



Geofakten 46

■ Boden und Klima

Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen

Engel, N., Bug, J., Stadtmann, R. & Harders, D.

April 2024

Der Klimawandel ist in Niedersachsen Realität. Dies führt auch zu kontinuierlichen Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen für die Böden in Niedersachsen. Die Bodeneigenschaften und damit auch die Funktionserfüllung reagieren unterschiedlich schnell auf diese Veränderungen. Da das Klima stark auf die Böden einwirkt, ist davon auszugehen, dass der Klimawandel mittel- bis langfristig sämtliche Funktionen der niedersächsischen Böden und auch die Gefährdungen der Böden beeinflussen wird. Um dies möglichst genau abbilden zu können, ist eine stetige Anpassung der Daten und Methoden zur Bewertung der Böden an den aktuellen Forschungsstand notwendig. Die Geofakten 46 sind deshalb als aktualisierbares Sammelwerk konzipiert. Dieses setzt sich zusammen aus dem hier vorliegenden Grundlagenteil, der im Überblick die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden in Niedersachsen beschreibt und Zusammenhänge zwischen den Böden und dem Klima aufzeigt sowie aus weiteren Teilen der Reihe Geofakten 46.x, „... im Klimawandel“ (z. B. Geofakten 46.1: Potenzieller mittlerer Zusatzwasserbedarf im Klimawandel), wo mit Hilfe von numerischen Wirkmodellen der Einfluss des Klimawandels auf einzelne Bodenfunktionen und Bodengefährdungen detaillierter gezeigt wird. Dabei werden die Modelle sowohl mit Klimabeobachtungsdaten, also gemessenen Daten aus der Vergangenheit, als auch mit Klimaprojektionsdaten für die Zukunft betrieben, um fundierte Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden treffen zu können. Die weiteren Teile der Reihe Geofakten 46 werden mit einer weiteren Ordnungsnummer nach einem Punkt versehen. Es werden also neben dem hier vorliegenden Geofakt 46 auch die Geofakten 46.1, 46.2 usw. erscheinen, die fortlaufend erarbeitet werden.

Boden, Klimawandel, Klimaveränderungen.

1. Klimawandel in Niedersachsen

1.1 Einleitung

Das Klima ändert sich und mit ihm die Lebensbedingungen für Mensch und Natur. Zwar unterliegt das Klimasystem natürlichen Schwankungen, der Anstieg der Temperatur in den vergangenen Jahrzehnten vollzieht sich jedoch in ungewöhnlich kurzen Zeiträumen. So war in Deutschland jede Dekade seit den 1960er Jahren wärmer als die jeweils vorangegangene (UBA 2019). Insgesamt sind in Niedersachsen neun der zehn wärmsten Jahre seit 1881 im 21. Jahrhundert aufgetreten. Das bisher wärmste Jahr war 2023 mit 10,9 °C Jahresmitteltemperatur. Die Häufung von Rekordjahren seit Mitte der 1980er Jahre ist nur durch die menschengemachte Klimaveränderung erklärbar, Zufälle oder natürliche Ursachen sind dafür nicht verantwortlich (DKK/DMG/DWD 2022).

Seit Beginn der Wetteraufzeichnungen 1881 ist das Jahresmittel der Temperatur in Niedersachsen im linearen Trend bis 2022 bereits um mehr als 1,7 °C

gestiegen. In unterschiedlichen Studien des Umweltbundesamtes (UBA 2008, 2015, 2019) wird das nordostdeutsche Tiefland – zu dem der Nordosten Niedersachsens gehört – als zukünftig besonders vom Klimawandel betroffene Region herausgestellt. Auch in den anderen Teilen Niedersachsens wird sich der Klimawandel auswirken. Aus diesem Grund legte das Land sowohl eine Klimaschutzstrategie als auch eine Klimaanpassungsstrategie für Niedersachsen vor. Mit den vorliegenden Strategien werden für Niedersachsen sowohl Ziele für einzelne Sektoren festgelegt als auch ein Maßnahmenkatalog (MU 2021a, 2021b). Zukünftig werden auch die Ergebnisse des ersten Klimafolgenmonitoringberichts für Niedersachsen (NIKO¹ 2023) in die Strategieentwicklung einfließen. Alle Berichte beinhalten auch Auswertungen und Maßnahmen im Themenkomplex Boden.

Mit Hilfe von Klimabeobachtungsdaten kann ein Überblick über die bereits eingetretenen Veränderungen des Klimas beschrieben werden. Der Deutsche Wetterdienst stellt dafür umfangreiche Daten zur Verfügung, die durch das Niedersächsische

¹ NIKO – Niedersächsisches Kompetenzzentrum Klimawandel. – www.niko-klima.de.

Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) in Niedersachsen aufbereitet und über das Niedersächsische Klimainformationssystem (NIKLIS²) Interessierten frei zur Verfügung gestellt werden.

Grundlage für die Abbildung zukünftiger Entwicklungen sind Klimaprojektionen, die mit Klimamodellen für ausgewählte Klimaszenarien („Klimaschutz“-Szenario RCP2.6 & „Kein-Klimaschutz“-Szenario RCP8.5) des aktuellen Sachstandsberichts (AR5) des IPCC erstellt worden sind. In den RCP-Szenarien (representative concentration pathways) werden unterschiedliche Entwicklungen der Bevölkerung, der Wirtschaft, der Technologie, des Umweltbewusstseins sowie insbesondere die aus diesen Entwicklungen resultierenden Strahlungsantriebe angenommen (vgl. IPCC³ 2014, Moss et al. 2010). Weitere Informationen zur Aufbereitung dieser Daten können den Geofakten 39 (HAJATI et al. 2022) entnommen werden.

Um die Klimawirkungen auf die Böden möglichst genau abbilden zu können, ist eine stetige Anpassung an den aktuellen Forschungsstand notwendig. Da die Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgrundlage Boden vielfältig sind, ist es zudem notwendig, diese auf Basis unterschiedlicher Methoden zu bewerten. Um methodische oder datenbezogene Weiterentwicklungen in diesen unterschiedlichen Bereichen zeitnah aktualisieren und bereitstellen zu können, werden die Geofakten 46 als aktualisierbares Sammelwerk konzipiert. Dieses setzt sich zusammen aus dem hier vorliegenden Grundlagenteil und aus daran anknüpfenden begleitenden methodischen Teilen (Reihe Geofakten 46.x: „... im Klimawandel“).

In dem hier vorliegenden Geofakt 46 werden die Grundlagen erläutert und ein Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden in Niedersachsen gegeben. Detaillierte Auswertungen zu einzelnen Themen (z. B. potenzielle Zusatzwassermenge oder Retentionsleistung der Böden) werden durch die jeweiligen begleitenden Teile bereitgestellt, die auf derselben Internetseite wie der Geofakt 46 veröffentlicht werden.

Diese detaillierten Auswertungen dienen als Grundlage für die präzise Bilanzierung und Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen, Bodengefährdungen und Nutzungspotenziale. Um diese zu erreichen, werden verschiedene Wirkmodelle eingesetzt, die mit Klimabeobachtungsdaten aus der Vergangenheit (1961–

2020) sowie Klimaprojektionsdaten für die „Mitte des Jahrhunderts“ (2031–2060) und die „Ferne Zukunft“ (2071–2100) gespeist werden. Das übergeordnete Ziel dieser Untersuchung besteht nicht nur darin, qualitative Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden zu treffen, sondern auch semi-quantitative bzw. quantitative Veränderungen anschaulich darzustellen. Durch die Integration von Klimadaten aus unterschiedlichen Zeiträumen und die Anwendung verschiedener Modelle wird eine umfassende Bewertung der Veränderungen angestrebt.

Diese Auswertungen sollen nicht nur ein Verständnis für die komplexen Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgrundlage Boden vermitteln, sondern auch als Grundlage für zukünftige Entscheidungen im Bereich des Boden- und Umweltschutzes dienen (vgl. BUG et al. 2019). Die Berücksichtigung von historischen Daten und Projektionen liefert Erklärungen für bestehende Probleme, ermöglicht eine Abschätzung der Herausforderungen, denen Niedersachsen gegenübersteht, und erlaubt die Ableitung von nachhaltigen Maßnahmen zum Schutz unserer Böden und zur Klimafolgenanpassung.

1.2 Klimatische Kennwerte

Der Verlauf des Klimawandels in Niedersachsen kann sehr gut durch die Darstellung einzelner Klimaparameter nachvollzogen werden. Dabei wird sich im Folgenden auf für den Boden besonders relevante klimatische Parameter fokussiert. Die Darstellung wird unterteilt in die bisherige Entwicklung, die mit Klimabeobachtungsdaten hinterlegt ist, und die zukünftige Entwicklung, die mit modellierten Klimaprojektionsdaten abgebildet wird.

Bisherige Klimaentwicklung

Das Klima wird maßgeblich von der Strahlungs- und Wärmebilanz beeinflusst, aber auch die Orographie und der Einfluss der Küste spielen wichtige Rollen. So zeigen sich in Niedersachsen in der Nähe der Nordsee bis zum Harz unterschiedliche klimatische Gegebenheiten. Es gibt maritim und kontinental beeinflusste Gebiete. Wichtig zu beachten ist, dass das Klima variabel ist und kurzfristige Wetterereignisse oder das Wetter einzelner Jahre von diesen allgemeinen Trends abweichen können.

Seit Beginn der Wetteraufzeichnungen zeigt sich für Niedersachsen ein deutlicher Anstieg der mittleren Temperatur. Die Jahresmitteltemperatur lag in

² NIKLIS – Niedersächsisches Klimainformationssystem. – <https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/niklis/>.

³ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, in Deutschland auch als „Weltklimarat“ bezeichnet.

der WMO⁴-Klimanormalperiode 1961–1990 im Mittel für Niedersachsen noch bei 8,6 °C, im Zeitraum 1991–2020 bereits bei 9,7 °C. Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur ist für alle Regionen Niedersachsens ähnlich (Abb. 1). Die Veränderung von 1991–2020 zu 1961–1990 ist in den verschiedenen Jahreszeiten mit +1,2 °C ähnlich ausgeprägt, mit Ausnahme des Herbstes, hier fällt sie mit +0,6 °C geringer aus. Damit einher geht eine weitere Zunahme von Sommertagen und Hitzetagen, wohingegen die Eis- und Frosttage abnehmen (NIKO 2023).

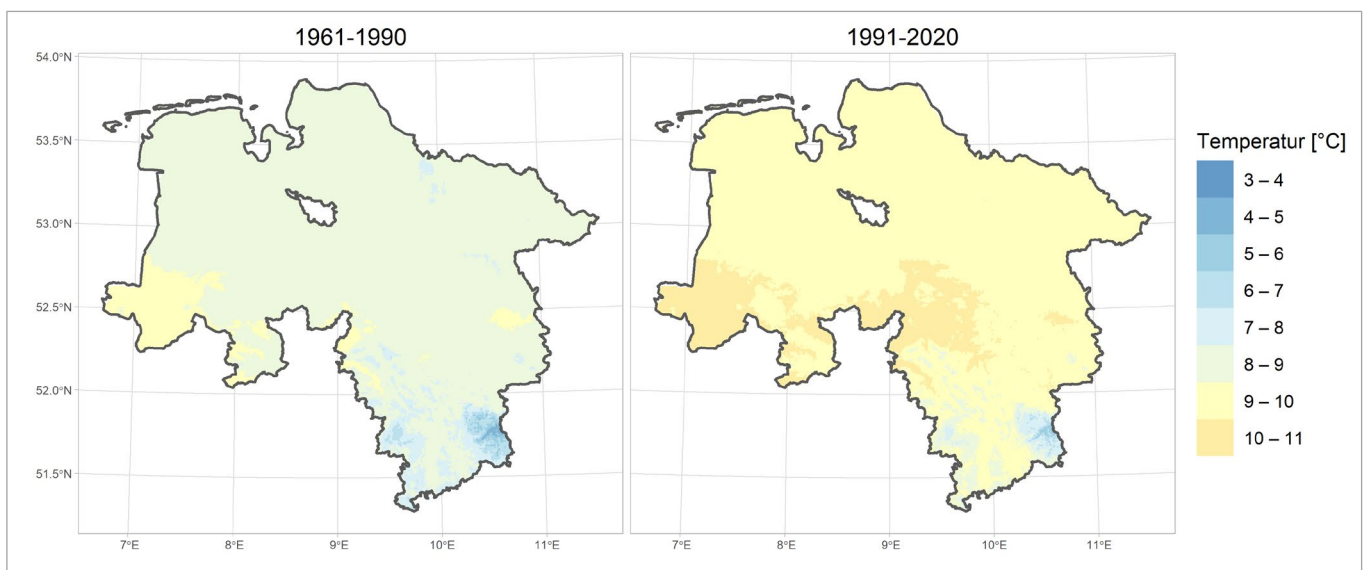


Abbildung 1: Jahresmitteltemperatur 1961–1990 (links) und 1991–2020 (rechts) für Niedersachsen (Datengrundlage: DWD Climate Data Center, Grafik: NIKO 2023).

Die Niederschlagsmenge im Jahr liegt in Niedersachsen bei 750 mm, wobei sie aufgrund der Orographie regional sehr unterschiedlich verteilt ist. Die höchsten Niederschlagsmengen werden im Harz erreicht, die geringsten im Osten Niedersachsens. Dabei schwankt die Niederschlagsmenge von Jahr zu Jahr deutlich. So gab es im Jahr 1959 im Mittel 404 mm Niederschlag, im Jahr 2023 das 2,7fache. In der Auswertung der 30jährigen Zeiträume zeigt sich für Niedersachsen ein Anstieg von 1961–1990 zu 1991–2020 um 21 mm (+3 %). Diese Zunahme fand allerdings nicht gleichmäßig statt: 1971–2000 veränderte sich die Niederschlagsmenge zu 1961–2020 kaum, 1981–2010 ist hingegen der niederschlagsreichste Zeitraum. Der Niederschlag ist auch innerhalb des Jahres unterschiedlich verteilt. Die höchsten Niederschläge treten im Sommer und Winter auf, die niedrigsten im Frühling und Herbst.

Dabei zeigen die Klimabeobachtungsdaten, dass der Klimawandel diese saisonale Niederschlagsverteilung beeinflusst. Der Frühling ist niederschlagsärmer und der Winter niederschlagsreicher geworden (Abb. 2).

⁴ World Meteorological Organization – Weltorganisation für Meteorologie.

