

Geofakten 46.2

■ Klima

Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im Klimawandel

Bug, J. & Harders, D.

Mai 2024

Die Geofakten 46 sind als aktualisierbares Sammelwerk konzipiert. Es setzt sich zusammen aus dem Grundlagenteil Geofakt 46, 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“, die fortlaufend erarbeitet werden. Die Erarbeitung erfolgte in Kooperation des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) mit dem Niedersächsischen Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU).

Klimawandel, Bewässerung, Austauschhäufigkeit.

1. Einleitung

Der Boden nimmt eine zentrale Stellung in Landschaftsökosystemen ein. Als Schnittstelle zwischen Litho-, Hydro-, Bio- und Atmosphäre erfüllt er zahlreiche Funktionen und ist an einer Vielzahl elementarer ökosystemarer Prozesse beteiligt. Eine große Bedeutung hat der Boden als Speicher für Wasser und Nährstoffe, die essenziell für das Wachstum der Pflanzen sind. Damit reguliert der Boden als Speicher sowohl den Nährstoff- als auch den Wasserhaushalt. Die Speicherkapazität von Wasser im Boden ist durch die Größe des Porenraumes bzw. durch die Feldkapazität (FK) begrenzt. Die FK beschreibt den Teil des Porenraumes, der Wasser durch Kapillar- und Adsorptionskräfte gegen die Schwerkraft im Boden halten kann. Wenn in den Boden mehr Wasser infiltriert als gehalten werden kann, entsteht Sickerwasser. Dieses füllt in tieferen Bodenschichten die Poren auf oder versickert weiter in die gesättigte Zone und trägt damit zur Grundwasserneubildung bei (ERTL et al. 2019). Ausnahmen sind Böden mit gehemmter Versickerung, wie z. B. Pseudogleye oder Knickmarschen.

Mit dem Sickerwasser werden auch im Bodenwasser befindliche Nähr- und Schadstoffe in tiefere Schichten verlagert. Insbesondere im Boden nicht sorbierbare Stoffe, wie z. B. die Anionen Nitrat und Sulfat, aber auch manche Schadstoffe, werden mit dem Sickerwasser verlagert. Da durch Düngung und Mineralisation von Humus vor allem in Ackerböden meist mehr Nitrat in die Bodenlösung gelangt als durch die Pflanzen aufgenommen werden kann, stellt die Verlagerung von Nitrat ein dringliches Problem des Grund- und Trinkwasserschutzes in

Niedersachsen dar. Landwirtschaftliche Stickstoffüberschüsse sind eine der Hauptursachen für die zu starke Belastung des Grundwassers mit Nitrat (BISCHOFF et al. 2022).

Um das Verlagerungsrisiko von nichtsorbierbaren Stoffen aus dem Boden am Standort abschätzen zu können, kann die jährliche Austauschhäufigkeit des Bodenwassers (AH) bestimmt werden. Sie gibt an, wie häufig das Sickerwasser innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens (betrachtet wird hierbei die effektive Durchwurzelungstiefe (W_e)) austauscht. Je höher die Sickerwasser- und je geringer das Wasserspeicher- und Rückhaltevermögen eines Bodens sind, desto größer ist seine AH. Der Kennwert AH kann ferner als Indikator genutzt werden, um die Funktionserfüllung des Bodens als Regulator im Nährstoffhaushalt zu bewerten. Die Höhe der AH wird neben klimatischen Faktoren maßgeblich von Bodeneigenschaften beeinflusst.

Im Zuge des Klimawandels wird eine Verschiebung der Niederschläge aus dem Frühjahr und Sommer hin zum Winter erwartet (ENGEL et al. 2024). Da die Sickerwasserbildung in Niedersachsen überwiegend im Winterhalbjahr erfolgt, kann es durch diese Verschiebung insbesondere auf Böden, die eine $AH < 1$ aufweisen (s. Kap. 2), zukünftig zu erhöhten Austrägen kommen.

Um regional und niedersachsenweit das Verlagerungsrisiko heute und in Zukunft abzuschätzen, werden im Folgenden Ergebnisse von Wirkmodellen zur AH für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft dargestellt und miteinander verglichen.

2. Methodik zur Bestimmung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers

Die Berechnung der AH ist in der DIN 19732 (2011) geregelt. Die Methode wurde vielfach angewendet (z. B. MÜLLER 1997), insbesondere für die landwirtschaftliche Beratung in Wasserschutzgebieten (z. B. ANTHONY & HASSELBAUER 1996, ENGEL 2000).

Die Methode AH wurde für den *NIBIS® Kartenserver* umgesetzt und in der Methodensammlung des LBEG veröffentlicht (BUG et al. 2020, VKR 6.5.18). Der Kennwert AH setzt die mittlere jährliche Sickerwasserrate (SWR) in Bezug zur Speicherefähigkeit von Wasser im Boden (FK) in der effektiven Durchwurzelungszone (We). Dazu wird ein Quotient aus der SWR und der FKWe gebildet. Ein Wert von 1 zeigt an, dass in einem Jahr das gesamte zu Beginn der Sickerwasserphase in der We befindliche

Bodenwasser aus der We in den darunterliegenden Bodenbereich verlagert wird, d. h. „einmal ausgetauscht wird“. Das erlaubt den Schluss, dass (Nähr-)Stoffe, die am Ende der Vegetationsperiode und zu Beginn der Sickerwasserphase im Bodenwasser gelöst sind, ausgetragen werden. Sie stehen somit in der darauffolgenden Vegetationsperiode den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung und erhöhen unter Umständen die Konzentration dieser Stoffe im oberflächennahen Grundwasser. Austauschhäufigkeiten mit Werten, die kleiner 1 sind, zeigen an, dass ein Teil der Bodenlösung auch nach der Sickerwasserperiode im effektiven Wurzelraum verbleibt und damit die darin gelösten (Nähr-)Stoffe aus der vorherigen Vegetationsperiode potenziell der nächsten Kultur zur Verfügung stehen können.

