusten führen und damit die Brutbestände, z. B. von Eisvogel, Rohrdommel u. a. reduzieren.

Im Zuge des Klimawandels treten die klimawandelbedingten Witterungsverhältnisse inzwischen häufiger auf und werden, v. a. in Kombination mit Lebensraumverlust und hoher Prädation, für manche Vogelarten zum Problem. Stark betroffen sind nordische Arten der Küsten und Feuchtgebiete wie Alpenstrandläufer, Kampfläufer, Bekassine und Küstenseeschwalbe. Die erhöhte Anzahl an Hochwasserereignissen während der Brutzeit stellt inzwischen für außendeichs brütende Arten wie Seeschwalben, Säbelschnäbler, Austernfischer, Sandregenpfeifer oder Seereggenpfeifer eine ernste Gefahr dar. Bereits ein einziges Überflutungsereignis während der Brutzeit kann den kompletten Bruterfolg einer Brutsaison zerstören. Ein Ausweichen auf binnendeichs liegende Flächen ist aufgrund des höheren Prädationsdrucks ebenfalls wenig erfolgversprechend.

Infolge des Klimawandels kommt es zudem zu Verschiebungen im gesamten Nahrungsnetz. So fehlen zur Brutzeit bzw. Kükenaufzucht, z. B. für Seeschwalben, die passenden Nahrungsfische nahe der Brutgebiete.

Einige Arten dehnen ihr Brutgebiet nach Norden aus.



▲ Vor Hochwasser sichere Brutplätze, ausreichend Nahrung und keine Prädation sind die Voraussetzungen für einen guten Bruterfolg bei der Küstenseeschwalbe.

So haben die ursprünglich südlicher verbreiteten Stelzenläufer und Bienenfresser in jüngster Zeit mehrfach in Schleswig-Holstein gebrütet.

Hüppop et al. (2008) beschäftigen sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Vogelzug. Sie zeigen auf, dass, obwohl sich der Vogelzug über Jahrtausende entwickelt hat und viele Arten mehr oder weniger ausgeprägt auf bestimmte Zugzeiten festgelegt sind, sich doch beobachten lässt, dass die Anpassungen ein erstaunliches Ausmaß erreicht haben. Es geht dabei nicht nur um kurzfristige Anpassungen an Witterungsverhältnisse im Brutgebiet, v. a. bei Kurz- und Mittelstreckenziehern (KMZ), sondern auch bei Langstreckenziehern (LZ). Während bei den KMZ eine Verfrühung der Durchzugszeiten, der Ankunft im Brutgebiet und des Brutbeginns, Veränderungen anderer Brutparameter oder auch Veränderungen des Brutareals nachgewiesen worden sind, zeigt sich bei LZ, die im Sahel-Bereich und südlich davon überwintern, ein gegenteiliger Effekt. LZ werden offenbar von den nachteiligen Veränderungen im Überwinterungsgebiet (niedrigeres Nahrungsangebot mit Folgen für die Fettreserven) beeinflusst. Sie beginnen ihren Heimzug in die Brutgebiete erst später. Diese Verschiebungen der jahresperiodischen Vorgänge bei Vögeln werden eindeutig dem Klimawandel zugeordnet.

Literatur

Dierssen, K., Huckauf, A., Breuer, M. (2007): Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf naturschutzfachlich relevante Lebensräume und Pflanzenarten des Landes Schleswig-Holstein und sich daraus gegebenenfalls ergebende Handlungsoptionen des Naturschutzes. Unveröffentlichtes Gutachten des Ökologiezentrums der Christian-Albrechts-Universität Kiel im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein, Flintbek, 77 Seiten.

Kolligs, D. (2021): Die Schmetterlinge Schleswig-Holsteins – Checkliste aller Arten und Rote Liste der Großschmetterlinge, 3. Fassung. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Flintbek, Bd. 1 & 2, 246 Seiten.

Winkler, C., Drews, A., Behrens, T., Bruens, A., Haacks, M., Jödicke, K., Röbbelen, F., Voß, K. (2011): Die Libellen Schleswig-Holsteins - Rote Liste, 3. Fassung. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 85 Seiten.

Kieckbusch, J., B. Hälterlein & B. Koop (2021): Die Brutvögel Schleswig-Holsteins – Rote Liste, 6. Fassung. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Flintbek, Bd. 1 & 2, 230 Seiten.

Hüppop, K., Hüppop, O., Bairlein (2008): Veränderung von Zugzeiten. Der Falke 55: 294-299.

Wald im Klimawandel

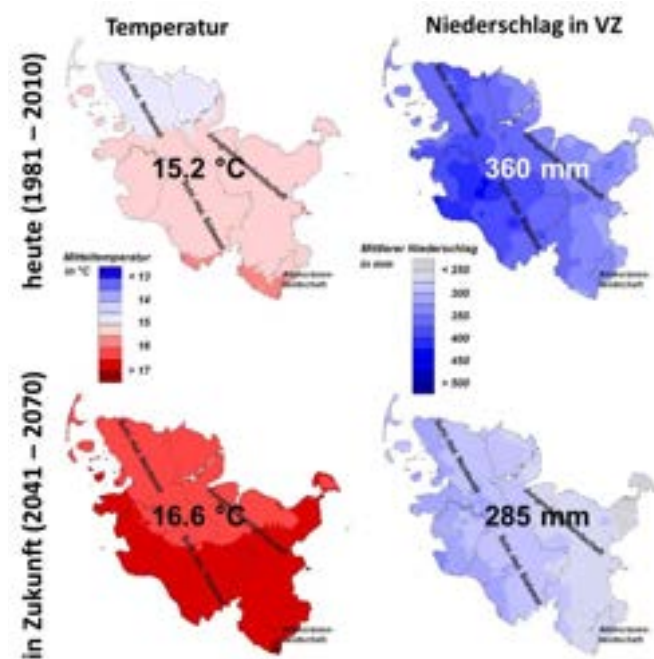
Beitrag der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)