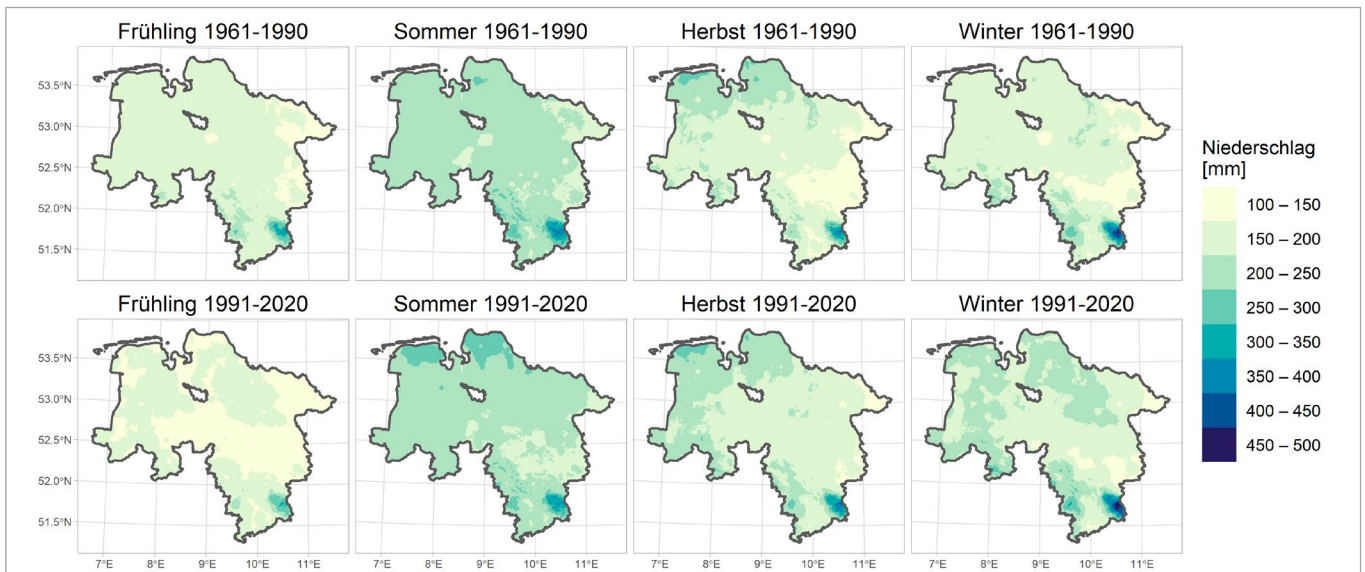


Abbildung 2: Saisonale Niederschlagssumme 1961–1990 (oben) und 1991–2020 (unten) für Niedersachsen (Datengrundlage: HYRAS-DE-PRE, Grafik: NIKO 2023).

Auch regional hat sich die Niederschlagsverteilung von 1961–1990 zu 1991–2020 verändert (NIKO 2023). So nimmt im Sommer der Niederschlag in Richtung Küste stärker zu und Richtung Südosten ab. Im Herbst und Winter nimmt vor allem im Süden Niedersachsens der Niederschlag zu. Zusätzlich konnte im Vergleich von 1961–1990 zu 1991–2020 eine geringfügige Zunahme von Starkregenereignissen beobachtet werden (NIKO 2023). Attributionsforschungen zeigen, dass der bisherige Klimawandel Starkregenfälle in Westeuropa wahrscheinlicher und stärker machte (wie z. B. die Extremereignisse im Juni und Juli 2021, vgl. TRADOWSKY et al. 2023). Mit dem Anstieg der Temperatur steigt auch die potenzielle Verdunstung. Bei gleichzeitiger Änderung der (saisonalen) Niederschlagsmenge ändert sich die Wasserverfügbarkeit im Land.

Ein vereinfachtes Maß zur Beschreibung der Wasserverfügbarkeit stellt dabei die Klimatische Wasserbilanz dar, welche aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung ermittelt wird. Innerhalb der Vegetationsperiode (April – September) lag diese im Niedersachsenmittel für 1961–1990 noch bei -88 mm; dieses Defizit hat sich 1991–2020 deutlich verstärkt (-136 mm). Gerade in der letzten Dekade treten verstärkt trockenere Jahre auf (s. Abb. 3).

Diese Entwicklung ist in allen Regionen Niedersachsens festzustellen, wobei sie am stärksten im Süden und Osten des Landes ausgeprägt ist.

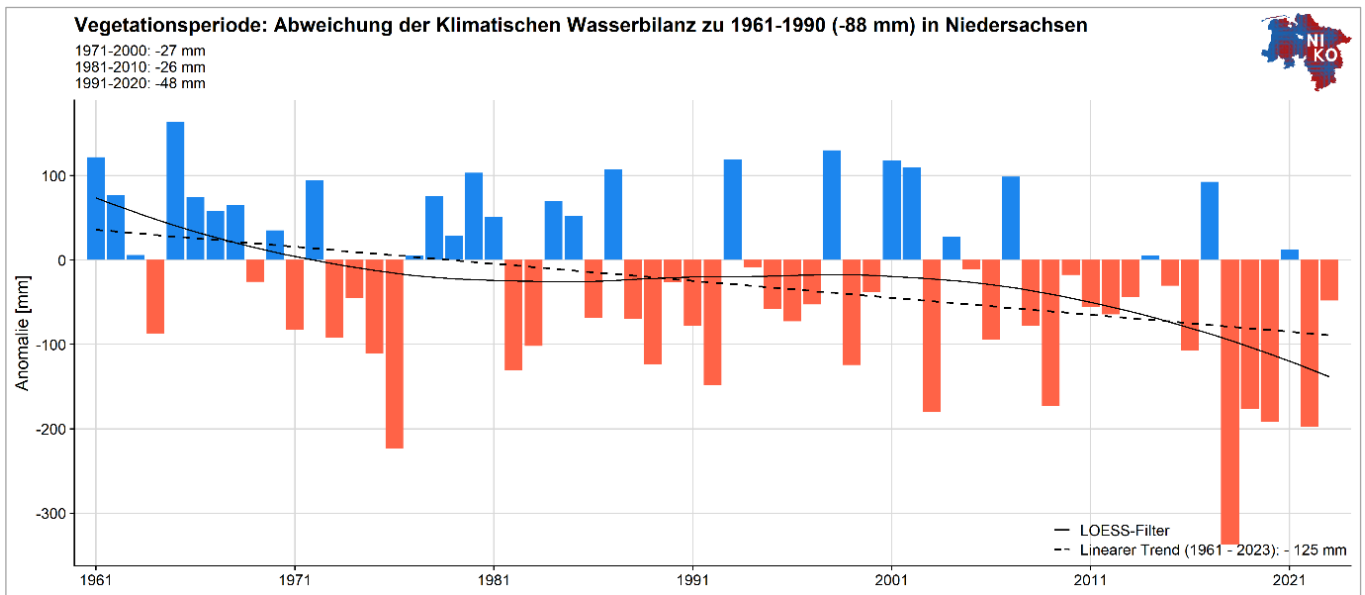


Abbildung 3: Jährliche Anomalie der klimatischen Wasserbilanz zu 1961–1990 von 1961 bis 2022 für Niedersachsen. Die klimatische Wasserbilanz wird aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung ermittelt. Blaue Balken kennzeichnen ein Jahr mit einer höheren klimatischen Wasserbilanz als 1961–1990 und rote Balken Jahre mit geringerer klimatischer Wasserbilanz als 1961–1990. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt den linearen Trend. Die durchgezogene Linie zeigt eine LOESS-Regression⁵ (Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1), Grafik: NIKO 2024).

Zukünftige Klimaentwicklung

Die Auswertung für die Zukunft erfolgt anhand des Niedersächsischen Klimaensembles (AR5-NI Version 2.1), welches in den Geofakten 39 (HAJATI et al. 2022) eingehend beschrieben wird. Ein Ensemble besteht aus einer Vielzahl von Modellen. Im Folgenden werden daher neben dem Mittelwert des Ensembles für eine erste Einordnung der obere sowie untere Rand der Ergebnisbandbreite betrachtet. Dabei stellen alle Ergebnisse eines Ensembles eine mögliche Zukunft dar. In den Abbildungen wird dies in Form von Kästen dargestellt (s. Abb. 4). Diese werden durch die geringste (Min) und höchste (Max) Veränderung eines Kennwertes für die Zukunft aufgespannt. Der Strich dazwischen gibt den Mittelwert an.

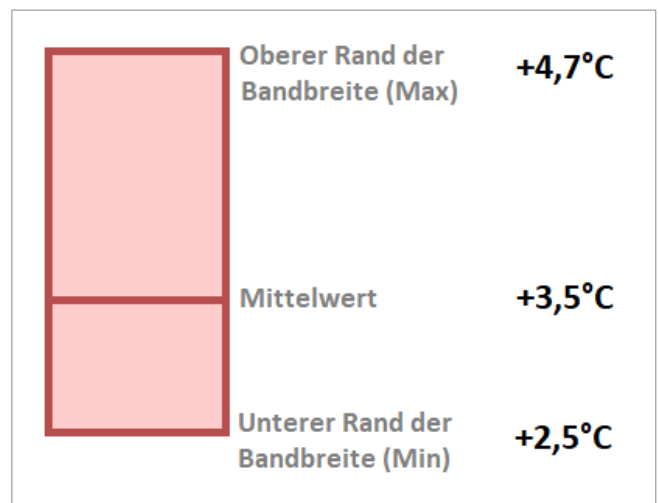


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bandbreite, wie sie in den folgenden Abbildungen verwendet wird. Als Beispiel sind die Ergebnisse des RCP8.5-Szenarios für die „Ferne Zukunft“ aufgeführt. Die geringste Veränderung (unterer Rand der Bandbreite) liegt bei +2,5 °C, die größte Änderung, die sich aus dem Ensemble ergibt, bei +4,7 °C. Der Mittelwert über alle Modelle liegt mit +3,5 °C dazwischen.

⁵ LOESS (Locally estimated Scatterplot Smoothing) ist ein sehr verbreitetes Glättungsverfahren mittels einer lokal gewichteten Regressionsfunktion. Im Kontext von Klimadatenanalyse oder Zeitreihenmodellierung weist die LOESS-Regression einige Stärken im Vergleich zur linearen Regression auf. Sie ermöglicht eine flexiblere Anpassung an lokale Muster und ist somit gut geeignet, um Trends oder zyklische Veränderungen in den Daten zu identifizieren.

Auch zukünftig ist von einem weiteren Temperaturanstieg für Niedersachsen auszugehen. Im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 wird für die „Ferne Zukunft“ 2071–2100 für Niedersachsen eine Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur von +3,5 °C (Min: +2,5 °C; Max: +4,7 °C) unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP8.5) erwartet. Auch unter dem „Klimaschutz“-Szenario (RCP2.6) wird es zu einer Erwärmung Niedersachsens kommen, wenngleich diese mit einem mittleren Anstieg von +1 °C (Min: +0,6 °C; Max: +1,4 °C) deutlich geringer ausfällt (Abb. 5). Dieses Ziel zu erreichen, ist inzwischen allerdings eher unrealistisch.

Die Veränderungen der Temperatur werden in Abhängigkeit von Höhe, Entfernung zum Meer sowie Exposition regional und lokal unterschiedlich stark ausfallen. Damit wird eine weitere Zunahme von Sommertagen und Hitzetagen einhergehen, wohingegen die Eis- und Frosttage abnehmen werden.

Neben einer Änderung der Temperatur wird auch eine weitere Veränderung der Niederschlagsverhältnisse erwartet. Im Jahr soll die Niederschlagsmenge bis zur „Fernen Zukunft“ unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP 8.5) um +39 mm (Min: -30 mm; Max: +97 mm) zunehmen. Unter dem „Klimaschutz“-Szenario liegt die Änderung bei -3 mm (Min: -65 mm; Max: +50 mm). Deutliche Änderungen werden vor allem für die innerjährliche Verteilung der Niederschlagsmengen projiziert. So zeigen die Ergebnisse unter beiden Szenarien im Mittel des Ensembles für die „Ferne Zukunft“ eine Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer (RCP2.6: -9 mm (Min: -3 mm; Max: +16 mm); RCP8.5: -22 mm (Min: -59 mm; Max: +17 mm)). Im Winter wird eine Zunahme erwartet (RCP2.6: +6 mm (Min: -22 mm; Max: +18 mm); RCP8.5: +27 mm (Min: +3 mm; Max: +64 mm)). Laut IPCC-Bericht werden West- und Mitteleuropa bei steigenden Temperaturen immer häufiger Starkregenfällen und Überschwemmungen ausgesetzt sein (IPCC 2021).

Auch auf die jahreszeitliche Entwicklung der Pflanzen haben Klimaänderungen einen Einfluss. So setzte die Vegetationsperiode im 20. Jahrhundert aufgrund von steigenden Wintertemperaturen und der Abnahme von Eis- und Frosttagen immer früher ein. Gleichzeitig (aber nicht so ausgeprägt) endete sie zunehmend später (KRAUSE 2008, DWD 2018a). Die deutlichste Veränderung für Niedersachsen wurde bisher bei den Eintrittsterminen der Frühjahrsphasen beobachtet (DWD 2018a). Es ist zu erwarten, dass sich der zu beobachtende Trend der Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten infolge des Klimawandels fortsetzt. Diese klimawandelbedingten Veränderungen der Eintrittstermine der phänologischen Phasen haben u. a. Auswirkungen auf die Verdunstung. Durch die Verlängerung der Vegetationsperiode wird auch die Verdunstung durch die Pflanzen (Transpiration) erhöht. Hinzu kommt die aufgrund von steigender Temperatur zunehmende Verdunstung von Boden- und Wasseroberflächen (Evaporation). Trockenheit kann – bei ausgeschöpften Bodenwasservorräten – allerdings auch verdunstungshemmend wirken.

Unter den projizierten Veränderungen ist eine Zunahme landwirtschaftlicher bzw. ökologischer Dürren zu erwarten (IPCC 2021). Bereits in der Vergangenheit zeigte sich innerhalb der Vegetationsperiode eine Abnahme der Wasserverfügbarkeit. Auch in der Zukunft wird eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz zu 1971–2000 projiziert (Abb. 6 und 7). Im Mittel ist diese Veränderung in der „Fernen Zukunft“ unter dem „Klimaschutz“-Szenario mit -22 mm (Min: -89 mm; Max: +47 mm) ähnlich zur „Jüngsten Vergangenheit“ mit -19 mm (1991–2020). Die Ergebnisse unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario liegen mit -63 mm (Min: -161 mm; Max: +14 mm) deutlich darunter. Gleichzeitig zeigen die unteren Ränder der Bandbreite für beide Szenarien noch deutlich trockenere Verhältnisse. Im Mittel sind dies ähnliche Verhältnisse wie in den trockenen Jahren 2019, 2020 sowie zuletzt 2022. Deutlich in Erinnerung sind hier z. B. die niedrigen Wasserstände und die über mehrere Kilometer ausgetrocknete Aller im Landkreis Helmstedt. In der „Fernen Zukunft“ (2071–2100) zeigen sich unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP8.5) Veränderungen in allen Regionen Niedersachsens, mit den stärksten Änderungen im Harz (Abb. 7).