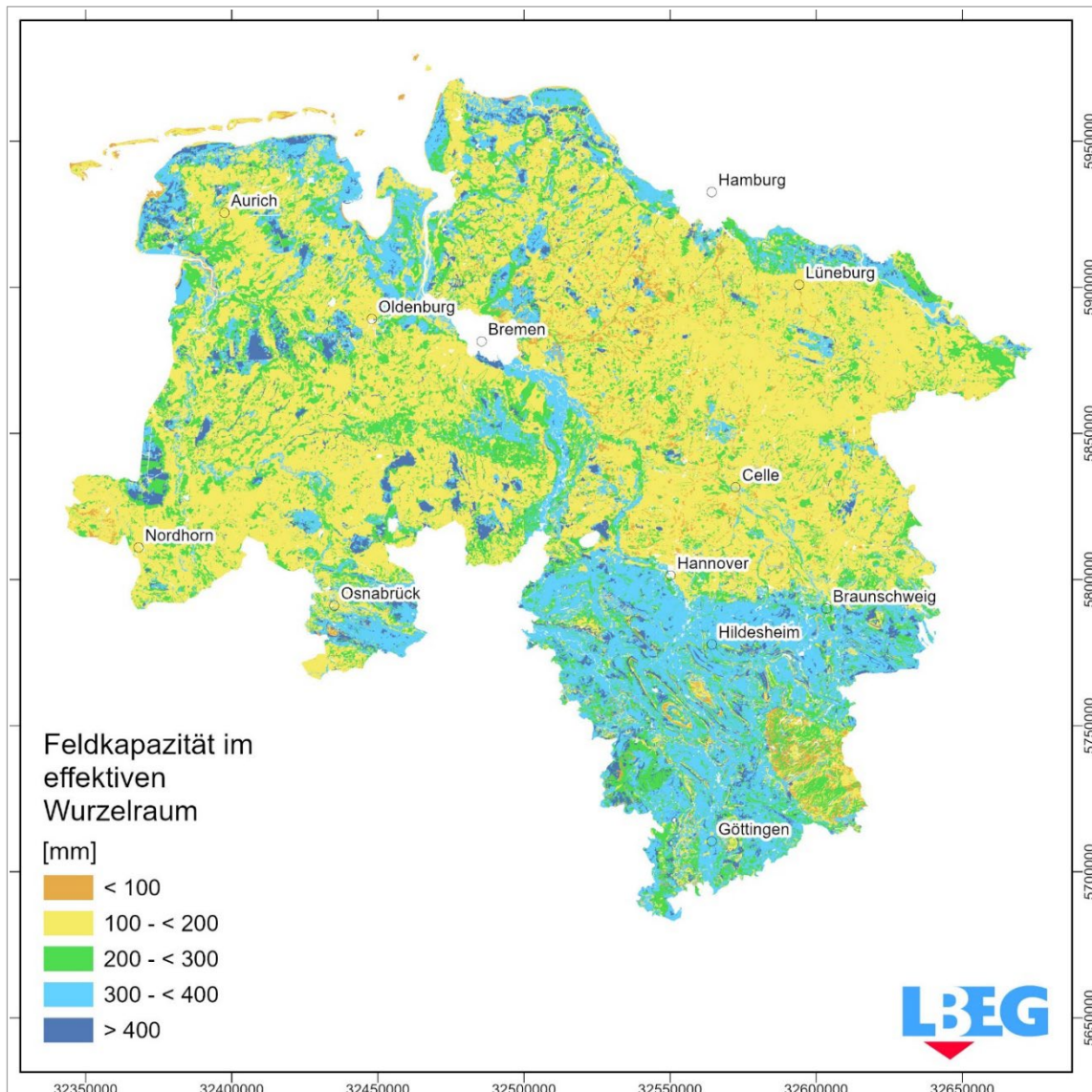


Abbildung 1: Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Niedersachsen auf Basis der BK50.

Die FKWe wird gemäß den Vorgaben in Geobericht 19 (BUG et al. 2022) basierend auf den Kennwerten aus dem DWA-Arbeitsblatt 920-1 (2016) abgeleitet. Dabei wird die Variante der Feuchteäquivalente genutzt, bei der die Feldkapazität durch unterschiedliche, bodenartabhängige Saugspannungen begrenzt ist. Abbildung 1 zeigt die regionale Verteilung des Kennwertes FKWe. Die höchsten Werte von >400 mm erreichen die Moorböden der Geest, während die geringsten Werte (<100 mm) bei geringmächtigen Verwitterungsböden im Bergland und selten auch in der Geest anzutreffen sind. Ein Großteil der Sandböden der Geest fällt in die Klasse 100–200 mm, während die Böden im Küstenholozän, in den Flussauen und die Lössböden des Bergvorlandes und des Berglandes meist Werte >300 mm erreichen.

Die Sickerwasserrate (SWR) wird mit Hilfe des TUB-BGR-Verfahrens (WESSOLEK et al. 2009, DWA-A 920-1 2016) bestimmt. Die Ableitung erfolgt mit Hilfe von empirischen Gleichungen. Eingangsdaten sind Bodeneigenschaften (nFK, KA, MNGW etc.), Landnutzung und Klima, wobei jeweils 30jährige Mittel für die Evapotranspiration und den korrigierten Niederschlag, bezogen auf das Jahr und die Vegetationsperiode, benötigt werden. Die Methodik ist nicht gültig für geneigte Ackerflächen (>3,5 % Hangneigung) und bei anderen Landnutzungen für Flächen >18 % Hangneigung, da andernfalls die Sickerwasserrate überschätzt wird. Auf diesen Flächen ist das Auftreten von Oberflächenabfluss wahrscheinlich. Daher werden nicht alle Flächen in Niedersachsen bewertet, sowohl hinsichtlich der Sickerwasserrate als auch der AH.

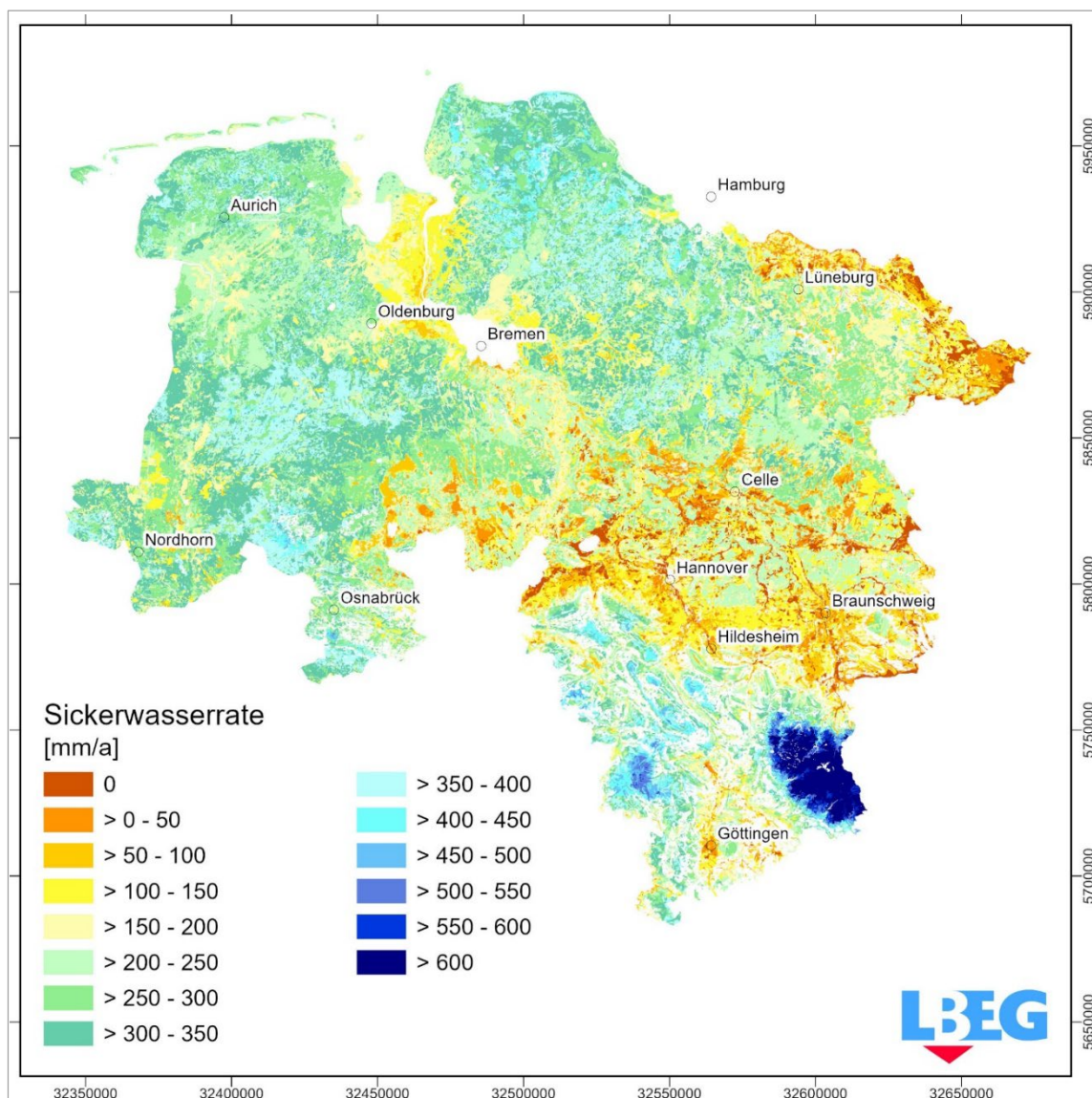


Abbildung 2: Mittlere Sickerwasserrate nach TUB-BGR-Verfahren für Niedersachsen, berechnet mit Klimadaten für die Periode 1990–2020.

Im landesweiten Vergleich zeigen sich große Unterschiede bei der Sickerwasserrate. Die höchsten Raten sind aufgrund der stark positiven klimatischen Wasserbilanz im Harz erkennbar. Ferner werden auch erhöhte Sickerwasserraten im Niedersächsischen Berg- und Hügelland erwartet sowie im nördlichen und westlichen Teil der Geest. Aufgrund von oberflächennah anstehendem Grundwasser sind die geringsten Sickerwasserraten in den Flusslandschaften und im Raum westlich von Hannover sowie im nördlichen Harzvorland zu erwarten.