Einführung

Der Klimawandel stellt für Wälder und Forstwirtschaft die größte Herausforderung der Gegenwart dar. Mögliche Klimaentwicklungen werden heute durch die vom Weltklimarat veröffentlichten RCP-Klimaszenarien beschrieben.

Während das optimistische Szenario RCP2.6 gegenüber dem Zeitraum 1971 – 2000 einen Anstieg der globalen Jahresmitteltemperatur um im Mittel 1 °C bis zum Ende des Jahrhunderts projiziert, ist nach dem pessimistischen Szenario RCP8.5 mit einer Temperaturerhöhung von im Mittel fast 4 °C zu rechnen (Hübener et al. 2017) (siehe Abbildung unten). Ungeachtet der Unterschiede im Detail lassen sämtliche Klimaprojektionen für Deutschland einen deutlichen Temperaturanstieg bei gleichzeitig veränderten jährlichen Niederschlagsverteilungen erwarten. Hinzu kommt ein gehäuftes Auftreten von Witterungsextremen wie Trockenperioden, Starkregenereignissen oder Stürmen.

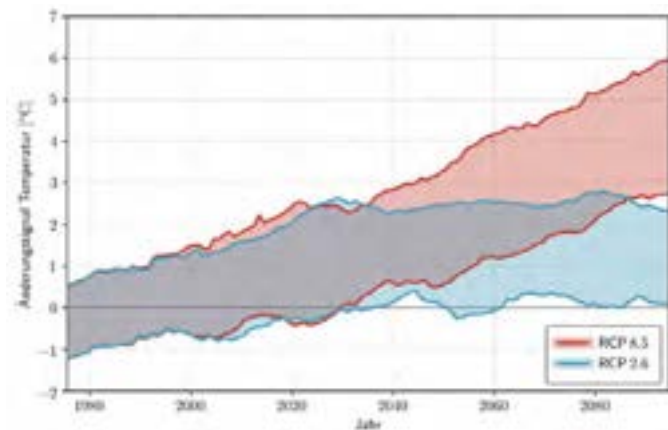
Für das Gebiet von Schleswig-Holstein zeigen die räumlichen Projektionen in Bezug auf Temperatur und Niederschlag (siehe Abbildung rechts) ein deutliches Bild der Veränderungen. Die Temperatur steigt dabei im Vergleich zu anderen Bundesländern verhaltener, während trotz des atlantischen Einflusses die Niederschläge in der für den Wald so wichtigen Vegetationszeit deutlich abnehmen. Die Projektionen für die aktuelle Waldvegetation lassen erwarten, dass in der



▲ Veränderung der Temperatur und des Niederschlages in der Vegetationszeit (VZ) für die Periode 2041 – 2070 gegenüber dem Median des Referenzzeitraumes (1981 – 2010) für die Simulationsensemble des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5, ECHAM6, STARS II).

Zukunft (2041 – 2070) die Wälder zu rund einem Drittel einem hohen Trockenstressrisiko ausgesetzt sein werden. Das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Klimawandels werden die Anpassungsfähigkeit wichtiger heimischer Baumarten vielerorts überschreiten, die Überlebenswahrscheinlichkeit wird für viele Baumarten deutlich abnehmen (vgl. Klinck u. Paar 2022).

Die nachhaltige, multifunktionale Forstwirtschaft in Schleswig-Holstein ist aufgrund ihrer weitreichenden Bindung an die Standortverhältnisse und langen Produktionszeiträumen im besonderen Maße durch den Klimawandel betroffen. Gesellschaft und Forstbetriebe müssen sich daher auf eine Zunahme der abiotischen und biotischen Gefahren, eine Veränderung des Landschaftsbildes und eine auf weiten Flächen verminderte Produktivität einstellen. Sie sind daher gut beraten, Risikovorsorge zu betreiben. Dabei sind Klimaanpassung und Klimaschutz zwei Seiten einer Medaille, denn nur durch den Erhalt stabiler, produktiver Wälder und die Nutzung der Potenziale in der Holzverwendung lässt sich der Beitrag der Forst-



▲ Veränderung der Jahresmitteltemperatur (Flächenmittel ReKlIEs-Gebiet) gegenüber dem Median des Referenzzeitraumes (1971 – 2000) für die Simulationsensemble des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5) und des Klimaschutz-Szenarios (RCP2.6) (Hübener et al. 2017).

und Holzwirtschaft zum Klimaschutz aufrechterhalten und ggf. ausbauen, um die weitere Klimaerwärmung zu begrenzen.

