The background of the page is a close-up photograph of dark brown soil that has cracked into several large, irregular sections. The cracks are deep and run in various directions, illustrating the effects of soil desiccation.

Auswirkungen des  
Klimawandels auf Böden  
in Niedersachsen







Landesamt für  
Bergbau, Energie und Geologie

## Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen

NICOLE ENGEL, UDO MÜLLER,  
ROBIN STADTMANN, DENISE HARDERS &  
HEINRICH HÖPER

Hannover 2020

## Impressum

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Stilleweg 2  
30655 Hannover  
Tel. (0511) 643-0  
Fax (0511) 643-2304

Version: 17.01.2022

Titelbild: Foto aus der Bilddatenbank des LBEG.



Bericht Klimawandel	S. 3 – 32	17 Abb.	1 Tab.	Anh.	Hannover 2020
---------------------	-----------	---------	--------	------	---------------

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Klimawandel in Niedersachsen .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Datenauswertung .....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt .....</b>	<b>8</b>
3.1.	Änderungen im Bodenwasserhaushalt, Konsequenzen für die Grundwasserneubildung, Zunahme der Hochwassergefahr.....	8
3.2.	Auswirkungen auf Nährstoffverfügbarkeit und Stoffausträge .....	12
3.3.	Auswirkungen extremer Witterungsverläufe .....	14
3.4.	Handlungsfeld Bodenwasserhaushalt.....	15
<b>4.</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffhaushalt und die Biodiversität 16</b>	
4.1.	Abnahme humusbildender Prozesse, Rückgang der organischen Bodensubstanz und verstärkte Freisetzung klimarelevanter Gase .....	16
4.2.	Veränderungen der Biodiversität .....	18
4.3.	Handlungsfeld Kohlenstoffhaushalt und Biodiversität.....	18
<b>5.</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels auf Erosion und Verdichtung .....</b>	<b>19</b>
5.1.	Erosion .....	19
5.2.	Verdichtung .....	22
5.3.	Handlungsfelder Erosion und Verdichtung .....	24
<b>6.</b>	<b>Auswirkungen des Klimawandels auf die natürlichen Bodenfunktionen und auf schutzwürdige Böden .....</b>	<b>24</b>
6.1.	Änderungen der natürlichen Bodenfunktionen und Auswirkungen auf die Schutzwürdigkeit von Böden .....	24
6.2.	Handlungsfeld Bodenfunktionen und schutzwürdige Böden .....	26
<b>7.</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>26</b>
<b>8.</b>	<b>Quellen .....</b>	<b>27</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>31</b>

# 1. Klimawandel in Niedersachsen

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). Die Hauptursache für diese derzeit beobachtete globale Erwärmung ist die Verstärkung des Treibhauseffektes durch menschliche Aktivitäten (IPCC 2018).

Auch Niedersachsen ist vom globalen Klimawandel betroffen. Seit Beginn der Wetteraufzeichnungen 1881 ist das Jahresmittel der Temperatur in Niedersachsen bereits um mehr als 1,5 °C gestiegen (DWD 2018a). 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. Doch auch in den anderen Teilen Niedersachsens wird sich der Klimawandel auswirken. Auf politischer Ebene wurde deshalb 2012 durch die REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ (MU 2012) eine Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels erarbeitet, welche auch den Bodenschutz beinhaltet und deren Umsetzungsstand dokumentiert wird (MU 2015).

Um die Klimawirkungen möglichst genau abbilden zu können, ist eine stetige Anpassung an den aktuellen Forschungsstand notwendig. Aufgrund von neuen Klimaszenarien, Weiterentwicklungen der Klimamodelle sowie überarbeiteter Methoden im Umgang mit den Klimaprojektionsdaten seit der ersten Auflage dieses Berichtes (ENGEL & MÜLLER 2009) war eine Überarbeitung erforderlich.

Grundlage für die in diesem aktualisierten Bericht verwendeten Klimaprojektionen sind Berechnungen mit Klimamodellen für ein ausgewähltes Klimaszenario (RCP8.5) des aktuellen

Sachstandsberichts (AR5) des IPCC<sup>1</sup>. In den Szenarien (representative concentration pathways (RCP) wie RCP8.5<sup>2</sup>) werden unterschiedliche Entwicklungen der Bevölkerung, der Wirtschaft, der Technologie, des Umweltbewusstseins sowie insbesondere die aus diesen Entwicklungen resultierenden Strahlungsantriebe zugrunde gelegt (vgl. IPCC 2014, Moss et al. 2010).

Für Niedersachsen wurde 2019 durch das Klimakompetenznetzwerk unter Beteiligung des LBEG eine Klimawirkungsstudie erstellt, in denen die Handlungsfelder Boden, Grundwasser (LBEG) und Oberflächengewässer (NLWKN) bearbeitet wurden. Das Ziel war insbesondere, Regionen und Sektoren zu identifizieren, die in Niedersachsen besonders durch den Klimawandel betroffen sind und besonderen Anpassungsbedarf aufweisen. Die Berechnungen erfolgten nach heutigem Stand der Forschung mit einem Multi-Modell-Ensemble, welches aus einer Gruppe aus Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen gebildet wurde (global z. B. MPI-ESM-LR, regional z. B. CCLM, zum Aufbau des Ensembles s. MU 2019a). Die Ergebnisse beruhen auf dem RCP8.5-Szenario. Als bodenkundliche Datengrundlage wurde die 2017 neu veröffentlichte Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50) verwendet. Ausgewählte Ergebnisse der Studie finden sich in diesem Bericht wieder. Dabei werden jeweils die Ergebnisse für den Mittelwert des Ensembles dargestellt.

Zudem wurde 2018 unter Mitwirkung des LBEG der Klimareport Niedersachsen durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) und das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU) fertiggestellt. Unter Einbeziehung dieser Erkenntnisse und Erwartungen sowie aktueller Literatur wurde dieser Bericht überarbeitet.

Nach DWD (2018a) wird für Niedersachsen bis 2100 eine Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur von 3,5°C unter dem sogenannten Weiter-wie-bisher-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 deutlich geringer ausfällt. Die Veränderungen werden dabei in

<sup>1</sup> IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, in Deutschland auch als „Weltklimarat“ bezeichnet.

<sup>2</sup> RCP8.5-Szenario: IPCC-Klimaszenario, das den kontinuierlichen Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen beschreibt. Zum Ende des 21. Jahrhunderts

resultiert daraus ein zusätzlicher Strahlungsantrieb von 8,5 W/m<sup>2</sup> im Vergleich zum vorindustriellen Niveau. Szenario mit dem stärksten Einfluss von anthropogen bedingten Treibhausgasen in der Zukunft, auch „Weiter-wie-bisher-Szenario“ genannt.

Abhängigkeit von Höhe, Entfernung zum Meer und Exposition regional unterschiedlich stark ausfallen. Damit einhergehen wird eine weitere Zunahme von Sommertagen ( $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ ) und Heißen Tagen ( $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ ), wohingegen die Eis- und Frosttage abnehmen werden.

Neben einer Änderung der Temperatur wird auch eine Veränderung der Niederschlagsverhältnisse erwartet. Die folgenden Abbildungen 1 und 2 zeigen die aktuellen Ergebnisse zur Änderung der Niederschlagsituation in Niedersachsen im Sommer- und Winterhalbjahr.

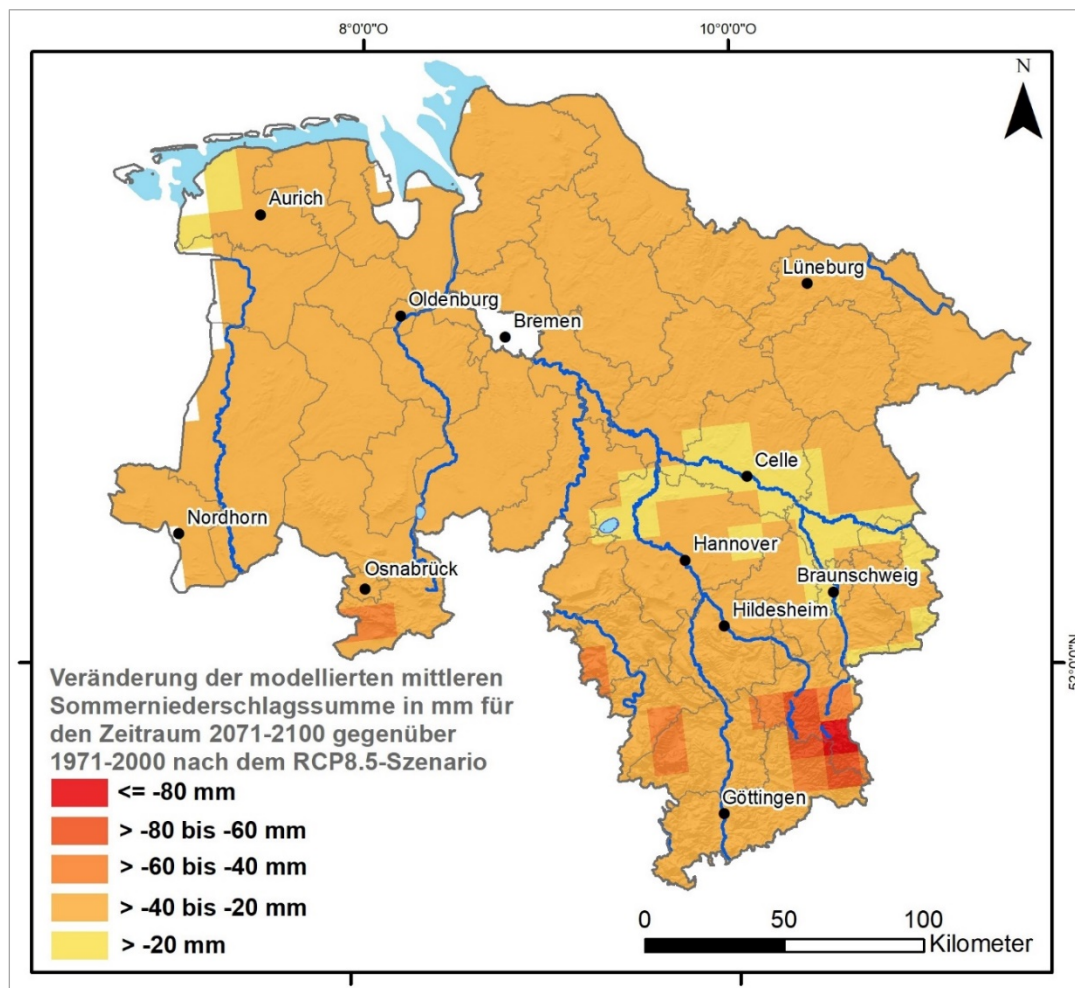


Abb. 1: Differenz der mittleren Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr (01. April bis 30. September) zwischen dem Zeitraum 2071–2100 und dem Referenzzeitraum 1971–2000 (mittlere Tendenz des Multi-Modell-Ensembles des LBEG, basierend auf dem RCP8.5-Szenario, vgl. MU 2019a). Die Bandbreite der Ensembleergebnisse kann für die einzelnen Kacheln auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.

Langfristig wird eine geringe Zunahme (+8 %) der mittleren Jahresniederschlagssummen erwartet. Deutlichere Änderungen werden vor allem für die innerjährliche Verteilung der Niederschlagsmengen projiziert (DWD 2018a).

Während für die Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr (v. a. in Winter und Frühjahr) im Laufe des 21. Jahrhunderts eine Zunahme angenommen wird, ist von einer Abnahme der Niederschlagsmengen in den Sommermonaten auszugehen (s. Abb. 1 und Abb. 2).