Zu beachten ist, dass die AH die mittlere Austauschhäufigkeit für einen 30jährigen Zeitraum angibt. Die Sickerwasserrate kann aber von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich sein. In trockenen Wintern kann es auch an Standorten mit geringer FKWe dazu kommen, dass kein Stoffaustrag stattfindet. Umgekehrt kann in sehr nassen Winterhalbjahren auch an Standorten mit sehr geringer mittlerer Austauschhäufigkeit (d. h. $AH < 1$) Sickerwasser entstehen und somit auch dort ein Austrag von nichtsorbierbaren Stoffen aus der We stattfinden. In sehr nassen Wintern führt die hohe Sickerwasserrate aber auch zu einer Verringerung der Stoffkonzentration im Sickerwasser, die entscheidend für die Bewertung der Qualität des Grundwassers ist.

In der Methode AH wird der Versiegelungsgrad aktuell nicht berücksichtigt. Es wird für alle Flächen von einem vollständig unversiegelten Boden ausgegangen, was eine potenzielle Fehlerquelle darstellen kann. In der DIN 19732 werden weiterhin die Verlagerungsgeschwindigkeit und die Verweilzeit unterhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe beschrieben. Diese sind nicht Bestandteil der hier genutzten Methode zur Ermittlung der AH und damit auch nicht Thema dieser Geofakten.

3. Datengrundlagen zur Bestimmung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers

Zur Anwendung der Methode werden als Eingangsparameter Klimadaten, Bodendaten und Reliefdaten benötigt. Die Methode kann sowohl mit Klimabeobachtungs- als auch mit Klimaprojektionsdaten verwendet werden. Für die in dieser Publikation beschriebenen Ergebnisse wurden Klimadaten und Klimaprojektionsdaten des Deutschen Wetterdienst (DWD), die Bodenkarte von Niedersachsen im Maßstab 1 : 50.000 (BK50) und das Digitale Geländemodell (DGM5) genutzt.

Die Ergebnisse der AH für die Beobachtungszeiträume basieren auf regionalisierten, täglichen Niederschlagsdaten (Produkt REGNIE, DWD), welche einer Korrektur nach RAUTHE et al. (2013) unterzogen wurden. Die Verdunstung wurde dem LBEG 2021 vom Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) des DWD in einer unveröffentlichten Vorab-Version bereitgestellt und basiert auf der FAO-Grasreferenzverdunstung (ALLEN et al. 1998).

Die verwendeten Klimaprojektionsdaten basieren auf den Daten des Niedersächsischen Ensembles AR5-NI v2.1 (HAJATI et al. 2022). Auf ihrer Basis wurden Informationen zu den Austauschhäufigkeiten in der Zukunft bzw. den Veränderungen im Vergleich zu heute abgeleitet. Dafür wurden für alle Member (Modellläufe unterschiedlicher Modelle) des Ensembles die Austauschhäufigkeiten des Bodenwassers einzeln berechnet. So wurden für jede Fläche der BK50 für das RCP8.5-Szenario („Kein-Klimaschutz“-Szenario) elf Ergebnisse bzw. für das RCP2.6-Szenario („Klimaschutz“-Szenario) acht Ergebnisse errechnet. All diese Ergebnisse bilden eine mögliche Zukunft ab. Aus dieser Vielzahl von Einzelergebnissen wurden eine Bandbreite (unterer Rand: Minimum/oberer Rand: Maximum) und der Mittelwert berechnet. Die Ergebnisse werden wie folgt angegeben: Mittelwert (Minimum - Maximum) und bilden so die Bandbreite der Modellergebnisse ab.

Die Hangneigung wurde aus dem DGM5 des LGLN abgeleitet und für die Flächen der BK50 gemittelt.

4. Austauschhäufigkeit des Bodenwassers – Ergebnisse der Auswertungen

4.1 Klimabeobachtungsdaten

Bei der Bewertung des Verlagerungsrisikos von nicht sorbierbaren Stoffen mit Hilfe des Kennwertes „Austauschhäufigkeit des Bodenwassers“ lassen sich in Niedersachsen räumlich deutliche Unterschiede feststellen. Im Folgenden werden die Ergebnisse regional differenziert nach den Bodenregionen Niedersachsens (GEHRT et al. 2021) ausgewertet und beschrieben. Einen Überblick über die räumliche Verteilung der Austauschhäufigkeit liefert Abbildung 3. Die Einteilung erfolgt nach DIN 19732 in fünf Stufen.

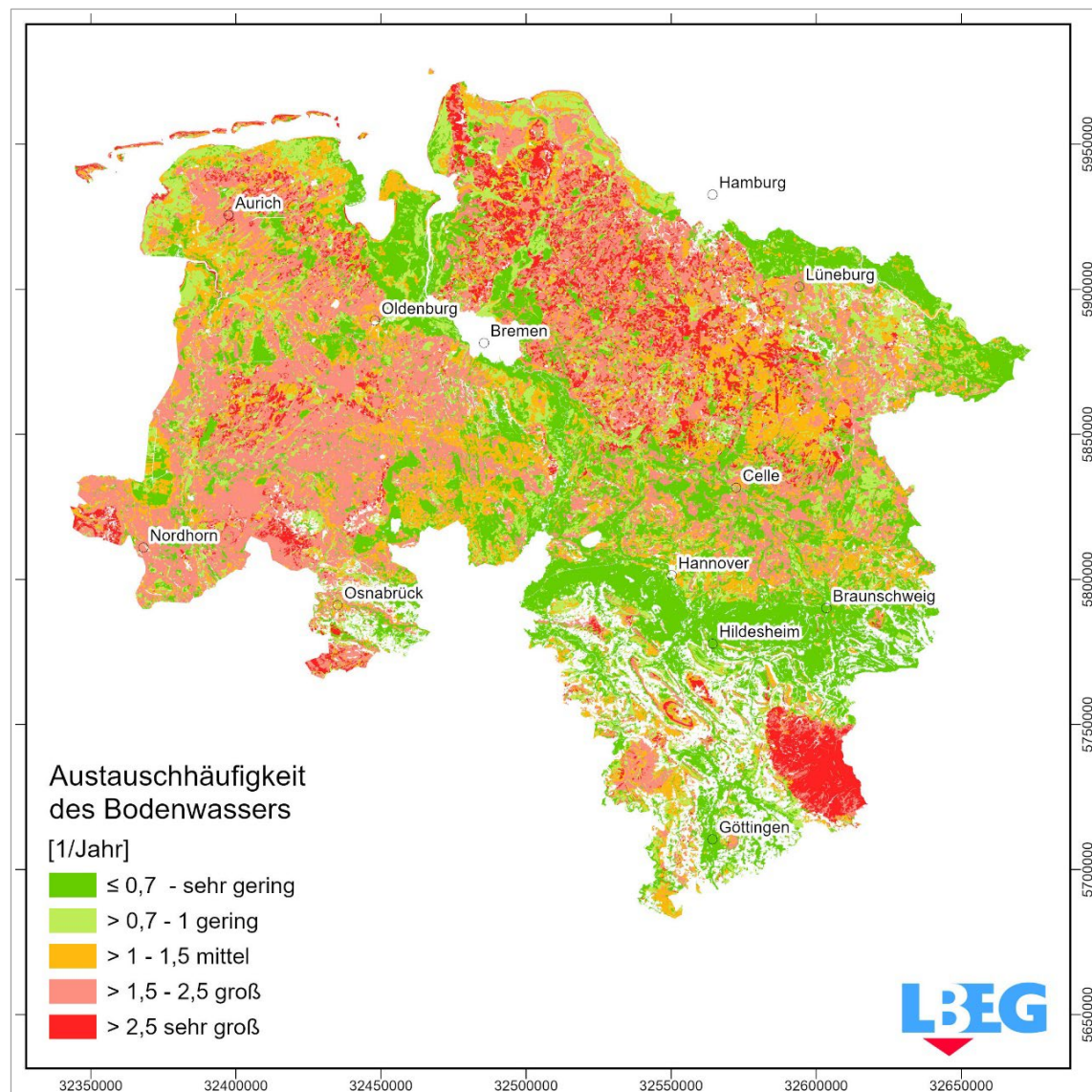


Abbildung 3: Austauschhäufigkeit des Bodenwassers 1990–2020 in Niedersachsen.

