

# Klimawandel – Boden – Bodenschutz

THOMAS VORDERBRÜGGE

Klimawandel, Bodenschutz, Bodenfunktionen, Humus, Kohlenstoffbindung im Boden

**Kurzfasung:** In der aktuellen Diskussion zum Beitrag der Böden für den Klimaschutz stehen die Maßnahmen zum Schutz der Moore im Vordergrund. Ziel ist es hier vor allem, die Treibhausgasemissionen aus den Mooren durch Wiedervernässung und angepasste Nutzung so weit wie möglich zu reduzieren. Aufgabe (nicht nur) des Bodenschutzes ist es aber, **alle** Böden und ihre Funktionen für den Klimaschutz zu erhalten. Nur so können sie ihre vielfältigen Funktionen zum Ausgleich von Klimaextremen wie Hitze oder Sturzregen, zur Kühlung in Siedlungen, zur Sicherung der Biodiversität oder als Speicher für CO<sub>2</sub> erfüllen. Dazu bedarf es eines Schutzes vor Erosion, einer deutlichen Minderung der Umwidmung von Agrarflächen in Flächen für Siedlung, Infrastruktur sowie Logistik und der Umsetzung von Maßnahmen zum Verbleib von Niederschlagswasser in der Landschaft.

## Climate change – soil – soil protection

Climate change, soil protection, soil functions, organic matter, carbon sequestration

**Abstract:** In the current discussion on the contribution of soils to climate protection, the focus is on measures to protect peatlands. The aim here is primarily to reduce greenhouse gas emissions from peatlands as far as possible through rewetting and adapted use. However, the task (not only) of soil protection is to preserve **all** soils and their functions for climate protection. Only in this way they can fulfill their diverse functions of compensating for climate extremes such as heat or torrential rain, for cooling in settlements, for safeguarding biodiversity or as storage for CO<sub>2</sub>. This requires protection against erosion, a significant reduction in the conversion of agricultural land to land for settlement, infrastructure and logistics, and the implementation of measures to ensure that precipitation water remains in the landscape.

### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	38
2	Klimawandel in Hessen und seine Wirkung auf die Böden und ihre Funktionen .....	39
3	Bodenschutz – Klimaschutz – Schutz der Bodenfunktionen .....	48
4	„System“ Boden und Klimawandel .....	49
5	Klimafunktion der Böden – Teilfunktion CO <sub>2</sub> -Speicherung in Form von Humus – „Vorrat – Verteilung – Aufbau – Erhalt“ ..	53
6	Erhalt von Humus in den Böden durch Bodenschutzvorsorge bei Planvorhaben .....	64
7	Erhalt von Humus – Niedermoorschutz .....	68
8	Literatur .....	70

## 1 Einleitung

Mit Inkrafttreten des „Hessischen Gesetzes zum Schutz der Natur und zur Pflege der Landschaft“ (Hessisches Naturschutzgesetz – HeNatG) vom 25.05.2023 (Hessischer Landtag 2023) wird erstmalig in einem Hessischen Umweltgesetz die „Klimafunktion der Böden“ angeführt. Allerdings mit den Einschränkungen, die durch § 2 Satz 1 des Gesetzes vorgegeben werden.

Er lautet: § 2 *Bewältigung der Folgen des Klimawandels*

*(1) Bei der Umsetzung von Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege sowie behördlichen Entscheidungen auf der Grundlage dieses Gesetzes sollen auch Klimaschutz und Klimaanpassung, auch unter Wahrung der Klimafunktion des Bodens, in besonderer Weise Berücksichtigung finden.*

Die originären gesetzlichen Grundlagen zum Schutz der Bodenfunktionen bilden das „Bundes-Bodenschutzgesetz“ (BBodSchG) sowie das „Hessische Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und zur Altlastensanierung“ (Hessisches Altlasten- und Bodenschutzgesetz – HAltBodSchG). Die „Klimafunktion der Böden“ wird in den beiden Gesetzen nicht speziell angeführt. Auch gibt es bisher keine eingeführte Methodik zur umfassenden Beschreibung bzw. zur Bewertung dieser Funktion. Es besteht also zwingend die Notwendigkeit, zunächst einmal die „Klimafunktion der Böden“ zu beschreiben und zu bewerten. Eine weitere Einschränkung im HeNatG besteht dadurch, dass es sich allein um die „Wahrung der Klimafunktion der Böden bei der Umsetzung von Maßnahmen des Naturschutzes bzw. der Landschaftspflege“ handelt.

Aber nicht nur Maßnahmen des Naturschutzes als Beitrag zum Klimaschutz, z. B. grundlegende Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt, können Auswirkungen auf die Bodenfunktionen haben. Auch Maßnahmen zum Schutz vor dem Klimawandel wie der Anbau von Energiepflanzen oder der Bau von Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energie können Böden und ihre Funktionen nachhaltig beeinträchtigen. Andererseits sollen Böden durch ihre Eigenschaften und Funktionen gleichzeitig die Folgen des Klimawandels mindern. Sei es durch die Kühlung der näheren Umgebung, den Erhalt der Biodiversität, die Aufnahme und langfristige Bindung von CO<sub>2</sub> oder die „klimaneutrale“ Produktion von Nahrungsmitteln.

Mit der Verabschiedung des novellierten Naturschutzgesetzes besteht in Hessen also eine gesetzliche Pflicht, zunächst einmal die möglichen Folgen des Klimawandels auf die Bodeneigenschaften und die Bodenfunktionen zu beschreiben und zu bewerten, denn nur so kann bei Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege die Klimafunktion des Bodens entsprechend berücksichtigt werden. Noch wichtiger ist es aber, dass sich möglichst viele Menschen darin bewusst werden, welche außerordentliche Rolle die Böden bei der Bewältigung der Folgen des Klimawandels, vor allem lokal und regional, haben. Dazu sollen die folgenden Ausführungen einen Beitrag leisten.

## 2 Klimawandel in Hessen und seine Wirkung auf die Böden und ihre Funktionen

Für die später aufgezeigten Auswirkungen auf die Böden und ihre Funktionen wird hier von folgenden sechs allgemein anerkannten Annahmen für den Klimawandel in Hessen ausgegangen:

1. Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur,
2. Zunahme der jährlichen Sonnenscheindauer,
3. langjährige Verschiebung der mittleren Jahresniederschläge,
4. erhöhte Verdunstung während der Vegetationszeiten,
5. höhere Variabilität der Jahressummen der Grundwasserneubildung,
6. langanhaltende Trocken- und Dürreperioden.

### Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur mit deutlichen lokalen (innerstädtisch), regionalen und saisonalen Unterschieden

Bei Einhaltung des globalen +2 °C-Zieles wird für Hessen, im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000, für den Zeitraum 2071 bis 2100 von einem Anstieg von ca. 1,1 °C ausgegangen. Die Spannweite der Prognosen reicht von + 0,6 bis + 1,7 °C (HLNUG 2018). Inwieweit diese Prognosen Bestand haben werden, ist offen.



Abbildung 1: Verlauf der mittleren Jahrestemperatur in Hessen in den Jahren 2013 bis 2022 im Vergleich zur langjährigen mittleren Jahrestemperatur im Zeitraum 1991–2020; Quelle: DWD.

Figure 1: Mean annual temperature in Hesse in the years 2013 to 2022 compared to the long-term mean annual temperature in the period 1991–2020; source: DWD.

So lagen bereits die Durchschnittstemperaturen für den Zeitraum 2013 bis 2022, im Schnitt um 0,8 °C über der Referenztemperatur von 9,28 °C (HLNUG 2018). Die Abbildung 1 zeigt die Jahresdurchschnittstemperatur sowie als Bezug den Referenzwert für den Zeitraum der letzten 10 Jahre. In fünf der letzten zehn Jahre lag die Temperatur mit bis zu 1,36 °C sogar deutlich über dem erst für den Zeitraum 2071 bis 2100 prognostizierten Anstieg.

Eine Zunahme der Temperatur ist i. d. R. auch mit der Erhöhung der Bodentemperatur, vor allem in den oberen 30 bis 50 cm des Bodens, verbunden. Dies beschleunigt u. a. die Pflanzenentwicklung, die Nährstoffmobilisierung sowie mikrobielle Umsetzungsprozesse.



Abbildung 2: Sonderkulturanbau in Südhessen ohne Schutz der Oberböden vor hohen Temperaturen durch eine Vegetationsüberdeckung; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 2: Special crop cultivation in southern Hesse without protection of the topsoil from high temperatures by vegetation cover; photo: T. Vorderbrügge.

### Zunahme der jährlichen Sonnenscheindauer

Aber nicht nur die Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperaturen ist für die Böden von Bedeutung, sondern auch die Sonnenscheindauer. Für den Zeitraum 1951 bis 2022 betrug die mittlere jährliche Sonnenscheindauer ca. 1.540 Stunden. Die Spanne liegt zwischen 1.247 Stunden im Jahr 1978 und 2.006 Stunden im Jahr 2003. Ein langjähriger Trend ist nicht zu erkennen. Erst ab 2011 deutet sich eine Zunahme der Sonnenscheindauer an, die nach 2018 noch ausgeprägter ist. Der mittlere Wert für den Zeitraum 2013 bis 2022 liegt bei 1.669 Stunden, also 120 Stunden mehr als im Vergleich zum langjährigen Mittel. Inwieweit sich dieser Trend fortsetzt und wie er sich auf die Bodeneigenschaften und -funktionen auswirken wird, kann man im Moment nur abschätzen.

Eine langanhaltende direkte Sonneneinstrahlung beeinflusst direkt den Oberboden. Das hat große Bedeutung für das Bodenleben, die Umsetzung der organischen Substanz oder den Wasserhaushalt dieser Schicht. Die direkte Einstrahlung

führt zudem zu einer schnellen Ab- und Austrocknung der Oberböden und damit zu einer höheren Anfälligkeit gegenüber Erosion, insbesondere Winderosion. Trockene Böden, insbesondere bei hohen Feinsand- und Humusgehalten, sind zudem schnell hydrophob, also wasserabweisend. Dadurch wird, insbesondere bei starken Niederschlägen in kurzer Zeit, die Infiltration des Niederschlagswassers behindert und der Oberflächenabfluss erhöht. Das gilt besonders für Böden mit Sonderkulturen wie Erdbeeren, Spargel oder Kartoffeln, bei denen die Oberfläche langanhaltend ohne großflächige Vegetationsbedeckung ist (Abb. 2).