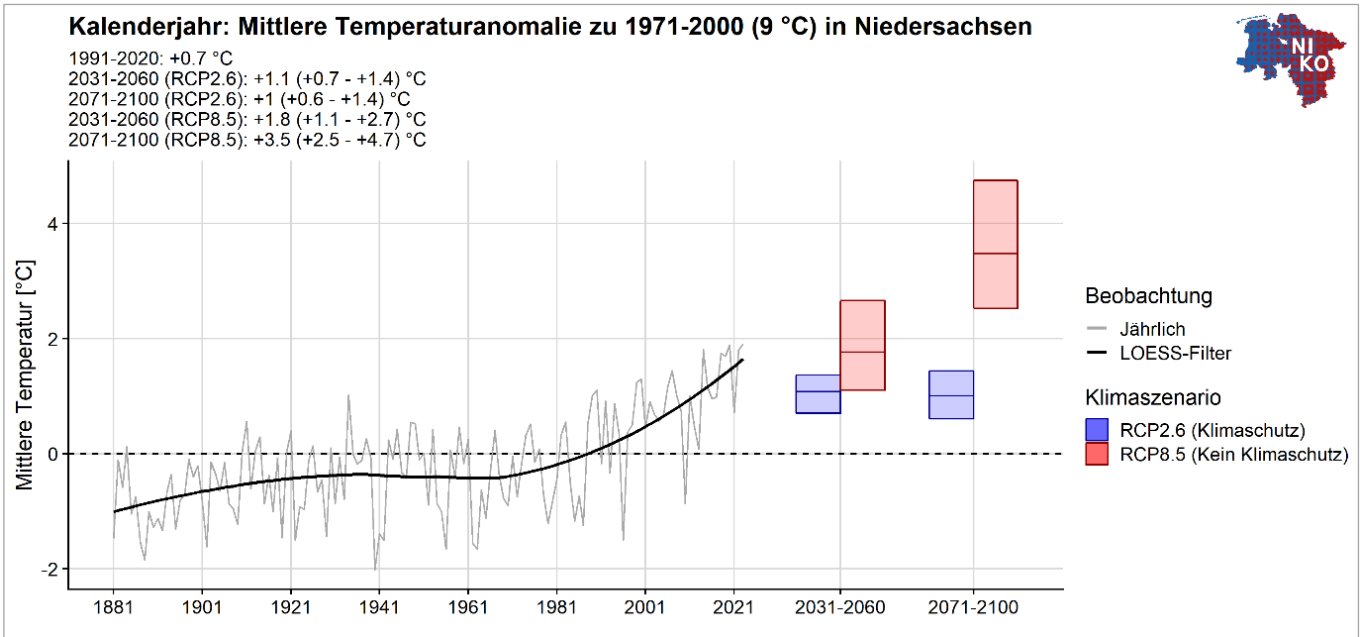


Abbildung 5: Anomalie der Jahresmitteltemperatur zu 1971–2020. Die durchgezogene schwarze Linie von 1881–2023 basiert auf Beobachtungsdaten. In Rot ist eine LOESS-Regression abgebildet. Für die „Mitte des Jahrhunderts“ (2031–2060) und die „Ferne Zukunft“ (2071–2100) sind die Bandbreiten (Min, Mittel, Max) des Ensembles für zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) dargestellt (Datengrundlage: DWD (CDC) und AR5-NI Version v2.1, Grafik: NIKO 2024).

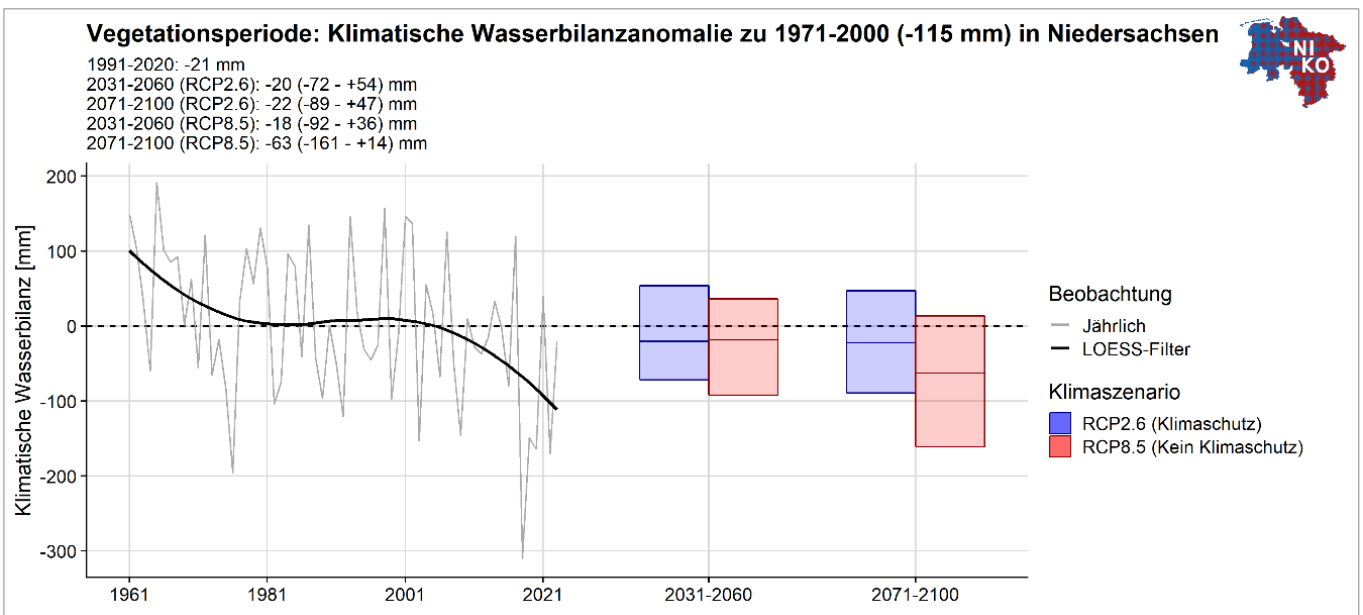
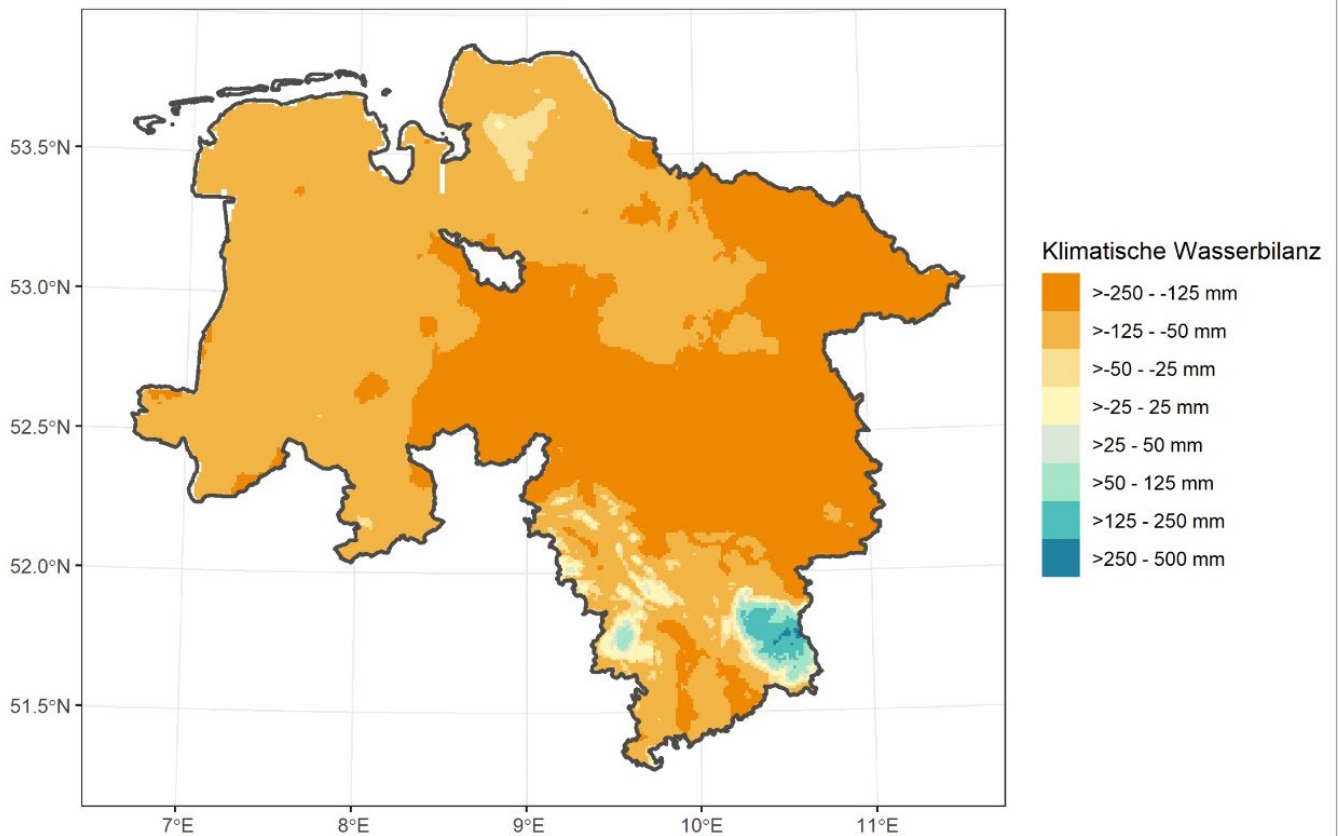


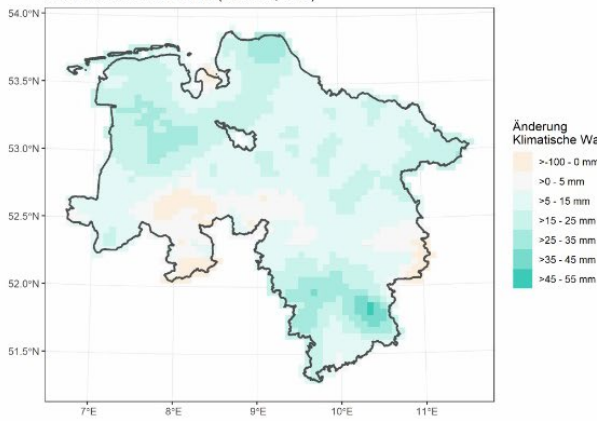
Abbildung 6: Anomalie der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April – September) zu 1971–2020. Die durchgezogene schwarze Linie von 1961–2023 basiert auf Beobachtungsdaten. In Rot ist eine LOESS-Regression abgebildet. Für die „Mitte des Jahrhunderts“ (2031–2060) und die „Ferne Zukunft“ (2071–2100) sind die Bandbreiten (Min, Mittel, Max) des Ensembles für zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) dargestellt (Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1) und AR5-NI Version v2.1, Grafik: NIKO 2024).

Klimatische Wasserbilanz (Vegetationsperiode) für den Zeitraum 1971-2000



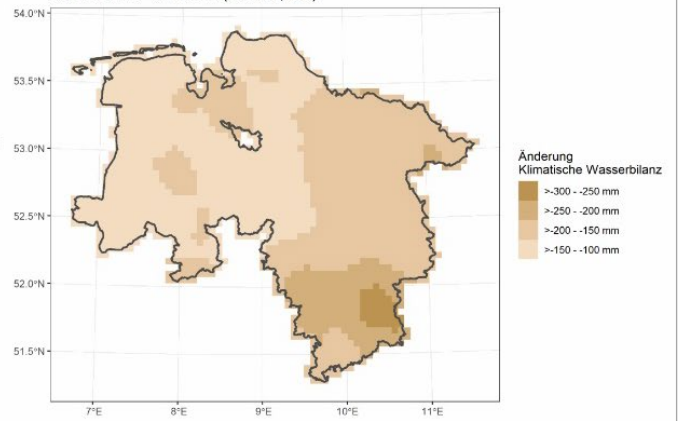
Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1)

Änderungssignal Klimatische Wasserbilanz (Vegetationsperiode) 2071-2100 zu 1971-2000 (RCP8.5, Max)



Datengrundlage: AR5-NI, Version2.1

Änderungssignal Klimatische Wasserbilanz (Vegetationsperiode) 2071-2100 zu 1971-2000 (RCP8.5, Min)



Datengrundlage: AR5-NI, Version2.1

Abbildung 7: Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April – September) 1971–2000 (oben) und Änderungssignal zu 2071–2100 unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario RCP8.5 (unten). Es wird der obere Rand der Ensemble-Bandbreite (Max; unten links) sowie der untere Rand der Ensemble-Bandbreite (Min; unten rechts) dargestellt (Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1) und AR5-NI Version v2.1, Grafik: NIKO 2024).

1.3 Extreme Witterungsverläufe

In den Jahren 2018 und 2019 war Niedersachsen, neben anderen Teilen Deutschlands, durch außergewöhnliche Trockenperioden geprägt. Ein hauptsächlichlicher Grund für die Trockenheit im Jahr 2018 war eine beständige und im Wesentlichen vom Frühling bis in den Sommer andauernde Hochdrucklage im Norden Europas (MÜHR et al. 2018). Solche stabilen Wetterlagen können Dürrephasen bedeuten, wenn dadurch die üblicherweise über Mitteleuropa hinwegziehenden Tiefdruckgebiete mit sommerlichen Niederschlägen blockiert werden (MÜHR et al. 2018). Verharren Tiefdruckgebiete hingegen lange, können daraus sehr hohe Niederschlagsmengen resultieren. Im Zuge des Klimawandels wird die Zunahme dieser stabilen Wetterlagen über Mitteleuropa und damit einhergehende Wetterextreme erwartet (FRANCIS & VAVRUS 2015, HARI et al. 2020).