Die laufenden und z. T. unvorhersehbaren klimatischen Entwicklungen werden die Klimaanpassung der Wälder zu einer Daueraufgabe der Forstbetriebe machen. Trotz aller Unsicherheiten im Detail erlaubt das bislang erarbeitete Wissen die Bereitstellung von Entscheidungshilfen zur Klimaanpassung, die in der Forstpraxis in ein adaptives Management zu integrieren sind, das grobe Fehler vermeidet und dem Erkenntnisfortschritt folgt.

Forschungsansatz

Aufgrund verlängerter Vegetationsperioden und erhöhtem Verdunstungsanspruch wird zunehmender Trockenstress bei den meisten mitteleuropäischen Baumarten zu einer verminderten Produktivität und einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber weiteren abiotischen und biotischen Stressfaktoren führen. Die Einschätzung des Trockenstressrisikos für grund- und stauwasserfreie Waldstandorte erfolgt über Schwellenwerte der Standortwasserbilanz. Sie verrechnet die klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (Verhältnis zwischen Verdunstungsanspruch und zur Verfügung stehenden Niederschlägen) mit der nutzbaren Feldkapazität des Bodens (pflanzenverfügbares Bodenwasser). Die verwendeten Schwellenwerte der Trockenstressgefährdung beruhen auf Literaturangaben, Inventurauswertungen und Expertenwissen und bewerten die Vitalität, Widerstandsfähigkeit und Leistungsfähigkeit der Baumarten, ohne jedoch bei hoher Gefährdung deren absolute Verbreitungsgrenzen aufzuzeigen (siehe Tabelle).

Die weiteren Auswirkungen der sich ändernden Klimabedingungen auf Wälder werden an der NW-FVA baumartenspezifisch mit Hilfe von statistischen Modellen funktional beschrieben. Dabei werden die Bereiche Wachstum und Risiken getrennt betrachtet, weil sie unterschiedlichen Einflussfaktoren und Dynamiken unterliegen und unterschiedliche Anpassungsmaßnahmen erfordern. Analogieschlüsse bilden die Grundlage für die Prognosen der zukünftigen Waldentwicklung. Sie gehen davon aus, dass sich die zukünftigen Zustände an einem Standort über die Zustände an anderen Standorten beschreiben lassen, die gegenwärtig diese oder ähnliche Bedingungen aufweisen.

Die wichtigsten Datengrundlagen der Modelle bilden die beobachteten Klimadaten des Deutschen Wetter-

Trockenstressrisiko	Fichte	Buche	Eiche/Douglasie	Kiefer
gering	> 0 mm	> -50 mm	> -150 mm	> -200 mm
mittel	0 bis -80 mm	-50 bis -100 mm	-150 bis -350 mm	-200 bis -450 mm
hoch	< -80 mm	< -100 mm	< -350 mm	< -450 mm

Roterle Moortirke	Weißtanne Japanlärche Bergahorn Schwarzmoos	Roteiche Ahornarten Esche Hainbuche Linde Europ. Lärche Küstentanne	Sandbirke Schwarzkiefer
----------------------	--	---	----------------------------

▲ Trockenstress-Risikoklassifizierung der Hauptbaumarten im Anhalt an die Standortwasserbilanz – Saldo aus klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (Grasreferenz) und nutzbarer Feldkapazität. Blöcke unten: Weitere Baumarten, für die jeweils die gleichen Risikoklassengrenzen gelten.

dienstes, die Klimaprojektionen für das aus Gründen der Risikovorsorge gewählte RCP-Szenario 8.5, Informationen zum Standort und dem forstlichen Umweltmonitoring, Bestockungsinformationen aus Bundeswaldinventuren (BWI), Betriebsinventuren und von Versuchsflächen sowie ausgewählte Waldschutzstatistiken.

Handlungsoptionen im Wald

Die waldbaulichen Handlungsoptionen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel reichen vom standortgemäßen, klimaangepassten Waldumbau, der Stabilisierung der vorhandenen Wälder bis hin zur Senkung bzw. Verteilung der Risiken (Baumartenwahl, angepasste Pflege- und Nutzungskonzepte). Sie sind aber insgesamt aufgrund der hohen Lebensdauer von Wäldern nur zeitlich begrenzt steuerbar.

Grundlage aller Klimaanpassungsmaßnahmen ist die Überprüfung, ob auf gegebenem Standort die heute dort wachsenden oder dort noch zu verjüngenden Baumarten nach heutigem Stand des Wissens geeignet sind, sowohl mit dem herrschenden, als auch mit dem künftigen Klima zurechtzukommen. Zur Potenzialabschätzung der Baumarten anhand ihrer Trockenstressgefährdung (siehe Tabelle) werden an der NW-FVA Zuordnungstabellen für Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer entwickelt, die für bestimmte Stufen der Standortwasserbilanz und der Nährstoffversorgung die Rangfolge der Baumarten in Mischbeständen ausweisen oder sie ausschließen. Dies führt, bezogen auf jede Waldfläche des Landes, zu einer Einstufung, in welchen standörtlichen Kombinationen dort eine Baumart zukünftig als standortgerecht betrachtet und in welcher Mischung sie in einem Waldentwicklungstyp (WET) geplant werden kann oder auszuschließen ist. In der Regel ergeben sich für bestimmte Standorte



▲ Die Esskastanie (*Castanea sativa*) – ein Archäophyt, der bisher waldbaulich wenig Berücksichtigung gefunden hat, dem in Zukunft aber eine größere Rolle in den Wäldern zukommen könnte.

mehrere Optionen für die Wahl geeigneter WET. Diese Erkenntnisse werden bis zum Ende des Jahres 2023 allen Waldbesitzenden und Waldbewirtschaftenden in Schleswig-Holstein in einem Web-Portal und als mobile App zur Verfügung stehen. Neben der klimatischen Einschätzung wirken sich natürlich auch zukünftig weitere Kriterien wie etwaige Schutzgebietsauflagen, sonstige Gefährdungen, die waldbauliche Ausgangssituationen oder betriebliche Belange auf die Baumartenwahl aus.