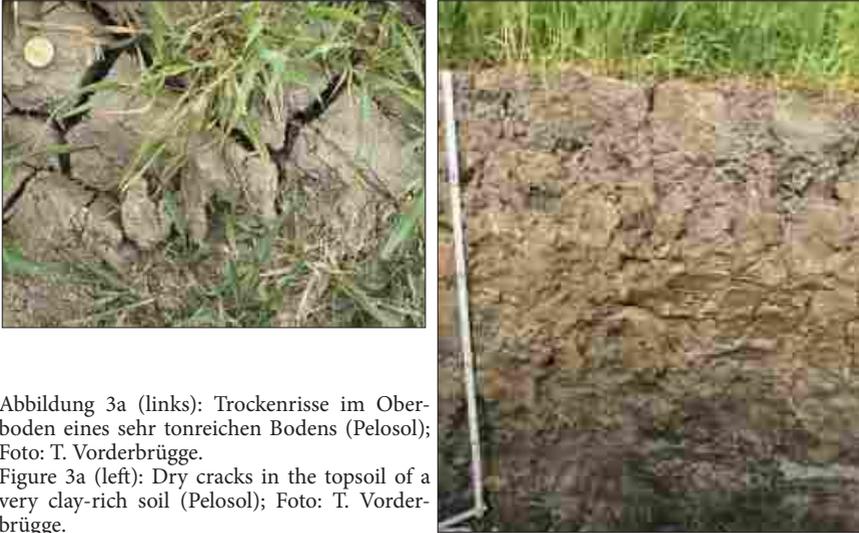


Abbildung 3a (links): Trockenrisse im Oberboden eines sehr tonreichen Bodens (Pelosol); Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 3a (left): Dry cracks in the topsoil of a very clay-rich soil (Pelosol); Foto: T. Vorderbrügge.

Abbildung 3b (rechts): Trockenrisse bis in 70 cm Tiefe im Unterboden des Pelosols; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 3b (right): Dry cracks down to a depth of 70 cm in the subsoil of the pelosol; photo: T. Vorderbrügge.

Bei besonders tonreichen Böden wirkt sich eine langanhaltende Trockenheit völlig anders aus. Im Oberboden werden sehr breite Trockenrisse ausgebildet, die durchaus größere Tiefen erreichen. Im hier dargestellten Profil (Abb. 3) reichen einzelne Risse bis in 70 cm Tiefe. Kommt es dann zu starken Niederschlägen, versickert das Wasser sofort darin.

Folgen unter den tonigen Substraten sandige Ablagerungen (Abb. 4), wird das Wasser sehr schnell in größere Tiefen abgeleitet und steht den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung.

Die Beispiele zeigen, dass der gleiche klimatische Einfluss auf Böden mit unterschiedlichen Eigenschaften, z. B. der Gehalt an Feinsand, Humus oder an Ton, völlig gegenteilige Folgen haben kann.

Da sich aber aktuell ein gewisser anhaltender (?) Trend in der jährlichen Zunahme der Sonnenscheindauer erst andeutet, gibt es noch keine eindeutigen Hin-

weise, welche Folgen für die Bodenfunktionen allein dieser Entwicklung zuzuschreiben sind.



Abbildung 4: Trockenrisse bis in 70 cm Tiefe in einem tonreichen Boden über einem sandigen Substrat; Foto: HLNUG.

Figure 4: Dry cracks down to a depth of 70 cm in a clay-rich soil over a sandy substrate; photo: HLNUG.

#### Langjährige Verschiebung der mittleren Jahresniederschläge

Erwartet wird eine langjährige Verschiebung der mittleren Jahresniederschläge. Die absolute Höhe der Jahresniederschläge in Hessen soll dabei aber weitgehend unverändert bleiben. Allerdings kann es zu deutlichen regionalen Unterschieden kommen. Prognostiziert wird eine Zunahme des Anteils der Winterniederschläge sowie eine Abnahme der Sommer- und Herbstniederschläge. Jedoch sind die aktuellen Beobachtungen nicht ganz in Deckung mit den Trendaussagen. So sind für die Zeitintervalle von 1961–1990 bzw. 1991–2020 für die Niederschlagsverteilung, im Vergleich zum langjährigen Mittel (1881–2000), zwei völlig unterschiedliche Entwicklungen zu beobachten, wie die folgende Tabelle 1 zeigt. Sie wurde von SCHÖNWIESE (2021) unverändert übernommen.

Tabelle 1: Beobachtete Klimatrends in Hessen (Flächenmittel); Quelle: DWD (2021).

Table 1: Observed climate trends in Hesse (area average); data source: DWD (2021)

Klimaelement	Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Niederschlag	1881–2000	+17,2 %	-5,5 %	+4,1 %	+27,1 %	+9,2%
Niederschlag	1961–1990	+7,3 %	-24,5 %	+11,8 %	+28,2 %	+3,2 %
Niederschlag	1991–2020	-9,8 %	+0,1%	-40,9 %	-8,7 %	-14,0 %

Eine Umverteilung der Niederschläge in die Wintermonate hätte vor allem Bedeutung für flach- und mittelgründige oder steinige Böden mit ihrer geringen Speicherfähigkeit für die Niederschläge im Winterhalbjahr. Das Wasser versickert schnell und steht damit im folgenden Jahr der Vegetation nicht zur Verfügung.

#### Erhöhte Verdunstung während der Vegetationsperioden

Durch eine Zunahme der Temperatur im Sommer bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge kann man von einer erhöhten Verdunstung während der Vegetationsperioden ausgehen. Dadurch entsteht u. a. ein erhöhter Bedarf an Wasser für die Bewässerung und Beregnung, insbesondere beim Anbau von Sonderkulturen. Für das „Trockenjahr“ 2003 ging BERTHOLD (2010) für die Beregnung im Hessischen Ried von einem Wasserbedarf von ca. 35,5 Mio. m<sup>3</sup> aus. Für die Böden in den drei Kreisen Bergstraße, Darmstadt-Dieburg und Groß-Gerau errechnete er eine Beregnungsmenge von 52 bis 207 Liter pro m<sup>2</sup>. Dabei unterscheiden sich die Mengen je nach Landkreis, Bodeneigenschaften und Kultur deutlich. Auf das Jahr 2003 folgten in Hessen aber einige Jahre mit durchschnittlichen Niederschlägen, sodass der Bedarf an Wasser zur Beregnung in den Folgejahren sicherlich nicht so hoch war wie im Jahr 2003. Anders sieht es dann für den Zeitraum ab dem Jahr 2018 aus. Seitdem unterschritten die Niederschläge in Hessen die Jahresmittelwerte jährlich um bis zu 27 %. Damit stieg der Bedarf an Beregnungswasser vor allem in Südhessen kontinuierlich an.

#### Erhöhte Variabilität der Grundwasserneubildung

Kommt es nicht nur zu einer Umverteilung der Niederschläge im Jahresverlauf, sondern auch zu einer Abnahme, kann man von einer insgesamt höheren Variabilität der Jahressummen der Grundwasserneubildung ausgehen. Und zwar mit der Tendenz zu einer Abnahme der jährlichen Grundwasserneubildung. Dies führt zu einer zunehmenden Konkurrenz der Bedarfe an Trinkwasser bzw. an Beregnungswasser. Dies gilt vor allem in Regionen mit hoher Besiedlungsdichte bei gleichzeitigem Anbau von stark wasserzehrenden Sonderkulturen. So berechneten ZINKERNAGEL, WEINHEIMER, HERBST et al. (2022) für verschiedene Sonderkulturen

den Gesamtwasserbedarf u. a. für den Standort Geisenheim im Zeitraum März bis Ende Oktober. Der höchste mittlere Bedarf wurde für Rosenkohl berechnet, er liegt für den Zeitraum Mitte Mai bis Ende Oktober bei ca. 740 Liter je m<sup>2</sup>. Der mittlere Gesamtjahresniederschlag der Jahre 2000 bis 2022 lag für Geisenheim aber nur bei 532 Liter je m<sup>2</sup>, der durchschnittliche Niederschlag für den Zeitraum Mai bis Oktober eines Jahres lag sogar bei nur 304 Liter je m<sup>2</sup>. Gedeckt werden somit nur 40 % des mittleren Bedarfs. Der rechnerische Rest von 400 Liter je m<sup>2</sup> musste also durch Beregnung zugeführt werden, sofern die Böden nicht einen hohen Anteil der Winterniederschläge noch zur Verfügung stellen konnten. Ein erhöhter Bedarf an Beregnungswasser, insb. bei Privatgärten, ist häufig gleichzeitig mit dem Trockenfallen von kleineren Fließgewässern im Sommer verbunden. Dies führt zu Einschränkungen, bis hin zu Verboten, für die Entnahme von Wasser für Bewässerung von Kulturen oder in Privatgärten.

### Langanhaltende Trocken- bzw. Dürreperioden

Sich jährlich wiederholende zu geringe Niederschläge erhöhen die Gefahr von langanhaltenden Trocken- bzw. Dürreperioden in den Frühsommer- und Sommermonaten. Dies ist besonders kritisch, wenn zu niedrige Sommerniederschläge mehrere Jahre aufeinander folgen, bzw. die Winterniederschläge nicht ausreichen, um die Vorjahresdefizite auszugleichen. Ertragsunsicherheit bei Getreide und deutliche Ertragsausfälle bei Hackfrüchten wie Mais, Zuckerrüben oder Kartoffeln sind die Folge. Auch einzelne höhere Tagesniederschläge im Herbst können die zu geringen Sommerniederschläge nicht ausgleichen. Die Abbildung 5 zeigt hierzu den Niederschlagsverlauf für den Zeitraum Juli 2021 bis Juli 2023. Blau dargestellt sind die Monate, in denen der Niederschlag den mittleren Monatsniederschlag des Zeitraums 1991 bis 2020 überschreitet. Rot dargestellt sind die Monate, in denen der Niederschlag die mittleren Monatswerte unterschreitet. Im Schnitt fielen im Zeitraum Juli 2021 bis Juli 2023 nur 6 mm weniger als im langjährigen Mittel. Aus Sicht des Bodenschutzes ist diese geringfügige absolute Abnahme der Niederschläge nicht relevant. Von großer Bedeutung sind hingegen die in schneller Abfolge ablaufenden starken Ausschläge der Unter- oder Überschreitung der langjährigen monatlichen Niederschlagsverteilung im Verlauf der Jahre. Zudem zeigt sich, dass auf die z. T. vier Monate andauernden Phasen von unterdurchschnittlichen Niederschlägen jeweils nur ein oder zwei Monate mit höheren Niederschlägen folgen. Höhere Niederschläge erfolgen zudem vor allem als Starkregen und nicht als „typischer Landregen“ über mehrere Tage hinweg, so z. B. in den Monaten Juli 2021, Februar und August 2022 oder März 2023. Auch lässt sich für diesen Zeitraum keine typische Periode ableiten, in der auch künftig mit langanhaltender Trockenheit zu rechnen ist. Waren es im Jahr 2021 die Monate September bis Dezember, so waren es im Jahr 2022 die Monate Mai bis August.