Im Sommerhalbjahr nehmen die Niederschlagsmengen ausgehend von dem Referenzzeitraum 1971–2000 bis zur „fernen Zukunft“ (2071–2100) für ganz Niedersachsen um bis zu 12 % ab (RCP8.5-Szenario). Die Abbildung 1 verdeutlicht, dass weite Teile Niedersachsens von Abnahmen zwischen 20 und 40 mm betroffen sein können. Geringer fallen diese Veränderungen im äußersten Nordwesten des Landes sowie in Teilen der südlichen Geest bzw. der Flusslandschaften (Allertal) aus. Die höchsten Abnahmen treten im Harz sowie in Teilen des Berglandes auf. Im Winter (+24 %) und Frühjahr (+12 %) werden für ganz Niedersachsen steigende Niederschlagssummen erwartet. Dieser Trend zeigt sich auch im Klimaschutz-Szenario (RCP2.6), wenngleich weniger ausgeprägt

(DWD 2018a). Die größten Zunahmen im Winterhalbjahr liegen im Bereich der Küste. Geringer fallen sie im Bergvorland und in den nördlichen Ausläufern des niedersächsischen Berglandes aus (s. Abb. 2). Der Trend zunehmender Niederschlagsmengen in Frühjahr und Winter konnte in Niedersachsen in der Vergangenheit bereits gemessen werden (DWD 2018a).

Zusätzlich wird von einer Zunahme von Starkniederschlagsereignissen und länger anhaltenden Niederschlagsereignissen mit großen Wassermengen (letzteres vor allem im Winter) ausgegangen. Seit 1951 konnte bereits eine geringfügige Zunahme von Starkregenereignissen beobachtet werden (DWD 2018a).

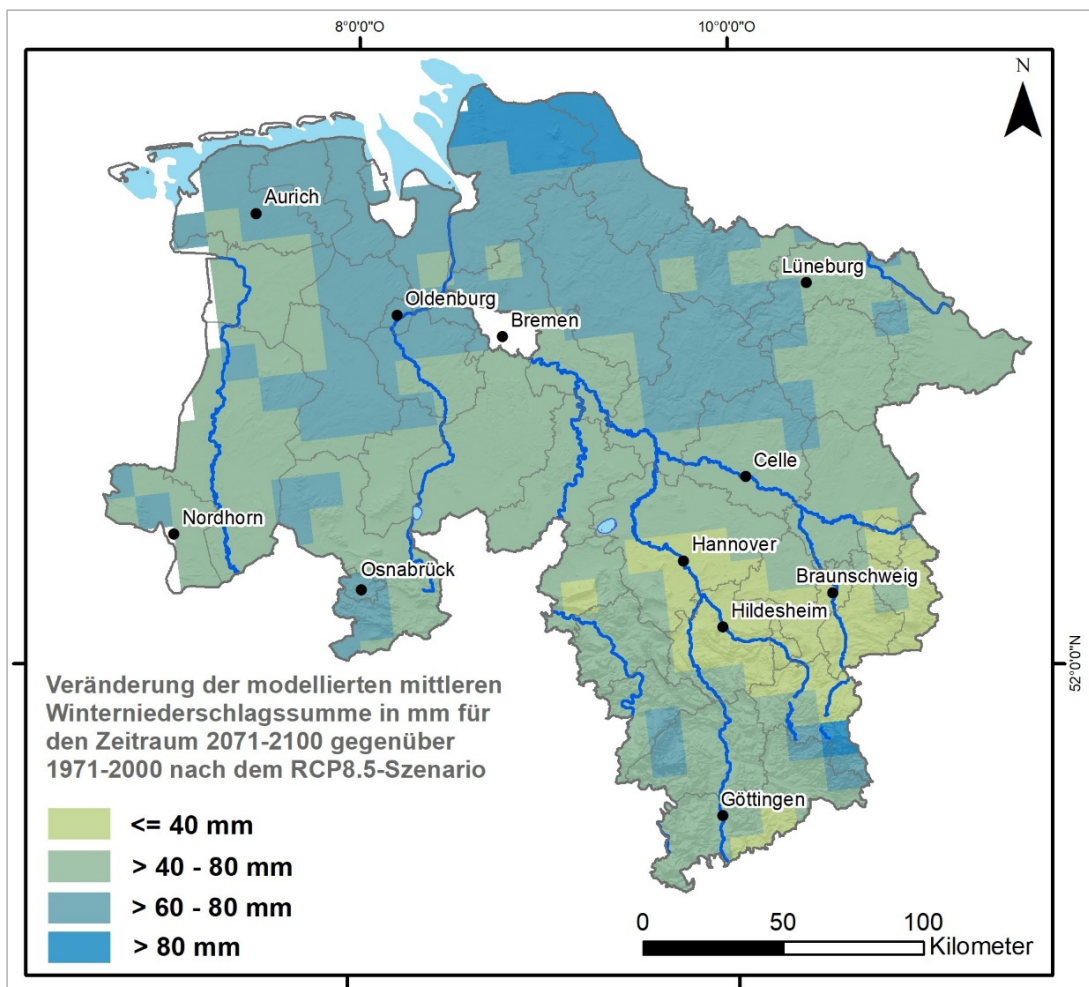


Abb. 2: Differenz der mittleren Niederschlagssummen im Winterhalbjahr (01. Oktober bis 31. März) zwischen dem Zeitraum 2071–2100 und der Referenzzeitraum 1971–2000 (mittlere Tendenz des Multi-Modell-Ensembles des LBEG, basierend auf dem RCP8.5-Szenario, vgl. MU 2019a). Die Bandbreite der Ensembleergebnisse kann für die einzelnen Kacheln auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.



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 bei der Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten in Folge 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 Wasserflächen (Evaporation) und Pflanzen. Trockenheit kann – bei ausgeschöpften Bodenwasservorräten – allerdings auch verdunstungshemmend wirken.

Der Boden, als zentrale Schnittstelle landschaftlicher Ökosysteme, erfüllt wichtige und zum Teil äußerst komplexe Funktionen für Mensch und Umwelt. Das Klima beeinflusst die im Boden ablaufenden Stoffumsetzungs- und Verlagerungsprozesse und die natürlichen Bodenfunktionen. Die erwarteten Klimaänderungen wirken sich auf den Wasserhaushalt, den Stofftransport, Bodenorganismen und damit auch auf den Stoffumsatz in Böden aus. Als Folge können wesentliche natürliche Bodenfunktionen beeinträchtigt werden. Die Abbildung 3 zeigt die Systemkomponenten und Gefährdungen von Böden, die in diesem Bericht den Schwerpunkt bilden. Im Anhang des Berichts werden die Zusammenhänge und Kenntnisse tabellarisch aufgeführt.

Es sind räumlich und zeitlich unterschiedliche Ausprägungen der Folgen des Klimawandels zu erwarten. Vor diesem Hintergrund ist eine regionale Betrachtung und standortdifferenzierte Bewertung der Folgen von Klimawirkungen für die Böden erforderlich. Aufgrund der Vielzahl der Faktoren, welche die Bodenfunktionen bestimmen, können die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden und ihre Funktionen derzeit bislang meist nur qualitativ, aber nicht oder nur bedingt quantitativ beschrieben werden.



Abb. 3: Im Weiteren betrachtete Systemkomponenten und Gefährdungen des Bodens. Starke Wechselwirkungen führen zu gegenseitiger Beeinflussung. Die Pfeile können sowohl positive als auch negative Wirkungen bedeuten.

Während sich z. B. Bodenwasserhaushaltsparameter über verhältnismäßig kurze Zeiträume ändern, können Veränderungen wie der Gehalt an organischer Substanz oder die Kationenaustauschkapazität auch langfristig die natürliche Bodenfruchtbarkeit beeinflussen (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Zeitliche Dimensionen der möglichen Änderung von Bodenparametern durch den Klimawandel in Deutschland/Niedersachsen (verändert, nach KARMAKAR et al. 2016 und PFEIFFER et al. 2017).

Zeitskala (Jahre)	Bodeneigenschaften und Kennwerte (Beispiele)
< 0,1	Temperatur, Bodenfeuchte, Trockenrohdichte, Infiltrationsrate, Zusammensetzung der Bodenluft, Nitratgehalt etc.
0,1 – 1	pH-Wert, Zusammensetzung der Bodenlösung, Mikrobiota
1 – 10	austauschbare Kationen, Gefügeeigenschaften, Mesofauna
10 – 100	Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, Wasserleitfähigkeit, Kationenaustauschkapazität, spezifische Oberflächen, Zusammensetzung von im Boden gebildeten Tonmineralen, Gehalt an organischer Substanz
100 – 1000	primäre Mineralzusammensetzung, chemische Zusammensetzung der Mineralkomponenten
> 1000	Textur, Körnungsverteilung

## 2. Datenauswertung

Die nachfolgenden Auswertungen wurden auf Grundlage der im Niedersächsischen Bodeninformationssystem NIBIS® vorliegenden Daten durchgeführt ([www.lbeg.niedersachsen.de](http://www.lbeg.niedersachsen.de)). Im NIBIS® sind Informationen zur räumlichen Verbreitung von Böden in verschiedenen Maßstabsebenen, Labordaten und Daten zur Bodendauerbeobachtung (BDF) abgelegt (HEINEKE et al. 2002). Für die Bewertung von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen wurde eine umfangreiche Methodenbank aufgebaut (BUG et al. 2020), auf deren Grundlage die nachfolgenden Auswertungen vorgenommen wurden. Neben den bodenkundlichen Daten werden Informationen zur Landnutzung, zum Relief und zum Klima vorgehalten.

Als Klimaprojektionen wurden Modelldaten aus dem Projekt EURO-CORDEX (JACOB et al. 2014) sowie dem Projekt ReKliEs-De (REKLIES-DE 2018) als Ensemble-Auswertung in das NIBIS® integriert (s. hierzu auch MU 2019a).

## 3. Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt

### 3.1. Änderungen im Bodenwasserhaushalt, Konsequenzen für die Grundwasserneubildung, Zunahme der Hochwassergefahr

Durch die klimawandelbedingte saisonale Verlagerung der Niederschlagsmenge (Zunahme der Niederschläge im Winter, Rückgang der Niederschläge im Sommer) bei gleichzeitigem Temperaturanstieg wird durch die resultierende höhere Verdunstung eine abnehmende klimatische Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode erwartet (DWD 2018a). Damit geht eine stärkere Ausnutzung der Bodenwasservorräte im Sommer einher.



Abb. 4: Beregnung von Kartoffeln in Niedersachsen (Foto: Bilddatenbank des LBEG).

Zudem wird eine Zunahme der Häufigkeit von Trockenperioden und deren Dauer erwartet. Als Folge steigen die Gefahr von Trockenstress für die Vegetation (auch für Wälder) und die Gefahr von Ertragseinbußen für die Landwirtschaft. Insgesamt ist mit einer Zunahme des Ertragsrisikos zu rechnen.

Eine Verlängerung der Vegetationszeit, höhere Temperatursummen und gleichzeitig eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ermöglichen aber zugleich auch höhere Biomasserträge und andere Fruchtfolgen. Ein Zweitanbau kann auch in bisher ungünstigen Lagen möglich werden, allerdings nur, wenn eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet ist. Dies wird jedoch im Zuge des Klimawandels zunehmend zur Herausforderung werden.

Die Abbildung 5 zeigt die projizierte Veränderung der klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (KWBv) für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Die Abbildung 5 zeigt deutlich, dass die KWBv in ganz Niedersachsen abnimmt. Für weite Teile des Landes bewegt sich die Abnahme im Sommerhalbjahr zwischen 100 und 125 mm. Die größten Veränderungen zeigen sich im Harz, wo Abnahmen über 200 mm erreicht werden können. Im Bereich der Küste fällt diese Veränderung mit Abnahmen unter 100 mm lokal geringer aus. Hier wird auch die für Niedersachsen geringste Abnahme von 88 mm erwartet.