Im Zuge der klimaangepassten Baumartenwahl werden in jüngster Zeit intensiver Ansätze diskutiert (Lieven et al. 2022), neben den heimischen Baumarten andere europäische Baumarten verstärkt in den Anbau einzubeziehen (siehe Fotos oben). Damit verbunden wird die Erwartung, dass im mediterranen Raum vorkommende und an die dortigen wintermilden sowie sommerheißen und häufig trockenen Verhältnisse angepasste Baumarten sich im Zuge des Klimawandels auch in Schleswig-Holstein als stabil und unempfindlich gegen Trockenstress erweisen. Belege dafür, dass nach Deutschland eingeführte, ursprünglich hier nicht heimische europäische Baumarten, beispielsweise aus dem mediterranen Raum, den Kriterien der Anbauwürdigkeit und ökologische Zuträglichkeit per se besser gerecht werden, sind jedoch bisher nicht erbracht.

Durch das forstliche Versuchswesen wurden solche Baumarten bislang größtenteils wenig untersucht bzw. zeigen – wie im Fall der bereits länger beobachteten Korsischen Schwarzkiefer (*Pinus nigra* var. *laricio*) – auf einer breiteren Standortpalette keine vorzüglichen Eigenschaften gegenüber einheimischen Arten. Kürzlich begonnene bzw. derzeit auch in Schleswig-Holstein anlaufende Forschungsprojekte, die ausdrücklich den mediterranen und vorderasiatischen Florenraum (z. B. Orient-Buche (*Fagus orientalis*); Baumhasel (*Corylus colurna*); Türkische Tanne (*Abies bornmülleriana*); Atlaszeder (*Cedrus atlantica*) u. a.) einbeziehen, werden mittel- bis langfristig Wissenslücken schließen, erlauben jedoch derzeit keine abschließende Beurteilung.

Ausblick

Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Klimas ist eine breite Baumartenpalette unumgänglich, um die Risiken für den Walderhalt, aber auch die Bewirtschaftung zu reduzieren. Der Klimawandel mit seinen Auswirkungen schreitet mit hoher Geschwindigkeit voran. Dieser Dynamik haben die Anpassungsfähigkeiten der Baumarten häufig nicht viel entgegenzusetzen. Die Begründung von Mischbeständen mit mehreren Baumarten erhöht die Resilienz der Wälder und wirkt so dem großflächigen Absterben einer Baumart entgegen (siehe Foto auf Folgeseite). Neben der besseren Durchmischung sind

vor allem auch die Erhöhung der Einzelstabilität und die Verkürzung von Produktionszeiträumen probate Mittel, die Wälder zu stabilisieren und damit Voraussetzungen für eine zügige Anreicherung mit klimaangepassten Baumarten zu schaffen. Eingeführte Baumarten sind bis auf wenige Ausnahmen bisher kein Ersatz, sondern eine willkommene Bereicherung des begrenzten heimischen Baumartenportfolios. Es fehlen aber langfristige Anbau- und Herkunftsversuche, sodass großflächige Anbauten erhebliche Risiken mit sich bringen und zunächst dem Versuchswesen vorbehalten bleiben sollten. Mindestens ebenso wichtig wie die Baumartenwahl sind geeignete Provenienzen und die Versorgung mit hochwertigem, herkunftsgesichertem Vermehrungsgut.

Eine Konzentration auf waldbauliche Handlungsoptionen und Anpassungsstrategien allein ist nicht ausreichend. Die jüngsten Erfahrungen und Forschungsergebnisse zeigen, dass in diese Anpassungsstrategien Aspekte eines systematischen Risikomanagements stärker integriert werden müssen. Für ein wirksames Risikomanagement bedarf es verstärkter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, um unter den Bedingungen des globalen Wandels die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß verschiedener Risiken besser einschätzen, ihre Wechselwirkungen mit bestimmten Standortbedingungen und Betriebspraktiken aufzeigen, die Sensitivität bzw. Elastizität von Waldökosystemen zutreffender beurteilen und ökonomisch und ökologisch bewertete Handlungsoptionen anbieten zu können. Die CO₂-Senkenleistungen des Waldes in allen Bereichen (Wald- und Produktspeicher, Holz als energetische und stoffliche Substitution) zu

▼ *Strukturreicher Mischbestand aus Schindelborkiger Hickorynuss (Carya ovata) und heimischer Rotbuche (Fagus sylvatica).*



optimieren, muss ein großes Anliegen sein. Angesichts der Langfristigkeit der forstlichen Produktion und der Unsicherheiten der Klimaprojektionen verbietet sich jegliche Form von Aktionismus. Insgesamt zeigt sich durch entsprechende Studien (Wördehoff et al. 2017, 2012; Evers u. Aydın 2012), dass der schleswig-holsteinische Wald und die aus ihm hervorgegangenen Holzprodukte einen wichtigen Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung leisten und dass die Speichermengen durch die Strategien einer nachhaltigen und multifunktionalen Forstwirtschaft merklich beeinflusst werden können. Dennoch werden alle Bemühungen und Anstrengungen, den Wald für den Klimawandel zu rüsten, mittel- bis langfristig nur von Erfolg gekrönt sein, wenn es der Gesellschaft gleichzeitig gelingt, den CO₂-Ausstoß drastisch zu senken.