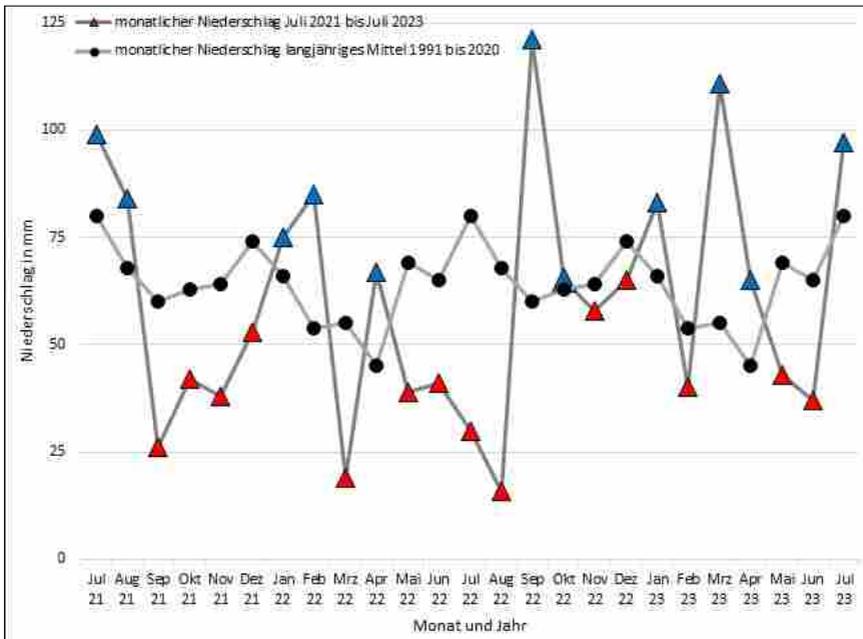


Abbildung 5: Mittlere Monatsniederschläge in Hessen für den Zeitraum Juli 2021 bis Juli 2023 im Vergleich zu den langjährigen mittleren Monatsniederschlägen im Zeitraum 1991–2020. HLNUG (2023 a); Quelle: DWD.

Figure 5: Monthly precipitation in Hesse (area average) for the period July 2021 to July 2023 compared to the long-term mean monthly precipitation in the period 1991–2020. HLNUG (2023 a); source: DWD.

Wenn sich die in der Abbildung dargestellten Muster künftig bestätigen, dann wird es für den Bodenschutz sehr schwer, diesem Wechsel angepasste Strategien zum Erhalt der Bodenfunktionen zu entwickeln.

So wurden sicherlich der Ab- und Umbau von Ernteresten und damit der Aufbau von Humus durch die Trockenheit im Herbst und Frühwinter 2021 beeinträchtigt. Man kann zudem davon ausgehen, dass die Starkniederschläge in den Monaten Juli 2021, September 2022 oder März 2023 lokal zu ausgeprägten Erosionsschäden und damit u. a. zu Humusverlusten geführt haben. Zusätzlich ist zu beachten, dass die in der Abbildung 5 dargestellten Verhältnisse „nur“ die mittleren Werte für Hessen wiedergeben. Regional und lokal dürfte es zu einer Vielzahl unterschiedlichster Abläufe kommen. Dies erschwert die Entscheidungen für ein klimaangepasstes Bodenmanagement.

Zudem können diese abrupten und kurzfristigen Wechsel von Trockenheit und sehr starken Niederschlägen in ihrer Wirkung durch die Böden nur schwer abgepuffert werden. Das führt zu einer extrem schnellen Abfuhr des Niederschlagswassers in der Vorflut, welche kurz darauf schnell wieder trockenfällt. Die Ab-

bildung 6 zeigt ein Gewässer, das drei Tage, nachdem durch einen Starkregen Schlamm und Kiese abgelagert wurden, wieder nahezu trockengefallen ist.

Die sehr hohen Niederschläge sind also nicht im Einzugsgebiet des Gewässers verblieben, um dann langsam abzufließen, sondern sind sofort und mit hoher Energie abgeflossen. Dadurch sind kurz danach nur noch vereinzelte kleine Reste an Bachwasser vorhanden.



Abbildung 6: Kleines trockenfallendes Fließgewässer wenige Tage nach Starkniederschlägen. Das Gewässerbett wurde durch die starken, schnell durchfließenden abgeführten Niederschläge mit Kiesen und Geröll überschüttet; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 6: Small watercourse drying out a few days after heavy rainfall. The bed of the watercourse was covered with gravel and debris due to the heavy, fast-flowing precipitation: photo: T. Vorderbrügge.

Die Ausführungen zeigen, dass es schwierig sein wird, Trends des Klimawandels und insbesondere seine Wirkungen auf die Böden zu quantifizieren, geschweige denn zu regionalisieren. Erschwerend kommt hinzu, dass die unterschiedlichen Ereignisse wie langanhaltende Dürre und Starkniederschläge lokal und regional durchaus gleichzeitig auftreten können.

Die bisher angeführten unterschiedlichen Ausprägungen und Trends des Klimawandels werden durch zahlreiche, bereits erfolgte lokale oder regionale Bodennutzungsentwicklungen (zunehmende Versiegelung, Verlust an Grünland) ergänzt oder überlagert, die die Folgen des Klimawandels auf die Bodenfunktionen deutlich verstärken. So wurden in Hessen im Zeitraum von 2001 bis 2022 ca. 24.700 ha (vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen) in Flächen für Siedlung und Verkehr umgewidmet („verbraucht“) (HLNUG 2023 b). Dies entspricht einer Fläche von 247 qkm und damit genau der aktuellen Flächengröße der Stadt Frankfurt a. M. mit 248 qkm. Unterstellt man, bezogen auf 1 m Tiefe, ein durchschnittliches Wasserspeichervermögen des Bodens von 200 l je m<sup>2</sup> bzw. 2.000 m<sup>3</sup> je ha, entsprechen die 247 qkm einem Speicherverlust an Wasser von 49.400.000 m<sup>3</sup>. Zur Größeneinordnung sei der jährliche Wasserverbrauch in der Stadt Frankfurt mit ca. 52.000.000 m<sup>3</sup> angeführt (Stadt Frankfurt am Main 2023).

Am nachhaltigsten spürbar sind die Folgen des Klimawandels flächenhaft vor allem für die Land- und Forstwirtschaft. Katastrophale Einzelereignisse wie Überschwemmungen im Ahrtal und entlang der Erft mit all ihren Folgen für die Anwohner oder Hitzestress mit ihren Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen sind hierbei selbstverständlich ausgenommen.

Während die Folgen des Klimawandels für die Forstwirtschaft aber anhand zahlreicher geschädigter Flächen für jedermann gut sichtbar sind, ist dies für den Bereich Landwirtschaft nicht so offensichtlich, da sie sich letztendlich vor allem in der Ertragshöhe bzw. -sicherheit abbilden.

Für jedermann nicht sichtbar sind die langfristigen Wirkungen des Klimawandels auf die Böden und ihre Funktionen. Ausnahmen bilden allein die sog. „Schlammfluten“, die häufig nach lokalen Starkregenereignissen durch kleinere Ortschaften in ländlichen Regionen fließen. So zählte das HLNUG an nur drei Tagen im September 2018 hessenweit 29 Starkregenereignisse (> 25 Liter je m<sup>2</sup> Niederschlag in 24 Stunden). Der höchste Wert für ein Einzelereignis im Jahr 2018 betrug 142 Liter je m<sup>2</sup> in 24 Stunden. Er wurde am 7. August an der Anlage „Kirchhain-Kläranlage“ gemessen. An dem Tag fielen ca. 24 % des Gesamtniederschlags 2018. Starkregenereignisse treten aber auch im Frühsommer auf (HLNUG 2019). So registrierte das HLNUG an nur einem Tag im Mai 2019 an 11 Orten in Hessen Niederschläge zwischen 70 und 112 Liter je m<sup>2</sup> in 24 Stunden (HLNUG 2020). Diese Ereignisse werden aber nur sehr selten überregional überhaupt wahrgenommen.

Letztendlich muss man davon ausgehen, dass die oben angeführten klimatischen Auswirkungen des Klimawandels überall in Hessen auftreten werden, wenn

auch in regional unterschiedlicher Ausprägung, aber durchaus mit überregionaler Auswirkung.

### **3 Bodenschutz – Klimaschutz – Schutz der Bodenfunktionen**

Das BBodSchG vom 17.03.1998 wurde vor 25 Jahren verabschiedet und war bis zur Verabschiedung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) am 12.12.2019 das jüngste der Umweltgesetze.

Zweck des BBodSchG ist es, die Bodenfunktionen nachhaltig zu sichern oder wieder herzustellen. Böden sind hochkomplexe Systeme und erfüllen eine Vielzahl von Funktionen. Im Gesetz werden sie unterteilt in die sogenannten „natürlichen Funktionen“, die „Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte“ sowie die „Nutzungsfunktionen“. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist die Funktion des Bodens als Archiv der Naturgeschichte besonders interessant.

So sind Böden auch das Ergebnis von bereits über Jahrtausende oder Jahrmillionen zurückliegenden klimatische Bedingungen. Der Einfluss dieser Bedingungen auf Gestein, Boden und Vegetation wird in Böden quasi „archiviert“ (BORK, H.-R. & BORK, H. 1987). Trotz ihrer großen Bedeutung wird auf diese Funktion aber hier im Weiteren nicht näher eingegangen, da sie vor allem eher zum grundsätzlichen Verständnis der klimatischen Veränderungen auf die Böden und ihre Funktionen beitragen. Die Archivfunktion als solche wird durch den Klimawandel zudem eher nicht beeinträchtigt. Eine Ausnahme gilt allerdings für organogene Böden wie die Moore.

In der aktuellen Diskussion zur Thematik „Klimawandel“ und „Boden“ stehen vor allem die „natürlichen Bodenfunktionen“ sowie die „Nutzungsfunktionen“ im Vordergrund. Die „natürlichen Bodenfunktionen“ werden gemäß BBodSchG aufgeteilt in:

- Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,
- Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers.