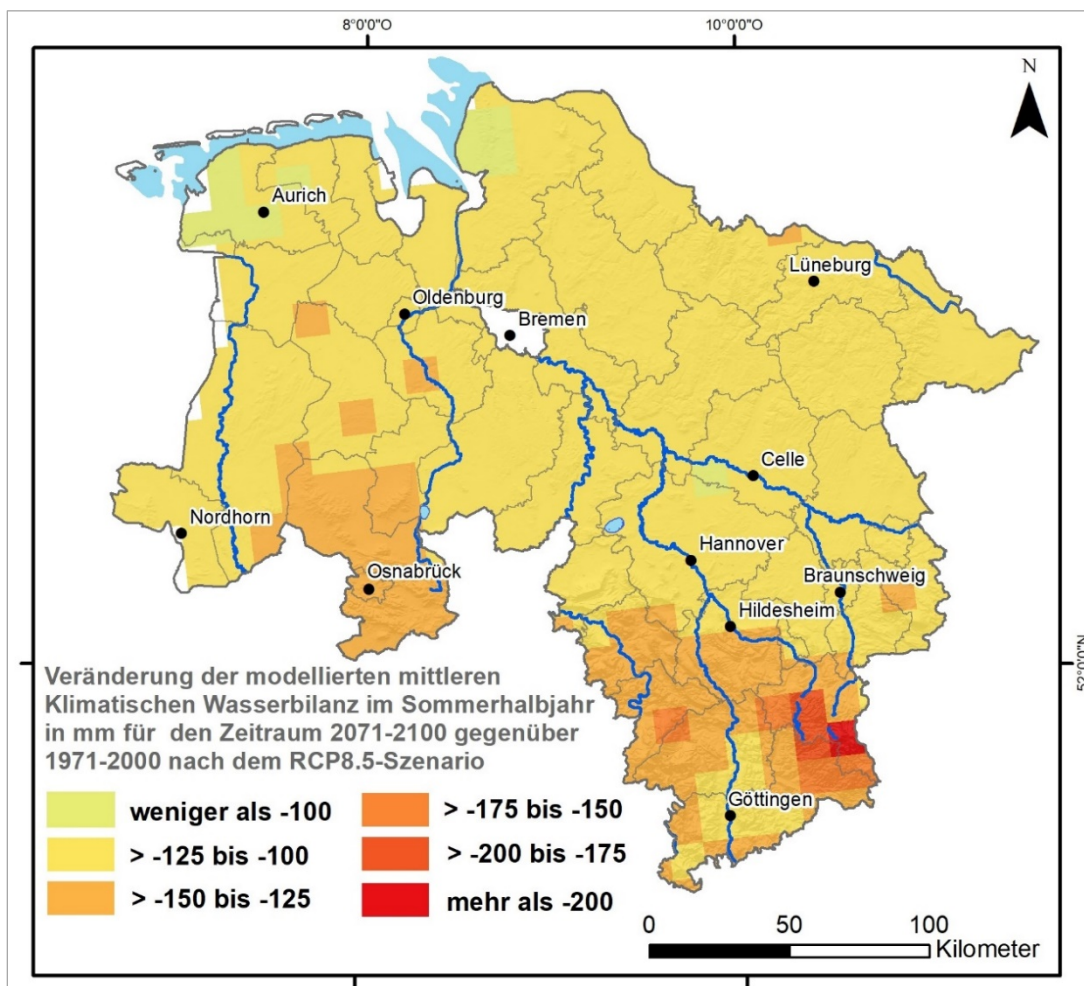


Abb. 5: Abnahme der klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (01. April bis 30. September) im Zeitraum 2071–2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 (mittlere Tendenz des Multi-Modell-Ensembles des LBEG, basierend auf dem RCP8.5-Szenario, vgl. MU 2019a). Die klimatische Wasserbilanz und deren Bandbreite kann für die Zeiträume auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.



Aufgrund der projizierten Abnahme der KWBv ist zu erwarten, dass sowohl die beregnungsbedürftige Fläche als auch die notwendige Beregnungswassermenge pro Beregnungsfläche zu nehmen. Die Abbildung 6 gibt, basierend auf der BK 50, einen Überblick, für welche Flächen eine Zunahme der mittleren potenziellen Beregnungswassermenge in der Vegetationsperiode im Zeitraum 2071–2100 (im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000) zu erwarten ist. Den

größten Flächenanteil nehmen die Klassen mit >10 bis 20 und >20 bis 30 mm Zunahme ein. Der Berechnung liegen die aus den Klimaprojektionsdaten ermittelte durchschnittliche klimatische Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (KWBv, s. Abb. 5) und die aus Bodenkennwerten abgeleitete Speicherfähigkeit für pflanzenverfügbares Bodenwasser zugrunde.

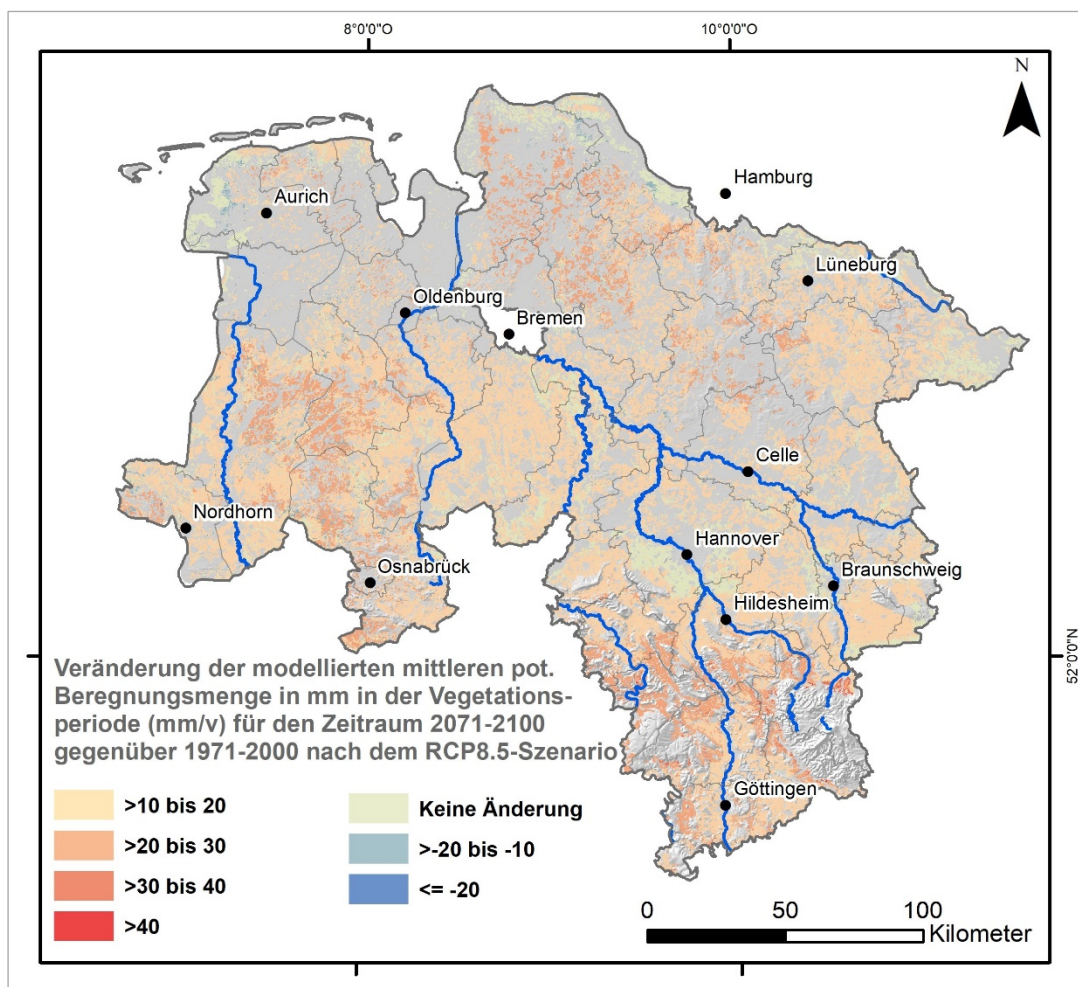


Abb. 6: Mittlere Änderung des Zusatzwasserbedarfs (Mittlere Tendenz des LBEG-Ensembles, vgl. MU 2019a) in der Vegetationsperiode (RCP8.5-Szenario), basierend auf der Berechnung der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit für Ackerflächen. Die Berechnung erfolgte mit der Methodenbank des NIBIS® (vgl. BUG et al. 2020) im Rahmen der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019a). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK 50). Die Bandbreite der Ensembleergebnisse kann auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.



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 Zweit- anbau, 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.

Aufgrund der projizierten Zunahme der Winterniederschläge zeigen die Ergebnisse der Klimawirkungsstudie (MU 2019a) im Winterhalbjahr für weite Teile Niedersachsens eine Zunahme der Grundwasserneubildungsrate bis zu 50 mm/a (Mittlere Tendenz des LBEG-Ensembles) bis zum Ende des Jahrhunderts.

Bei Betrachtung der Ergebnisse zur Grundwasserneubildung im Gesamtjahr (Abb. 7) lässt sich für ganz Niedersachsen allerdings kein eindeutiger Trend feststellen. Die gegenwärtige Situation ist dadurch gekennzeichnet, dass küstennahe Marschen, Flussniederungen und Gebiete weit im Osten Niedersachsens durch geringe Grundwasserneubildungsraten oder Grundwasserzehrung gekennzeichnet sind. Große Teile der Geest, Bereiche des Berg- und Hügellandes sowie besonders ausgeprägt der Harz zeigen hohe jährliche Grundwasserneubildungsraten. Die Klimaänderungssignale deuten darauf hin, dass Gebiete mit bereits im Referenzzeitraum (1971–2000) niedriger Grundwasserneubildung oder -zehrung zukünftig durch Abnahmen gekennzeichnet sind und Gebiete mit höherer Grundwasserneubildung eine geringe Zunahme erfahren (MU 2019a).

Aufgrund der projizierten Veränderung der Niederschlagsverhältnisse (Zunahme der Winterniederschläge, Zunahme von lang andauernden Niederschlagsereignissen mit großen Regemengen im Winter, Zunahme der Starkregenergebnisse im Sommer) ist ein verstärkter Oberflächenabfluss zu erwarten. Eine zunehmende Bodenerosionsgefährdung durch Wasser mit den bekannten On- und Offsite-Schäden (s. dazu auch Kap. 5) und eine Zunahme von Hochwasserereignissen sind daraus resultierende Folgen.

Die Ergebnisse der Klimawirkungsstudie (MU 2019a, Beitrag des NLWKN) zeigen für Berg- und Hügelland, das Flachland und auch die Küste insgesamt eine Zunahme der Häufigkeiten von Hochwasserereignissen. Im Harz lässt sich hingegen keine eindeutige Zunahme feststellen. Auch zeigen die Ergebnisse zunehmende, durch Dauer- und Starkregen beeinflusste, Hochwasserscheitel-Abflusshöhen. In allen Regionen außerhalb des Harzes wird hier von einer erheblichen Verschärfung der Hochwassersituation ausgegangen (MU 2019a). Der Wasserrückhalt der Böden im Einzugsgebiet kann bei der Minderung dieser Effekte eine zentrale Rolle spielen.

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 (s. Kap. 5) erhöht werden.