Literatur

- Evers, J.; Aydın, C. T. (2012): Kohlenstoffvorräte im Waldboden von Schleswig-Holstein - Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2012 für Schleswig-Holstein. S. 21-28.
- Hübener, H.; Bülow, K.; Fooker, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S.; Keuler, K.; Menz, C.; Mohr, V.; Radtke, K.; Ramthun, H.; Spekat, A.; Steger, C.; Toussaint, F.; Warrach-Sagi, K.; Woldt, M. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.
- Klinck, C.; Paar, U. (2022): WZE-Ergebnisse für alle Baumarten. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Ministerium für Landwirtschaft, ländliche Räume, Europa und Verbraucherschutz des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2022 für Schleswig-Holstein. S. 8-17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7326881>.
- Lieven, S.; Fasse, F.; Werning, M.; Nagel R.-V. (2022): Alternative Baumarten - ein Lösungsbeitrag für die Klimaanpassung der Wälder in Schleswig-Holstein. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Ministerium für Landwirtschaft, ländliche Räume, Europa und Verbraucherschutz des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2022 für Schleswig-Holstein. S. 29-34. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7326941>.
- Wördehoff, R.; Fischer, C.; Spellmann, H. (2017): II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Schleswig-Holstein. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Göttingen, 30 S.
- Wördehoff, R.; Spellmann, H.; Evers, J.; Aydın, C. T.; Nagel, J. (2012): Kohlenstoffstudie Forst und Holz Schleswig-Holstein. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Göttingen, 104 S.

Aktuelle Forschungsthemen zum System Klima

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

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

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

Vertiefung des Systemverständnisses zum Klimageschehen

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

In Zusammenarbeit vieler Klimawissenschaftlerinnen und -wissenschaftler auf nationaler wie auf internationaler Ebene wurden in den letzten Jahren viele Themengebiete systematisch analysiert und vorhandene Lücken identifiziert. Auf Basis dieser Ana-

lysen wurden sechs Themengebiete herausgearbeitet, die von besonderem Interesse sind:

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

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

Bewertung und Umgang mit Risiken und Chancen

Der zeitliche und räumliche Versatz zwischen den Ursachen und den Folgen des Klimawandels führt zu einer besonderen Herausforderung aller Akteurinnen und Akteure. Die Frage nach Nutzen und Schaden durch den Klimawandel und die daraus zu entwickelnden Handlungsoptionen müssen als Gemeinschaftsaufgabe vieler Wissenschaftsbereiche interdisziplinär auf regionaler und globaler Ebene bearbeitet werden.

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels treffen

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

Erforschung des Zusammenspiels Klimawandel und Gesellschaft

Eine wichtige Frage der Zukunft ist die zukünftige Position der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie der Forschungsinstitutionen in der Gesellschaft. Dabei steht die Frage nach deren Aufgabe und den damit verbundenen Grenzen im Vordergrund. Welche Aufgaben hat beispielsweise die Klimaforschung? Wo hört die Verantwortlichkeit auf? Welchen Einfluss sollte die Wissenschaft auf die Politik nehmen? Ist die IPCC-Philosophie („... politikrelevant, aber nicht Politik vorschreibend ...“) übertragbar auf andere Bereiche?

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

Klimavorhersagen für die nächsten Monate bis Jahre

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

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

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

Für eine robuste statistische Abschätzung der Qualität und Verlässlichkeit der Klimavorhersagen werden eine Vielzahl an historischen und aktuellen Klimavorhersagen gerechnet, die zu jedem Prognosestart mit leicht variierenden Bedingungen gestartet werden. Die so entstehende Lösungsvielfalt, Ensemble genannt, dient zugleich dazu, die Unsicherheiten, welche durch die Nichtlinearität des Klimasystems bedingt sind, zu bewerten. Saisonale Klimavorhersagen werden unter anderem durch den DWD berechnet und monatlich analysiert. Mit den Ergebnissen sind beispielsweise El Niño-Vorhersagen möglich. Veröffentlicht werden sie auf der Webseite dwd.de/klimavorhersagen.



◀ Auf der Webseite www.dwd.de/klimavorhersagen werden die Klimavorhersagen des Deutschen Wetterdienstes veröffentlicht.

Begriffskompass Klima

Beaufort-Skala

Die Beaufort-Skala ist ein Hilfsmittel, mit deren Hilfe die Windstärke anhand der Auswirkungen des Windes abgeschätzt werden kann. Sie reicht von Stärke 0 (Windstille) bis Stärke 12 (Orkan). Der Wind wird standardmäßig 10 m über dem Boden gemessen.