Bodenregion Küstenholozän: Über 50 % der Böden der Marsch weisen eine sehr geringe oder geringe Austauschhäufigkeit (Abb. 3 und 4) auf. Trotz relativ hoher Sickerwasserrate (Abb. 2) ist die Austauschhäufigkeit aufgrund der hohen Wasserspeicherfähigkeiten (Abb. 1) in dieser Region geringer als in anderen Bodenregionen.

Bodenregion Flusslandschaften: Deutlicher als im Küstenholozän ist dieser Zusammenhang entlang der großen Flüsse in Niedersachsen, Elbe, Weser, Ems, Leine und Oker ausgeprägt. Über 85 % der Flächen haben hier ein geringes oder sehr geringes Austragsrisiko, hauptsächlich aufgrund der hohen Wasserspeicherfähigkeit. In der Region der Flusslandschaften sind die jährlichen Sickerwasserraten vergleichsweise gering. Das liegt an dem dort fast flächendeckend vorhandenen Grundwasseranschluss der Böden und dem damit einhergehenden

kapillaren Aufstieg und der somit erhöhten Verdunstung. Dies heißt aber nicht, dass in dieser Bodenregion per se das Eintragsrisiko von Nährstoffen in die Gewässer geringer ist. Auch durch Oberflächenabfluss und durch Überflutungen der Auen können Nährstoffe wie Nitrat aus oder mit dem Boden abgetragen und in die Gewässer verlagert werden.

Geest: Die größte Bodenregion von Niedersachsen weist eine große Spanne an Austauschhäufigkeiten auf. Jede Klasse ist mit über 10 % Flächenanteil vertreten (Abb. 4), was in keiner anderen Bodenregion zu beobachten ist. Dominant sind trotzdem die Klassen „groß“ und „sehr groß“ mit zusammen über 50 % Flächenanteil. Die weit verbreiteten Sandböden haben meist nur eine geringe FKWe, während die SWR hier Werte >250 mm/a erreicht. Die AH nimmt innerhalb der Bodenregion Geest mit der

SWR kontinuierlich, dem klimatischen Gradienten folgend, nach Osten und Südosten ab. Eine Sonderstellung weisen die Moorböden der Geest auf. Durch ihre sehr hohe Wasserspeicherfähigkeit ist die Austauschhäufigkeit trotz hoher Sickerwasserraten meist mit der Stufe „sehr gering“ zu bewerten.

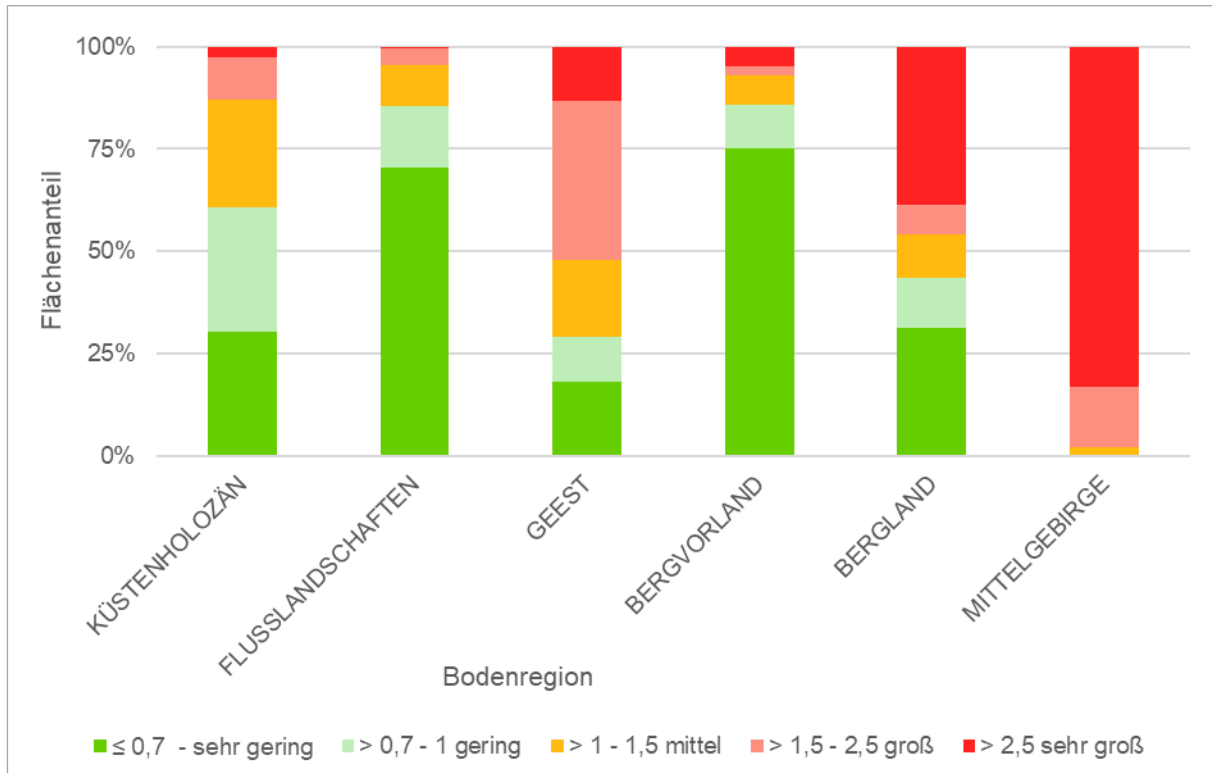


Abbildung 4: Mittlere Austauschhäufigkeit des Bodenwassers nach Bodenregionen Niedersachsens für den Zeitraum 1990–2020: Flächenanteile der Klassen der AH nach DIN 19732, differenziert für die Bodenregionen.

Bergvorland: Die Klasse „sehr gering“ ist mit fast 75 % Flächenanteil die dominante Klasse. Hier fallen die Sickerwasserraten im Landesdurchschnitt eher gering aus. Die Lössböden der Region haben sehr hohe Feldkapazitäten.

Bergland: Geringe Austauschhäufigkeiten treten auf den Lössböden der Täler des Berglandes auf. Ansonsten weisen die geringmächtigen Böden der bewaldeten Hänge und Kuppen große oder sogar sehr große Austauschhäufigkeiten auf. Die Böden haben eine geringe FKWe, zudem steigt mit zunehmender Höhe der Niederschlag an und mit ihm auch die Sickerwasserrate. Im Bergland erfolgt für einen Teil der Flächen keine Darstellung (vgl. Abb. 3). Aufgrund der Ackernutzung an den Hängen mit Neigungen >3,5 % ist keine Bewertung der SWR nach der Methode TUB-BGR möglich.

Mittelgebirge: Im Harz treten landesweit die mit Abstand höchsten Sickerwasserraten auf (Abb. 2). Dies ist auf die erhöhten Niederschläge und eine reduzierte Verdunstung infolge kühlerer Temperaturen zurückzuführen. Dies resultiert bei den dort verbreiteten gering- bis mittelmächtigen Verwitterungsböden mit mäßiger Wasserspeicherfähigkeit in überwiegend sehr großen Austauschhäufigkeiten. Jedoch muss in dieser Region nicht davon ausgegangen werden, dass dadurch eine besonders hohe Belastung des Grundwassers besteht. Die große Sickerwassermenge führt zu einer Verdünnung der Stoffe in der Bodenlösung. Zudem gibt es hier nur wenige landwirtschaftlich genutzte Flächen.

4.2 Veränderungen der Austauschhäufigkeit in den letzten 60 Jahren

In Niedersachsen zeigte sich in den letzten 60 Jahren keine deutliche Veränderung der mittleren Austauschhäufigkeit und damit des Verlagerungsrisikos (Tab. 1). Im Mittel lag der Wert für das Land Niedersachsen 1961–1990 bei 1,5 und stieg dann leicht an, um dann in der letzten, eher trockenen

Periode auf den Wert 1,4 zu fallen. Damit ist insgesamt tendenziell eine leichte Abnahme des Verlagerungsrisikos in den letzten 60 Jahren zu verzeichnen, die maßgeblich durch die trockene letzte Dekade von 2011–2020 zu begründen ist. Die Sickerwasserraten in diesem Zeitraum waren geringer, so dass auch das Verlagerungsrisiko geringer ausfiel.