Bei klimatischen Betrachtungen sind Zeiträume von mindestens 30 Jahren üblich, da das Klima eine natürliche Variabilität aufweist und Veränderungen nur über längere Zeiträume abbildbar sind. Es ist also grundsätzlich zwischen einzelnen extremen Witterungen und Klimawandel zu unterscheiden. Eine Bestimmung des Klimawandeleinflusses (sogenannte Attribution) auf Trockenperioden ist bislang, im Vergleich zur Attribution von z. B. Hitzewellen, noch mit verstärktem Forschungsbedarf versehen (MEINERT et al. 2019). Einerseits führt eine wärmere Atmosphäre im globalen Mittel zu einem erhöhten Niederschlag, da wärmere Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann. Auf der anderen Seite erhöhen steigende Temperaturen die Verdunstungsraten, was dazu führen kann, dass Böden schneller austrocknen, insbesondere in Regionen, die bereits anfällig für Trockenheit sind. Dies erschwert die Einschätzung des Klimawandeleinflusses auf Trockenperioden. Gleichzeitig gibt es Untersuchungen, welche die Zusammenhänge zwischen Trockenperioden und Klimawandel nachweisen können. So wurde in einer Untersuchung von PARK WILLIAMS et al. (2020) gezeigt, dass der Klimawandel die ausgeprägte Trockenperiode von 2000–2018 im Südwesten der USA durch die hohen Verdunstungsraten maßgeblich verschärft hat. Auch für die Schweiz konnte in der Studie von SCHERRER et al. (2022) gezeigt werden, dass die Zunahme der Verdunstung – als Folge des Klimawandelbeding-

ten Temperaturanstiegs – den Trend zu mehr Trockenheit maßgeblich beeinflusst hat. Zukünftig wird erwartet, dass mehr Regionen weltweit von Trockenheit betroffen sein werden. In Europa sollen diese Zunahmen vor allem den Mittelmeerraum sowie West- und Mitteleuropa betreffen (IPCC 2021).

Basierend auf den sehr trockenen Verhältnissen in Niedersachsen in den Jahren 2018 und 2019, aber auch durch die Analyse von vorausgegangenen Trockenphasen (z. B. 2003, vgl. MEINKE et al. 2013), können Erkenntnisse über die Auswirkungen solcher Phasen auf den Bodenwasserhaushalt zusammengeführt und Hinweise für mögliche Anpassungsmaßnahmen für Niedersachsen abgeleitet werden. Selbiges gilt für sehr niederschlagsreiche Witterungsverläufe wie im Sommer 2017 oder zum Jahreswechsel 2023/2024.

Das Jahr 2018 ist als Extremjahr hinsichtlich der hohen Temperaturen und der geringen Niederschlagsmengen in besonderem Maße hervorzuheben (ZSCHEISCHLER & FISCHER 2020). Die klimatischen Faktoren wirkten zusammen und führten zu einer ausgeprägten Trockenheit. In Niedersachsen fielen im Sommer 2018 mit 100 l/m^2 nur 46 % der langjährig durchschnittlichen Niederschlagsmenge (219 l/m^2 , vgl. DWD 2018b). Gleichzeitig sorgten hohe Temperaturen für eine gestiegene Verdunstung. Als Folge war die Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode mit -426 mm deutlich negativer als in der bereits sehr trockenen Dekade von 2013–2023, die im Durchschnitt bei -181 mm lag (Abb. 8). Da die Vegetation in Niedersachsen unter erheblichem Trockenstress stand, wurden die Bodenwasservorräte während dieser Zeit vielerorts sehr stark ausgeschöpft, sodass auch tieferen Bereichen der Böden Wasser entzogen wurde. Im Mittel für alle Ackerflächen unterschritt der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat in diesem Jahr erstmals den Wert von 40 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK), ab dem von deutlichem Trockenstress für die Vegetation auszugehen ist. Im Osten Niedersachsens zeigen die Auswertungsergebnisse teils Werte unter 20 % der nFK (NIKO 2023, WIDMER et al. 2024). Insgesamt zeigte das sehr trockene Jahr in Niedersachsen sowohl in Land- (LSN 2018) als auch Forstwirtschaft deutliche negative Auswirkungen (SUTMÖLLER et al. 2019a, SUTMÖLLER et al. 2019b, WAGNER et al. 2019).

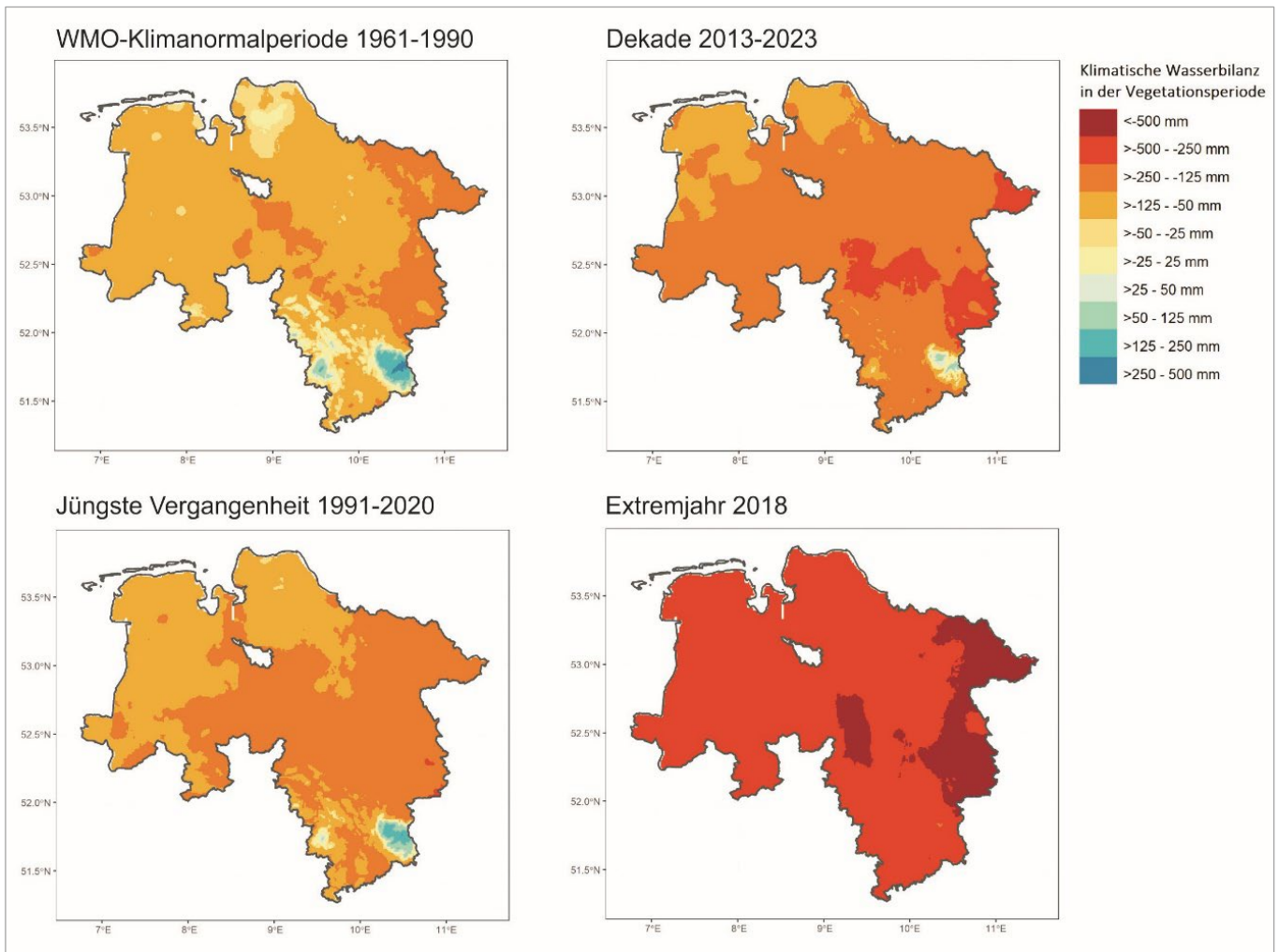


Abbildung 8: Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April – September) für die beiden 30jährigen Zeiträume WMO-Klimanormalperiode 1961–1990 (oben links) und jüngste Vergangenheit 1991–2020 (unten links) sowie die letzte eher trockene Dekade 2013–2023 (oben rechts) und das Extremjahr 2018 (unten rechts) (Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1)).

Diese Situation, mit z. T. stark ausgeschöpften Bodenwasservorräten, prägte auch das Jahr 2019. Untersuchungen von SUTMÖLLER et al. (2019a) zum Bodenwasserhaushalt von Waldböden zu Beginn der Vegetationszeit 2019 zeigen, dass der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher von 30 % der Waldböden in Nordwestdeutschland nicht vollständig gefüllt war. Die Niederschläge während des Winterhalbjahres, die im Vergleich zu langjährigen Zeitreihen für Niedersachsen als überdurchschnittlich eingestuft wurden (DWD 2019), reichten also nicht überall aus, um den pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher nach dem ausgeprägten Trockenjahr 2018 wieder aufzufüllen. In Niedersachsen waren hiervon insbesondere Standorte im Osten betroffen. Die untersuchten Böden im Harz wurden hingegen durch höhere Niederschlagsmengen wieder vollständig durchfeuchtet. Diese Situation ist mit Einschränkung auch auf landwirtschaft-

lich genutzte Standorte übertragbar. Auf diesen Zustand von teilweise nicht wieder aufgefüllten Bodenwasservorräten folgte eine außerordentlich warme und trockene Witterung insbesondere im Juni 2019, welche zu teilweise sehr geringen Bodenfeuchten und entsprechendem Trockenstress für die Pflanzen führte (MEINERT et al. 2019). Wesentlich für die Auswirkungen der Trockenphasen kann also, neben der Dauer und dem mengenmäßigen Wasserspeichervermögen der Standorte, die Situation des Bodenwasserspeichers vor Beginn der Trockenphase sein (SUTMÖLLER et al. 2019b).

Zu beachten ist bei dem hier vorgestellten Beispiel, dass die Auswirkungen der Trockenjahre zeitlich versetzt auftreten können. Während Böden mit geringen Wasserspeicherkapazitäten bereits im ersten Trockenjahr deutliche Auswirkungen zeigen, können Böden mit hohen Wasserspeicherkapazitä-

ten dieses Defizit gegebenenfalls noch kompensieren. Gleichzeitig erfolgt eine tiefgründige Ausschöpfung der Wasserspeicherkapazitäten dieser Standorte, welche nur durch sehr ergiebige Niederschläge wieder vollständig aufgefüllt werden können. Geschieht dies nicht, können Schäden auch langfristig in den Folgejahren einer Dürre auftreten. Nimmt die Häufigkeit dieser ausgeprägten Trockenphasen im Zuge des Klimawandels zu, sind diese Effekte häufiger zu erwarten.

Lang andauernde und sehr ergiebige Niederschläge, wie in Südniedersachsen im Sommer und Herbst 2017, können ein weiteres Extrem darstellen und ebenfalls negative Auswirkungen auf die Böden haben (z. B. Überschwemmung, Risiko für Bodenerosion durch Wasser und Bodenverdichtung). Die hohen Niederschlagsmengen wurden vor allem durch ein einziges Tiefdruckgebiet über Südniedersachsen verursacht, welches in der niedersachsenweiten Betrachtung die üblichen durchschnittlichen monatlichen Niederschlagsmengen für Juli um das

Doppelte übertraf (145 mm). Zudem fiel der Großteil des Niederschlags innerhalb weniger Tage, wobei es auch bereits zuvor Niederschläge gegeben hatte (NLWKN 2021). Insbesondere im Harz und Harzvorland fielen große Niederschlagsmengen. In der Folge entstanden Überschwemmungen im Harz und Harzvorland mit erheblichen Schäden (NLWKN 2021).

Das Jahr 2023 war in Niedersachsen in mehrfacher Hinsicht ein Extrem. Mit 10,9 °C Jahresmitteltemperatur war es das wärmste je gemessene Jahr in Niedersachsen. Gleichzeitig wurden mit 1.073 mm so hohe Jahresniederschläge gemessen wie nie zuvor, und es war mit einer klimatischen Wasserbilanz von 384 mm das viertnasseste Jahr (NIKO 2024). Insbesondere das vierte Quartal 2023 war außergewöhnlich niederschlagsreich. So fielen mit 411 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961–1990) 225 % des abflussrelevanten Niederschlags⁶ (vgl. Abb. 9).

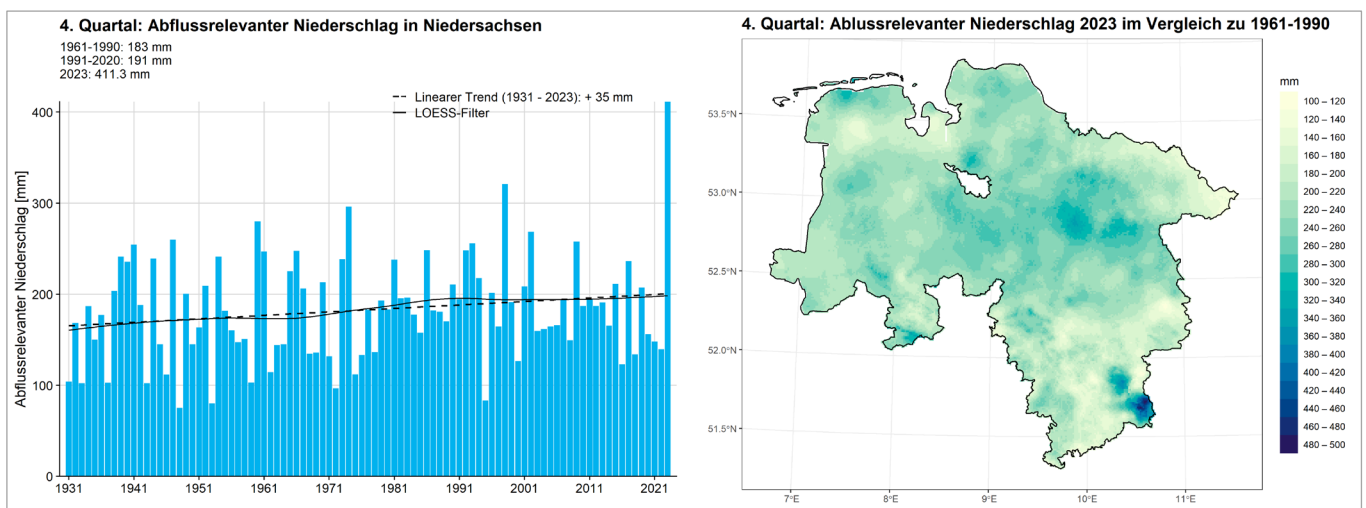


Abbildung 9: Links: Abflussrelevanter Niederschlag im 4. Quartal im langjährigen Vergleich von 1931–2023. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt den linearen Trend. Die durchgezogene Linie zeigt eine LOESS-Regression. Rechts: Räumliche Verteilung des abflussrelevanten Niederschlags im 4. Quartal 2023 im Vergleich zu 1961–1990 (Datengrundlage: DWD (HYRAS-DE-PRE v5.0 und eta_fao v1.1), Grafik: NIKO 2024).