Windstärke	Bezeichnung	Geschwindigkeit [m/s]	Geschwindigkeit [km/h]
0	Windstille	0 - 0,2	< 1
1	leiser Zug	0,3 - 1,5	1 - 5
2	leichte Brise	1,6 - 3,3	6 - 11
3	schwache Brise schwacher Wind	3,4 - 5,4	12 - 19
4	mäßige Brise mäßiger Wind	5,5 - 7,9	20 - 28
5	frische Brise frischer Wind	8,0 - 10,7	29 - 38
6	starker Wind	10,8 - 13,8	39 - 49
7	steifer Wind	13,9 - 17,1	50 - 61
8	stürmischer Wind	17,2 - 20,7	62 - 74
9	Sturm	20,8 - 24,4	75 - 88
10	schwerer Sturm	24,5 - 28,4	89 - 102
11	orkanartiger Sturm	28,5 - 32,6	103 - 117
12	Orkan	ab 32,7	ab 118

Bezugszeitraum/Bezugsperiode

Angaben über eine Änderung der zukünftigen mittleren klimatischen Verhältnisse werden immer in Relation zu einer Bezugsperiode getätigt. In 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.

CMIP6

CMIP6 ist die Abkürzung für „Coupled Model Intercomparison Project Phase 6“. Damit wird eine Generation globaler Klimamodelle bezeichnet, deren Ergebnisse im 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), dargestellt werden. Mit CMIP6-Modellen sind Aussagen für die globale Skala und für große Regionen (z. B. Mitteleuropa) möglich.

Frühindustrieller und vorindustrieller Zeitraum

Der Zeitraum 1881 bis 1910 wird als *frühindustrieller* Zeitraum definiert. Die Definition erfolgt in Anlehnung an die Begriffsbestimmung des vorindustriellen Zeit-

raumes durch die Pariser Klimakonferenz COP21. Bei der Entwicklung der RCP-Szenarien vom IPCC für den 5. Sachstandsbericht umfasst der *vorindustrielle* Zeitraum die Jahre 1861 bis 1880.

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 diesen Rasterdaten werden Gebietsmittelwerte für einzelne Bundesländer und für ganz Deutschland berechnet. Aus diesem Grund sind die im Klimareport angegebenen Kenntage, z. B. Sommertage, meist keine ganzzahligen Werte.

Gefühlte Temperatur

Das Temperaturempfinden des Menschen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der Lufttemperatur sind u. a. die Sonnenstrahlung, der Wind und die relative Luftfeuchte wesentliche Parameter. Bei hohem Wasserdampfgehalt der Luft im Sommer empfindet man die Temperatur als höher, bei Wind - besonders im Winter - als geringer. Die gefühlte Temperatur kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird berechnet. Dafür setzt der DWD das Klima-Michel-Modell ein, das den Wärmehaushalt eines Modellmenschen (Klima-Michel) bewertet.

Gefühlte Temperatur (T) [°C]	Thermisches Empfinden
$T \leq -39$	sehr kalt
$-39 < T \leq -26$	kalt
$-26 < T \leq -13$	kühl
$-13 < T \leq 0$	leicht kühl
$0 < T < +20$	behaglich
$+20 \leq T < +26$	leicht warm
$+26 \leq T < +32$	warm
$+32 \leq T < +38$	heiß
$T \geq +38$	sehr heiß

Kenntage

Ein Kenntag ist ein Tag, an dem ein definierter Schwellenwert eines klimatischen Parameters erreicht beziehungsweise über- oder unterschritten wird (z. B. Sommertag als Tag mit Temperaturmaximum ≥ 25 °C) oder ein Tag, an dem ein definiertes meteorologisches Phänomen auftritt (z. B. Sturmtag als Tag, an dem mindestens Windstärke 8 gemessen wurde).

Temperaturkenntage

- **Heißer Tag:** die höchste Temperatur des Tages hat 30 °C erreicht oder überschritten.
- **Sommertag:** die höchste Temperatur des Tages hat 25 °C erreicht oder überschritten.
- **Tropennacht:** die Temperatur beträgt während der Nacht (Zeitraum: 18 - 06 UTC, koordinierte Weltzeit) dauerhaft 20 °C oder mehr.
- **Frosttag:** die tiefste Temperatur des Tages liegt unter 0 °C.
- **Eistag:** die höchste Temperatur des Tages liegt unter 0 °C.

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 für zukünftige Zeiträume von Jahrzehnten bis Jahrhunderten erstellt. In diesem Klimareport werden die Planungshorizonte 2031 - 2060 und 2071 - 2100 betrachtet und verglichen mit dem historischen Zeitraum 1971 - 2000.

Klimavorhersage

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

Planungshorizonte

In diesem Bericht wird zwischen einem kurzfristigen und einem 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 1961 - 1990 bezogen. Dieser Zeitraum entspricht der WMO-Referenzperiode für die langfristige Klimaüberwachung.

In diesem Bericht werden zusätzlich 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 (Ensembles) genutzt. Mit der Spannbreite bzw. Bandbreite wird der Bereich zwischen dem Modellergebnis mit der geringsten und größten Änderung beschrieben.

Starkregen

Bei Starkregen handelt es sich um hohe Niederschlagsmengen, die in kurzer Zeit fallen. Starkregen kann überall auftreten und zu schnell ansteigenden Wasserständen und Überschwemmungen führen. Häufig geht Starkregen mit Bodenerosion einher. Der DWD warnt vor Starkregen in drei Stufen, wenn voraussichtlich bestimmte Schwellenwerte überschritten werden. Die [Warnkriterien](#) sind auf der DWD-Website zu finden.