Tabelle 1: Austauschhäufigkeiten (AH) [1/Jahr] für verschiedene Bodenregionen in Niedersachsen für die Zeiträume 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010 und 1991–2020. In Klammern ist die Änderung zu 1961–1990 aufgeführt. Die Mittelwerte entsprechen dem Flächenmittel für die Region.

Bodenregion	Austauschhäufigkeiten (AH) [1/Jahr]			
	1961–1990	1971–2000	1981–2010	1991–2020
Küstenholozän	1,2	1,1 (-0,1)	1,3 (+0,1)	1,2 (0)
Flusslandschaften	0,7	0,7 (0)	0,7 (0)	0,6 (-0,1)
Geest	1,6	1,6 (0)	1,7 (+0,1)	1,6 (0)
Bergvorland	0,6	0,6 (0)	0,6 (0)	0,5 (-0,1)
Bergland	1,0	1,0 (0)	1,1 (+0,1)	1,0 (0)
Mittelgebirge	5,3	5,4 (+0,1)	5,8 (+0,5)	5,3 (0)
Niedersachsen gesamt	1,5	1,5 (0)	1,6 (+0,1)	1,4 (-0,1)

Die höchsten Werte der AH sind in der Periode 1981–2010 mit einem Mittelwert von 1,6 zu verzeichnen. Diese Periode war insgesamt feuchter, so dass hier der Anteil der Flächen mit sehr großem Verlagerungsrisiko auf fast 29 % (1961–1990 ca. 24 %) anstieg (Abb. 5). Während die Anteile der Klassen mit geringem, mittlerem und sehr großen Verlagerungsrisiko gleichblieben, sank der Anteil

der Flächen 1981–2010 in der Klasse „sehr gering“ deutlich. Daraus lässt sich schließen, dass trotz ansteigender jährlicher Mitteltemperaturen in Niedersachsen (1961–1990 8,6 °C zu 1981–2010 9,3 °C; NIKO 2024) und damit höherer Verdunstung das Verlagerungsrisiko ansteigen kann. Viel entscheidender hierfür war der angestiegene Jahresniederschlag im Vergleich der beiden Perioden.

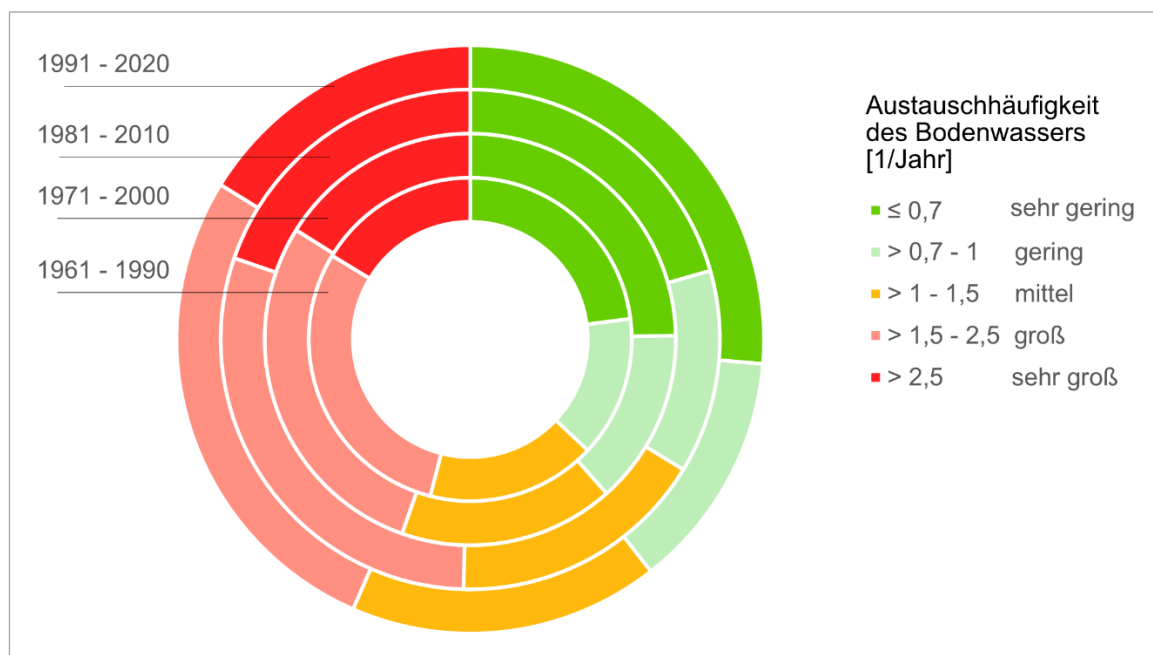


Abbildung 5: Klassenverteilung der Austauschhäufigkeiten in Niedersachsen für unterschiedliche Beobachtungszeiträume. Der innere Kreis zeigt die Ergebnisse für den Zeitraum 1961–1990, die mittleren Kreise die für 1971–2000 sowie für 1981–2010 und der äußere Kreis die Ergebnisse für den Zeitraum 1991–2020.

Die Karte in Abbildung 6 zeigt die absolute Veränderung der AH zwischen den Perioden 1961–1990 zu 1991–2020. Trotz des in Niedersachsen eher gering ausgeprägten Trends sind doch regionale Unterschiede zu verzeichnen. So steigt z. B. die AH südöstlich von Hamburg (Bodenregion Geest) an, was mit höheren Niederschlägen zu begründen ist. Nördlich und nordwestlich von Hannover (ebenfalls Bodenregion Geest) sinken die Austauschhäufig-

keiten und damit das Verlagerungsrisiko von Stoffen. Dies sind die Regionen, bei denen die stärksten Anstiege der Verdunstung und ein Rückgang der Niederschläge in den letzten Jahrzehnten zu beobachten waren. Hervor sticht zudem der östliche Teil des niedersächsischen Harzes. Hier steigen die AH-Werte an. Bei der Bewertung spielt dieser Anstieg jedoch keine große Rolle, da diese Böden weiterhin in der Klasse „sehr große AH“ liegen.