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

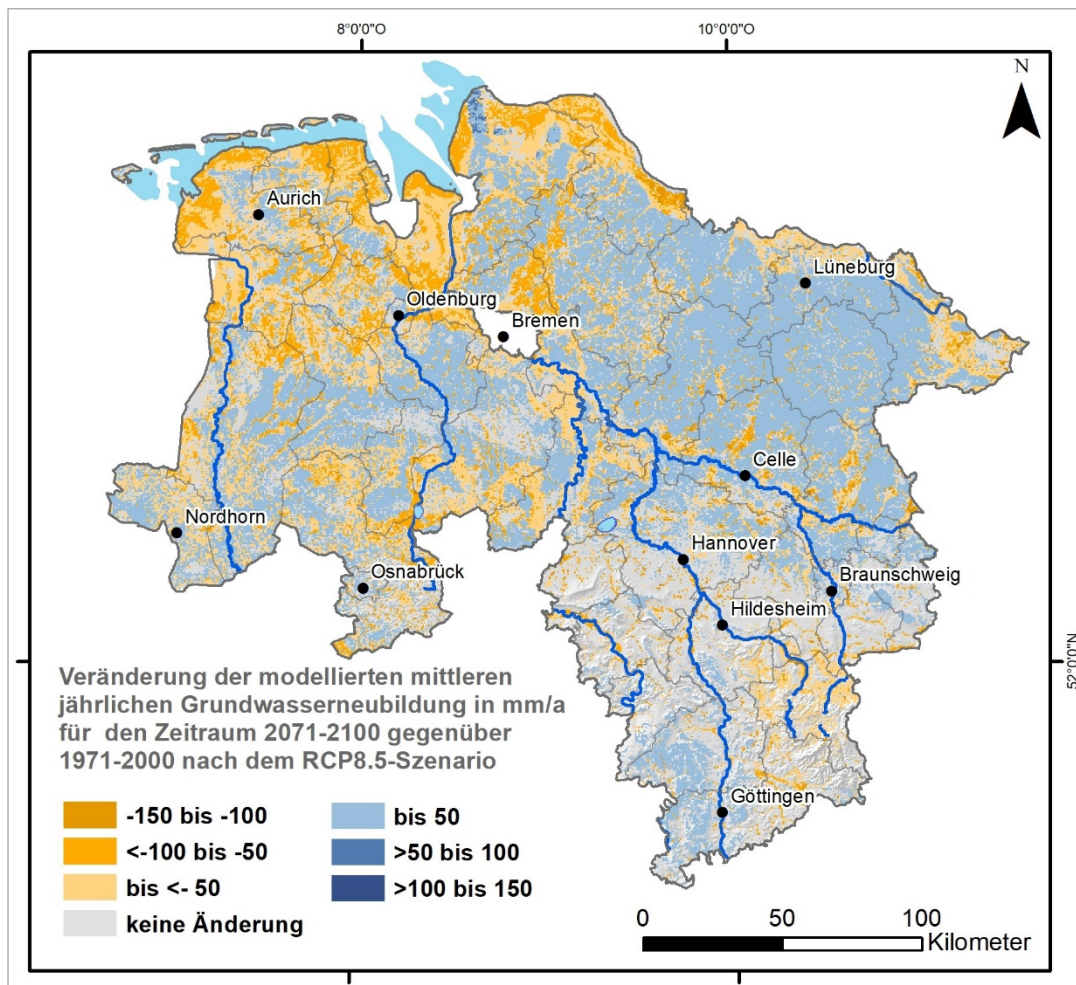


Abb. 7: Änderung der Grundwasserneubildungsrate im Gesamtjahr in dem Zeitraum 2071–2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 (Mittlere Tendenz des LBEG-Ensembles (RCP8.5-Szenario), vgl. MU 2019a). Die Berechnung erfolgte mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 (ERTL et al. 2019) im Rahmen der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019a). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BUEK 50). Die Bandbreite der Ensembleergebnisse kann auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.

### 3.2. Auswirkungen auf Nährstoffverfügbarkeit und Stoffausträge

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 Düngernährstoffen zur Pflanzenwurzel und die Aufnahme zahlreicher Pflanzen-nährstoffe 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 Wintertemperaturen die Mineralisation im Boden zunehmen, was zu einer weiteren Verstärkung der Auswaschungsproblematik führt.

Die Abbildung 8 zeigt die mittlere Veränderung des Verlagerungsrisikos für nicht sorbierbare Stoffe (Austauschhäufigkeit) unter den projizierten klimatischen Bedingungen für den Zeitraum 2071–2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 (RCP8.5-Szenario). Das Ergebnis berücksichtigt keine bodenchemischen oder -biologischen Prozessveränderungen, sondern zeigt eine auf der Wasserspeicherkapazität und

der Sickerwassermenge basierende Austauschhäufigkeit der Bodenlösung und darin enthaltener Stoffe pro Jahr (BUG et al. 2020).

Es treten sowohl Bereiche mit höherem als auch Bereiche mit verringertem Verlagerungsrisiko auf, die regional unterschiedlich verteilt sind. In den überwiegenden Landesteilen zeigen die Ergebnisse keine Veränderung. Zunehmende Austauschhäufigkeiten des Bodenwassers zeigen insbesondere die sandigen Böden der Geest, welche nur geringe Wasserspeicherkapazitäten aufweisen.

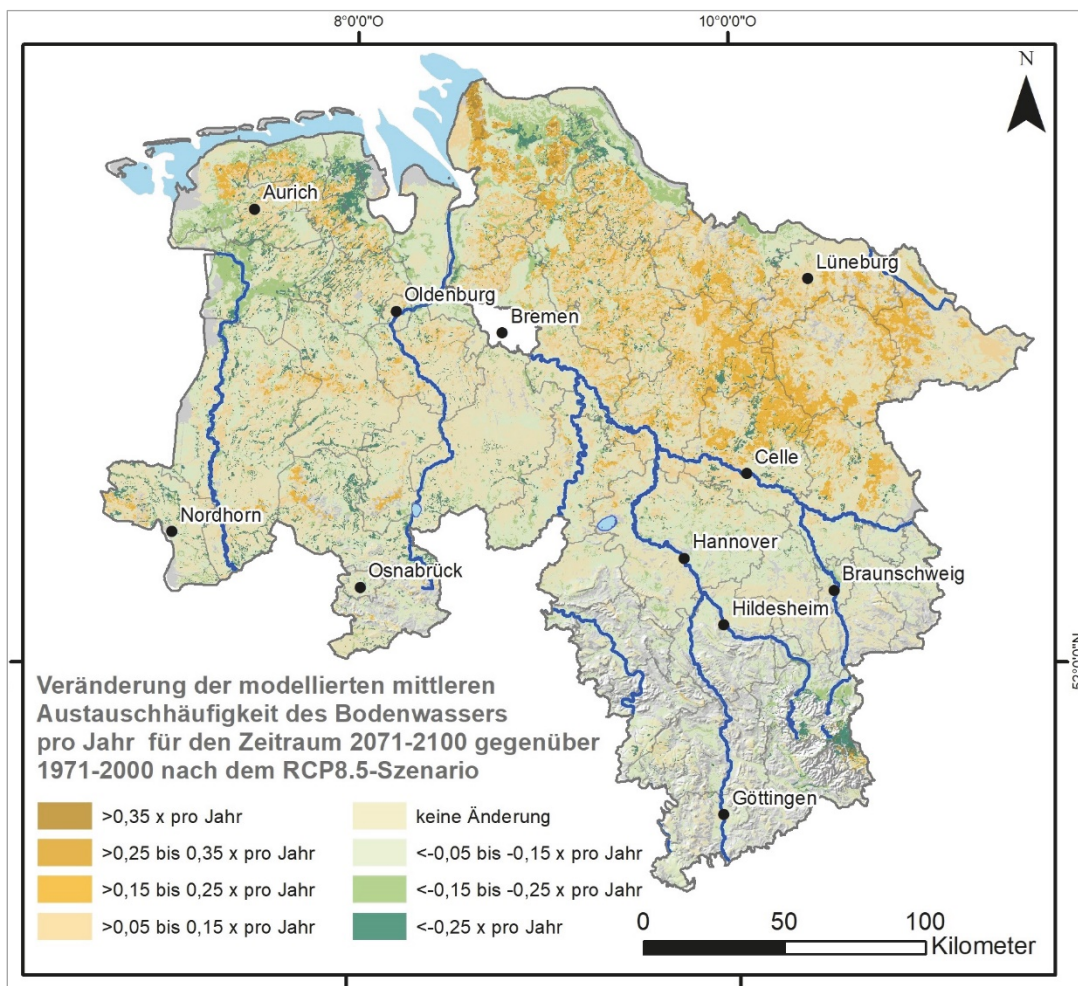


Abb. 8: Veränderung des standörtlichen Verlagerungsrisikos vom Zeitraum 2071–2100 (RCP8.5-Szenario, Mittlere Tendenz des LBEG-Ensembles, vgl. MU 2019a) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971–2000). Die Berechnung erfolgte mit der Methodenbank des NIBIS® im Rahmen der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019a). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK 50). Die Bandbreite der Ensembleergebnisse kann auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) abgerufen werden.

### 3.3. Auswirkungen extremer Witterungsverläufe

In den Jahren 2018 und 2019 war Niedersachsen, neben anderen Teilen Deutschlands, durch außergewöhnliche Trockenperioden geprägt. Ein hauptsächlicher 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).

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). Allerdings können, basierend auf den sehr trockenen Verhältnissen in Niedersachsen in den Jahren 2018 und 2019, aber auch vorausgegangenen Trockenphasen (z. B. 2003, vgl. MEINKE et al. 2013), Erkenntnisse über die Auswirkungen dieser Phasen auf den Bodenwasserhaushalt zusammengeführt und Hinweise für mögliche Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden.

In Niedersachsen fielen im Sommer 2018 mit 100 l/m<sup>2</sup> nur 46 % der langjährig durchschnittlichen Niederschlagsmenge (219 l/m<sup>2</sup>, DWD 2018b). Da die Vegetation unter erheblichem Trockenstress stand, wurden die Bodenwasservorräte während dieser Zeit vielerorts sehr stark ausgeschöpft, sodass auch tieferen Bereichen der Böden Wasser entzogen wurde. 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).

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 der Nichtvegetationszeit, 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 landwirtschaftlich 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 in dem ersten Trockenjahr deutliche Auswirkungen zeigen, können Böden mit hohen Wasserspeicherkapazitäten dieses Defizit ggf. noch kompensieren. Gleichzeitig erfolgt eine tiefgründige Ausschöpfung der Wasserspeicherkapazitäten dieser Standorte, welche nur durch sehr ergiebige Niederschläge wieder vollständig aufgefüllt werden können. Erfolgt 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. Die Ereignisse erhöhen insbesondere das Risiko für Bodenerosion durch Wasser und auch Bodenverdichtung (vgl. Kap. 5).

#### **Folgen der Veränderungen des Bodenwasserhaushalts**

- 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).
- Zunahme der Mineralisation durch höhere Temperaturen im Herbst/Winter oder Abnahme durch Wasserüberschuss im Winter.

### **3.4. Handlungsfeld Bodenwasserhaushalt**

Um Maßnahmen gezielt einsetzen zu können, müssen die durch den Klimawandel potenziell besonders betroffenen Gebiete zunächst identifiziert und hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bewertet werden.

Einer möglichen Zunahme des Oberflächenabflusses mit gesteigerter Hochwasser- und Erosionsgefährdung kann von der Bodenbewirtschaftungsseite her mit verstärkten Erosionsschutzmaßnahmen zur Verringerung von Bodenabtrag bei Starkregen- und Dauerregenereignissen, wie z. B. Mulchsaat und ganzjähriger Bodenbedeckung sowie konservierender Bodenbearbeitung, begegnet werden. Zudem kann durch eine Verringerung von Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung das Retentionsvermögen der Böden in einem Einzugsgebiet erhalten werden, um die Auswirkungen von Hochwasserereignissen möglichst gering zu halten.

In der Landwirtschaft sind außerdem verschiedene Maßnahmen zur Verringerung der Ertragsunsicherheit und Verminderung von Nährstoffüberhängen erforderlich, wie beispielsweise gezielte und standortabhängige Beregnung in Trockenzeiten, Anpassung der Düngestrategie (in Kombination mit Beregnung) und Anpassung der Fruchtfolgen mit wärmeliebenderen und trockenheitsresistenteren Arten und Sorten, die sich durch einen geringeren Wasserbedarf auszeichnen. Auch ein Humusmanagement, das die Aspekte der Bodenfruchtbarkeit, des Boden- und Klimaschutzes, aber auch des Grundwasserschutzes berücksichtigt, und die Förderung einer tiefen Durchwurzelung des Bodens können Anpassungsmaßnahmen darstellen. Letztere kann auch durch die Vermeidung von Bodenverdichtung (Kap. 5.2) gefördert werden. Gleichzeitig ist aufgrund der zu erwartenden Nutzungskonflikte, besonders bei der Grundwassernutzung, eine Anpassung des Wassermanagements mit ressourcenschonender Nutzung erforderlich. Für die Beregnung in

Nordost-Niedersachsen stellen die Wasserkontingente aus wasserrechtlichen Erlaubnissen teilweise bereits begrenzende Faktoren hinsichtlich der Erhöhung der Bewässerungsmengen dar (UBA 2019). Anpassungsmöglichkeiten liegen, neben den oben genannten Bodenbearbeitungs- und Bewirtschaftungsaspekten, also auch im technischen Bereich, z. B. über Beregnungssteuerung und neue Beregnungstechnik (UBA 2019) oder den Rückhalt von Wasser in Reservoirs in Zeiten mit Wasserüberschuss.

Anpassungen werden auch in der Forstwirtschaft hinsichtlich Vegetation und Bewirtschaftung erfolgen müssen. Hier wäre insbesondere der Einsatz standortangepasster, toleranter und resistenter Baumarten zu nennen, um die Betroffenheit durch Trockenschäden und Schädlingsbefall zu senken (BMEL 2017).