Die Nutzungsfunktionen werden gemäß BBodSchG aufgeteilt in die Nutzung als:

- Rohstofflagerstätte,
- Fläche für Siedlung und Erholung,
- Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung,
- Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung.

Die „Klimafunktion“ der Böden wird im BBodSchG als eigenständige Funktion nicht angeführt. Für die Beschreibung und Bewertung der Klimafunktion von Böden müsste deshalb die Rolle und Bedeutung jeder einzelnen Bodenfunktion für diese Fragestellung festgelegt werden. Dies gilt zum einen für die Darstellung der unterschiedlichen Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen durch den Klimawandel. Andererseits tragen die Böden, je nach Ausprägung der einzelnen Bodenfunktionen, auch zum Schutz vor den Folgen des Klimawandels bei. Diese müssten ebenfalls bewertet werden. Erwähnt sei hier die „Kühlungsfunktion“ der Böden mit ihrer herausragenden Bedeutung für die Gesundheit der Menschen im urbanen Raum. Zusätzlich sind aber auch die Wirkungen von Maßnahmen zum Schutz vor den Folgen des Klimawandels auf die Böden und ihre Funktionen zu betrachten. Insbesondere technische Maßnahmen im Bereich der erneuerbaren Energien oder der Umsetzung von Klimaschutz- und Renaturierungsmaßnahmen des Naturschutzes können durchaus mit Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen verbunden sein. Hier ist es eine der Aufgaben des Bodenschutzes, mögliche Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Minderung frühzeitig aufzuzeigen. Könnten doch einzelne Maßnahmen zum Schutz vor dem Klimawandel die Klimafunktion der Böden selbst wieder beeinträchtigen.

#### 4 „System“ Boden und Klimawandel

Böden sind hochkomplexe, durch Pflanzen und Tiere belebte dreidimensionale Systeme, bestehend aus den drei Phasen fest, flüssig und gasförmig. Im System Boden selbst sowie mit der direkten Umgebung findet ein ständiger Austausch von Energie, Stoffen und Wasser statt. Gleichzeitig läuft eine Vielzahl von biologischen und physikochemischen Prozessen im Boden ab. Dadurch befinden sich Böden in einem stetigen Wandel und nie in einem statischen Zustand. So können sich durchaus innerhalb weniger Minuten Eigenschaften und Prozesse im Boden gravierend ändern. Die vielfältige Rolle der Böden und der dort stattfindenden Prozesse im Zusammenhang mit dem Klimawandel lässt sich deshalb nur aufzeigen, wenn man einzelne Funktionen bzw. Eigenschaften und ihre Wechselwirkungen näher darstellt und erläutert.

Der bekannteste der auf und im Boden ablaufenden klimarelevanten Prozesse ist „Aufbau, Umsetzung, Erhalt und Abbau der organischen Substanz (Humus)“ durch die Bodenorganismen. Die Intensität dieser hochkomplexen Prozesse, die immer gleichzeitig ablaufen, wird wiederum sehr stark von den aktuellen physikalischen Bedingungen wie Energieflüsse (Temperaturausgleich), Gasaustausch oder Wassergehalt gesteuert. Zunehmende Wärme intensiviert die biologische Aktivität und damit auch die Umsetzung und den Abbau von Humus, da Humus der Energielieferant für die Bodenorganismen ist. Mit der Umsetzung können

wiederum andere Stoffe wie Stickstoff freigesetzt werden. Diese können, bei einer ungenügenden Aufnahme durch Pflanzen, wiederum mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden. Ist es dagegen zu kalt und zu nass bzw. ist zu wenig Sauerstoff im Boden, reduziert sich die Aktivität der Bodenorganismen und damit der Abbau von organischen Resten wie Stroh und damit der weitere Aufbau von Humus.

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel gelingt es bisher nur, die grundsätzlichen, sich häufig gegenseitig beeinflussenden Prozesse und Zusammenhänge zu beschreiben. Es gibt z. Zt. aber keine Ansätze, wie man „pauschale“ Wirkungen des Klimawandels wie „zu warm“, „zu nass“ oder „zu trocken“ auf die Biodiversität und die durch das Bodenleben gesteuerten Prozesse hinreichend quantifizieren könnte (TIBBETT, FRASER & DUDDIGAN 2020). Erschwerend kommt hinzu, dass die Bodenorganismen durch ihre hohe Diversität in Gänze über ein großes Regenerationsvermögen verfügen. Konsens besteht allerdings darin, dass vor allem langanhaltende Phasen von Trockenheit, Nässe oder Hitze dieses Regenerationsvermögen zahlreicher Arten stark beeinträchtigen können. So können solche Phasen bei Regenwürmern, die eine extrem wichtige Funktion für den Humusaufbau oder für die Aufnahme von Niederschlagswasser haben, große Populationschwankungen und Bestandsverluste verursachen (EHRMANN 2008; PLUM & FILSER 2005; WALTER, BRANDHUBER, BURMEISTER et al. 2016).



Abbildung 7: Ablagerung von mehreren Dezimeter mächtigen Sedimenten auf Grünlandböden in einer Aue nach Starkniederschlägen; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 7: Deposition of sediments several decimetres thick on grassland soils in a floodplain after heavy precipitation: photo: T. Vorderbrügge.

Wie ein kausaler Zusammenhang von Klimawandel, Bodenleben und Aufbau von Humus ausgestaltet sein könnte, wird im Folgenden beispielhaft skizziert.

Starkniederschläge können zu häufigeren und vor allem weiträumigeren Überflutungen führen (Abb. 7). Dabei können, je nach Gewässer, auch mit Schadstoffen oder Plastik belastete Sedimente auf der Bodenoberfläche abgelagert werden.

Die Ablagerung führt zunächst dazu, dass alle größeren luftführenden Hohlräume zugeschlammte und durch die Bodentiere erst wieder geöffnet werden müssen (EHRMANN 2021). Die Sedimente werden dabei durch Bodentiere, vor allem durch die Regenwürmer, aufgenommen und in tiefere Bodenschichten verlagert. Ob und wie sich die möglichen stofflichen Belastungen dann auf die Bodenlebewesen langfristig auswirken, ist vor allem für Plastik kaum erforscht (LÜGGER, KLEIN, SCHUHMACHER et al. 2023).

Insbesondere die Regenwürmer sind wiederum von großer Bedeutung für den Aufbau und die Verteilung bzw. Umverteilung von organischer Substanz im Boden. Mit dem Regenwurmkot werden gegenüber der Aufprallwirkung von Niederschlägen stabile und humusreiche Aggregate an die Bodenoberfläche gebracht (Abb. 8). Diese Aggregate sind damit zugleich Nahrungsgrundlage und Lebensraum für die kleineren Bodentiere.



Abbildung 8: Frischer, gegenüber Regentropfen stabiler Regenwurmkot auf einer verschlammten Bodenoberfläche; Foto: HLNUG.

Figure 8: Fresh earthworm faeces stable to raindrops on a sealed soil surface; photo: HLNUG.

Die große Anzahl an Regenwurmgingen bis in den Unterboden, je nach Boden und Nutzung bis zu mehreren 100 je m<sup>2</sup>, fördert den Gasaustausch und die Infiltration von Niederschlagswasser (Abb. 9). Damit werden wiederum die Lebensbedingungen der sonstigen Bodenlebewesen gesteuert und der Gasaustausch der Pflanzenwurzeln gesichert.



Abbildung 9: Markierte Regenwurmröhren in einem Lössboden in 40 cm Tiefe; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 9: Marked earthworm tubes in a loess soil at a depth of 40 cm; photo: T. Vorderbrügge.

Die Regenwurmgänge sind im Unterboden Hauptleitbahnen für die Pflanzenwurzeln. Die Pflanzenwurzeln erschließen sich so die nähere Umgebung der Leitbahnen und Bodentiefen von durchaus mehr als zwei bis drei Metern. Damit sichern sie die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen. Die abgestorbenen Pflanzenwurzeln sind wiederum Energiequellen für andere Bodenlebewesen und Grundlage für den Aufbau von Humus im Unterboden bzw. Speicherung von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre (Abb. 10).

Diese kurzen Ausführungen zu den Wirkungen einer Sedimentablagerung nach Starkniederschlägen auf Bodenleben, Pflanzenwachstum und Aufbau bzw. Umsatz von Humus zeigen, dass die Klimafunktion der Böden nur beschrieben und bewertet werden kann, wenn man die durch den Klimawandel induzierten komplexen Prozesse und Zusammenhänge auf und im Boden beschreiben und somit auch bewerten kann. Gleichzeitig zeigt sich, dass vom Klimawandel immer mehrere der oben angeführten Bodenfunktionen gleichzeitig betroffen sind. In diesem Beispiel sind dies die „Lebensraumfunktion“ für Tiere und Pflanzen, die „Filter- und Pufferfunktion“ sowie die „Produktionsfunktion“ für die landwirtschaftliche Nutzung.

Schon allein der Humus ist gleichzeitig Energiequelle für Bioorganismen, Rückhalt von Nähr-, aber auch Schadstoffen sowie Lieferant von Nährstoffen für die Ackerkulturen. Die eigentlichen Klimafunktionen des Humus sind damit noch gar nicht erwähnt. Dazu gehören vor allem sein Einfluss auf den Temperaturhaushalt an der Bodenoberfläche und sein Vermögen für sandige Böden, die Speicherfähigkeit an Wasser zu erhöhen, aber auch die Möglichkeit, durch den

Aufbau von Humus der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  zu entziehen. Zumindest in der aktuellen öffentlichen Diskussion scheint letztere die wichtigste Klimafunktion zu sein, die dem Humus und damit dem Boden zugeschrieben wird.



Abbildung 10: Getreidewurzeln in einer Regenwurmröhre im Unterboden einer Pararendzina aus Löss; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 10: Cereal roots in an earthworm tube in the subsoil of a calcaric Regosol of loess; photo: T. Vorderbrügge.