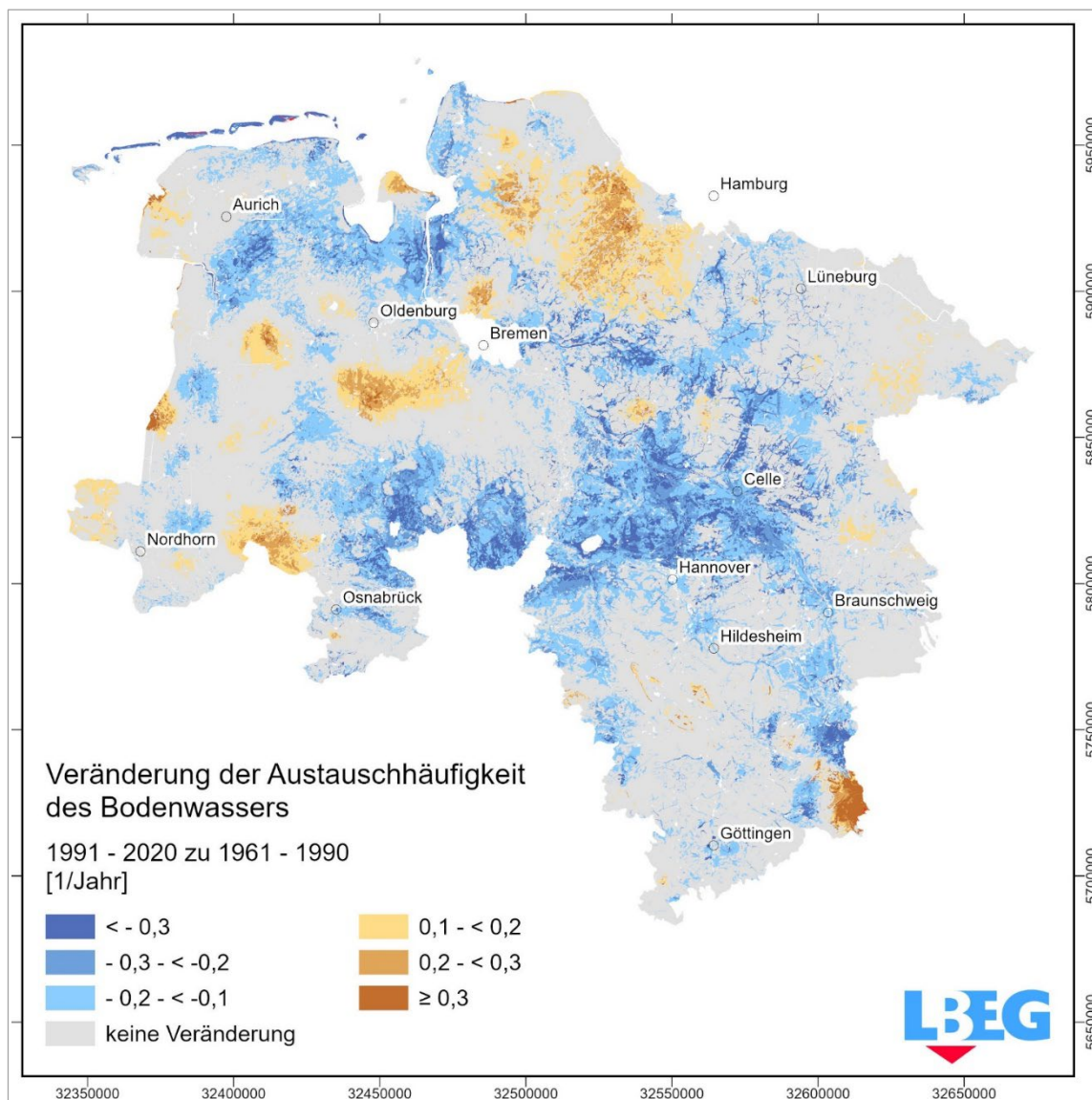


Abbildung 6: Absolute Änderungen der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers 1991–2020 zu 1961–1990 in Niedersachsen.

4.3 Projizierte Veränderungen der Austauschhäufigkeit für die Zukunft

In der Zukunft werden steigende Temperaturen und damit ein Anstieg der Verdunstung erwartet, die Niederschlagsmengen werden hingegen etwa gleichbleiben, aber eher im Winter und weniger im Frühjahr und Sommer fallen (ENGEL et al. 2024). Dies hat auch Auswirkungen auf die Sickerwasserrate und somit auf die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers und das Verlagerungsrisiko von nichtsorbierbaren Stoffen. Während die erhöhte Verdunstung eher zu geringeren Bodenfeuchten und damit geringeren Sickerwasserraten führt, bedeuten höhere Niederschläge im Winter mehr Sickerwasserbildung. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der Ergebnisse des Wirkmodells zu Ermittlung der AH mit Klimaprojektionsdaten.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für die Modellierung mit den Klimaprojektionsdaten des „Kein-Klimaschutz“-Szenarios (RCP8.5). Im linken Teil der Abbildung ist der untere Rand der Bandbreite der berechneten AH (MIN) für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060, mittlerer Kreis) und für die ferne Zukunft (2071–2100, äußerer Kreis) sowie die Ergebnisse für die Periode 1971–2000 (innerer Kreis) als Vergleich dargestellt. Der rechte Teil zeigt den oberen Rand der Bandbreite (MAX).

Bei der Betrachtung des unteren Randes der Bandbreite, der trockenere Verhältnisse repräsentiert (Abb. 7, links), zeigt sich eine deutliche Abnahme des Verlagerungsrisikos sowohl in der Mitte des Jahrhunderts als auch in der fernen Zukunft. Der Anteil der Fläche mit einer sehr geringen AH nimmt von 27 % auf 43 % (Mitte des JH) bzw. 44 % (Ende des JH) zu. Flächen mit einer sehr großen AH werden weniger. 1971–2000 lagen etwa 9 % der Flächen in dieser Kategorie, während es in der Zukunft nur noch 5 % sind. Bei der Betrachtung der stoffhaushaltlich wichtigen Grenze (AH = 1) zeigen die Modellrechnungen für beide Zeiträume eine Zunahme der Fläche mit einer AH <1 von 42 % auf 55 %. Bei Eintreten des unteren Randes der Bandbreite für die AH bedeutet dies, dass in Zukunft auf über 55 % der Flächen die Bodenlösung nicht mehr komplett ausgetauscht wird und damit Stoffe auch im darauffolgenden Jahr den Pflanzen zur Verfügung stehen würden.



Abbildung 7: Klassenverteilung der Austauschhäufigkeiten (Einheit: 1/Jahr) in Niedersachsen für den Beobachtungszeitraum 1971–2000 sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts (2031–2060; 2071–2100) für den unteren (links) und oberen (rechts) Rand der Bandbreite des „Kein-Klimaschutz“-Szenarios.

Bei der Betrachtung des oberen Randes der Bandbreite der AH (Abb. 7, rechts), der besonders feuchten Verhältnissen entspricht, sind im Vergleich gravierende Unterschiede zu beobachten. Im Vergleich zur Periode 1971–2000 fallen deutlich mehr Flächen in die Kategorie „sehr große AH“. Von 9 % steigt der Anteil auf 13 % (Mitte des JH) bzw. 20 % (Ende des JH). Der Anteil der Flächen mit einer AH <1 sinkt im Gegensatz dazu von 42 % auf 36 % (Mitte des JH) bzw. 31 % (Ende des JH). Das bedeutet, dass sich bei Eintreten dieses Zustandes die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers erhöht und mit ihr das stoffliche Verlagerungsrisiko. Dementsprechend ist eine Erhöhung der Gefährdung der Grundwasserqualität durch wenig und nicht sorbierbare Stoffe, wie etwa Nitrat, in Zukunft nicht ausgeschlossen. Bei der Betrachtung des oberen Randes der Bandbreite der Modellergebnisse zeigt sich auch eine Verstärkung der Tendenz im Vergleich der Perioden 2031–2061 zu 2071–2100. Dies ist bei dem unteren Rand der Bandbreite nicht zu beobachten.

Regional sind die festgestellten Tendenzen in den beiden Extrema der Projektionsdaten ausgeprägt, aber räumlich wenig differenziert. Abbildung 8 stellt die Veränderung der AH für die ferne Zukunft dar, einmal für den unteren Rand (links) und einmal für den oberen Rand der Bandbreite (rechts) des „Kein-Klimaschutz“-Szenarios. Die jeweilige Richtung der Veränderung (Abnahme am unteren Rand und Zunahme am oberen Rand der Bandbreite) sind niedersachsenweit zu beobachten. Die Intensität der Veränderung ist in den Bodenregionen Geest und Mittelgebirge besonders groß, während die Veränderungen im Küstenholozän, den Flusslandschaften und insbesondere im Bergvorland eher gering ausfallen. Dies ist plausibel durch die vorherrschenden höheren Feldkapazitäten zu begründen. Die Böden sind dadurch weniger anfällig (weniger sensibel) gegenüber Veränderungen und können ihre Funktion als Regulator im Stoffhaushalt besser (resilienter) ausfüllen.