Szenarien

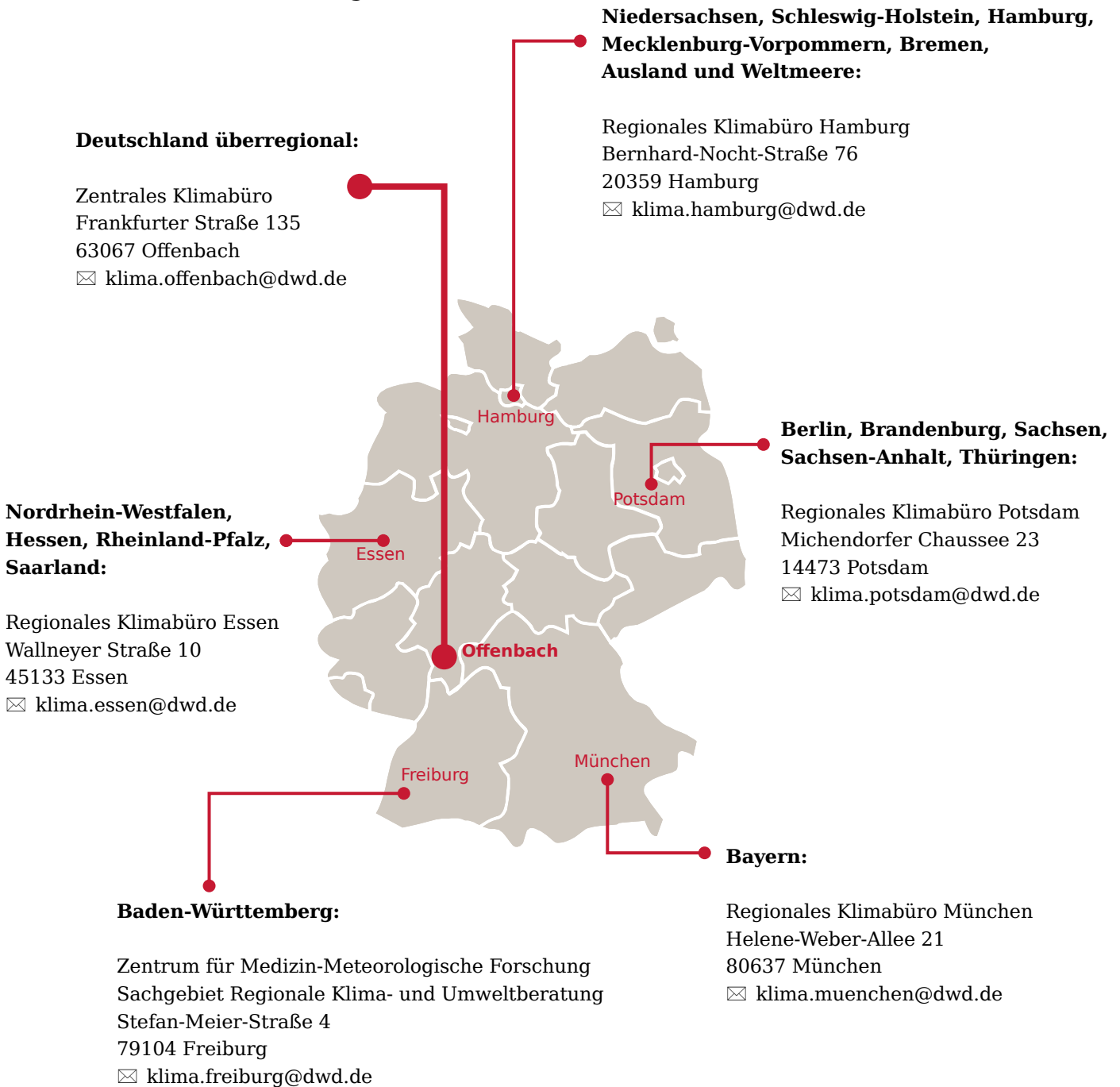
Ein Szenario ist eine Beschreibung einer möglichen Zukunft auf Grund von Annahmen. Eine Möglichkeit ist der Aufbau einer in sich schlüssigen Kette von Annahmen bezüglich der politischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen in der Zukunft und der daraus abgeleiteten Veränderungen der Treibhausgasemissionen.



Präsenz in der Fläche

Unsere Beratungsstellen

Deutscher Wetterdienst Klima- und Umweltberatung



Medizin-Meteorologie



Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
Stefan-Meier-Straße 4
79104 Freiburg
✉ mm.freiburg@dwd.de

Deutscher Klimadienst (DKD)



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

Agrarmeteorologie



Fachleitung und Beratung
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
✉ lw.offenbach@dwd.de

Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung
Bundesallee 33
38116 Braunschweig
✉ lw.braunschweig@dwd.de

Agrarmeteorologische
Forschung und Beratung
Alte Akademie Nr. 16
85354 Freising
✉ lw.weihenstephan@dwd.de

Hydrometeorologie



Hydrometeorologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
✉ hydromet@dwd.de