## 5 Klimafunktion der Böden – Teilfunktion $\text{CO}_2$ Speicherung in Form von Humus – „Vorrat – Verteilung – Aufbau – Erhalt“

Grundsätzlich muss es allen bewusst sein, dass alle Böden die „Klimafunktion“ erfüllen, allerdings in durchaus unterschiedlichem Ausmaß und mit unterschiedlichen „Schwerpunkten“. So haben Böden mit einer besonders ausgeprägten Kühlungsfunktion nicht zwingend gleichzeitig auch eine besondere Funktion für den Aufbau von Humus und der damit verbundenen Funktion als Senke für  $\text{CO}_2$ . Um also die im BBodSchG angeführten unterschiedlichen Funktionen eines jeden Bodens grundsätzlich beschreiben, bewerten und schützen zu können, untergliedert

der Bodenschutz eine Funktion immer in mehrere „Teilfunktionen“. Die Klimafunktion könnte man, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, z. B. in die folgenden Teilfunktionen aufteilen:

- Rückhalt von kurzfristig anfallenden großen Mengen an Niederschlagswasser in der Landschaft,
- Kühlung im urbanen Raum,
- Speicherung und Bereitstellung von Grundwasser zur Beregnung in Phasen mit zu geringen Niederschlägen
- Beitrag zur Ertragssicherheit von Kulturpflanzen trotz zu geringer Niederschläge während der Vegetationszeiten,
- Aufbau und Erhalt von Humus als Lebensgrundlage für die Bodenorganismen und als Senke für CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre.

Für die Bewertung der angeführten Teilfunktionen benötigt man entsprechende Kriterien oder Bodenkennwerte wie z. B. den pH-Wert, die Bodenart, das Speichervermögen für Wasser oder den Humusgehalt.

Es werden also immer mehrere Kriterien benötigt, um die „Klimafunktion“ bzw. die zugehörigen „Teilfunktionen“ umfassend bewerten zu können. Die wichtigsten Kriterien sind sicherlich das Speichervermögen an Wasser, eine hohe biologische Aktivität, der Vorrat an Humus sowie das Potential, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch Humusaufbau langfristig zu binden.

Im Folgenden beschränkt sich der Beitrag hauptsächlich auf das Kriterium „Humus“. Ihm wird in der aktuellen Diskussion zum Klimawandel die größte Aufmerksamkeit gewidmet, da man davon ausgeht, dass ein großer Teil der klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Boden zu Humus umgewandelt und vor allem für einen sehr, sehr langen Zeitraum auch gespeichert werden könnte.

Aus Sicht des Bodenschutzes ergeben sich damit vier vorrangige Aufgaben:

- Identifikation und Bewertung von Böden mit überdurchschnittlichen Humusgehalten sowie Entwicklung von Maßnahmen zum Erhalt des Humus sowie zum Schutz vor gasförmigen Verlusten durch Abbau des Humus,
- Identifikation von Böden mit großem Potential zur langanhaltenden zusätzlichen Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch Aufbau von Humus,
- Bereitstellung von Informationen über die unterschiedliche Verteilung der Humusvorräte innerhalb von Bodenprofilen und zur Anpassung von Maßnahmen zum Humusaufbau,
- Sicherung dieser Böden in Planvorhaben vor Eingriffen, die zu nachhaltigen Beeinträchtigungen und Verlusten an Humus führen, sowie zur Minimierung der Folgewirkung von Eingriffen.

Der Humusgehalt kann in „Prozent“ oder in „Tonnen je Hektar“ angegeben werden. Für die Bestimmung in „Tonnen je ha“ werden zusätzlich die Angaben zum Anteil an Grobboden sowie zum Raumgewicht benötigt. Diese Angaben liegen i. d. R. nur punktuell, aber nie flächendeckend vor.



Abbildung 11a und b: Forstböden mit Laubabfall über schwarzem Humus- und mineralischem Horizont; Foto: HLNUG.

Figure 11 a and b: Forest soils with leaf litter over black humus and mineral horizon; photo: HLNUG.

Die Höhe des Humusgehaltes der Böden wird vor allem durch die Nutzung und den aktuellen Wasserhaushalt bestimmt. Die höchsten Humusgehalte werden allgemein für Forstböden erwartet. Die Daten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald ergaben für eine Bodentiefe von 0 bis 90 cm einen mittleren Gehalt von ca. 200 t/ha, mit einer weiten Spanne von weniger als 30 bis zu mehr als 700 t/ha (WELLBROCK, BOLTE & FLESSA 2016). Bei Böden unter Forst unterliegen die Vegetationsreste wie Laubabfall oder Altholz einer vergleichsweise langsamen biologischen Umsetzung. Dadurch entsteht eine Auflage, die als Auflagehumus bezeichnet wird. Bereits in dieser Auflageschicht besteht eine große Spannweite der Humusgehalte. Nach WELLBROCK, BOLTE & FLESSA (2016) liegen sie zwischen 0,3 und 330 t/ha. Häufig stellt dieser den größten Anteil an Humus bei Forstböden dar. Die Abbildungen 11 a und b zeigen solch flachgründige Böden mit dem mehrere cm mächtigen schwarzen Humushorizont.

Bei Böden unter forstlicher Nutzung ist die Wirkung der Vegetation für den Humusaufbau deshalb anders zu betrachten als bei Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung. In letzteren werden die Vegetationsreste vor allem schnell biologisch und mechanisch eingearbeitet und umgesetzt, was zu einer anderen, vor allem gleichmäßigeren Verteilung des Humus in den oberen Horizonten führt. Die Humusgehalte in Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung sind dann aber nicht zwingend niedriger als in Böden unter forstlicher Nutzung.

Die bundesweite Studie zum Humusgehalt der Böden unter landwirtschaftlicher Bodennutzung ergab für eine Tiefe von 0 bis 90 cm einen mittleren Humusgehalt von 212 t/ha. Er liegt damit sogar um ca. 10 t über dem Vorrat der Forstböden. Für Böden unter Ackernutzung liegt er bei ca. 175 t/ha und bei Grünlandnutzung bei 345 t/ha. Die höheren Vorräte für Grünlandböden sind vor allem dadurch zu erklären, dass es sich dabei häufig um hydromorphe (grund- und staunässe geprägt) Böden und organogene Substrate (Moore und moorähnliche Böden) handelt (JACOBS, FLESSA, DON et al. 2018). Ähnlich wie bei den Waldböden sind die Humusgehalte für ackerbaulich genutzte Böden vor allem in dem häufig 30 cm mächtigen Bearbeitungshorizont durch eine weite Spanne gekennzeichnet. Bei den mineralischen Oberböden unter Acker reicht sie von ca. 60 bis ca. 150 t/ha. Bei den mineralischen Oberböden unter Grünland, hier ebenfalls auf die oberen 30 cm bezogen, liegt diese Spanne zwischen ca. 115 und ca. 190 t/ha.

Böden mit extrem hohen Gehalten an Humus sind bekanntermaßen aus organogenen Substraten bestehende Moore. Ihr Schutz bedeutet vor allem Schutz vor weiteren Abbau und den damit verbundenen gasförmigen Verlusten. Mineralische Böden mit überdurchschnittlichen Humusgehalten im Oberboden sind, bundesweit betrachtet, vor allem Podsole, Plaggenesche, Marschen, Gleye oder die tonreichen Pelosole. Die Humusgehalte im Oberboden liegen dort häufig zwischen 3,0 und 3,5 %, während bei anderen Böden die Gehalte häufig zwischen 1,5 und 2,5 % liegen. Diese Zahlen mögen auf den ersten Blick gering erscheinen, sie entsprechen aber 110 bis 150 t Humus je ha. In Hessen haben vor allem Gleye, Auenböden, Kolluvien und Pseudogleye die höchsten Humusgehalte (GLASNER & HELLER 2022)

In Deutschland werden im oberen Meter der landwirtschaftlich genutzten Böden derzeit insgesamt rund 4,3 Mrd. t Humus gespeichert (JACOBS, FLESSA, DON et al. 2018). Diese 4,3 Mrd. t Humus entsprechen ca. 9,1 Mrd. t CO<sub>2</sub>eq.

Um die beiden letzten Zahlen richtig einordnen zu können, sei die im Jahr 2022 in Deutschland emittierte Menge an Treibhausgasen von 746 Mio. t CO<sub>2</sub>eq gegenübergestellt. Sie entspricht bereits 8,2 % der im Ackerboden gespeicherten Menge an CO<sub>2</sub>. Rein rechnerisch entspricht somit die in landwirtschaftlich genutzten Böden gespeicherte Menge an CO<sub>2</sub>eq dem Ausstoß der Jahre 2012 bis 2022 mit insgesamt ca. 9,44 Mrd. t CO<sub>2</sub>eq (Umweltbundesamt 2023). Anders ausgedrückt, um die in Deutschland 2022 emittierte Menge an CO<sub>2</sub>eq in Form von Humus zu binden, hätten 351 Mio. t Humus gebildet werden müssen, ohne dass gleichzeitig Humus im Boden abgebaut und gasförmig verloren gegangen wäre.

Bezogen auf die Ackerfläche in Deutschland im Jahr 2021 von 11,6 Mio. ha bedeutet dies den Aufbau von ca. 32 t Humus je ha. Da Humus vor allem in den oberen 30 cm aufgebaut wird, muss auch die Menge an Humus, die zusätzlich aufzubauen ist, auf die oberen 30 cm bezogen werden. Für die Bundesrepublik beträgt der durchschnittliche Humusvorrat in den oberen 30 cm Ackerkrume ca. 105 t/ha. Das bedeutet, dass der Vorrat nahezu alle drei bis vier Jahre um jeweils

105 t erhöht werden müsste, um die bundesweiten Emissionen an Treibhausgasen vollständig zu kompensieren.

Die aktuelle Studie des Umweltbundesamtes geht für Deutschland allerdings von einem Minderungspotential durch Humusaufbau von nur 1,4 Mio. t CO<sub>2</sub>eq im Jahr aus (FRELH-LARSEN, RIEDEL, HOBEIKA et al. 2022). Dieses Potential wurde zudem für Acker- und (!) Grünlandnutzung berechnet. Dies entspricht theoretisch einem Aufbau von insgesamt ca. 0,66 Mio. t Humus im Jahr. Je ha berechneten die Autoren ein Minderungspotential von 0,42 t CO<sub>2</sub>eq im Jahr, dies entspricht ca. 0,19 t Humus je ha.