## 4. Auswirkungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffhaushalt und die Biodiversität

### 4.1. Abnahme humusbildender Prozesse, Rückgang der organischen Bodensubstanz und verstärkte Freisetzung klimarelevanter Gase

Auch die Humusspeicherung im Boden wird maßgeblich vom Klima beeinflusst. Gleichzeitig spielen Böden selbst eine essenzielle Rolle im Klimageschehen. Sie sind ein wichtiger Bestandteil im globalen Kohlenstoffzyklus. Global gesehen speichern allein schon die Böden außerhalb von Permafrost- und Feuchtgebieten die bis zu vierfache Kohlenstoffmenge der Atmosphäre (CIAIS et al. 2013; Abb. 9).

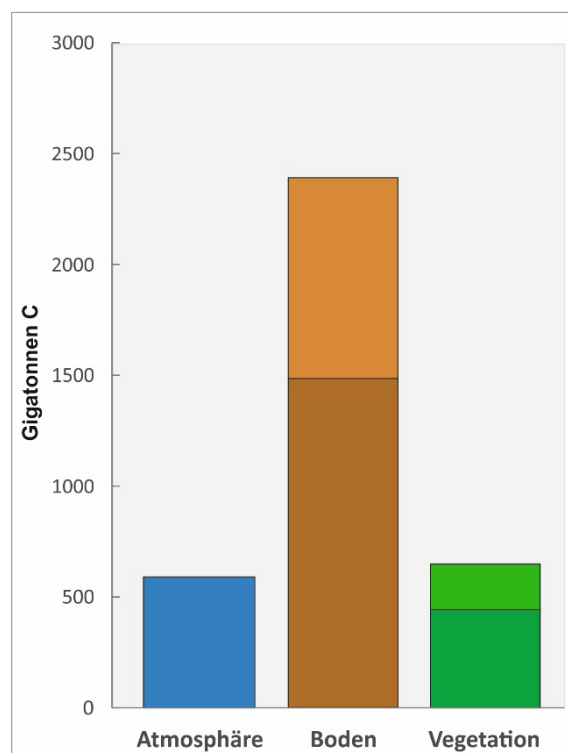


Abb. 9: Ausgewählte Kohlenstoffreservoirs im globalen Kohlenstoffkreislauf nach CIAIS et al. (2013). Farbliche Unterschiede in den Säulen grenzen minimale und maximale Angaben ab.

Böden stellen den drittgrößten Kohlenstoffvorrat der Erde dar (DENMAN et al. 2007), wovon etwa 15–30 % auf die Moore entfallen. Sie sind deshalb von großer Bedeutung bei der Regulierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Niedersächsische Moore enthalten auf weniger als 10 % der Landesfläche mehr als 50 % der Bodenkohlenstoffvorräte des Landes.

Die organische Substanz im Boden ist außerdem von grundlegender Bedeutung für die Fruchtbarkeit der Böden, für ihr Wasserspeichervermögen und für die Erhaltung der biologischen Vielfalt. Ein Rückgang der organischen Substanz in Böden hat folglich nicht nur Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf, sondern auch auf Nähr- und Wasserkreisläufe sowie die (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 (Abb. 10). Humusabbau und CO<sub>2</sub>-Freisetzung sind die Folge. Gleiche Effekte werden dadurch bewirkt, dass sich aufgrund der projizierten Sommertrockenheit mehr Grünlandstandorte für eine Ackernutzung eignen und umgebrochen werden können. Derzeit wirken

allerdings die Cross-Compliance-Regeln der EU-Agrarpolitik einem verstärkten Grünlandumbruch entgegen. 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.

Ein wesentliches klimarelevantes Gas ist Lachgas (N<sub>2</sub>O). Eine Tonne Lachgas entspricht der klimaschädlichen Wirkung von über 300 Tonnen Kohlendioxid. Lachgas entsteht vor allem bei Prozessen in Böden (Denitrifikation) unter bestimmten Standortbedingungen (Staunässe, hohe Gehalte an organischer Substanz, hohe NO<sub>3</sub>-Gehalte). Diese Lachgasemissionen aus dem Boden machen ca. 50 % aller landwirtschaftlichen Treibhausgase aus (UBA 2009). Da Lachgas unter bestimmten Standortbedingungen entsteht, ist die Kenntnis über diese Standorte, insbesondere Niederungsböden, für Nutzungsempfehlungen von Bedeutung.

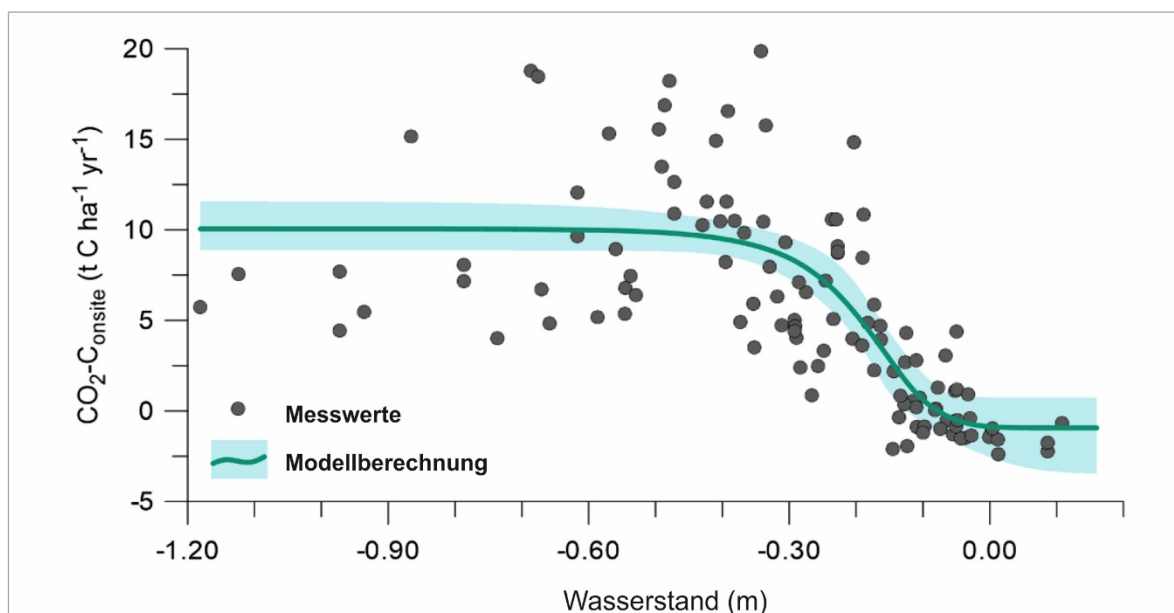


Abb. 10: Zusammenhang zwischen mittlerem Grundwasserstand und jährlicher CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus organischen Böden, v. a. Hoch- und Niedermoore, Messwerte (Kreise) und Modellwerte (Gompertzmodell (verändert, aus TIEMEYER et al. 2020)).

## 4.2. Veränderungen der Biodiversität

Der Boden ist Lebensraum für Pflanzen und tierische Lebewesen.

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 (Pedogenese). 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 Bodenbiodiversität 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.

### Folgen für den Kohlenstoffhaushalt und die Biodiversität

- verstärkte Entwässerung v. a. hydromorpher Böden (Moore, Marschen und Gleye):
  - Humusabbau durch verstärkte Humusmineralisation,
  - Humusverlust durch Grünlandumbruch,
  - CO<sub>2</sub>-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 Bodenbiodiversität.

## 4.3. Handlungsfeld Kohlenstoffhaushalt und Biodiversität

Die durch den Klimawandel potenziell betroffenen Standorte müssen zunächst identifiziert und hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bewertet werden, um Maßnahmen gezielt einsetzen zu können.

In erster Linie führen Meliorationsmaßnahmen (Entwässerung), vor allem von Hoch- und Niedermooren, zu Humusabbau und CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Ziel sollte es sein, die Kohlenstoffvorräte in den Böden zu erhalten. Hierzu wären vor allem auf Moorböden die Wasserstände deutlich anzuheben, v. a. in den Sommermonaten. Dagegen sollten eine weitere Entwässerung hydromorpher Böden und Grünlandumbruch vermieden werden. Bei Ackerböden ist verstärkt eine humusschonende Bodenbearbeitung und eine ausgeglichene Humusbilanz anzustreben

(z. B. durch organische Düngung und den Verbleib von Ernterückständen auf der Fläche), wobei potenziell negative Effekte auf die Grundwasserqualität, z. B. infolge verstärkter Stickstoffmineralisation, berücksichtigt werden müssen.

Für den Erhalt und die Förderung einer möglichst großen Bodenbiodiversität sind eine große Pflanzendiversität auch in Agrarökosystemen sowie humusschonende und Verdichtung vermeidende Bodenbearbeitungsformen förderlich.



## 5. Auswirkungen des Klimawandels auf Erosion und Verdichtung



Abb. 11 und 12: Erosion durch Wasser und Wind (Fotos: links: D. Harders, rechts: Bilddatenbank des LBEG).

### 5.1. Erosion

Unter den aktuellen klimatischen Bedingungen sind ca. 10 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen stark oder sehr stark durch Wassererosion und rund 23 % stark oder sehr stark durch Winderosion gefährdet (MU 2019b). Es ist davon auszugehen, dass der Klimawandel diesen Zustand verändern wird.

Durch die projizierte Zunahme der Winterniederschläge sowie der Zunahme von lang andauernden Niederschlagsereignissen mit großen Regenmengen (v. a. im Winter) und insbesondere der Zunahme von Starkregenereignissen ist ein verstärkter Oberflächenabfluss im Winter zu erwarten. Bedingt durch eine früher einsetzende Wassersättigung der Böden, kann dieser zudem auch früher im Jahr entstehen. Hierdurch steigt das Risiko von Wassererosion.

Zudem wird aufgrund des Klimawandels von einer Zunahme der erosiven Niederschläge ausgegangen (EHLHAUS et al. 2019). Vor allem für die Sommermonate wird erwartet, dass die in ihrer Menge zwar abnehmenden Niederschläge

verstärkt als Starkregenereignisse eintreten (DWD 2018a). Dies hat, vor dem Hintergrund zunehmender Bodentrockenheit, ebenfalls einen verstärkten Oberflächenabfluss zur Folge, da das Wasser nicht in die luftgefüllten Poren infiltrieren kann.

Ebenfalls negativ auf die Erosionsanfälligkeit der Böden wirken sich weitere mögliche, durch den Klimawandel ausgelöste Bodenveränderungen aus. Durch 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.

Die Abbildung 13 zeigt die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wasser der unter Ackernutzung stehenden Böden in Niedersachsen, fokussiert auf Flächen, die im Zuge des Klimawandels wahrscheinlich besonders betroffen sein werden. Gefährdet sind in Niedersachsen vor allem die Gebiete mit Löss- oder Sandlössdecken in geneigten Lagen und die schluffig-lehmigen Böden des Berg- und Hügellandes (vgl. auch MU 2006, 2019b).