Weblinks

Sachstandsberichte des IPCC

6. Sachstandsbericht

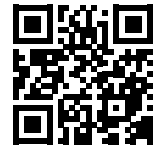
<https://www.de-ipcc.de/250.php>



Phänologie

Informationen zur Phänologie

www.dwd.de/phaenologie



Daten und Informationen zum Klimawandel

Auswertungen zur Klimaentwicklung in Deutschland

www.dwd.de/zeitreihen



Klimadaten Deutschland

www.dwd.de/klimadaten



Deutscher Klimaatlas

www.dwd.de/klimaatlas



Besondere Ereignisse

www.dwd.de/witterungsereignisse



Klimareports

Nationaler Klimareport

https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download_report.html?nn=16102



Klimavorhersagen

Klimavorhersagen

www.dwd.de/klimavorhersagen



Weitere Klimareports

<https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareports/klimareports.html>



Attribution

Informationen zur Attributionforschung

www.dwd.de/attribution



Weiterführende Informationen

DAS Basisdienst

<https://www.das-basisdienst.de/DAS-Basisdienst/DE/home/>



Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023>



Klimafakten

www.klimafakten.de



Impressum

Der Klimareport Schleswig-Holstein ist eine Veröffentlichung des Deutschen Wetterdienstes. Die Erstellung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Landesamt für Landwirtschaft und nachhaltige Landentwicklung (LLnL) des Landes Schleswig-Holstein.

Autoren

Gabriele Krugmann, Oliver Weiner
Co-Autoren: Marek Filipinski (LfU), Jörn Fröhlich (LfU), Christoph Haas (LfU), Wolfgang Janssen (LfU), Rita Jensen (LfU), Elisabeth Krauthan, Jens Möller (BSH), NW-FVA, Reinhard Spengler
Einzelne Kapitel beruhen auf dem Nationalen Klimareport (2022).

Beiträge weiterer Landes- und Bundesinstitutionen

Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek
www.schleswig-holstein.de/lfu

Landesamt für Landwirtschaft und nachhaltige Landentwicklung Schleswig-Holstein
Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek
www.schleswig-holstein.de/llnl

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstr. 2
37079 Göttingen
www.nw-fva.de/

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg
www.bsh.de

Redaktion

Gabriele Krugmann, Oliver Weiner

Gestaltung und Satz

Annett Püschel, Wiebke Winzig

Zitierhinweis

DWD (2023): Klimareport Schleswig-Holstein;
2. aktualisierte Auflage, Deutscher Wetterdienst,
Deutschland, 68 Seiten.

ISBN 978-3-88148-548-7 (Print)
ISBN 978-3-88148-549-4 (Online)

Online-Ausgabe

Dieses Heft finden Sie als digitale Ausgabe auf unserer Webseite www.dwd.de/klimareports. Hier stehen auch Links zu weiterführenden Informationen und ähnlichen DWD-Produkten sowie Klimareports anderer Bundesländer und Regionen.

Die Online-Ausgabe unterliegt der Lizenz



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

Druck

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV),
Hausdruckerei

Bildnachweise

Titelseite: Strandkörbe, Susanne Schorlemmer.
Elbstraße Lauenburg, sh-tourismus/Markus Tiemann.
Leuchtturm Westerheversand, Frank Kahl.

weitere Fotos: alle DWD (Andreas Friedrich, Hans Richard Henkes, Frank Kahl, Jesko Kruda, Rüdiger Manig, Thomas Möller, Annett Püschel, Wiebke Winzig), *außer:*

Bildkraftwerk: **S. 6** (Silas Stein)

LfU: **S. 7**, **S. 32/33** (Marek Filipinski) **S. 47** (LLUR), **S. 52** (Arne Drews), **S. 54** (Arne Drews), **S. 55** (Jan Kieckbusch)

NW-FVA: **S. 58** links (Stefan Lieven), **S. 58** rechts (Stefan Lieven), **S. 59** (Franziska Fasse)

Mediacenter Schleswig-Holstein sh-tourismus.de:

S. 11 oben (MOCANOX), **S. 11** unten, **S. 15** (Tourismus-Service Kellenhusen/mtwomedia), **S. 16** unten, **S. 18** oben (Alex K. Media / HLMS GmbH), **S. 22** (photocompany GmbH / HLMS GmbH), **S. 40**, **S. 45**
Fotolia: **S. 14** (Paul Paladin), **S. 65** Mitte rechts (makuba)

Panthermedia: **S. 23** links (Daniel Loretto), **S. 24** (Hans Eder), **S. 25** (bestshot70), **S. 26** (Ralph Glaser), **S. 37** (Laurent Renault), **S. 46** (Peter Kaschuba), **S. 48** oben (D. Mattwich)

creative collection Verlag Freiburg: **S. 9**

Pixabay: **S. 27** (Harald Meyer-Kirk), **S. 65** Mitte links

Piqs: **S. 65** links (bebe)

Eider-Treene-Verband: **S. 48** Mitte

Hannelore Philipp: **S. 63** links

Christoph Wenzel: **S. 63** rechts



**Landesamt für Landwirtschaft und nachhaltige
Landentwicklung Schleswig Holstein**

Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek



Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein

Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek



Deutscher Wetterdienst

Klima- und Umweltberatung
Regionales Klimabüro Hamburg
Bernhard-Nocht-Str. 76
20359 Hamburg
Tel.: +49 69 / 8062 4948
E-Mail: klima.hamburg@dwd.de

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



www.blauer-engel.de/uz14a