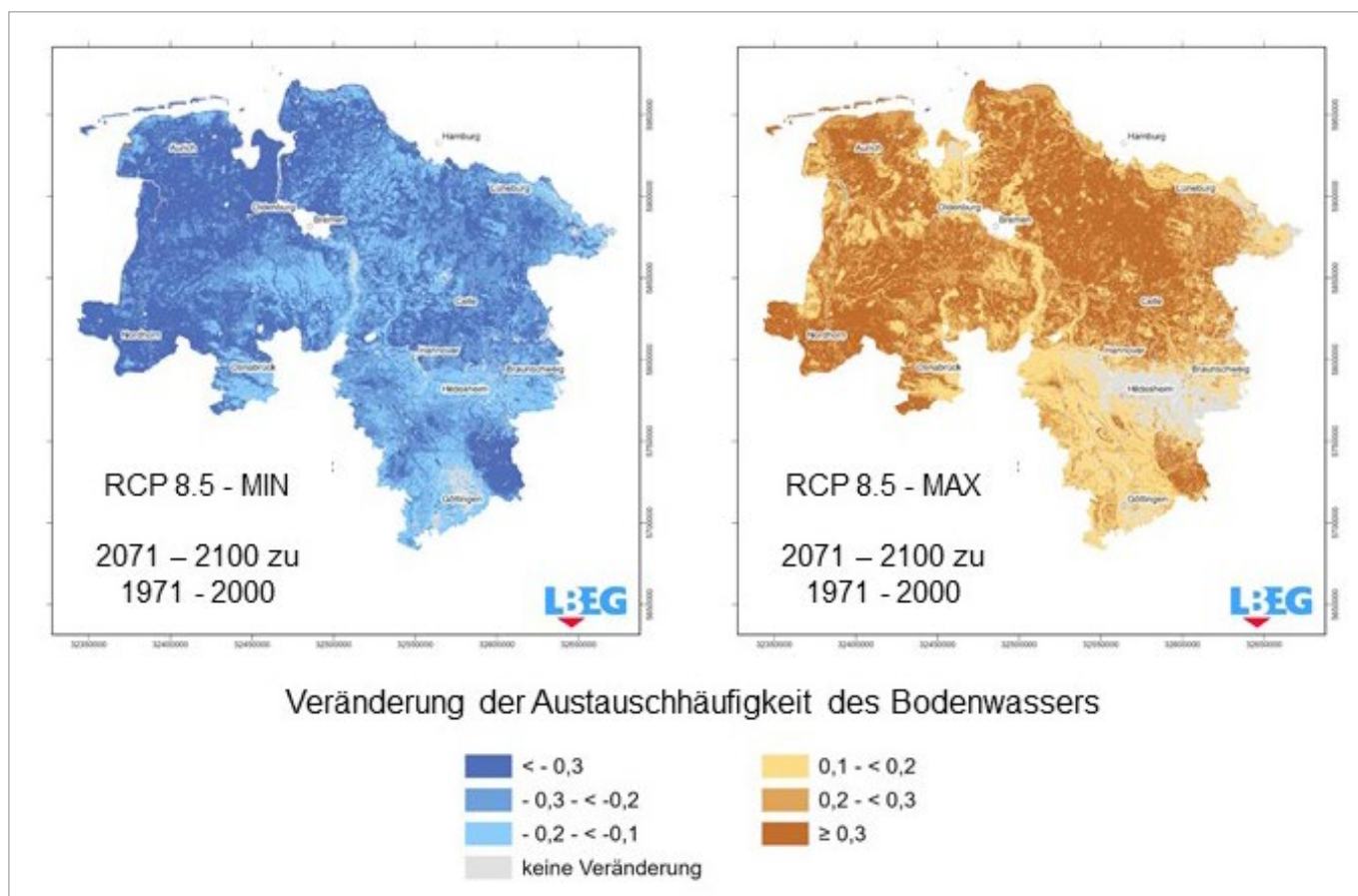


Abbildung 8: Absolute Änderung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers (Einheit: 1/Jahr) 2071–2100 zu 1971–2000 für den unteren (links) und den oberen (rechts) Rand der Bandbreite des „Kein-Klimaschutz“-Szenarios (RCP8.5) in Niedersachsen auf Basis der Landwirtschaftsflächen der BK50.

Die Ergebnisse aus den Karten in Abbildung 8 lassen sich auch in Tabelle 2 wiederfinden. Hier sind die Ergebnisse der Modellierungen für die Bodenregionen zusammengefasst. Neben den Ergebnissen für das „Kein-Klimaschutz“-Szenario (RCP 8.5) sind auch Ergebnisse für das „Klimaschutz“-Szenario (RCP2.6) aufgezeigt. Tatsächlich ergeben sich aber nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Szenarien. Bei beiden Szenarien und für beide Zeitperioden verändern sich landesweit die AH im Mittel nur gering um -0,1 und erreichen damit einen Wert von 1,4. Dieser Wert wurde auch schon in der Periode 1991–2020 erreicht.

Im Vergleich der Bodenregionen zeigen sich die größten Unterschiede im Mittelgebirge. Hier könnte die AH im Maximalfall um 1,1 (RCP 8.5., MIN, 2071–2100) abnehmen, aber auch um 0,5 steigen (RCP 8.5, MAX, 2031–2060). In allen Fällen liegen die Werte im Harz weiterhin in der gleichen Klasse (sehr groß), so dass sich der Zustand des Systems

nicht grundlegend ändern wird. Die geringsten Änderungen zeigen die Bodenregionen Bergvorland und Bergland. Hier sind bei der Austauschhäufigkeit der Bodenlösung auch im Zuge des Klimawandels keine großen Abweichungen zum Stand der letzten 60 Jahre zu erwarten.

Es kann zusammengefasst werden, dass der Klimawandel in Niedersachsen im Mittel der Projektionen nur einen relativ geringen Einfluss auf die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers haben wird. Eine eindeutige Tendenz (Anstieg oder Abnahme) ist nicht, oder wenn, nur sehr schwach zu erkennen. Die Bandbreite der Klimaprojektionsdaten lässt beide Entwicklungen zu. Die Stärke der Veränderung ist im Mittel gering. Jedoch kann es auf einigen Flächen zu einer Veränderung des Stoffhaushaltes kommen, vor allem, wenn der Wert für AH von 1 durch die auftretenden klimatischen Veränderungen unter- oder überschritten wird.

Tabelle 2: Veränderung der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers (Einheit: 1/Jahr) für verschiedene Bodenregionen in Niedersachsen für den Beobachtungszeitraum 1971–2000 und die Zukunftszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 (jeweils für das „Klimaschutz“ (RCP2.6)- und „Kein-Klimaschutz“ (RCP8.5)-Szenario). Der erste Wert gibt jeweils den Mittelwert des Ensembles an, die Werte in Klammern den oberen (MAX) bzw. unteren Rand (MIN) der Bandbreite. Die Werte entsprechen dem Flächenmittel für die Region auf Basis der Landwirtschaftsflächen der BK50.

Bodenregion	Veränderung der Austauschhäufigkeit				
	1971–2000	2031–2060		2071–2100	
		RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
Küstenholozän	1,1	-0,1 (-0,6 – +0,5)	-0,1 (-0,4 – +0,2)	-0,1 (-0,6 – +0,4)	-0,2 (-0,6 – +0,3)
Flusslandschaften	0,7	-0,1 (-0,3 – +0,3)	-0,1 (-0,3 – +0,1)	-0,1 (-0,3 – +0,2)	-0,1 (-0,3 – +0,2)
Geest	1,6	-0,1 (-0,4 – +0,4)	-0,1 (-0,4 – +0,1)	-0,1 (-0,5 – +0,3)	-0,1 (-0,4 – +0,3)
Bergvorland	0,6	+/- 0 (-0,2 – +0,2)	-0,1 (-0,3 – +0,1)	+/-0 (-0,2 – +0,2)	-0,1 (-0,2 – +0,1)
Bergland	1	+/- 0 (-0,2 – +0,2)	-0,1 (-0,3 – +0,1)	+/-0 (-0,2 – +0,2)	-0,1 (-0,2 – +0,2)
Harz	5,4	-0,2 (-0,7 – +0,3)	-0,2 (-1 – +0,5)	-0,2 (-0,7 – +0,3)	-0,4 (-1,1 – +0,4)
Niedersachsen gesamt	1,5	-0,1 (-0,4 – +0,4)	-0,1 (-0,4 – +0,2)	-0,1 (-0,5 – +0,2)	-0,1 (-0,4 – +0,4)

5. Zusammenfassung und Fazit

Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers ist ein Indikator zur Bewertung der Funktion des Bodens als Regulator im Nährstoffkreislauf. Mit Hilfe dieser bodenwasserhaushaltlichen Kenngröße können Standorte dahingehend verglichen werden, wie wahrscheinlich es ist, dass Stoffe, die nicht (oder ggf. nur schwach) im Boden sorbierbar sind, aus dem effektiven Wurzelraum und ggf. weiter in das Grundwasser verlagert werden können. Die Austauschhäufigkeit beschreibt das mittlere Verlagerungsrisiko dieser Stoffe über einen 30jährigen Zeitraum. Sie stellt jedoch nicht den tatsächlichen Input von Nitrat in das Grundwasser dar, da die Konzentration

nicht bekannt ist bzw. sogar von der Sicherungswasserrate abhängt und damit nicht bewertet werden kann.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass insbesondere in den Sandböden der Geest und in den geringmächtigen Böden des Berglandes und des Harzes ein hohes Verlagerungsrisiko vorliegt. Die Böden des Küstenholozäns, der Flusslandschaften, des Bergvorlandes und die lössverkleideten Böden des Berglandes weisen ein geringeres Verlagerungsrisiko auf.