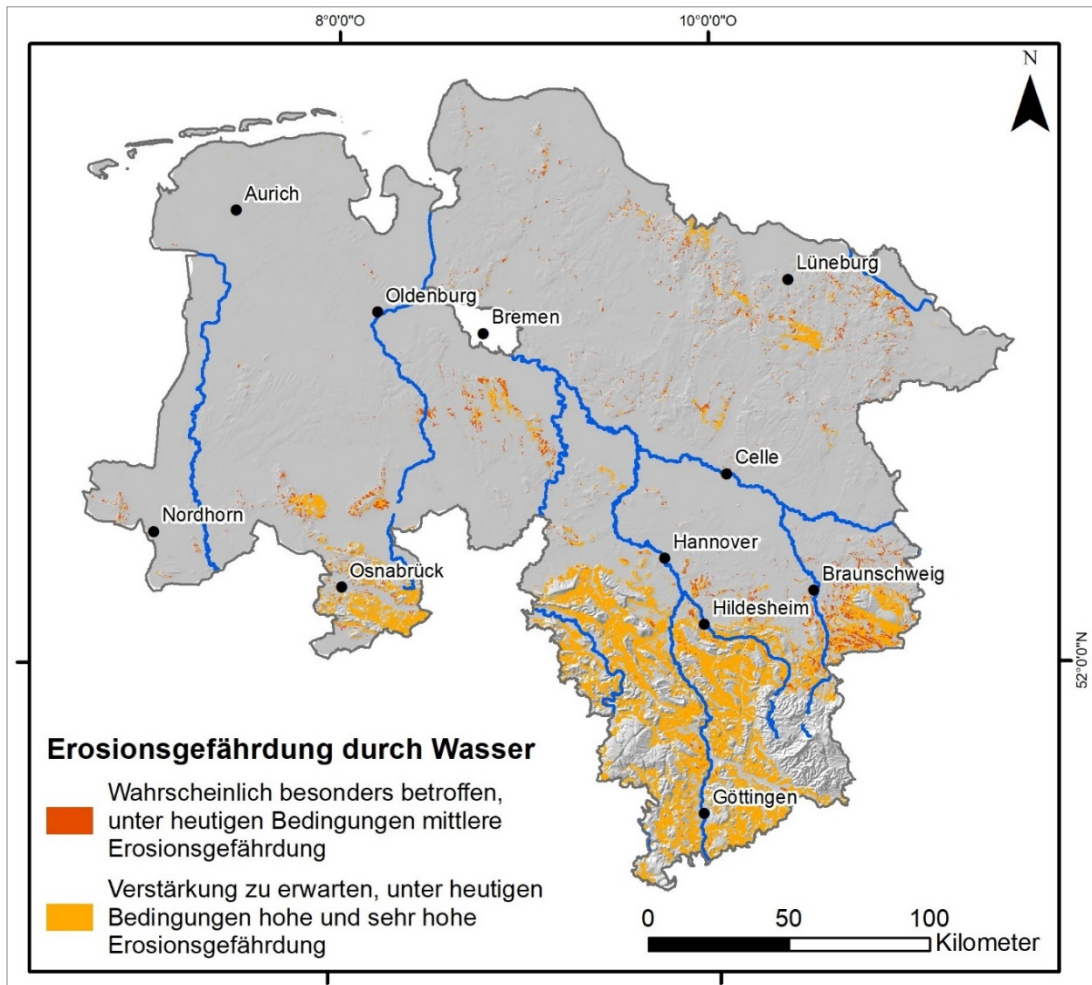


Abb. 13: Potenzielle Bodenerosionsgefährdung durch Wasser. Dargestellt sind die Ackerflächen, die bereits unter den aktuellen Klimabedingungen eine hohe oder sehr hohe Bodenerosionsgefährdung durch Wasser aufweisen und Flächen mit aktuell mittlerer Gefährdung, die als besonders anfällig für verstärkte Erosionsgefährdung unter sich ändernden klimatischen Bedingungen gelten. Die Berechnung erfolgte mit der Methodenbank des NIBIS® (vgl. BUG et al. 2020). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK 50).

Eine in Folge des Klimawandels zunehmende Verdunstung bei gleichzeitiger Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr führt zu einem schnelleren Austrocknen der Oberböden. Dies hat eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Winderosion zur Folge. Die Abbildung 14 zeigt die potenzielle Erosionsgefährdung der Böden in Niedersachsen durch Wind. Betroffen sind weite Teile der norddeutschen Tiefebene Niedersachsens mit Ausnahme der Marschen und Auen. Besonders gefährdet sind allgemein die sandigen Geestböden oder landwirtschaftlich genutzte Moorstandorte.

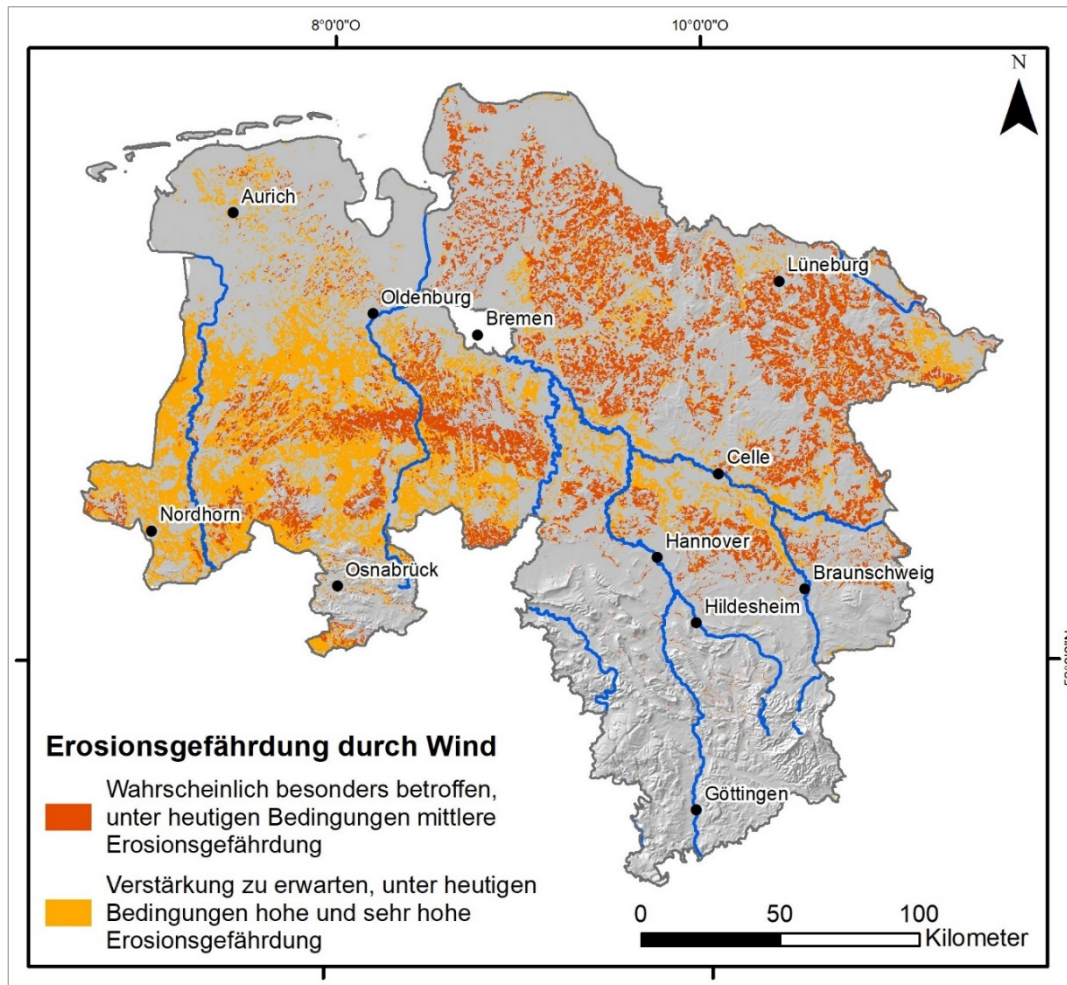


Abb. 14: Potenzielle Bodenerosionsgefährdung durch Wind. Dargestellt sind die Ackerflächen, die bereits unter aktuellen Klimabedingungen eine hohe oder sehr hohe Bodenerosionsgefährdung durch Wind aufweisen, und Flächen mit aktuell mittlerer Gefährdung, die als besonders anfällig für verstärkte Erosionsgefährdung unter sich ändernden klimatischen Bedingungen gelten. Die Berechnung erfolgte mit der Methodenbank des NIBIS® (vgl. BUG et al. 2020). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK 50).

Zu rechnen ist zum einen mit einem verstärkten Bodenabtrag auf bereits unter heutigen Klimabedingungen erosionsanfälligen Standorten sowie mit einer Zunahme der durch Bodenerosion gefährdeten Flächen. Betroffen sind hier insbesondere die Standorte, die unter heutigen Klimabedingungen als mittel erosionsgefährdet eingestuft werden. Es ist damit zu rechnen, dass diese Flächen unter den projizierten Klimabedingungen zukünftig stärker durch Erosion gefährdet sein werden.

Folgen für die Ökosysteme ergeben sich zum einen im On-Site-Bereich. Die betroffenen Flächen verlieren vor allem humoses und nährstoffreiches Oberbodenmaterial mit Auswirkungen für die Bodenfruchtbarkeit, Wasserspeicherfähigkeit und Gefügestabilität. Außerdem verringert sich die Gründigkeit der Standorte. Zum anderen entstehen auch Schäden im Off-Site-Bereich durch Nährstoffeinträge in benachbarte Ökosysteme und/oder Oberflächengewässer. Hinzu kommen Schäden durch das verlagerte Material an Straßen und Wegen sowie teilweise erhebliche Gefährdungen im Straßenverkehr durch Sichteinschränkungen bei Winderosionsergebnissen (Sandstürme).



## 5.2. Verdichtung

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 bindige und schluffreiche Böden bei einer hohen Bodenfeuchtigkeit. Besonders verdichtungsgefährdet sind in Niedersachsen beispielsweise die Auenböden, die Marschen und die Lössböden der Börde und des südniedersächsischen Berg- und Hügellandes (s. Abb. 16).

Durch erhöhte Niederschlagsmengen im Winter können zu Beginn der Frühjahrsbodenbearbeitung, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, allerdings auch in anderen Bearbeitungsphasen, höhere Bodenwassergehalte auftreten, die die Stabilität des Bodengefüges herabsetzen. Gleichzeitig wirkt sich eine Abnahme der Frosttage negativ auf die Gefügestabilität aus, da ein wiederholtes Auftauen und Wiedergefrieren zur Aggregatbildung beiträgt. Auch durch einen möglichen Humusabbau kann die Gefügestabilität vermindert und die Verdichtungsgefahr erhöht werden. Eine reduzierte Anzahl an Frosttagen und hohe Bodenwassergehalte im Winter führen auch zu einer Verstärkung der Gefährdung durch Bodenverdichtung während der Holzernte.

Folgen einer Schadverdichtung sind eine Verringerung des Wasserspeichervermögens und der Durchwurzelbarkeit. Für die landwirtschaftliche Nutzung kann dies Ertrags- und Qualitätseinbußen bedeuten. Das Infiltrationsvermögen wird vermindert und die Verschlammungsneigung erhöht. Dies kann sowohl zu 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 (vgl. Kap. 3.3; HARTMANN et al. 2012).



Abb. 15: Schädliche Bodenverdichtung durch eine Fahrspur (Foto: J. Boess, LBEG).

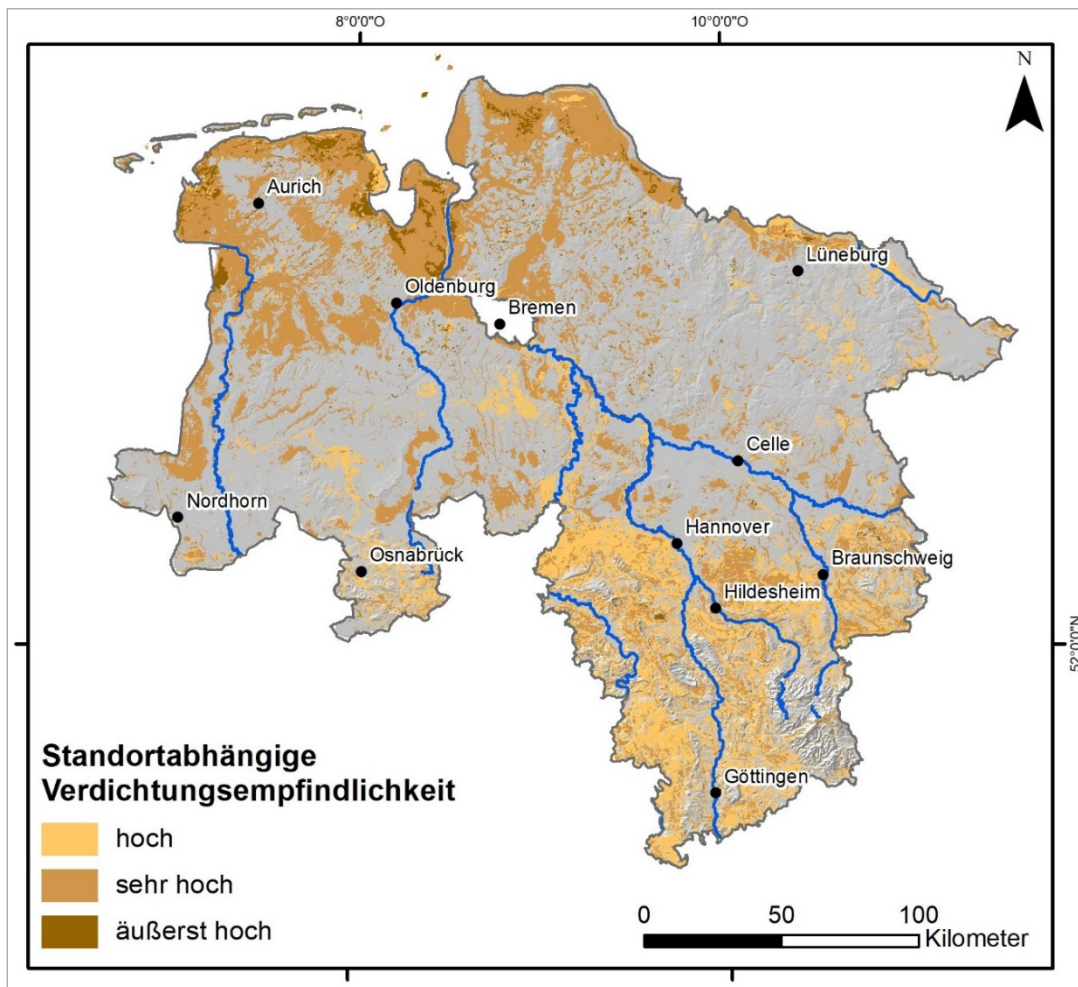


Abb. 16: Standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit niedersächsischer Böden (Klassen hoch, sehr hoch und äußerst hoch) unter derzeitigen Klimabedingungen. Die Berechnung erfolgte mit der Methodenbank des NIBIS® (vgl. Bug et al. 2020). Die bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK 50).