Zum Abschluss des insgesamt feuchten Quartals wies der Dezember die höchsten Niederschlagssummen seit Messbeginn auf, welche die langjährigen Mittelwerte um ca. 45 % überstiegen (MU 2024). Ab dem 18.12.2023 bis in die erste Januarwoche 2024 zogen mehrere Tiefdruckgebiete über Niedersachsen hinweg (KASPAR et al. 2024). Ebenfalls nie zuvor gemessene hohe Oberflächentemperaturen des Atlantiks trugen dazu bei, dass diese Tiefdruckgebiete durch die Verdunstung viel

Feuchtigkeit mit sich führten. Die Tiefdruckgebiete brachten folglich neben Stürmen auch sehr ergiebige Niederschläge und Dauerregen mit sich. 18 Tage lang regnete es großflächig, mit nur wenigen Unterbrechungen (KASPAR et al. 2024, MEYER 2024). Abbildung 10 verdeutlicht, dass zwar in vielen Gebieten Deutschlands erhöhte Niederschläge auftraten, dass jedoch insbesondere Niedersachsen großflächig betroffen war.

⁶ Niederschlag > 1 mm.

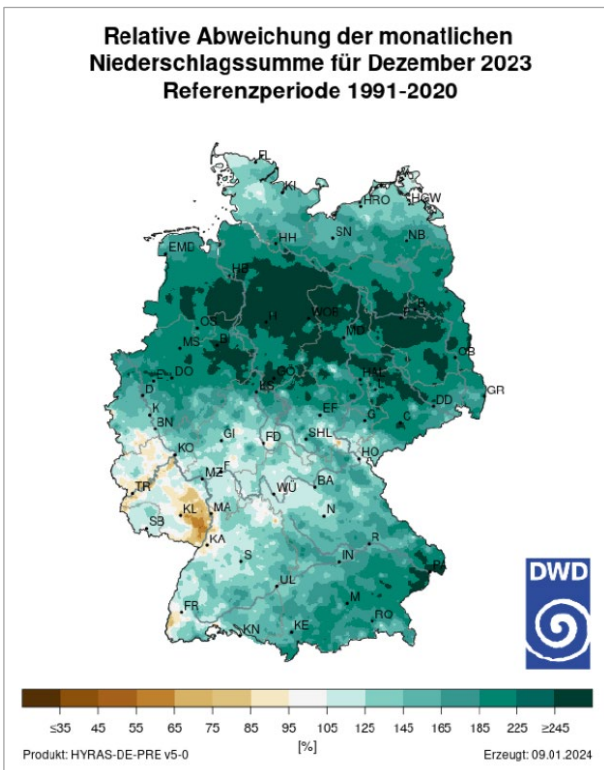


Abbildung 10: Relative Abweichung der monatlichen Niederschlagssumme für Dezember 2023 zur Referenzperiode 1991–2020 in % (aus: KASPAR et al. 2024).

Aufgrund der bereits z. T. durch den Niederschlag gesättigten Böden entwickelte sich eine erhebliche Hochwasserlage (KASPAR et al. 2024). Verdeutlicht werden kann das auch an den technischen Rückhaltstrukturen: Das 1994 gebaute Hochwasserrückhaltebecken Salzderhelden im Leinetal war erstmalig vollständig gefüllt. Auch die Talsperren im Harz erreichten z. T. ihre Kapazitätsgrenzen (MEYER 2024). Es entstanden flächenhafte Überschwemmungen im Bereich der Fließgewässer sowie überstaute Flächen in der freien Landschaft. Klimaprojektionen verdeutlichen, dass mit solchen sehr ergiebigen Niederschlagsereignissen zukünftig häufiger gerechnet werden muss (vgl. Kap. 1.2).

2. Klimawandel und Boden

Der Boden ist die zentrale Schnittstelle landschaftlicher Ökosysteme und wird durch die Interaktion von Litho-, Hydro-, Bio- und auch der Atmosphäre geprägt. Veränderungen im Zustand einer dieser Sphären, wie der Atmosphäre im Zuge des Klimawandels, führen daher auch zu Veränderungen im Boden selbst.

Der Boden ist besonders wertvoll, da er wichtige und zum Teil äußerst komplexe Funktionen für Mensch und Umwelt erfüllt (vgl. Abb. 11). Darunter fallen die natürlichen Bodenfunktionen, die Nutzungsfunktion sowie die diesen Funktionen zugrundeliegenden, im Boden ablaufenden Stoffumsetzungs- und Verlagerungsprozesse. Diese Funktionen und Prozesse werden zum Großteil auch durch das Klima und dessen Änderungen beeinflusst. Die bereits eingetretenen und zukünftig erwarteten Änderungen der klimatischen Parameter wirken sich insbesondere auf den Wasserhaushalt und damit auch auf den Stofftransport, die Eigenschaften des Bodens als Lebensraum (z. B. über die Temperatur) sowie auf den Stoffumsatz in Böden aus.

Auch die Humusspeicherung im Boden wird maßgeblich vom Klima beeinflusst. Gleichzeitig spielen Böden selbst eine essenzielle Rolle im Klimageschehen. Böden speichern in organischen Kohlenstoffverbindungen mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und die Vegetation gemeinsam (GEORGIU et al. 2022). Sie sind somit einer der größten Kohlenstoffspeicher weltweit und wichtiger Bestandteil im globalen Kohlenstoffkreislauf.

Neben diesen Zusammenhängen wird auch die Intensität von bodengefährdenden Prozessen, wie Bodenerosion und Bodenverdichtung, durch klimatische Rahmenbedingungen gesteuert. Als Folge können wesentliche natürliche Bodenfunktionen beeinträchtigt werden und die Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen abnehmen.

Abbildung 11 verdeutlicht die vielfältigen Leistungen von Böden und zeigt auf, wo direkte Einflüsse des Klimawandels zu erwarten sind.

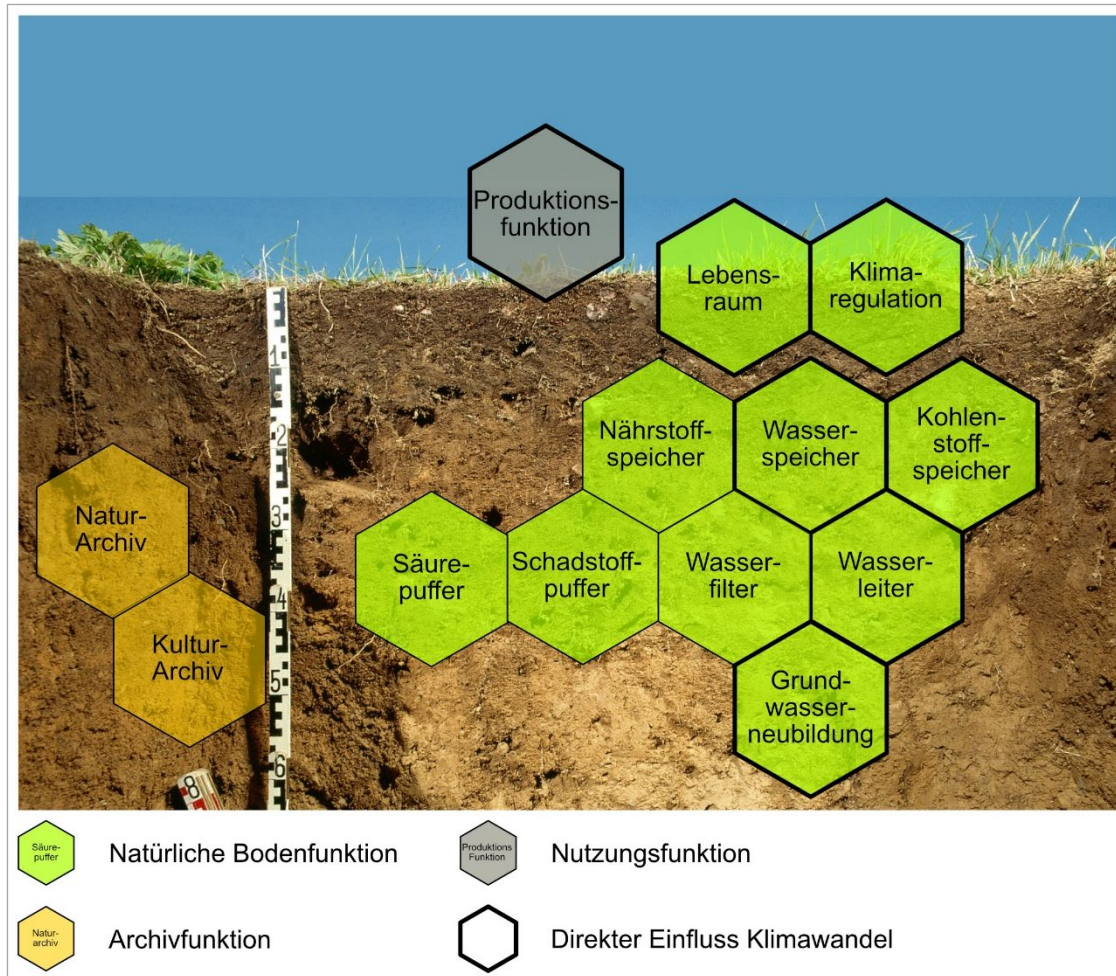


Abbildung 11: Natürliche Bodenfunktionen, Archivfunktion und Produktionsfunktion von Böden als Systemkomponenten unserer Ökosysteme und ihre mögliche direkte Beeinflussung durch den Klimawandel.

Der Klimawandel führt zu kontinuierlichen Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen für die Böden und ihre Funktionen. Die Eigenschaften des Bodens und damit auch die Funktionserfüllung reagieren jedoch unterschiedlich schnell auf diese Veränderungen. Abbildung 12 zeigt unterschiedliche messbare Parameter des Bodens, die sich zeitlich in ganz unterschiedlichen Dimensionen verändern können. Viele der von der Bodenkunde betrachteten Faktoren verändern sich nur langsam, aber nicht alle. Während sich z. B. Bodenwasserhaushaltsparameter über verhältnismäßig kurze Zeiträume ändern, können Veränderungen wie der

Gehalt an organischer Substanz oder die Kationenaustauschkapazität auch längerfristig stabil sein und damit die natürlichen Bodenfunktionen für längere Zeit aufrechterhalten. Dies muss bei der Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die Böden berücksichtigt werden. Eine Betrachtung der Veränderung zum Beispiel der Körnung ist in den typischerweise in Klimaszenarien betrachteten Zeiträumen bis zum Jahr 2100 nicht zielführend bzw. mit großen Unsicherheiten belegt. Sich kurzfristig ändernde Bodenparameter, wie etwa die Bodenfeuchte, stehen daher im Fokus der Betrachtungen dieses Berichtes und der Arbeiten des LBEG.

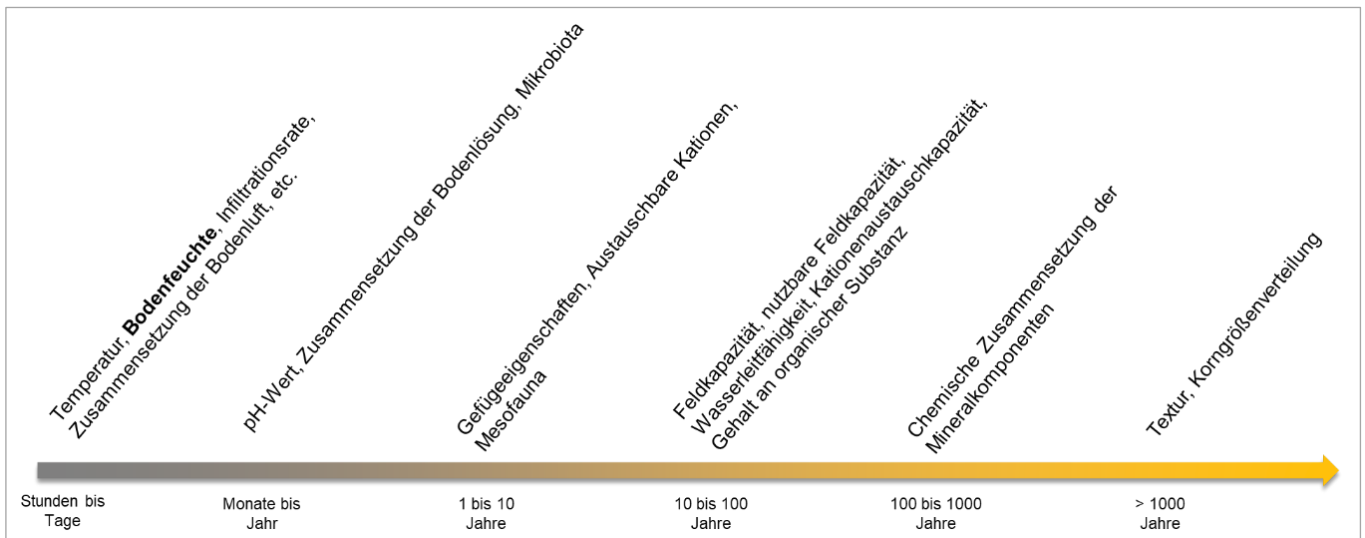


Abbildung 12: Zeitliche Dimensionen der möglichen Änderung von Bodenparametern durch den Klimawandel in Deutschland/Niedersachsen (verändert nach KARMAKAR et al. 2016, PFEIFFER, ESCHENBACH & MUNCH 2017 und GRÖNGRÖFT & MIEHLICH 2009).

Die in Kapitel 1.2 aufgezeigten Klimaveränderungen führen, abhängig von der Bodenfunktion bzw. der Gefährdung, zu sehr unterschiedlichen Auswirkungen. Die Klimaveränderungen werden in Tabelle 1 mit den Bodenfunktionen und in Tabelle 2 mit den Bodengefährdungen zusammengeführt. Dabei wird über Pfeile und die Farbgebung dargestellt, ob die Veränderung positiv oder negativ für die Erfüllung der Bodenfunktion oder die Gefährdung ausfällt. Nicht in allen Fällen kann jedoch eine eindeutige Richtung der Entwicklung aufgezeigt werden. So kann sich der Klimawandel in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften auf einzelne Bodenfunktionen sowohl positiv als auch negativ auswirken. Dies wird durch einen gelben Doppelpfeil symbolisiert.