Diese Zahlen zeigen eindrücklich, dass im Grunde nur ca. 2 % der jährlichen Treibhausgasemissionen im Boden als zusätzlicher Humus gespeichert werden könnten

Da, wie bereits erwähnt, Humus aber stetig um- und abgebaut wird, kommt es aktuell auch zu ständigen Treibhausgasemissionen aus dem Boden. Die weithin bekannteste ist sicherlich der Abbau von organogenen Böden wie den Hochmooren oder den Nieder- und Anmooren, die vor allem in Auenlandschaften ausgebildet wurden. Ursache für den Verlust sind i. d. R. anthropogene Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt. Die Höhe der Emissionen aus den Böden beträgt im Schnitt 18 Mio. t CO<sub>2</sub>eq im Jahr. Der Anteil an den Gesamtemissionen liegt somit bei ca. 2 %. Im bereits oben angeführten Zeitraum von 2012 bis 2022 emittierten insgesamt ca. 214 Mio. t CO<sub>2</sub>eq aus den Böden. Dies entspricht einem gasförmigen Verlust von insgesamt 100 Mio. t Humus, also etwa 8,5 Mio. t Humus im Jahr. Es ist offensichtlich, dass diese Mengen nicht durch den Aufbau von Humus in mineralischen Böden kompensiert werden können. Deshalb ist es vorrangiges Ziel des bodenbezogenen Klimaschutzes, die Treibhausgas-Emissionen aus dem Boden so weit wie möglich zu reduzieren.

Hinzu kommt, dass aus Sicht des Grundwasserschutzes bestimmte Humusgehalte nicht überschritten werden sollten. So kann man davon ausgehen, dass bei einem Humusgehalt von 4 % in den oberen 30 cm ca. 18 t Stickstoff je ha im Humus gespeichert sind. Da Humus fortwährend auch abgebaut wird, werden zeitgleich entsprechende Mengen an Stickstoff freigesetzt. Wird dieser Stickstoff nicht von Pflanzen aufgenommen, besteht die große Gefahr, dass er ins Grundwasser transportiert wird. Man sollte deshalb bedenken, dass in den Böden, die jetzt schon überdurchschnittliche Humusgehalte aufweisen, nicht noch nennenswerte Mengen an Humus zusätzlich gespeichert werden sollten, zumal ein Humusaufbau immer mit einer Zufuhr von weiterem Stickstoff verbunden ist. Damit sollten sich aus Sicht des Bodenschutzes Maßnahmen zum Aufbau von Humus auf die Böden konzentrieren, die aktuell durch sehr geringe Gehalte nicht nur im Oberboden, sondern auch im Unterboden gekennzeichnet sind. Hierzu gehören bspw. Böden aus Rohlöss, wie sie z. B. auf den Rekultivierungsflächen des Braunkohle-tagebaus zu finden sind. Die Abbildung 12 zeigt solch ein Profil.



Abbildung 12: Auftragsboden aus Rohlöss mit sehr geringen Humusgehalten im Ober- und Unterboden; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 12: Technosol from loess with very low humus contents in the topsoil and subsoil; photo: T. Vorderbrügge.

Hierzu sollte man aber auch wissen, wie unterschiedlich Humus in den verschiedenen Böden verteilt ist, denn grundsätzlich ist es einfacher, den Humus im Boden zu erhalten als neuen Humus aufzubauen.

Grundlage für eine zielgenaue Maßnahmenumsetzung zum Aufbau von Humus sind deshalb Informationen zur räumlichen Verteilung bzw. Konzentration von Humus in den einzelnen Bodenprofilen.



Abbildung 13 a (links): Pseudogley aus Löss mit einem Humusvorrat von etwas mehr als 150 t je ha; Foto: HLNUG.

Abbildung 13 b (rechts): Kolluvium aus Löss mit einem Humusvorrat von etwas mehr als 200 t je ha; Foto: HLNUG.

Figure 13 a (left): Stagnogley of loess with a humus stock of slightly more than 150 t per ha; photo: HLNUG.

Figure 13 b (right): Loess colluvium with a humus stock of slightly more than 200 t per ha; photo: HLNUG.

Die bundesweite Erhebung der Vorräte an Humus im Boden ergab, dass im Schnitt ca. 60 % der Vorräte in den oberen 30 cm gespeichert werden. Bei einigen Böden werden aber nahezu 80 bis 90 % in den oberen 30 cm gespeichert. Ein typisches Beispiel hierfür zeigt die Abbildung 13 a. Das Profil liegt in einer Lösslandschaft in Nordhessen. Ab 38 cm Tiefe findet man Humus nur noch an den Aggregatoberflächen und in den Regenwurmgingen. Die scharfe Grenze in 38 cm Tiefe ist Ergebnis einer regelmäßigen Pflugarbeit. Der Erhalt des Humus wird also vor allem durch eine angepasste Bodenbearbeitung und regelmäßige Zufuhr an organischer Substanz gewährleistet.

Auf einer Fläche von einem ha sind in den oberen 38 cm nicht ganz 150 t Humus gespeichert, in den folgenden 70 cm nur noch ca. 5 t, insgesamt also mehr als 150 t. Im Vergleichsprofil (Abb. 13 b), das sich nur ca. 1,5 km vom ersten Profil entfernt befindet, ist der Humusgehalt in den oberen 40 cm deutlich geringer. Dies



Abbildung 14 a bis 14 d (von links oben nach rechts unten): Verteilung von Humus in vier typischen Böden im Hessischen Ried; Fotos: HLNUG.

Figure 14 a until 14 d (from top left to bottom right): Distribution of humus in four typical soils in the Hessian Ried; photos: HLNUG.

ist an der Färbung zu erkennen. Hingegen ist der Humusgehalt im Unterboden deutlich höher. Während bei diesem Profil der Humusvorrat im Oberboden nur ca. 75 t/ha beträgt, sind es für den Unterboden ca. 127 t/ha. Insgesamt beträgt der Vorrat hier also ca. 200 t/ha und ist damit um ca. 50 t/ha größer als im linken Profil. Obwohl das rechte Profil auf den ersten Blick humusärmer scheint, ist der Vorrat doch insgesamt deutlich höher.

Die beiden Profile zeigen die beiden „Extrema“ der Humusverteilung innerhalb eines Profils in einer Lösslandschaft. Sie liegen zwischen „fast vollständig im Oberboden“ und „gleichmäßig verteilt über das gesamte Profil“. Die in der Abbildung 14 gezeigten Profile befinden sich in Südhessen in einem anderen Landschaftsraum, dem Hessischen Ried. Die vier Profile liegen ebenfalls nur wenige Kilometer voneinander entfernt und die jeweiligen klimatischen Bedingungen sind mehr oder weniger identisch. Aber auch hier zeigt die Humusverteilung im Profil wieder völlig unterschiedliche Muster. Zum einen die typische Konzentration im bearbeiteten Oberboden (Abb. 14 a) ähnlich wie im Profil der Abbildung 13 a. Im nächsten Profil (Abb. 14 b) ist der Humus zu großen Teilen ebenfalls in den oberen 30 cm zu finden. Allerdings folgt direkt darunter eine ebenfalls humose Schicht. Ab 70 cm sind ungleich verteilte humose Bereiche bis in 2 m Tiefe zu erkennen. Dabei handelt es sich um alte Wurzelbahnen, Regenwurmgänge und mit humosem Material verfüllte größere Tiergänge. Im dritten Profil (Abb. 14 c) lagert ebenfalls viel Humus im Oberboden, aber farblich deutlich schwächer ausgeprägt. Auffällig ist aber vor allem die dunkle Schicht in 100 cm bis 140 cm Tiefe. Hierbei handelt es sich um eine Lage aus Niedermoortorf, die aktuell aber nicht mehr im Bereich des Grundwassers liegt. Man kann also von einer ständigen Durchlüftung und damit einem Abbau des Torfs ausgehen. Im vierten Profil (Abb. 14 d) ist bereits ab 50 cm ein anmooriger Bereich, gefolgt von 50 cm Niedermoortorf, erkennen. Auch dieses Profil unterliegt aktuell nicht mehr dem Einfluss des Grundwassers.

Die in der Abbildung 15 dargestellten Profile liegen hingegen aktuell noch im Einflussbereich des Grundwassers. Zur Profilaufnahme wurden die Gruben leer geschöpft. In einem normalen Frühjahr liegt der Grundwasserspiegel zwischen 30 und 50 cm unter Flur.

Bei beiden Profilen liegt eine tonreiche mineralische Überdeckung von ca. 40 bis 50 cm Mächtigkeit auf den organogenen Substraten (Niedermoortorf). Die tiefschwarze Färbung der oberen 50 cm im linken Profil ist dadurch bedingt, dass hier im Laufe der Jahre immer wieder sehr humoses tonreiches Material durch Überflutung abgelegt wurde. Der hohe Tonanteil konserviert die organischen Bestandteile und schützt durch stabile Ton-Humusverbindungen vor raschem Abbau der organischen Substanz. Die mineralische Überdeckung im rechten Profil ist das Ergebnis von Bodenerosion. Auch hier schützt das immer wieder hochanstehende Grundwasser den Humus vor Umsetzung und Abbau. Der Niedermoortorf unterhalb der ca. 50 cm mächtigen mineralischen Auflage wird in beiden Profilen vor Umsetzung und gasförmige Verluste vor allem durch das hoch anstehende

Grundwasser geschützt. Die mineralische Überdeckung schützt also vor allem vor intensiver Austrocknung in Phasen von niedrigeren Grundwasserständen.



Abbildung 15 a (links) und 15 b (rechts): Verteilung von Humus in zwei typischen Böden im Hessischen Ried; Fotos: HLNUG.

Figure 15 a (left) and 15 b (right): Distribution of humus in two typical soils in the Hessian Ried; photos: HLNUG.

Die weitere Entwicklung des Niedermoores wurde durch die Veränderung des großräumigen Wasserregimes (und der Ablagerungsverhältnisse) gestoppt und von einer stetigen Überlagerung von mineralischem Material abgelöst. Damit verbunden war dann im Laufe der Zeit auch die Entwicklung einer anderen Vegetation. Man kann davon ausgehen, dass die Flächen nach ausreichender mineralischer Überdeckung zunächst als extensives Grünland genutzt wurden. Dadurch wurde eine typische Niedermoorvegetation aus Schilf, Seggen, Erlen oder Weiden zurückgedrängt. Inzwischen werden beide Profile als Acker genutzt. Einen weiteren Aufbau von Niedermooortorfen kann man somit ausschließen.

Die sechs Profile zeigen eindrucksvoll, dass standardisierte Maßnahmen zum Aufbau oder Erhalt von Humus als Maßnahme zum Klimaschutz ohne detaillierte Kenntnisse über die verschiedenen Böden, die jeweilige Humusverteilung innerhalb der Profile sowie den historischen und aktuellen Wasserhaushalt kaum zu Erfolg führen werden.