### 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.



### 5.3. Handlungsfelder Erosion und Verdichtung

Für die als potenziell besonders vom Klimawandel betroffen identifizierten Flächen mit bislang mittlerer Erosionsgefährdung sollte eine regionalspezifische Bewertung ihrer Empfindlichkeit erfolgen. So können Standorte mit einer infolge des Klimawandels erhöhten Verdichtungsgefährdung identifiziert werden.

In der Bewirtschaftung können anschließend bei den identifizierten Standorten erosionsmindernde Bewirtschaftungsverfahren (z. B. konservierende Bodenbearbeitung, Mulchsaat, Pflugrichtung quer zum Hang, ganzjährige Bodenbedeckung) verstärkt berücksichtigt werden, um einen Bodenabtrag zu vermeiden. Als Zielgrößen können z. B. Stufen der pflanzennutzbaren Gründigkeit formuliert werden, die nicht unterschritten werden sollten (vgl. NLÖ 2003). Außerdem sind verdichtungsmindernde Bewirtschaftungsverfahren zu berücksichtigen. Hier kommt vor allem der Wahl des richtigen Bearbeitungszeitpunktes in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte Bedeutung zu. Zur Erhöhung der Aggregatstabilität gewinnen humuserhaltende Bewirtschaftungsverfahren und konservierende Bodenbearbeitung an Bedeutung. Bei bereits vorhandener Verdichtung sind Bodenlockerung und Tiefpflügen bei einer Unterbodenverdichtung mögliche Gegenmaßnahmen.

## 6. Auswirkungen des Klimawandels auf die natürlichen Bodenfunktionen und auf schutzwürdige Böden

### 6.1. Änderungen der natürlichen Bodenfunktionen und Auswirkungen auf die Schutzwürdigkeit von Böden

Bei Fortsetzung der bereits zu beobachtenden Klimatrends sind, wie in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt wurde, in Zukunft negative Auswirkungen auf die Funktionen der niedersächsischen Böden in verschiedener Weise zu erwarten. Diese Änderungen werden aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen wiederum Auswirkungen auf andere Schutzgüter haben. Insbesondere werden davon die natürlichen Bodenfunktionen betroffen sein, die von besonderer Bedeutung für den Naturhaushalt sind. Dies sind die Lebensraum-, Regulations- sowie Filter- und Pufferfunktion des Bodens.

Böden, welche die natürlichen Bodenfunktionen in besonderem Maße erfüllen, zählen zu den schutzwürdigen Böden. Zudem wird Böden mit Erfüllung der Archivfunktion eine besondere Bedeutung beigemessen (Abb. 17). Diese Standorte sind z. B. im Rahmen von Planungs- und Genehmigungsverfahren besonders vor einer Überbauung zu bewahren. Durch die sich ändernden Klimabedingungen müssen auch Auswirkungen auf die räumliche Verteilung der schutzwürdigen Böden in Niedersachsen erwartet werden.

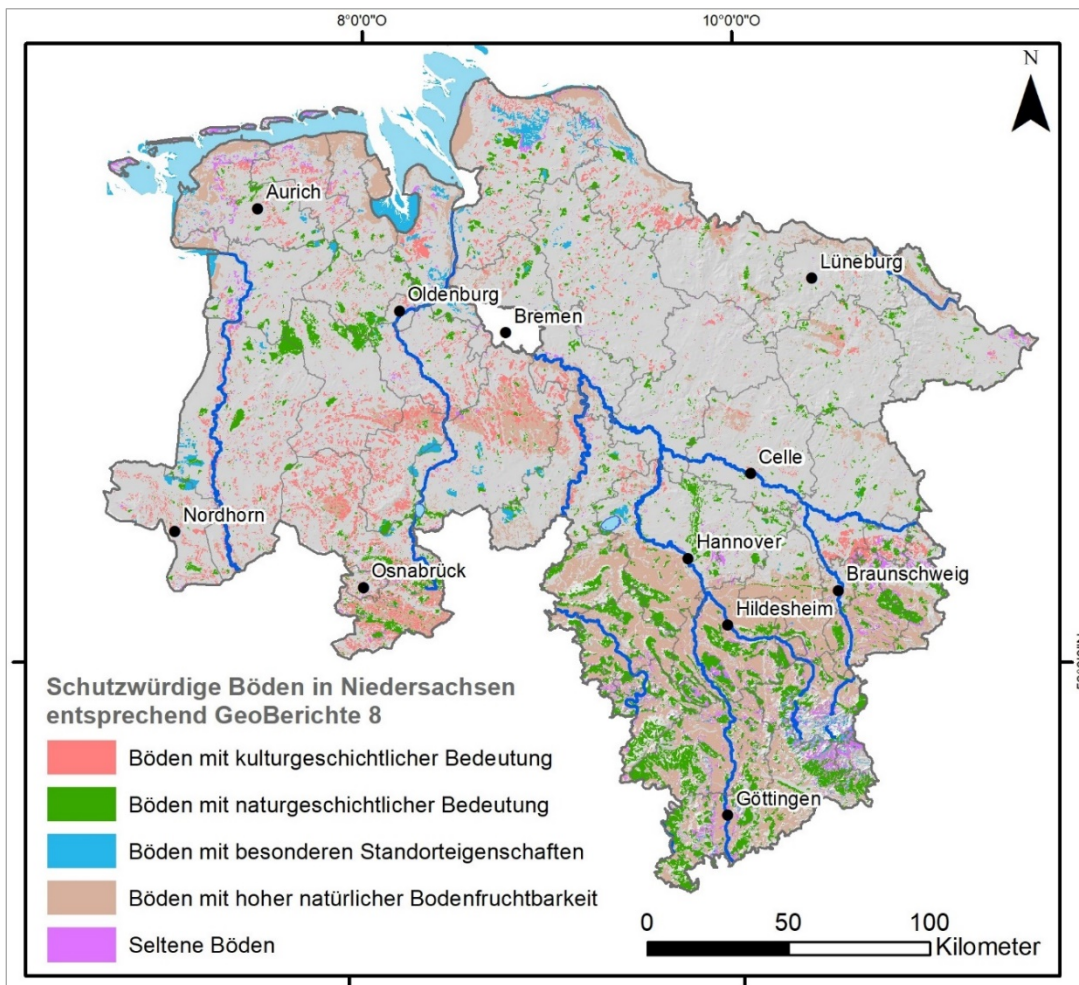


Abb. 17: Schutzwürdige Böden in Niedersachsen (nach BUG et al. 2019).

Durch die sich ändernden klimatischen Bedingungen besteht die Gefahr, dass neben einer Einschränkung der Bodenfunktionen auch die Eigenschaften von schutzwürdigen Böden soweit verändert werden, dass sie ihre besonderen Standorteigenschaften verlieren.

Durch Veränderungen des Niederschlagsregimes können Feuchtstandorte durch zunehmende Sommertrockenheit stärker austrocknen. Auch Böden mit einer hohen natürlichen Bodenfruchtbarkeit können dadurch betroffen sein. Es ist aber auch eine gegenläufige Entwicklung möglich (MADENA, BORMANN & GIANI 2012): Die Auswirkungen des Klimawandels könnten bei einigen Standorten auch zu einer positiven Veränderung der Standorteigenschaften und damit der Schutzwürdigkeit, wie z. B. zu

einer Erhöhung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit, führen.

Auch Böden mit einer hohen Filter- und Pufferkapazität für nicht sorbierbare Stoffe (entspricht einer geringen oder sehr geringen Austauschhäufigkeit) können vom Klimawandel in ihren Funktionen beeinflusst werden. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ist mit Änderungen der Auswaschungsgefährdung zu rechnen. Bei einem Teil der Böden mit hohen und sehr hohen Filter- und Pufferkapazitäten würde dies dazu führen, dass ihre Filter- und Pufferfunktion eingeschränkt wird. Auf der anderen Seite kann es aber auch Standorte geben, die in Folge des Klimawandels eine Verringerung der Auswaschungsgefährdung erfahren. Ähnliche Auswirkungen lassen sich für weitere Bodenfunktionen und schutzwürdige Böden ableiten.

Böden mit Erfüllung der Archivfunktion (natur- und kulturgeschichtlich) können insbesondere dann durch den Klimawandel in ihrer Funktionserfüllung und damit auch der Schutzwürdigkeit

bedroht sein, wenn es sich um Moorböden bzw. kultivierte Moorböden handelt und sich klimawandelbedingt eine stärkere Zehrung der Torfkörper einstellt.

#### **Folgen für Bodenfunktionen und schutzwürdige Böden**

- mögliche Beeinträchtigung oder Schädigung aller Bodenfunktionen,
- Veränderung der Funktionen von schutzwürdigen Böden, die ihre besonderen Standorteigenschaften infolge dessen irreversibel verlieren,
- Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit,
- mögliche Beeinträchtigung der Archivfunktion bei Moorböden bzw. kultivierten Mooren.

### **6.2. Handlungsfeld Bodenfunktionen und schutzwürdige Böden**

Die durch den Klimawandel potenziell besonders betroffenen Standorte mit schutzwürdigen Böden müssen zunächst identifiziert und hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bewertet werden.

Um die natürlichen Bodenfunktionen zu erhalten und für nachfolgende Generationen zu sichern, werden v. a. vorsorgende Bodenschutzmaßnahmen immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dabei sind alle aktuellen präventiven Maßnahmen zur Verringerung bzw. Vermeidung von Bodenerosion, schadhafter Bodenverdichtung oder Bodenkontaminationen (s. dazu die vorhergehenden Kapitel) geeignete Maßnahmen im Hinblick auf eine Anpassung an sich verändernde Klimaverhältnisse. Auch die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und die Erhaltung insbesondere der Böden, welche die Effekte des Klimawandels abschwächen können, sollten vermehrt in den Fokus gerückt werden (s. hierzu ENGEL & STADTMANN 2020).

## **7. Ausblick**

Die in diesem Bericht dargestellten Zusammenhänge zwischen Böden und Klima zeigen, dass der erwartete Klimawandel mittel- bis langfristige Auswirkungen auf sämtliche natürlichen Funktionen der niedersächsischen Böden haben wird und teilweise auch bereits hat. Als besonders wichtig und vordringlich zu bearbeiten sind dabei die Handlungsfelder Humusgehalt/organische Substanz, Erosion, Bodenwasserhaushalt und Verdichtung.