Beispielhaft sei zur Erläuterung von Tabelle 1 die Produktionsfunktion der Böden für die Land- und Forstwirtschaft herausgegriffen. So ist durch einen Temperaturanstieg eine Veränderung dieser Funktion wahrscheinlich. Die Richtung kann aber in Abhängigkeit vom Standort variieren. Besonders kalte Standorte mit Neigung zu Spätfrösten können durch einen Temperaturanstieg profitieren, da Ertragseinbußen unwahrscheinlicher werden. Der Temperaturanstieg insbesondere im Sommer führt aber an anderen Standorten auch zu einer Verringerung der Produktionsfunktion, da Hitze- und Trockenstress bei den Anbaukulturen bzw. bei den Bäumen in den Forsten zunehmen. Weitere Faktoren erschweren eine eindeutige Bewertung der Entwicklung: Die bereits messbare Abnahme der Frühjahrsniederschläge (vgl. Kap. 1.2) kann in wichtigen

Wachstumsphasen der Vegetation sehr problematisch sein und die Produktionsfunktion beschränken. Eine Verlängerung der Vegetationszeit, höhere Temperatursummen und gleichzeitig eine höhere CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ermöglichen, abhängig von Vegetation und Wasserversorgung, aber zugleich auch höhere Biomasseerträge. Dieses Beispiel verdeutlicht das komplexe Wirkungsgefüge, das teilweise zu betrachten ist.

Beispielhaft für Tabelle 2 sei zudem der Prozess der Bodenverdichtung erläutert. Durch den Temperaturanstieg und die Verringerung der Frühjahrsniederschläge sinkt die Bodenfeuchte insbesondere im Frühjahr im Oberboden. Dadurch ist die Stabilität des Bodens größer und die Wahrscheinlichkeit von Bodenverdichtung durch Befahrung nimmt ab. Der gleiche Zusammenhang begründet auch die positive Auswirkung durch die Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und die Zunahme von Trockenperioden. Durch die erhöhten Niederschläge im Winter kann es aber gerade im ausgehenden Winter zu sehr hohen Bodenwassergehalten und somit nassen Böden kommen. Dann ist die Befahrbarkeit der Flächen nicht gegeben, und die Gefährdung durch Bodenverdichtungen steigt daher an.

In einigen Fällen wird in den Tabellen zudem gar keine Bewertung vorgenommen. Große Unsicherheiten bestehen zum Beispiel bei den Aussagen über eine mögliche Zunahme der Windgeschwindigkeiten. Während eine Verstärkung der Bodenerosion durch Wind wahrscheinlich ist, kann die Wirkung auf diverse Bodenfunktionen nicht eindeutig benannt werden.

Tabelle 3 und 4 zeigen jeweils auf, inwiefern die Auswirkungen des Klimawandels mit bodenkundlichen Auswertungsmethoden beim LBEG abgebildet werden können. Hierzu wurden aus den NIBIS®-Auswertungsmethoden (BUG et al. 2020) klimasensitive Methoden ausgewählt und auf ihre Eignung getestet. Dabei ist zu erkennen, dass die Methoden meist nicht alle Aspekte des Klimawandels, also nicht alle identifizierten Klimaveränderungen aufnehmen und widerspiegeln können. Daraus lässt sich zum einen ableiten, dass bei der Interpretation der Ergebnisse der Methoden immer gewisse Unsicherheiten vorhanden sind. Zum anderen kann damit ein weiterer Forschungsbedarf zur Fortentwicklung der Methoden festgestellt werden. Wenn die Methoden mehr durch den Klimawandel beeinflusste Klimaparameter berücksichtigen, steigt auch ihre Aussagekraft zu der Veränderung der Bodenfunktionen und der Gefährdungen an.

Eine detaillierte Beschreibung der Kennwerte, deren aktuelle Ausprägung sowie zu erwartende Entwicklungen auf Basis von Klimaprojektionen erfolgt in den weiterführenden Geofakten der Reihe 46.x „... im Klimawandel“ (vgl. Kap. 1.1). Um jedoch einen Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Komponenten des Bodens zu geben, werden im Anschluss einige grundsätzliche Zusammenhänge erläutert, die den Tabellen 1 und 2 zugrunde liegen und zudem Wirkungsketten zu anderen Kompartimenten des Ökosystems aufzeigen. Die Ausführungen entsprechen z. T. im Wortlaut den Berichten ENGEL & MÜLLER 2009 und ENGEL et al. 2020, die durch diesen Geofakt ersetzt werden.

Tabelle 1: Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf ausgewählte Bodenfunktionen
 (Tabelle verändert nach PFEIFFER, ESCHENBACH & MUNCH 2017; SCHICKHOFF & ESCHENBACH 2018 und ENGEL et al. 2020).

Auswirkungen auf Bodenfunktionen	Bodenteilfunktion / Kriterium	Klimaveränderungen						
		Temperaturanstieg	Abnahme Frühjahrsniederschläge	Zunahme Winter-niederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	Zunahme Trockenperioden	Stürme / Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten
Lebensraumfunktion	Diversität und Aktivität von Bodenorganismen	↕	↕	↕	↕	↕	↕	
	Lebensraum für Pflanzen, Besondere Standorteigenschaften	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen	Regulation des Bodenwasserhaushalts	↑	↑	↓	↓	↑	↕	
	Grundwasserneubildung	↓	↓	↑	↓	↓	↓	
	Regulation Nährstoffkreislauf	↑	↕	↓	↕	↕	↓	
Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	Schadstoffabbau und -pufferung	↑	↕	↕	↓	↕	↕	
Produktionsfunktion	Wasserbereitstellung für Pflanzenwachstum	↓	↓	↕	↓	↓	↓	
	Bearbeitbarkeit, Befahrbarkeit	↕	↕	↕	↕	↕	↕	
	Standort für ackerbauliche Nutzung	↓	↓	↕	↓	↓	↓	
Klimafunktion	Kohlenstoffspeicherung	↕	↕	↕	↓	↕	↕	
	Kühlungsfunktion in Städten	↓	↓			↓	↓	↑

↑	Funktionserfüllung nimmt zu.
↕	In Abhängigkeit von Standortbedingungen Zu- oder Abnahme der Funktionserfüllung möglich.
↓	Funktionserfüllung nimmt ab.
	Keine Bewertung zur Funktionserfüllung.

Tabelle 2: Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf ausgewählte Bodengefährdungen.

Auswirkungen auf Bodengefährdungen	Prozess	Klimaveränderungen						
		Temperaturanstieg	Abnahme Frühjahrsniederschläge	Zunahme Winterniederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	Zunahme Trockenperioden	Stürme / Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten
Gefährdungen und Empfindlichkeiten	Bodenerosion durch Wind		↑			↑	↑	↑
	Bodenerosion durch Wasser	↑	↓	↑	↑	↕	↕	
	Bodenverdichtung	↓	↓	↑	↑	↓	↓	
	Versauerung durch Grundwasserabsenkung	↑	↑	↓	↕	↑	↑	

↓	Gefährdung nimmt ab.
↕	In Abhängigkeit von Standortbedingungen Zu- oder Abnahme der Gefährdung möglich.
↑	Gefährdung nimmt zu.
	Keine Bewertung zur Gefährdung.

Tabelle 3: Sensibilität von Auswertungsmethoden und Kennwerten zur Beschreibung von Bodenfunktionen auf Klimaveränderungen.

Auswirkungen auf Bodenfunktionen	Bodenteilfunktion / Kriterium	Kennwert	Klimaveränderungen						
			Temperaturanstieg	Abnahme Frühjahrsniederschläge	Zunahme Winter-niederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	Zunahme Trockenperioden	Stürme / Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten
Lebensraumfunktion	Diversität und Aktivität von Bodenorganismen	–							
	Lebensraum für Pflanzen, Besondere Standorteigenschaften	Biotopentwicklungspotenzial (OEKO)	x	x	x		x		
Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen	Regulation des Bodenwasserhaushalts	Retentionsleistung (RL)	x		x				
		Oberflächenabfluss (OA)		x	x	x			
	Grundwasserneubildung	Sickerwasserrate (SWR)	x	x	x		x		
	Regulation Nährstoffkreislauf	Austauschhäufigkeit (AH)	x	x	x				
Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	Schadstoffabbau und -pufferung	–							
Nutzungsfunktion als Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung	Wasserbereitstellung für Pflanzenwachstum	Pflanzenverfügbares Wasser in der Vegetationsperiode	x	x			x		
	Bearbeitbarkeit, Befahrbarkeit	Bodenkundliche Feuchtestufe (BKF)	x	x	x		x		
	Standort für ackerbauliche Nutzung	Zusatzwasserbedarf (mZWpot)	x	x			x		
Klimafunktion	Kohlenstoffspeicherung	–							
	Kühlungsfunktion in Städten	Kühlungsfunktion (KÜHL)	x	x			x		

x	Klimaveränderung wird in der Methode des Kennwerts abgebildet.
	Klimaveränderung ist relevant und wird <u>nicht</u> in der Methode des Kennwertes abgebildet.
	Kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Funktion / Gefährdung und Klimaveränderung.

Tabelle 4: Sensibilität von Auswertungsmethoden und Kennwerten zur Beschreibung von Bodengefährdungen auf Klimaveränderungen.

Auswirkungen auf Bodengefährdungen	Prozess	Kennwert	Klimaveränderungen						
			Temperaturanstieg	Abnahme Frühjahrsniederschläge	Zunahme Winter-niederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode	Zunahme Trockenperioden	Stürme / Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten
Gefährdungen und Empfindlichkeiten	Bodenerosion durch Wind	Enatwi							
	Bodenerosion durch Wasser	ABAG		x	x	x			
	Bodenverdichtung	VDST	x	x			x		
	Versauerung durch Grundwasserabsenkung	Kulissen Geofakt 24 / Grundwasserstände	x	x	x		x		

x	Klimaveränderung wird in der Methode des Kennwerts abgebildet.
	Klimaveränderung ist relevant und wird <u>nicht</u> in der Methode des Kennwertes abgebildet.
	Kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Funktion / Gefährdung und Klimaveränderung.

Veränderung von Bodenwasserhaushalt, Nährstoffverfügbarkeit und Stoffaustragen

Aufgrund der projizierten und z. T. bereits gemessenen Veränderung der Niederschlagsverhältnisse (Zunahme der Winterniederschläge, Abnahme der Frühjahrsniederschläge, Zunahme von lang andauernden Niederschlagsereignissen mit großen Regenmengen im Winter, Zunahme der Starkregenereignisse) ist ein im Mittel erhöhter Oberflächenabfluss zu erwarten. Daraus ergibt sich auf Ackerflächen eine zunehmende Bodenerosionsgefährdung durch Wasser mit typischen On- und Offsite-Schäden. Die Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen steigt. Darüber hinaus hat eine länger anhaltende, besonders hohe Durchfeuchtung der Böden ungünstige Auswirkungen auf die Verankerungsstabilität der Waldbestände, insbesondere bei den flach wurzelnden Bäumen. Als Folge steigt die Anfälligkeit gegenüber Windwurf. Zusätzlich kann die mechanisierte Holzernte im Winter durch die geringere Befahrbarkeit der nassen Böden erschwert und die Gefahr für Bodenverdichtung erhöht werden.

Weniger Frost- und Eistage führen zudem zu einer Verschlechterung der Bodenstruktur mit erhöhter Verschlammungsneigung durch das Ausbleiben der Frostgare. Gleichzeitig resultieren die erwarteten höheren Wintertemperaturen in eine Reduzierung der Schneeniederschläge. Die Abpufferung von Abflussspitzen durch die Zwischenspeicherung von Wasser in der Schneedecke nimmt folglich ab. Beides verstärkt die Gefahr von Erosion durch Wasser und Hochwasser zusätzlich.

Die erwartete Zunahme der Sommertrockenheit mit einer stärker werdenden Austrocknung der Böden, insbesondere der Oberböden in der Hauptvegetationsperiode, wird zu einer Änderung der Nährstoffdynamik führen. Da der Transport von Düngemitteln zur Pflanzenwurzel und die Aufnahme zahlreicher Pflanzennährstoffe an das Vorhandensein von Wasser gekoppelt sind, werden die Nährstoffverfügbarkeit und die Düngewirkung (ohne zusätzliche Beregnung) eingeschränkt. Aus diesem Grund und durch den erwarteten zunehmenden Trockenstress steigt das Risiko von Mindererträgen mit schlechter Nährstoffausnutzung.

Als Folge können höhere Nährstoffüberhänge im Herbst auftreten. Durch die gleichzeitig zu erwartenden höheren Sickerwasserraten im Winter (also im Zeitraum ohne Nährstoffaufnahme), steigt das Auswaschungsrisiko für nicht sorbierbare Stoffe, insbesondere Nitrat, ins Grundwasser.

Zusätzlich kann durch die höheren Herbst- und Wintertemperaturen die Mineralisation im Boden zunehmen, was zu einer weiteren Verstärkung der Auswaschungsproblematik führt. Ein Wasserüberschuss im Winter kann diesen Effekt gleichzeitig durch die Verdünnungswirkung auch vermindern.

Als Folge des Klimawandels ist mit einer verstärkten Beanspruchung der Grundwasservorräte und mit zunehmenden Nutzungskonflikten (höhere Verdunstungsleistung der Vegetation auf Flächen mit Grundwasseranschluss, längere Vegetationsperiode mit möglichem Zweitanbau, verstärkter Beregnungswasserbedarf in der Landwirtschaft, erhöhter Wasserbedarf der Bevölkerung, mögliche Beeinträchtigung grundwasserabhängiger Landökosysteme) zu rechnen. Die Betroffenheit in Niedersachsen wird regional sehr unterschiedlich ausfallen. In Regionen mit sandigen Böden und weiter zunehmenden Defiziten der klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr sind zunehmender Trockenstress für die Vegetation und folglich ein steigender Beregnungsbedarf zu erwarten.

Der Klimawandel kann auch zu Veränderungen des Grundwasserflurabstandes führen. Es wird davon ausgegangen, dass die Extreme größer werden. Im Sommer bedeutet dies, dass einige normalerweise grundwasserbeeinflusste Böden keinen Grundwasseranschluss mehr aufweisen. Dadurch fällt der kapillare Aufstieg aus. Dies kann insbesondere die Erträge in der Landwirtschaft, die Vitalität der Wälder, aber auch die Existenz von grundwasserabhängigen Landökosystemen (BUG et al. 2021) gefährden.