Aber nicht nur landwirtschaftlich genutzte Böden sind durch z. T. sehr hohe Humusgehalte gekennzeichnet. Böden, die im Kontext mit dem Klimawandel als mögliche Quelle von Treibhausgasen in Frage kommen, sind z. B. auch „Gartenböden“, vom Bodenkundler als „Hortisole“ bezeichnet. Die Abbildung 16 zeigt ei-



Abbildung 16 a – 16 c (von links oben nach links unten): Typischer Kleingarten sowie zwei typische Gartenböden in Ostwestfalen; Fotos: Geologischer Dienst NRW, A. Deppe.

Figure 16 a – 16 c (from top left to bottom left): Typical allotment garden and two typical Hor-tisole in East Westphalia; photos: Geological Survey NRW, A. Deppe

nen typischen Kleingarten und zwei typische Gartenböden in Ostwestfalen. Die beiden Gärten werden seit 100 bzw. mehr als 300 Jahren genutzt. In dieser Zeit

wurde in den oberen 60 bis 70 cm Humus aufgebaut, was gut an den farblichen Unterschieden zu erkennen ist. Am zweiten Profil ist auch sehr schön zu sehen, wie der Humus vor allem in den Regenwurmbahnen im Unterboden angereichert wurde. Die Vorräte an Humus in den beiden Böden liegen zwischen 300 und 450 t je ha, also doppelt so hoch wie in einem durchschnittlichen Ackerboden. So hohe Vorräte sind zwar nicht die Regel, aber die Werte zeigen, dass auch innerhalb oder direkt am Rande von Siedlungen Böden mit sehr hohen Humusgehalten anzutreffen sind.

Das letzte Beispiel zeigt, dass Maßnahmen zum Humuserhalt nicht nur im Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung erforderlich sind, sondern z. B. auch im Bereich der Kleingärten. Gerade diese Böden haben zudem ein hohes Wasserspeichervermögen und dadurch eine sehr hohe Kühlungsfunktion für die nähere Umgebung der Flächen,

Um also die jeweilige Klimafunktion der unterschiedlichsten Böden beschreiben zu können und sie gemäß den Vorgaben des BBodSchG vor weiteren Verlusten zu schützen, benötigt man hinreichende Informationen zum Vorkommen und zur Verteilung in der Landschaft, zur aktuellen und historischen Nutzung, zum Gehalt an Humus sowie zur Verteilung des Humus innerhalb eines Bodenprofils.

## **6 Erhalt von Humus in den Böden durch Bodenschutzvorsorge bei Planvorhaben**

Da der Aufbau von zusätzlichem stabilem Humus im Grunde mengenmäßig ein nur sehr geringes Potential hat, ist im Hinblick auf den Klimawandel und die Bedeutung des Humus zum Schutz vor den Folgen des Klimawandels aus Sicht des Bodenschutzes vorrangig der Schutz vor weiteren Humusverlusten zu gewährleisten.

Klimatisch und anthropogen bedingte Ursachen für einen Humusverlust sind vor allem:

1. ein möglicherweise grundsätzlich erhöhter Humusabbau durch den prognostizierten Temperaturanstieg,
2. Eingriffe in den Wasserhaushalt insb. von Niedermooren z. B. durch Grundwasserabsenkung infolge eines erhöhten Beregnungsbedarfs, Baumaßnahmen oder durch die sogenannte „Entfesselung“ von Gewässern,
3. Starkniederschläge und erosiver Abtrag des humosen Oberbodenmaterials,
4. Oberbodenabtrag beim Bau von Infrastruktur, Siedlungs- und Gewerbeflächen und die daraus resultierenden Maßnahmen des Naturschutzes zur Aushagerung und der Erstellung und weiteren Entwicklung von sog. „Magerstandorten“.

Für die unter zwei bis vier angeführten Ursachen für Humusverluste und damit zusätzliche Freisetzung von Treibhausgasen werden zunächst einige Beispiele auf-

gezeigt. Die Abbildung 17 zeigt den freigelegten Uferbereich eines Kleingewässers mit humosem, fast anmoorigem Oberboden. Der Bereich wurde während starker Niederschläge unterspült. Das humose Oberbodenmaterial wurde z. T. schon abgeführt bzw. wird bei den nächsten stärkeren Niederschlägen fortgeschwemmt. Eine Ablagerung der Sedimente durch Überflutung der Böden im weiteren Verlauf der Aue war nicht möglich, sodass die Sedimente in die nächst größeren Gewässer eingetragen wurden.



Abbildung 17: Freigelegter, unterspülter Uferbereich eines Kleingewässers als Folge einer Entfesselung; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 17: Exposed, undercut bank area of a small water body as a result of an unleashing; photo: T. Vorderbrügge.

Der Verlust an humosen Oberbodenmaterial durch Erosion ist sicherlich die bekannteste Ursache. Die Abbildung 18 zeigt eine Ackerfläche nach Starkniederschlägen. Starkniederschläge bewirken u. a., dass die Bodenaggregate zerschlagen und vor allem die feineren Bodenteilchen wie Schluff und Humus abgeführt werden. Humus wird in den Bodenaggregaten fest an Tonteilchen gebunden. Werden diese Aggregate zerschlagen, wird der Humus noch leichter abgeführt bzw. ungleichmäßig auf der Bodenoberfläche verteilt.

Die etwas braunereren „Schlieren“ auf der Oberfläche zeigen die Bereiche, in denen mehr Ton und Humus abgelagert wurden, die helleren die Bereiche, in denen vor allem der Schluff abgelagert wurde. Diese Trennung von Humus, Ton und Schluff ist rein technisch nicht zu beheben.



Abbildung 18: Erosion nach Starkniederschlägen mit Trennung von Ton- und Humusteilchen als Folge der Zerschlagung von Bodenaggregaten; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 18: Erosion after heavy precipitation with separation of clay and humus particles as a result of the break-up of soil aggregates; photo: T. Vorderbrügge.



Abbildung 19: Anlage eines Trockenbiotops für die „Blaüflügelige Ödlandschrecke“ (*Oedipoda caerulescens*; LINNAEUS, 1758) nach Abtrag des humosen Oberbodens und Auftrag von nicht standorttypischen Material in Wiesbaden; Foto: T. Vorderbrügge.

Figure 19: Creation of a dry biotope for *Oedipoda caerulescens* after removal of the humus topsoil and application of non-site-typical material in Wiesbaden; photo: T. Vorderbrügge.

Für die Wirkung von Maßnahmen des Naturschutzes seien zwei Beispiele angeführt. Im Rahmen einer Ersatzmaßnahme für eine Versiegelung wurde als Ausgleich ein Habitat für die „Blaüflügelige Ödlandschrecke“ (*Oedipoda caerulescens*) angelegt. Hierfür wurde der natürlich gebildete und 30 cm mächtige Oberboden zunächst abgetragen sowie anschließend Blockschutt, Kies, Sand, Holz und stellenweise humoses Material aufgetragen (Abb. 19).

Hier muss man davon ausgehen, dass der Humus zum großen Teil mineralisiert wurde und entsprechend verloren gegangen ist. Nach Auftrag des Schotter wird mangels ausreichender Vegetation künftig nur extrem wenig Humus gebildet werden.

Neben der Anlage von Trockenbiotopen hat auch die Anlage von Feuchtbiotopen eine große Bedeutung als naturschutzfachliche Kompensationsmaßnahme zum Ausgleich oder Ersatz für den Flächenverlust in Folge von, ganz allgemein gesprochen, Baumaßnahmen.

Das Beispiel in Abbildung 20 zeigt die Anlage eines Kleingewässers auf der Fläche einer ehemaligen Kleingartenkolonie. Auch hier wurde der humose Oberboden vollständig abgetragen.



Abbildung 20: Anlage eines Kleingewässers nach Abtrag des Oberbodens; Foto: Ing. Büro N. Feldwisch.

Figure 20: Creation of a small water body after removal of the topsoil; photo: Ing. Büro N. Feldwisch.

Die Beispiele zeigen, dass das Thema Humus und Humuserhalt nicht nur auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen zu beachten ist, sondern auch auf den vermeintlich kleinen Garten- und Grünflächen im kommunalen Bereich, die ja durchaus hohe Vorräte an Humus enthalten können.

Eingriffe in den Oberboden finden aber hauptsächlich statt bei der Umwidmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen in Flächen für Siedlung, Gewerbe und Infrastruktur, i. d. R. sind dies Flächen mit hochwertigen Böden und herausragender Funktionalität. EGGLESTON, BUENDIA, MIWA et al. (2006) gehen bei ihrer Berechnung der Emissionsinventare davon aus, dass ca. 20 % des auf diesen Flächen vorhandenen Humus freigesetzt werden. In der Fachliteratur belaufen sich diese Schätzungen auf eine Größenordnung zwischen 10 und 80 % (FELDWISCH & KOUMANS 2023).

Zurzeit werden in Deutschland täglich ca. 55 ha Fläche umgewidmet, dies entspricht einer Fläche von ca. 20.000 ha pro Jahr. Unterstellt man einen durchschnittlichen Gehalt von 105 t Humus im Oberboden, handelt es sich um ca.

2.100.000 t Humus, die betroffen sind. Folgt man der Annahme von EGGLESTON, BUENDIA, MIWA et al. (2006), dass ca. 20 % gasförmig verloren gehen, entspräche dies einem jährlichen Verlust von 420.000 t Humus bzw. einer Treibhausgas-Emission von ca. 890.000 t CO<sub>2</sub>eq. Die entsprechenden Werte für Hessen, bei einer Flächenumwidmung von ca. 750 ha im Jahre, belaufen sich auf einen Humusverlust von 13.200 t bzw. einer Freisetzung von 28.000 t CO<sub>2</sub>eq.

Eine Flächenumwidmung führt aber nicht nur zu direkten Humusverlusten. Diese Flächen stehen auch für eine Speicherung von Humus nicht mehr zur Verfügung. Zusätzlich können, wie oben gezeigt, einzelne Kompensationsmaßnahmen durch den Naturschutz zu weiteren deutlichen Verlusten an Humus führen.