In den letzten 60 Jahren ist keine eindeutige klimabhängige Tendenz der Veränderung des Kennwertes zu erkennen. Während die erhöhten Temperaturen und die damit erhöhte Verdunstung zu einer Verringerung des Risikos beitragen, führt die Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr zu höheren Sickerwasserraten und damit auch zu einem erhöhten Risiko für die Verlagerung von Stoffen. Auch bei der Betrachtung von Klimaprojektionsdaten zeigt sich im Mittel keine eindeutige Tendenz. Die Bandbreite der Ergebnisse lässt eine Entwicklung in beide Richtungen möglich erscheinen.

Unter dem „Kein-Klimaschutz“-Szenario könnte im ungünstigsten Fall das Verlagerungsrisiko für nichtsorbierbare Stoffe in weiten Teilen Niedersachsens ansteigen. Bei gleichbleibenden Stoffkonzentrationen am Ende der Vegetationsperiode bzw. zu Beginn der Sickerwasserperiode könnte dies zu höheren Stoffeinträgen in das Grundwasser führen. Bezüglich Nitrat kann dies bedeuten, dass der Abbau von Nitrat im Boden und vor allem in der gesättigten Zone (Denitrifikation) nicht mehr ausreichen könnte, um die Qualität des Grundwassers, z. B. als Trinkwasser, sicherzustellen, insbesondere, da das Potenzial zur Denitrifikation in der gesättigten Zone aufgrund des damit einhergehenden Abbaus von Pyrit begrenzt ist und so mit der Zeit abnimmt (vgl. NLWKN 2012). Dies könnte dazu führen, dass weitere kostspielige technische Maßnahmen (Brunnenverlagerung, Brunnenvertiefung oder Aufbereitungsverfahren wie Umkehrosmose, siehe UBA 2017) durchgeführt werden müssten, um die Trinkwasserqualität zukünftig zu sichern. Alternativ wären aufwändige, ebenfalls kostenintensive pflanzenbauliche Maßnahmen denkbar, deren Wirksamkeit aber oft begrenzt ist (vgl. NLWKN 2023).

Die vorliegenden Auswertungen machen keine Aussagen über die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser. In Hinblick auf eine qualitative Bewertung der Stoffkonzentration im Sickerwasser und auch im Grundwasser ist daher zu beachten, dass nasse Winter mit hohen Sickerwasserraten einen „Verdünnungseffekt“ haben und zu einer Verringerung der Stoffkonzentration beitragen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Regionen, in denen bereits heute ein höheres Verlagerungsrisiko vorliegt, für die gegenwärtige als auch für die zukünftige Situation Maßnahmenprogramme sowie standortdifferenzierte Nutzungs- und Bewirtschaftungspläne umgesetzt bzw. erweitert werden müssen, damit das Grundwasser sinnvoll geschützt werden kann. Die zukünftig möglicherweise erhöhte Auswaschung von Schad- und Nährstoffen kann zu Belastungen führen sowie bestehende verstärken, wenn keine ausreichenden Maßnahmen in den kritischen Regionen ergriffen werden.

Literatur

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. & SMITH, M. (1998): Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. – United Nations FAO, Irrigation and Drainage paper **56**: 300 S.; Rom.

ANTHONY, F. & HASSELBAUER, R. (1996): Gutachten zur geologisch-bodenkundlichen Kartierung und Erfassung des Bodenwasserhaushaltes der Wasservorranggebiete „Elze“ (Stadt Elze) und „Poppenburg“ (Stadtwerke Hildesheim) als Bewertungsgrundlage der standorttypischen Stoffaustragsgefahr und darauf aufbauenden Empfehlungen zur Verminderung der Nitratbelastung des Grundwassers. – Ingenieurdienst Umweltsteuerung INGUS: 57 Bl., LBEG-Archiv **0126545**; Hannover.

BISCHOFF, N., FIER, A. & NOLTEMEYER, L. (2022): Eignung von Herbst-N_{min}-Werten und schlagbezogenen N-Bilanzsalden zur Abschätzung des N-Austrags mit dem Sickerwasser am Beispiel des Dauerfeldversuches Thülsfelde. – GeoBerichte **44**: 62 S., 22 Abb., 4 Tab., Anh.; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_44_2022.

BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – GeoBerichte **19**; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_19_2020.

DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2016): Bodenfunktionsansprache. Teil 1: Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes. – Arbeitsblatt **DWA-A 920-1**, 12-2016, 67 S.; [ISBN 978-3-88721-381-7].

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST, ABTEILUNG HYDROMETEOROLOGIE (2020): REGNIE: REGIONalisierte NIEederschläge - Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung. – interner Bericht im DWD; Offenbach.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2011): DIN 19732 - Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotenzials von nichtsorbierbaren Stoffen. – 2011-10; Berlin (Beuth).

ENGEL, N. (2000): Bodenkundliche Vorstudie zur Abschätzung der potentiellen Nitratauswaschungsgefährdung aus dem durchwurzelten Boden für das Wasserschutzgebiet Düngel. – 13 S.; Hannover (NLfB).

- ENGEL, N., BUG, J., STADTMANN, R. & HARDERS, D. (2024): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. – *Geofakten* **46**; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geofakt_46_1_2024.
- 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), DOI 10.48476/geober_36_2019.
- GEHRT, E., BENNE, I., EVERTSBUSCH, S., KRÜGER, K. & LANGNER, S. (2021): Erläuterung zur BK 50 von Niedersachsen. – *GeoBerichte* **40**; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geober_40_2021.
- HAJATI, M., HARDERS, D., PETRY, U., ELBRACHT, J. & ENGEL, N. (2022): Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1. – *Geofakten* **39**; Hannover (LBEG), DOI 10.48476/geofakt_39_1_2022.
- MÜLLER, U. (1997): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). – 6. erw. u. erg. Aufl., Technische Berichte zum NIBIS - Bodenkunde; Stuttgart (Schweizerbart).
- NIBIS® Kartenserver: Hannover (LBEG), <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>.
- NIKO (2024): Klimadaten Niedersachsen. – <https://niko-klima.de/klimadaten/>, abgerufen am 11.04.2024.
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2012): Messung des Exzess-N₂ im Grundwasser mit der N₂/Ar-Methode als neue Möglichkeit zur Prioritätensetzung und Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz. – Reihe Grundwasser **15**.
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2023): Trinkwasserschutzkooperationen in Niedersachsen - Grundlagen des Kooperationsmodells und Darstellung der Ergebnisse. Aktualisierung der Tabellen und Abbildungen. Stand: Dezember 2023. – Reihe Grundwasser **57**.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A. & GRATZKI, A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). – *Meteorologische Zeitschrift* **22/3**: 235–256; <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2017): Wieviel zahlen Trinkwasserkunden für die Überdüngung? – https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/factsheet_kosten_nitrat_trinkwasser_0.pdf, abgerufen am 11.04.2024.
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W. H. M. & TRINKS, S. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Teil III: Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. – *Bodenökologie und Bodengenese* **40**: 66–80.

Impressum

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

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

© LBEG Hannover 2024

Version: 27.03.2025

Titelabbildung: Warming Stripes für Niedersachsen in Anlehnung an Ed Hawkins. – Datengrundlage: DWD Climate Data Center (CDC): Jährliche Gebietsmittel der Lufttemperatur (Jahresmittel) in °C (2 m Höhe), Version v19.3, abgerufen am 24.02.2022.

Autorenschaft

- Dr. Jan Bug, Tel.: 0511/ 643-3876
mail: Jan.Bug@lbeg.niedersachsen.de
- Denise Harders, ehemals
Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie
Stilleweg 2, 30655 Hannover
Internet: <https://www.lbeg.niedersachsen.de>
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,
Energie, Bauen und Klimaschutz
Archivstraße 2, 30169 Hannover
Internet: *NIKO – Niedersächsisches Kompetenzzentrum
Klimawandel*