Durch die tiefgreifende Austrocknung von Böden mit potenziell sulfatsaurem Material (HEUMANN, GEHRT & GRÖGER-TRAMPE 2018) kann es zur Oxidation von Schwefel und damit zur Freisetzung von Schwefelsäure in den Marschgebieten kommen. Durch die plötzliche Freisetzung von Säure sinkt der pH-Wert im Boden und den angrenzenden Gewässern kurzfristig stark ab. Dies kann zur Freisetzung von Aluminium führen und ein Fischsterben hervorrufen. Diese Situationen werden infolge des Klimawandels wahrscheinlicher.

Kurz zusammengefasst

Folgen der Veränderungen von Bodenwasserhaushalt, Nährstoffverfügbarkeit und Stoffausträgen

Zunehmende Sommertrockenheit und Zunahme von Trockenperioden und Dürren:

- zunehmende Ertragsunsicherheit,
- Zunahme der beregnungsbedürftigen Flächen und der Beregnungswassermenge,
- Verschlechterung der Nährstoffverfügbarkeit, Verringerung der Düngewirkung.

Zunehmender Oberflächenabfluss:

- zunehmende Verschlammungsneigung der Bodenoberfläche,
- steigende Hochwassergefahr,
- steigende Gefahr von Erosion durch Wasser.

Steigende Sickerwasserrate im Winter:

- zunehmende Auswaschungsgefahr nicht sorbierbarer Stoffe, insbesondere Nitrat.

Zunehmendes Wasserdefizit im Sommer wird durch Wasserüberschuss im Winter nicht immer ausgeglichen:

- stärkere Ausnutzung der Grundwasservorräte im Sommer (Nutzungskonflikte).

Organische Bodensubstanz und Boden-Biodiversität

Durch die zu erwartenden höheren Temperaturen und die erwartete verstärkte Sommertrockenheit können vor allem hydromorphe Böden (Moore, Marschen, Gleye) in den Sommermonaten stärker entwässert werden, so dass die durch Wasserüberschuss konservierte organische Substanz dem oxidativen Abbau ausgesetzt wird. Humusabbau und CO₂-Freisetzung sind die Folge. (ENGEL et al. 2020, HÖPER & SCHÄFER 2012) In Niedersachsen wären insbesondere die Moore und Marschen im Nordwesten des Landes betroffen.

Die erwartete Zunahme der Temperaturen im Winterhalbjahr und eine ausreichende Bodenfeuchte beschleunigen die Mineralisierungsprozesse der organischen Substanz im Winter. Dem gegenüber steht allerdings möglicherweise durch die erwarteten verstärkten Niederschläge im Winter eine konservierende Wirkung durch Wasserübersättigung und

in nicht hydromorphen Böden eine verringerte Mineralisation in trockenen Sommermonaten.

Bodentiere und Mikroorganismen, beispielsweise Bakterien und Pilze, spielen eine maßgebliche Rolle für den Abbau und die Mineralisierung der organischen Substanz, die Durchmischung und Stabilisierung organischer und mineralischer Partikel und damit für den Humusaufbau und die Bodenaggregation, die Bindung atmosphärischen Stickstoffs sowie Verwitterungsprozesse und für die Bodenbildung. Sie beeinflussen zahlreiche Stoffflüsse im Boden und spielen eine maßgebliche Rolle bei der Nährstoffbereitstellung für die Pflanzen. Auch der Abbau organischer Schadstoffe erfolgt durch Bodenorganismen. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag zum Bodenaufbau und zur Standortqualität. Veränderungen der Biodiversität im Boden können daher weitreichende Konsequenzen haben.

Klimaveränderungen, die die Bodentemperatur und -feuchte beeinflussen, können zu einer Veränderung der Boden-Biodiversität führen, mit Folgen für die ökosystemaren Funktionen im Boden. Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf zur den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Biodiversität im Boden und zu den ökologischen Folgen einer Veränderung der Bodenfauna.

Kurz zusammengefasst

Folgen für den Kohlenstoffhaushalt und die Biodiversität

Verstärkte Entwässerung v. a. hydromorpher Böden (Moore, Marschen und Gleye):

- Humusabbau durch verstärkte Humusmineralisation,
- Humusverlust durch Grünlandumbruch,
- CO₂-Freisetzung und Verstärkung des Treibhauseffektes.

Veränderung der biologischen Aktivität im Boden:

- Folgen für Stoffflüsse, Stoffumsätze und die Nährstoffverfügbarkeit des Bodens und damit für die Standortqualität,
- mögliche Veränderungen der Boden-Biodiversität.

Erosion durch Wasser und Bodenverdichtung

Durch die projizierte Zunahme der Winterniederschläge und die Zunahme von lang andauernden Niederschlagsereignissen mit großen Regenmengen ist ein verstärkter Oberflächenabfluss im Winter zu erwarten. Durch die erhöhten Niederschlagsmengen sind die Perioden mit gesättigten Böden (das Gesamtporenvolumen ist mehr oder minder mit Wasser gefüllt) im Winterhalbjahr häufiger. Dadurch kann auch schon bei Ereignissen mit geringen Niederschlagsmengen Oberflächenabfluss entstehen. Hierdurch steigt das Risiko von Wassererosion.

Zudem wird aufgrund des Klimawandels von einer Zunahme der erosiven Niederschläge ausgegangen (EHLHAUS et al. 2019, UBER et al. 2024). Vor allem für die Sommermonate wird erwartet, dass die in ihrer Menge zwar abnehmenden Niederschläge verstärkt als Starkregenereignisse eintreten (DWD 2018a). Dies führt dazu, dass die Infiltrationskapazität der Böden kurzfristig überstiegen wird und dass so, trotz trockenerer Böden, Oberflächenabfluss stattfinden kann. Durch die zunehmende Bodentrockenheit nimmt die Infiltrationskapazität der Böden noch weiter ab, da sehr trockene Böden eine hydrophobe Wirkung haben. Dies kann ebenfalls einen verstärkten Oberflächenabfluss zur Folge haben.

Ebenfalls negativ auf die Erosionsanfälligkeit der Böden wirken sich weitere mögliche, durch den Klimawandel ausgelöste Bodenveränderungen aus. Durch einen möglichen Humusabbau und weniger Frost- und Eistage verschlechtert sich die Bodenstruktur, und die Gefügestabilität verringert sich – die Verschlammungsneigung und damit die Erodierbarkeit der Bodenoberfläche nehmen zu.

Zu Schadverdichtungen kann es kommen, wenn die Tragfähigkeit von Böden bei der Bearbeitung bzw. Befahrung überschritten wird. Die Tragfähigkeit eines Bodens hängt von der Stabilität des Bodengefüges ab. Diese Stabilität wird durch verschiedene im Folgenden erläuterte Faktoren beeinflusst, welche einer Veränderung durch den Klimawandel unterworfen sein können.

Gefährdet sind vor allem tonige und schluffreiche Böden bei einer hohen Bodenfeuchtigkeit. Durch erhöhte Niederschlagsmengen im Winter können zum Zeitpunkt der ersten Düngergabe (Ende der Güllesperrfrist) zu Beginn der Frühjahrsbodenbearbeitung, allerdings auch in anderen Bearbeitungsphasen, höhere Bodenwassergehalte bis hin zur Sättigung auftreten, die die Stabilität des Bodenge-

füges herabsetzen. Gleichzeitig wirkt sich eine Abnahme der Frosttage negativ auf die Gefügestabilität aus. Auch durch einen möglichen Humusabbau kann die Gefügestabilität vermindert und die Verdichtungsgefahr erhöht werden.

Folgen einer Schadverdichtung sind eine Verringerung der Retentionskapazität, der Infiltrationsleistung (vgl. BUG et al. 2022) und der Durchwurzelbarkeit. Für die landwirtschaftliche Nutzung kann dies Ertrags- und Qualitätseinbußen bedeuten. Schadverdichtungen können sowohl zur Bildung von Staunässe als auch zu einer Erhöhung des Erosionsrisikos beitragen. Zudem kann die Gefahr der Austrocknung in Trockenphasen erhöht werden, da die Böden weniger Wasser aufnehmen können. Die als Folge verminderte Auffüllung des Bodenwasserspeichers in Herbst und Winter steht im Gegensatz zu der zunehmenden Bedeutung, die Böden nach trockenen Sommern durch Niederschläge wieder zu durchfeuchten (HARTMANN et al. 2012).

Kurz zusammengefasst

Folgen für die Erosions- und Verdichtungsgefährdung

Erosions- und Verdichtungsgefährdung steigen:

- Zunahme des Oberflächenabflusses,
- Abnahme der natürlichen Ertragsfähigkeit der Böden durch Verringerung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit,
- Eutrophierung benachbarter Ökosysteme und/oder Fließgewässer,
- Reduzierung der Durchwurzelungstiefe,
- Verringerung der Infiltrationskapazität und Verstärkung von Staunässe bei Verdichtung,
- mögliche Erhöhung der Anfälligkeit für Trockenphasen.

3. Ausblick

Die in diesem Geofakt dargestellten Veränderungen des Klimas zeigen, dass der Klimawandel in Niedersachsen Realität ist. Da das Klima stark auf die Böden einwirkt, ist davon auszugehen, dass der Klimawandel mittel- bis langfristig sämtliche Funktionen der niedersächsischen Böden beeinflussen wird. Insbesondere werden davon die natürlichen Bodenfunktionen betroffen sein, die von hoher Bedeutung für den Naturhaushalt sind. Dies sind die

Lebensraum-, Regulations- sowie Filter- und Pufferfunktion des Bodens (Abb. 11, vgl. ENGEL & STADTMANN 2020). Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen des Bodens mit anderen Kompartimenten des Ökosystems werden die Auswirkungen auch andere Schutzgüter, wie das Grundwasser oder die Flora und Fauna, betreffen.

Die Folgen des Klimawandels auf die Böden zeigen räumlich und zeitlich unterschiedliche Ausprägungen (vgl. Kap. 1.2 und 1.3). Vor diesem Hintergrund ist eine zeitlich differenzierte, regionale Betrachtung und standortdifferenzierte Bewertung der Folgen von Klimawirkungen für die Böden erforderlich.

Aufgrund der Vielzahl der Faktoren und Bodenfunktionen können die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden und ihre Funktionen nicht umfassend in diesem Geofakt bewertet werden. Daher wird es Erweiterungen geben, die einzelne Methoden zur Beschreibung von **Bodenfunktionen, Bodengefährdungen** und **Anpassungsstrategien** vorstellen und die Ergebnisse mit unterschiedlichen Klimabeobachtungs- und -projektionsdaten aufzeigen. Diese werden regelmäßig als Geofakt 46.x veröffentlicht und überarbeitet, wenn neue Erkenntnisse oder Daten entstehen. Die dazugehörigen Karten werden im NIBIS®-Kartenserver veröffentlicht und zum Download bereitgestellt.

Für die verbesserte Abschätzung klimabedingter Effekte auf die Böden und die Konzeption regional differenzierter Anpassungsstrategien ist die Weiterentwicklung bodenkundlicher Auswertungsmethoden erforderlich, welche die Wechselwirkungen zwischen Klimaparametern, Landnutzung und Boden berücksichtigen. Diese Methoden müssen zudem nicht nur langjährige Mittelwerte von Klimaparametern berücksichtigen, sondern auch die Verteilung von z. B. Hitzeperioden oder Niederschlägen stärker integrieren.

Die Bodeninformationssysteme und die Bodenzustandserhebungen sowie Bodendauerbeobachtungsflächen der Länder stellen unerlässliche Datengrundlagen für die Weiterentwicklung der Methoden dar und sind daher elementarer Bestandteil der Klimawirkungs- und Klimaanpassungsforschung.

Für die Entwicklung regional differenzierter Anpassungsstrategien sind zudem weiter verbesserte regionale Projektionen von Klimabedingungen und -extremen und deren Kopplung an Wirkmodelle von entscheidender Bedeutung. Hierzu stellen außerdem möglichst hoch auflösende Bodeninformationen die Grundlage dar, um die Bodenfunktionen und deren Gefährdung bewerten zu können.

Neben diesem Geofakt gibt es weitere Veröffentlichungen, die die Böden Niedersachsens im Klimawandel thematisieren. Um auf die potenziellen Folgen des Klimawandels reagieren zu können, müssen die regional unterschiedlichen Auswirkungen auf die Böden beschrieben werden. Durch die Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019) wurde 2019 hierzu ein Schritt getan. Durch Kenntnis der regionalen Betroffenheit können regionale oder standortbezogene Anpassungsstrategien entwickelt werden, um mittel- und langfristige Folgeschäden auf Böden und Bodenfunktionen abzuwenden. Hierzu gehört als Planungsgrundlage eine Ausweisung der betroffenen Gebiete, in denen angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen gefördert werden können. Eine überarbeitete Version wird 2025 veröffentlicht. Die niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels von 2021 verdeutlicht zudem, dass die Böden eine Schnittstellenfunktion auch für andere Handlungsfelder einnehmen. Deshalb werden in der Strategie spezifische Anpassungsmaßnahmen für den Boden aufgeführt (MU 2021a).

Ähnlich angelegt ist der Klimafolgenmonitoringbericht von 2023 (NIKO 2023). Dieser stellt gebündelt das Wissen niedersächsischer Fachbehörden und wissenschaftlicher Einrichtungen zu den beobachteten Auswirkungen des Klimawandels in Niedersachsen dar. Das Thema Boden wird in der Rubrik Land anhand der Indikatoren Regenerosivität (Bodenerosion) und Bodenwasservorrat (land- und forstwirtschaftliche Flächen) behandelt.

Die Bündelung der Informationen wird zukünftig eine wichtige Aufgabe sein. Dazu sollen der Geofakt 46 und die weiteren Geofakten der Reihe 46.x „...im Klimawandel“ einen wichtigen Beitrag leisten.