## 7 Erhalt von Humus – Niedermoorschutz

Ein herausragender Beitrag der Böden zum Schutz vor dem Klimawandel wird in der breiten Öffentlichkeit vor allem in ihrer Funktion als Kohlenstoffspeicher gesehen. Wie aber bereits oben gezeigt, ist das zusätzliche Speichervermögen von CO<sub>2</sub> im Boden durch den Aufbau von Humus mengenmäßig eng begrenzt. Die Maßnahmen, die das größte Potential zum Aufbau von Humus besitzen, sind in der Regel mit einem Nutzungswandel verbunden. Dazu gehören z. B. die Wiedervernässung, die Umwandlung von Ackerflächen in Grünlandflächen oder die Entwicklung von Agroforstsystemen (FRELH-LARSEN, RIEDEL, HOBEIKA et al. 2022). Alle Maßnahmen sind zudem mit Eingriffen in die Betriebsabläufe der Landwirtschaft verbunden. Eine Umnutzung von Ackerflächen in eine Grünlandnutzung bedeutet ja nicht zwingend, dass es für die Ernteprodukte auch einen entsprechenden Absatzmarkt gibt. Ein nennenswertes Potenzial für den Humusaufbau durch eine Umnutzung besitzen zudem nur die Flächen, die vor allem durch Eingriffe in den Wasserhaushalt wie der Absenkung des Grundwasserspiegels ackerfähig geworden sind. Solche Flächen sind häufig die mit Mineralböden überlagerten Niedermoore. Durch die Grundwasserabsenkung wurde statt einer Grünlandnutzung nun auf einigen z. B. der Anbau von Mais möglich. Die besondere Problematik einer Wiedervernässung von Niedermoorböden liegt aber in Hessen in der Form ihrer Verbreitung in der Landschaft. Der Auszug aus der Bodenkarte „Ried“ (Abb. 21) zeigt, dass die Niedermoore nicht als zusammenhängende Flächen, sondern vor allem in den alten Fluss Schleifen zu finden sind.

Ein Eingriff in den Wasserhaushalt mit dem Ziel des Grundwasseranstiegs auf eine Höhe, mit der das gesamte Niedermoor grundwassergesättigt wird, würde sich somit nicht nur auf die Flächen des Niedermoores, sondern auch direkt auf den Wasserhaushalt der benachbarten Flächen und damit auch auf die Bodenfunktionen dieser Flächen auswirken. Bei einer Planung entsprechender Maßnahmen sind aus Sicht des Bodenschutzes deshalb ihre Wirkung auf die umgebenden Böden und ihre Funktionen mit zu bewerten.



dervernässung von Niedermooren beruht vorrangig nicht in einer zusätzlichen Senke von Treibhausgasen, sondern vor allem in der Reduktion der Gasemission. So geht man bei einem Anstieg des Grundwasserspiegels von 70 cm unter Flur auf nur noch 30 cm unter Flur von einer Minderung der Emissionen von 35 t CO<sub>2</sub>eq je ha und Jahr auf noch 25 t CO<sub>2</sub>eq je ha und Jahr aus (BERGHÖFER, COUWENBERG, DRÖSLER et al. 2015). Bei einem Grundwasserspiegel von nur noch 15 cm unter Flur betragen die Emissionen immer noch 10 t CO<sub>2</sub>eq je ha und Jahr. Würde man in Hessen das Grundwasser auf den 5.000 ha Niedermooren auf 15 cm unter Flur aufspiegeln, würden im Vergleich zu einem Grundwasserspiegel von 70 cm unter Flur rein rechnerisch jährlich maximal 125.000 t CO<sub>2</sub>eq weniger emittiert. Damit könnten lediglich 4 % der jährlichen Klimagasemissionen in Hessen kompensiert werden. Diese Menge entspricht der Freisetzung von Klimagasen durch den aktuellen Flächenverbrauch in Hessen innerhalb von vier bis fünf Jahren.

Die Beispiele zeigen, dass die Möglichkeiten, Böden als CO<sub>2</sub>-Senke zu nutzen, stark eingeschränkt sind, sie bewegen sich letztendlich in einer Größenordnung von 2 bis 4 % der jährlichen Treibhausgasemissionen. Da sich aber der Auf- und Abbau von Humus letztendlich auf ein Gleichgewicht einpendelt, ist das Potential der Böden, CO<sub>2</sub> zu speichern, limitiert.

## 8 Literatur

- BERGHÖFER, A., COUWENBERG, J., DRÖSLER, M., JENSEN, R., KANTELHARDT, J., LUTHARDT, V., PERMIEN, T., RÖDER, N., SCHALLER, L., SCHWEPPE-KRAFT, P., TANNEBERGER, F., TREPPEL, M. & S. WICHMANN (2015): Kapitel 5: Klimaschutz durch Wiedervernässung von kohlenstoffreichen Böden. – In: VON HARTJE, V., WÜSTEMANN, H. & BONN, A. (Hrsg.): Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2015): Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. – 124-147; Berlin, Leipzig (TU Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung).
- BERTHOLD, G. (2010): Klimawandel und Zusatzwasserbedarf im Hessischen Ried. – Jahresbericht des HLNUG **2009**: 63-72.
- BORK, H.-R. & BORK, H. (1987): Extreme jungholozäne hygrische Klimaschwankungen in Mitteleuropa und ihre Folgen. – *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **37**: 109-118; Hannover.
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17.03.1998 (BGBl, I, S. 502).
- DWD (Deut. Wetterdienst, 2021): [www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen](http://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen).
- EGGLESTON, H. S., BUENDIA, L., MIWA, K., NGARA, T. & TANABE, K. (eds.) (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 8.3.3.2: Settlements; 08\_V4\_Ch8\_Settlements\_final\_v2.doc (iges.or.jp). [letzte Abfrage 28.07.2023].
- EHRMANN, O. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs – 64 S.; Karlsruhe (LUBW). [Internetausgabe 2012, aufgerufen am 28.06.2023]
- EHRMANN, O. (2021): Einfluss extremer Wetterereignisse auf die Population von Regenwürmern – Regenwürmer und Klimawandel. – *LOP*, **12/2021**: 38-43.
- FELDWISCH, N. & KOUMANS, C. (2023): Naturschutzfachliche Bodeneingriffe aus Sicht des Bodenschutzes. – In: *Natur in NRW*, **2023/2**: 14-19.
- FRELIH-LARSEN, A., RIEDEL, A., HOBEIKA, M., SCHEID, A., GATTINGER, A., NIETHER, W. & SIEMONS, A. (2022): Role of soils in climate change mitigation. – *Climate Change*, **56**: 88 S.

- GLASNER, B. & HELLER, CH. (2022): Organische Kohlenstoffvorräte landwirtschaftlich genutzter Böden Hessens – Ergebnisse der ersten deutschlandweiten „Bodenzustandserhebung Landwirtschaft“. – In: Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen, Ausgabe 2022: S. 15-20.
- Hessischer Landtag (2023): Hessisches Gesetz zum Schutz der Natur und zur Pflege der Landschaft (Hessisches Naturschutzgesetz – HeNatG) GVBL – Gesetz und Verordnungsblatt von Hessen Nr. 18: 379-400. 00018.pdf (hessen.de). [letzte Abfrage 28.07.2023].
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) (2018): Klimawandel in der Zukunft. – Klimawandel in Hessen<sup>4</sup>, 2: 24 S. Ausgabe\_02Klimawandel-in-der-Zukunft\_internet.pdf (hlnug.de). [letzte Abfrage 28.07.2023].
- HLNUG (2019): Hydrologie in Hessen (Gewässerkundlicher Jahresbericht 2018), 18: 81 S.
- HLNUG (2020): Hydrologie in Hessen (Gewässerkundlicher Jahresbericht 2019), 19: 81 S.
- HLNUG (2023 a): Klimaportal Hessen – Witterungsbericht; <https://klimaportal.hlnug.de/witterungsbericht>. [letzte Abfrage 05.08.2023]
- HLNUG (2023 b): Umweltindikatoren Hessen – Flächenverbrauch; <https://hlnug.de/themen/nachhaltigkeit-indikatoren/indikatorensysteme/umweltindikatoren-hessen/flaechenverbrauch>. [letzte Abfrage 05.08.2023].
- JACOBS, A., FLESSA, H., DON, A., HEIDKAMP, A., PRIETZ, R., DECHOW, R., GENSIOR, A., POEPLAU, C., RIGGERS, C., SCHNEIDER, F. et al. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. – Thünen Report, 64: 316 S.; Braunschweig (Johann Heinrich von Thünen-Institut).
- LÜGGER, K., KLEIN, B., SCHUHMACHER, N. & STEINICKE, CH. (2023): Bodenzustand hessischer Bach- und Flusssauen – Belastungen der Auenböden der Diemel. – Jahresbericht HLNUG 2022: 119-129.
- PLUM, N. M. & FILSER, J. (2005): Floods and drought: Response of earthworms and potworms (Oligochaeta: Lumbricidae, Enchytraeidae) to hydrological extremes in wet grasslands. – *Pedobiologia*, 49 (5): 443-453; doi:10.1016/j.pedobi.2005.05.004.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2021): Klimawandel im Industriezeitalter: global, Deutschland, Hessen. – *Jb. nass. Ver. Naturkde.*, 142: 113-130.
- Stadt Frankfurt am Main (2023): Wie viel Wasser wird in Frankfurt verbraucht? Trinkwasserversorgung Stadt Frankfurt am Main. [letzte Abfrage 28.07.2023]
- TIBBETT, M., FRASER, T. D. & DUDDIGAN, S. (2020): Identifying potential threats to soil biodiversity. – *PeerJ*, 8: e9271; doi.org/10.7717/peerj.9271. [letzte Abfrage 28.07.2023]
- UBA – Umweltbundesamt (2023): Emissionen ausgewählter Treibhausgase in Deutschland nach Kategorien in Tsd. t Kohlendioxid-Äquivalenten. – 8\_tab\_thg-emi-kat\_2023.pdf.
- WALTER, R., BRANDHUBER, R., BURMEISTER, J. & MÜLLER, CH. (2016): Auswirkungen von Überflutungen landwirtschaftlicher Nutzflächen auf Regenwürmer im Boden. – *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, 10: 50 S.
- WELLBROCK, N., BOLTE, A. & FLESSA, H. (eds.) (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. – *Thünen Report*, 43: 550 S.; Braunschweig (Johann Heinrich von Thünen-Institut).
- ZINKERNAGEL J., WEINHEIMER S., HERBST M., KLEBER J. & MAYER N. (2022): Der Bewässerungsbedarf von Freilandgemüse steigt. – *Berichte über Landwirtschaft*, 100 (2): 1-77; doi: 10.12767/buel.v100i2.432.

DR. THOMAS VORDERBRÜGGE  
65199 Wiesbaden  
Panoramastraße. 55  
vorderbrueggeth@online.de

Manuskriptingang: 26. Juli 2023

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde](#)

Jahr/Year: 2023

Band/Volume: [144](#)

Autor(en)/Author(s): Vorderbrügge Thomas

Artikel/Article: [Klimawandel – Boden – Bodenschutz 37-71](#)