Um auf die potenziellen Folgen des Klimawandels reagieren zu können, müssen die regional unterschiedlichen Auswirkungen auf die Böden abgeschätzt werden. Durch die Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019a) wurde hierzu ein Schritt getan, der konsequent weitergeführt werden muss. 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.

Hier kommt es zunächst darauf an, für die jeweiligen regionalen Betroffenheiten auch belastbare quantitative Aussagen abzuleiten. Dazu sollten Bodendaten weiterhin mit den aktuellsten Ergebnissen der regionalen Klimaforschung verknüpft werden. Hierzu können die Daten und Methoden des niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®) genutzt, und es kann

z. T. auch auf schon vorhandene Vorarbeiten zurückgegriffen werden.

Die Komplexität des Systems Boden mit seinen vielen internen Regelkreisen und Rückkopplungsmechanismen erschwert quantitative Voraussagen zu den Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Böden. Auch wenn fachlich Konsens über die grundsätzlichen Klimawirkungen auf Böden vorliegt, müssen die Auswirkungen genauer gefasst werden. Zu vielen speziellen Fragestellungen besteht weiterhin Diskussions- und Forschungsbedarf (s. Anhang).

Die Bodeninformationssysteme und die Bodenzustandserhebungen sowie Bodendauerbeobachtungsflächen der Länder stellen unerlässliche Datengrundlagen für die Klimawirkungs- und Klimaanpassungsforschung dar.

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. Voraussetzung ist, dass die Auswertungsmethoden mit wenigen und flächendeckend verfügbaren Eingangsdaten auskommen. Auf ihrer Basis sind Aussagen zu langfristigen Veränderungen und Prozessen im Boden möglich.

Für die Entwicklung regional differenzierter Anpassungsstrategien sind 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.

## 8. Quellen

- BUG, J., ENGEL, N., GEHRT, E. & KRÜGER, K. (2019): Schutzwürdige Böden in Niedersachsen. Arbeitshilfe zur Berücksichtigung des Schutzgutes Boden in Planungs- und Genehmigungsverfahren. – 4. überarb. Aufl., GeoBerichte **8**: 56 S., 25 Abb., 5 Tab., Anh.; Hannover (LBEG).
- BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – 9. Aufl., GeoBerichte **19**; Hannover (LBEG).
- BMEL – BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2017): Extremwetterlagen in der Land- und Forstwirtschaft. Maßnahmen zur Prävention und Schadensregulierung. – Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009): Dem Klimawandel begegnen - Die deutsche Anpassungsstrategie. – Berlin.
- CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROKVIN, V., CANADELL, J., CHHABRA, A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J. & HEIMANN, M. (2013): Carbon and other biogeochemical cycles. Climate change 2013: the physical science basis. – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 465–570.; Cambridge (University Press).
- DENMAN, K. L., BRASSEUR, G., CHIDTHAISONG, A., CIAIS, P., COX, P. M., DICKINSON, R. E., HAUGLUSTAINE, D., HEINZE, C., HOLLAND, E., JACOB, D., LOHMANN, U., RAMACHANDRAN, S., DA SILVA DIAS, P. L., WOFYSY, S. C. & ZHANG, X. (2007): Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. – In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. & MILLER, H. L. (eds.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. – Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge (University Press).
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. – Drucksache 16/11595, 16. Wahlperiode; Berlin.



- 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](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](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190227_deutschlandwetter_winter2018_2019_news.html)>, Stand: 27.02.2019, letzter Zugriff: 02.10.2019.
- DON, A., FLESSA, H., MARX, K., POEPLAU, C., TIEMEYER, B. & OSTERBURG, B. (2018): Die 4-Prozente-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“ - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. – Thünen Working Paper **112**.
- EHLHAUS, D., WINTERRATH, T., AUERSWALD, K. & FISCHER, F. (2019): Klimawandel und Boden-erosion. 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. – 27 S., 15 Abb.; Hannover (LBEG).
- 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. – 2. Aufl., *GeoBerichte* **26**: 67 S., 15 Abb., 21 Tab., Anh.; Hannover (LBEG).
- ERTL, G., BUG, J., ELBRACHT, J., ENGEL, N. & HERRMANN, F. (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. – *GeoBerichte* **36**: 54 S., 20 Abb., 9 Tab.; Hannover (LBEG).
- FRANCIS, J. A. & VAVRUS, S. J. (2015): Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. – *Environmental Research Letters* **10** (2015): 1–12.
- 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.
- HEINEKE, H. J., BARTSCH, H. U., SBRESNY, J. & MÜLLER, U. (2002): Das Methodenmanagementsystem im Niedersächsischen Bodeninformationssystem NIBIS®. – *Bodenmanagement, Schriftenreihe Geowissenschaften + Umwelt*: 59–84; Hamburg (Springer).
- HÖPER, H. & SCHÄFER, W. (2012): Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz. – *Bodenschutz* **3/2012**: 72–80.
- IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebereit. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). – [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](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf)>.
- IPCC (2018): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. – In: 1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut; deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 08.10.2018 und unter Berücksichtigung von Korrekturmeldungen des IPCC bis zum 14.11.2018; Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim, Österreichisches Umweltbundesamt; Bonn/Bern/Wien, November 2018.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C.,

- RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B. & YIOU, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. – *Reg. Environ. Change* **14**: 563–578.
- 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.
- 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], <[https://www.muk.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/Institusbericht\\_74.pdf](https://www.muk.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/Institusbericht_74.pdf)>.
- LABO – BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2010): LABO Positionspapier Klimawandel. Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. – <[https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO\\_Positionspapier\\_Boden\\_und\\_Klimawandel\\_090610\\_aa8\\_bf5.pdf](https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf)>.
- LSN – LANDESAMT FÜR STATISTIK NIEDERSACHSEN (2018): Ernteergebnisse Erntestatistik online - Ernteergebnisse in Niedersachsen seit 1991. Ernte 2018. – <[https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/land\\_forstwirtschaft\\_fischerei/erntestatistik\\_online/ernteergebnisse\\_seit\\_1991/themenbereich-land--und-forstwirtschaft-fischerei---ernteergebnisse-152870.html](https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/land_forstwirtschaft_fischerei/erntestatistik_online/ernteergebnisse_seit_1991/themenbereich-land--und-forstwirtschaft-fischerei---ernteergebnisse-152870.html)>, letzter Zugriff: 02.10.2019.
- MADENA, K., BORMANN, H. & GIANI, L. (2012): Soil functions - Today's situation and further development under climate change. – *ERKUNDE* **66/3**: 221–237.
- 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, <[https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20190712\\_trockenheit\\_juni\\_juli\\_2019.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20190712_trockenheit_juni_juli_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>, letzter Zugriff: 20.02.2020.
- 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.
- 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 & Hitzwelle Sommer 2018 (Deutschland. – Report No. 1 CEDIM Forensic Disaster Analysis Group (FDA), <[https://www.cedim.kit.edu/download/FDA\\_Duerre\\_Hitzwelle\\_Deutschland\\_report1\\_final\\_2.pdf](https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_Duerre_Hitzwelle_Deutschland_report1_final_2.pdf)>, letzter Zugriff: 01.04.2020.
- NIBIS® KARTENSERVEN: <<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>>; Hannover (LBEG).
- NIBIS® – NIEDERSÄCHSISCHES BODENINFORMATIONSSYSTEM: <[www.lbeg.niedersachsen.de](http://www.lbeg.niedersachsen.de)>; Hannover (LBEG).
- NLÖ – NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung. – Hildesheim.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (2006): Umweltbericht 2006. – Hannover.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT UND KLIMASCHUTZ (2008): Klimawandel - Herausforderung für Staat und Gesellschaft. – Hannover.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ – REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2012): Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. – Hannover.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2015): Umsetzungsbericht zu den Empfehlungen der Regierungskommission Klimaschutz. – Hannover.

- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2019a): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. Wissenschaftlicher Hintergrundbericht. – Hannover.
- MU – NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2019b): Auf gutem Grund - Ein Aktionsprogramm zum Schutz der Böden in Niedersachsen. – Entwurf vom 30.09.2019.
- 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).
- REKLIES-DE (2018): Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. – <<http://reklies.hlnug.de/startseite>>, letzter Zugriff: 30.09.2019.
- 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).
- 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.
- TIEMEYER, B., FREIBAUER, A., ALBIAC BORRAZ, E., AUGUSTIN, J., BECHTOLD, M., BEETZ, S., BEYER, C., EBELI, M., EICKENSCHIEDT, T., FIEDLER, S., FÖRSTER, C., GENSIOR, A., GIEBELS, M., GLATZEL, S., HEINICHEN, J., HOFFMANN, M., HÖPER, H., JURASINSKI, G., LAGGNER, A., LEIBER-SAUHEITL, K., PEICHL-BRAK, M. & DRÖSLER, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. – Ecological Indicators **109**, Artikel 105838.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2008): UBA-Workshop Böden im Klimawandel - Was tun? – UBA-Texte **25**/08; Dessau.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2009): Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie, Beitrag einer nachhaltigen Landwirtschaft zum Klimaschutz. – <<http://www.umweltbundesamt.de/landwirtschaft/nahrungsmittelproduktion/klimaschutz.html>>, letzte Aktualisierung vom 27.03.2006.
- 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.
- 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.

## 9. Anhang

Die folgende Tabelle führt die Klimaveränderungen und deren mögliche Auswirkungen auf Bodenfunktionen zusammen. Große Unsicherheiten bestehen bei den Aussagen über eine mögliche Zunahme der Windgeschwindigkeiten (Tabelle verändert nach PFEIFFER, ESCHENBACH & MUNCH 2017 und SCHICKHOFF & ESCHENBACH 2018).

Auswirkungen auf Bodenfunktionen und -gefährdungen	Bodenteilfunktion / Kriterium	Klimaveränderungen				
		Temperaturanstieg	Abnahme Sommer-niederschläge	Zunahme Winter-niederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Stürme / Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten
		Mögliche Auswirkungen auf die Böden				
Lebensraumfunktion	Diversität und Aktivität von Bodenorganismen	+ / -	+ / -	+ / -	+ / -	(+ / -)
Rolle im Nährstoff- und Wasserkreislauf	Bodenwasserspeicherung	-	-	+	-	
	Grundwasserneubildung	-	-	+	+ / -	
	Regulation Nährstoffkreislauf	+ / -	+ / -	+ / -	(-)	
Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium	Schadstoffabbau und -pufferung	+	(+ / -)	(+ / -)	(+ / -)	
Produktionsfunktion	Standort für Land- und Forstwirtschaft	+ / -	-	+ / -	-	-
Klimafunktion	Kohlenstoffspeicherung	+ / -	+ / -	+ / -	(-)	
	Kühlungsfunktion in Städten	-	-		(+ / -)	
Gefährdungen und Empfindlichkeiten	Bodenerosion durch Wind	(+)	+	(-)		+
	Bodenerosion durch Wasser	(+ / -)	(+)	+	+	
	Bodenverdichtung	(+ / -)	(-)	(+)	(+)	

Direkt	
+	Zunahme möglich
-	Abnahme möglich
+ / -	in Abhängigkeit von Standortbedingungen Zu- oder Abnahme möglich
Indirekt	
(+)	durch indirekte Wirkungen Zunahme möglich
(-)	durch indirekte Wirkungen Abnahme möglich
(+ / -)	durch indirekte Wirkungen in Abh. von Standortbed. Zu- oder Abnahme möglich
	keine Aussage



## Autorenschaft

- Nicole Engel

<https://orcid.org/0000-0002-0208-1110>

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,  
Referat L 3.1 Bodenschutz, Bodenkundliche Landesaufnahme,  
Stilleweg 2,  
30655 Hannover.

- Dr. Udo Müller

ehemals

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,  
Stilleweg 2,  
30655 Hannover.

- Denise Harders

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,  
Referat L 3.1 Bodenschutz, Bodenkundliche Landesaufnahme,  
Stilleweg 2,  
30655 Hannover.

- Dr. Robin Stadtmann

<https://orcid.org/0000-0002-6232-4188>

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,  
Referat L 3.1 Bodenschutz, Bodenkundliche Landesaufnahme,  
Stilleweg 2,  
30655 Hannover.

- Dr. Heinrich Höper

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,  
Referat L 3.2 Landwirtschaft, Bodenmonitoring,  
Stilleweg 2,  
30655 Hannover.