Quellen

- BUG, J., ENGEL, N., GEHRT, E. & KRÜGER, K. (2019): Schutzwürdige Böden in Niedersachsen. Arbeitshilfe zur Berücksichtigung des Schutzgutes Boden in Planungs- und Genehmigungsverfahren. – GeoBerichte **8**: 4. überarb. Aufl., 56 S., 25 Abb., 5 Tab., Anh.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_8_2019.
- BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – GeoBerichte **19**: 9. Aufl., 383 S., 36 Abb., 384 Tab.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_19_2020.
- BUG, J., PLINKE, A.-K., AFFELT, L. T. & HARDERS, D. (2021): Standortpotenziale Grundwasserabhängiger Landökosysteme in Niedersachsen - Erläuterung zur Kulissenerstellung und Bewertung der Vulnerabilität. – GeoBerichte **43**: 66 S., 38 Abb., 9 Tab.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_43_2021.
- BUG, J., SCHARUN, C., HARDERS, D. & STADTMANN, R. (2022): Der Wasserhaushalt der Böden in Niedersachsen - Neue methodische Ansätze zur bodenfunktionalen Bewertung. – Geofakten **36**: 17 S., 7 Abb., 5 Tab.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geofakt_36_1_2022.
- DKK – DEUTSCHES KLIMA-KONSORTIUM, DMG – DEUTSCHE METEOROLOGISCHE GESELLSCHAFT, DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST, EXTREMWETTERKONGRESS HAMBURG, HELMHOLTZ-KLIMAINITIAIVE, KLIMAFAKTEN.DE (Hrsg.) (2022): Was wir heute übers Klima wissen. Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. – https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/basisfakten-klimawandel.pdf.
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2018a): Klimareport Niedersachsen. – 52 S.; Offenbach am Main.
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2018b): Deutschlandwetter im Sommer 2018. Außergewöhnlich warm, trocken und sonnig - viele neue regionale Rekorde. – https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20180830_deutschlandwetter_sommer_news.html, Stand: 30.08.2018, letzter Zugriff: 02.10.2019.
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2019): Deutschlandwetter im Winter 2018/19. Ein sehr milder und niederschlagsreicher Winter mit viel Sonnenschein. – https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190227_deutschlandwetter_winter2018_2019_news.html, Stand: 27.02.2019, letzter Zugriff: 03.04.2024.
- EHLHAUS, D., WINTERRATH, T., AUERSWALD, K. & FISCHER, F. (2019): Klimawandel und Bodenerosion. Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung. – Bodenschutz **4**/2019: 136–142.
- ENGEL, N. & MÜLLER, U. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. – 1. Aufl., 27 S., 15 Abb.; Hannover (LBEG).
- ENGEL, N., MÜLLER, U., STADTMANN, R., HARDERS, D. & HÖPER, H. (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. – 2. Aufl., 32 S., 17 Abb., 1 Tab., Anh.; Hannover (LBEG), https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/klimawandel/auswirkungen_auf_boeden/auswirkungen-des-klimawandels-auf-boeden-in-niedersachsen-89957.html.
- ENGEL, N. & STADTMANN, R. (2020): Bodenfunktionsbewertung auf regionaler und kommunaler Ebene - Ein niedersächsischer Leitfaden für die Berücksichtigung der Belange des vorsorgenden Bodenschutzes in der räumlichen Planung. – GeoBerichte **26**: 2. Aufl., 67 S., 15 Abb., 21 Tab., Anh.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_26_2020.
- FRANCIS, J. A. & VAVRUS, S. J. (2015): Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. – Environmental Research Letters **10**: 1–12.
- GEORGIU, K., JACKSON, R. B., VINDUŠKOVÁ, O., ABRAMOFF, R. Z., AHLSTRÖM, A., FENG, W., HARDEN, J. W., PELLEGRINI, A. F. A., POLLEY, H. W., SOONG, J. L., RILEY, W. J. & TORN, M. S. (2022): Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. – Nat. Commun. **13**: 3797.
- GRÖNGRÖFT, A. & MIEHLICH, G. (2009): Die Erfassung planungsrelevanter Bodeneigenschaften. – NNA-Berichte **1**: 5–10.
- HAJATI, M., HARDERS, D., PETRY, U., ELBRACHT, J. & ENGEL, N. (2022): Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1. – Geofakten **39**: 15 S., 1 Abb., 4 Tab., Anh.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geofakt_39_1_2022.
- HARI, V., RAKOVEC, O., MARKONIS, Y., HANEL, M. & KUMAR, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. – Scientific reports **10**/2020.

- HARTMANN, P., ZINK, A., FLEIGE, H. & HORN, R. (2012): Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of Arable Luvisols in Northwest Germany. – *Soil and Tillage Research* **124**: 211–218.
- HEUMANN, S., GEHRT, E. & GRÖGER-TRAMPE, J. (2018): Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten: Entstehung, Vorerkundung und Auswertungskarten. – *Geofakten* **24**: überarbeitete Fassung (2. Auflage), 17 S., 6 Abb., 1 Tab.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geofakt_24_2_2018.
- HÖPER, H. & SCHÄFER, W. (2012): Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz. – *Bodenschutz* **3/2012**: 72–80.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. – Hauptautoren: PACHAURI, R. K. & MEYER, L. A. (Hrsg.), IPCC, Genf, Schweiz; deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016; https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. – In: *Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen*. – 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.). – Im Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Druckvorlage, Oktober 2021. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern, Februar 2022. – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf.
- KARMAKAR, R., DAS, I., DUTTA, D. & RAKSHIT, A. (2016): Potential Effects of Climate Change on Soil Properties: A Review. – *Science International* **4/2**: 51–73.
- KASPAR, F., RAUTHE, M., BRENDDEL, C., JUNGÄNEL, T., RAUTHE-SCHÖCH, A., OSTERMÖLLER, J., KUNERT, L., DRÜKE, M., DEUTSCHLÄNDER, T., ZIESE, M., RUSTEMEIER, E., SCHIRMEISTER, Z., BREIDENBACH, J. N., ZEPPERITZ, M., SCHRÖTER, J., TIVIG, M., LORENZ, P., SAUERBREI, R., KREIENKAMP, F., BISSOLLI, P., V. D. LINDEN, R., DASSLER, J., FRIEDRICH, K., LEPELT, T., KRATZSCH, T. & ULLRICH, R. (2024): Hydroklimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands vom 19. Dezember 2023 bis 5. Januar 2024. – https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignis-se/niederschlag/20240116_dauerniederschlaege_2023-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=4; Stand: 06.02.2024, letzter Zugriff: 19.02.2024.
- KRAUSE, A. (2008): Der Klimawandel in Niedersachsen - Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze. – *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover* **74**, 122 S., Anh.; (Selbstverlag), [ISBN 3-923624-48-5, ISSN 0440-2820].
- LSN – LANDESAMT FÜR STATISTIK NIEDERSACHSEN (2018): Erntestatistik online - Ernteergebnisse in Niedersachsen seit 1991. > Ernte 2018. – über: https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft_forstwirtschaft_fischerei/erntestatistik_online/ernteergebnisse_seit_1991/erntestatistik-online-ernteergebnisse-in-niedersachsen-seit-1991-152870.html, letzter Zugriff: 02.10.2019.
- MEINERT, T., BECKER, A., BISSOLLI, P., DASSLER, J., BREIDENBACH, J. N. & ZIESE, M. (2019): Ursachen und Folgen der Trockenheit in Deutschland und Europa ab Juni 2019. – DWD, Abteilungen Klimaüberwachung, Agrar- und Hydrometeorologie; https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20190712_trockenheit_juni_juli_2019.pdf;jsessionid=4C3D5E458C5AAE78FB609A14D6B1C0EA.live21074?__blob=publicationFile&v=1, letzter Zugriff: 03.04.2024.
- MEINKE, I., MANEKE, M., KLEPGEN, J. & QUANTE, M. (2013): Klimawandel in Nordost-Niedersachsen unter besonderer Berücksichtigung des Hitzesommers 2003. – *Jb. Naturw. Verein Fstm. Lbg.* **45**: 9–21.
- MEYER, S. (2024): Das Weihnachts- und Neujahrshochwasser 2023/2024. Ursächliche Wettersituation und Besonderheiten aus dem Blickwinkel der HWVZ. – Vortrag im Rahmen der Klima-Gespräche des NIKO, 06.02.2024; https://niko-klima.de/wp-content/uploads/2024/02/2024-02-06_HW2324_Niedersachsen_HWVZ.pdf.

- MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., v. VUUREN, D. P., CARTER, T. R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G. A., MITCHELL, J. F., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S. J., STOUFFER, R. J., THOMSON, A. M., WEYANT, J. P. & WILBANKS, T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. – *Nature* **463**: 747–756.
- MÜHR, B., KUBISCH, S., MARX, A., STÖTZER, J., WISOTZKY, C., LATT, C., SIEGMANN, F., GLATTFELDER, M., MOHR, S. & KUNZ, M. (2018): Dürre & Hitzewelle Sommer 2018 (Deutschland. – Report No. 1, CEDIM Forensic Disaster Analysis Group (FDA), Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology; https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_Duerre_Hitzewelle_Deutschland_report_1_final_2.pdf, letzter Zugriff: 01.04.2020.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. Wissenschaftlicher Hintergrundbericht. – Hannover.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2021a): Niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels 2021. – Hannover; <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/178371>.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2021b): Niedersächsische Klimaschutzstrategie. – Hannover; https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/178369/Niedersaechsische_Klimaschutzstrategie_2021.pdf.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ (2024): Ursachen für das Hochwasser in Niedersachsen 2023/2024. – <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/aktuelles-hochwasser-in-niedersachsen-228435.html>; Stand: 16.01.2024, letzter Zugriff: 14.02.2024.
- NIKO – NIEDERSÄCHSISCHES KOMPETENZZENTRUM KLIMAWANDEL (2023): Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023. – Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 266 S.; <https://niko-klima.de/wp-content/uploads/2024/01/Klimafolgenmonitoringbericht-fuer-Niedersachsen-2023.pdf>.
- NIKO – NIEDERSÄCHSISCHES KOMPETENZZENTRUM KLIMAWANDEL (2024): Klimarückblick 2023. – Vortrag im Rahmen der Klimagespräche des NIKO, 06.02.2024; <https://niko-klima.de/wp-content/uploads/2024/02/Klimarueckblick2023.pdf>.
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2021): Das Juli-Hochwasser 2017 im südlichen Niedersachsen. – Stand: Juli 2021; <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/124949>.
- PARK WILLIAMS, A., COOK, E. R., SMERDON, J. E., COOK, B. I., ABATZOGLOU, J. T., BOLLES, K. and BAEK, S. H., BADGER, A. M. & LIVNEH B. (2020): Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. – *Science* **368**: 314–318, DOI: 10.1126/science.aaz9600.
- PFEIFFER, E.-M., ESCHENBACH, A. & MUNCH, J.-C. (2017): Boden. – In: BRASSEUR, G. P., JACOB, D. & SCHUCK-ZÖLLER, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven: 203–213; (Springer Spektrum).
- SCHERRER, S. C., HIRSCHI, M., SPIRIG C., MAURER, F. & KOTLARSKI, S. (2022): Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. – *Environmental Research Communications* **4**; DOI: 10.1088/2515-7620/ac4fb9.
- SCHICKHOFF, U. & ESCHENBACH, A. (2018): Terrestrische und semiterrestrische Ökosysteme. – In: STORCH, H. V., MEINKE, I. & CLAUSSEN, M. (Hrsg.): Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandlung und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland: 109–145; (Springer Spektrum).
- SENEVIRATNE, S. I., ZHANG, X., ADNAN, M., BADI, W., DEREZYNSKI, C., DI LUCA, A., GHOSH, S., ISKANDAR, I., KOSSIN, J., LEWIS, S., OTTO, F., PINTO, I., SATOH, M., VICENTE-SERRANO, S. M., WEHNER, M. & ZHOU, B. (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. – In: *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. LEITZEL, 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, pp. 1513–1766; DOI:10.1017/9781009157896.013.
- SUTMÖLLER, J., WAGNER, M., SCHELER, B. & MEESENBURG, H. (2019a): Der Bodenfeuchtezustand zu Beginn der Vegetationszeit 2019. – *AFZ-Der Wald* **15**/2019: 46–49.

- SUTMÖLLER, J., WAGNER, M., SCHELER, B., PAAR, U. & MEESENBURG, H. (2019b): Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 1. – AFZ-Der Wald **06/2019**: 42–46.
- TRADOWSKY, J. S., PHILIP, S. Y., KREIENKAMP, F., KEW, S. F., LORENZ, P., ARRIGHI, J., BETTMANN, T., CALUWAERTS, S., CHAN, S. C., DE CRUZ, L., DE VRIES, H., DEMUTH, N., FERRONE, A., FISCHER, E. M., FOWLER, H. J., GOERGEN, K., HEINRICH, D., HENRICH, Y., KASPAR, F., LENDERINK, G., NILSON, E., OTTO, F.E.L., RAGONE, F., SENEVIRATNE, S. I., SINGH, R. K., SKÅLEVÅG, A., TERMONIA, P., THALHEIMER, L., VAN AALST, M., VAN DEN BERGH, J., VAN DE VYVER, H., VANNITSEM, S., VAN OLDENBORGH, G. J., VAN SCHAEYBROECK, B., VAUTARD, R., VONK, D. & WANDERS, N. (2023): Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. – *Climatic Change* **176**: 90; <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2008): UBA-Workshop Böden im Klimawandel - Was tun? – UBA-Texte **25/08**; Dessau.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. – *Climate Change* **24/2015**; Dessau-Roßlau.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. – Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung; Dessau-Roßlau.
- UBER, M., HALLER, M., BRENDL, C., HILLEBRAND, G. & HOFFMANN, T. (2024): Past, present and future rainfall erosivity in central Europe based on convection-permitting climate simulations. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **28**: 87–102; <https://doi.org/10.5194/hess-28-87-2024>.
- WAGNER, M., SCHELER, B., SUTMÖLLER, J., DAMMANN, I., PAAR, U. & MEESENBURG, H. (2019): Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 2. – AFZ-Der Wald: **06/2019**: 47–50.
- WIDMER, T., BUG, J., ENGEL, N. & HARDERS, D. (2024): Bodenwasservorrat im Klimawandel. – *Geofakten* **46.5**; Hannover (LBEG) [in Vorbereitung].
- ZSCHEISCHLER, J. & FISCHER, E. M. (2020): The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany. – *Weather and Climate Extremes* **29**: 100270; <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100270>.

Impressum

Die Geofakten werden vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) herausgegeben und erscheinen unregelmäßig bei Bedarf.

Die bisher erschienenen Geofakten können unter <http://www.lbeg.niedersachsen.de> abgerufen werden.

© LBEG Hannover 2024

Version: 15.04.2024

DOI: 10.48476/geofakt_46_1_2024

Autorenschaft

- Nicole Engel, Tel.: 0511/643-3597
mail: Nicole.Engel@lbeg.niedersachsen.de
- Dr. Jan Bug, Tel.: 0511/ 643-3876
mail: Jan.Bug@lbeg.niedersachsen.de
- Dr. Robin Stadtmann, Tel.: 0511/ 643-3901
mail: Robin.Stadtmann@lbeg.niedersachsen.de
- Denise Harders, ehemals
Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie
Stilleweg 2, 30655 Hannover
Internet: <http://www.lbeg.niedersachsen.de>