

# Gesunder Boden – gesunder Mensch:

Die Bedeutung von Böden für die menschliche Gesundheit



Politische Studie im Auftrag von  
Sarah Wiener, MEP

## **Gesunder Boden - gesunder Mensch:** Die Bedeutung von Böden für die menschliche Gesundheit

**DEZEMBER 2023**

### **Autor\*Innen:**

#### **Markus Puschenreiter:**

Freiberuflicher Berater für Bodenökologie, Bodenmanagement, Bodenbewertung und Klimawandelanpassung sowie Wissenschaftler an der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU).

#### **Anna Valeria Requardt:**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin von Dr. Markus Puschenreiter und Expertin für Umweltwissenschaften mit Schwerpunkten auf Biodiversität & Ökosysteme und Umweltmanagement (Universität für Bodenkultur Wien, Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala).

#### **Christina Hummel:**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin für Dr. Markus Puschenreiter, Projektkoordinatorin und Expertin für Bodenbiogeochemie mit Schwerpunkt auf Nährstoff- und Schadstoffverhalten im Boden und Wurzel-Boden-Wechselwirkungen (Universität für Bodenkultur Wien).

### **Redaktion und fachliche Beratung:**

**Dr. Andrea Beste**, *gesunde-erde.net*

### **Herausgeberin:**

#### **Sarah Wiener MEP**

Die Grünen/EFA im Europäischen Parlament  
Rue Wiertz 60, 1047 Brüssel

<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>4</b>
Böden – eine komplexe und wertvolle Ressource .....	5
Gefährdete Böden – Degradationsprozesse .....	6
Bodengesundheit für die Gesundheit des Planeten und des Menschen .....	9
<b>2 Boden- und Wasserqualität</b>	<b>10</b>
Interaktionen zwischen Wasser und Boden .....	11
Bodenbezogene Gefährdung von Wasservorräten .....	13
<b>3 Boden- und Lebensmittelqualität</b>	<b>16</b>
Die ernährungsphysiologische Qualität von Lebensmitteln .....	17
Bodeneigenschaften beeinflussen die ernährungsphysiologische Qualität unserer Lebensmittel .....	18
Bodenmanagement beeinflusst die ernährungsphysiologische Qualität unserer Lebensmittel .....	19
<b>4 Das Mikrobiom im Boden und im menschlichen Darm</b>	<b>22</b>
Das Bodenmikrobiom und seine Funktionen .....	23
Der Zusammenhang zwischen dem Bodenmikrobiom und dem menschlichen Darmmikrobiom .....	23
<b>5 Maßnahmen zur Verbesserung der Bodengesundheit und Verringerung von Bodendegradation</b>	<b>26</b>
Maßnahmen für Bodengesundheit in der Landwirtschaft .....	27
Maßnahmen für Bodengesundheit in der Forstwirtschaft .....	33
Maßnahmen für Bodengesundheit in städtischen und kontaminierten Gebieten .....	37
<b>6 Schlussfolgerungen</b>	<b>40</b>
Glossar .....	42
Abkürzungen .....	43

# Zusammenfassung

Böden sind die Grundlage terrestrischen Lebens. Sie sind eines der komplexesten Ökosysteme der Erde, bestehend aus einer Vielzahl von Mineralien, organischer Bodensubstanz, Wasser, Luft und einer riesigen Vielfalt an Organismen. Insbesondere Mikroorganismen sind Schlüsselfaktoren für Bodenfunktionen und Ökosystemdienstleistungen. Böden ermöglichen landwirtschaftliche Produktion, halten unser Trinkwasser rein, bieten Räume für menschliches Handeln und sind einer der größten Kohlenstoffspeicher der Erde.

Aufgrund menschlicher Aktivitäten sind Böden schwerwiegend gefährdet. Bodendegradation und Bodenverluste bedrohen Böden als natürliche Ressource. Erosion, Verdichtung, Kontamination und Versiegelung von Böden bedrohen nicht nur Ökosystemdienstleistungen, sondern auch die landwirtschaftliche Produktion und somit die wichtigste Grundlage des menschlichen Wohlergehens. Nicht nur die Menge, sondern auch die Qualität landwirtschaftlicher Produkte wird von degradierten Böden beeinflusst, was zu einer verringerten ernährungsphysiologischen Qualität und erhöhten Schadstoffkonzentrationen führt. Die Filterkapazität des Bodens bildet die Grundlage für die Bereitstellung von sauberem Trinkwasser. Degradierte Böden halten Schadstoffe nur eingeschränkt zurück, was zu Trinkwasserverschmutzung führen kann. Auch Trinkwasser-Quantitäten werden zunehmend beeinflusst – mit abnehmender Bodenqualität nimmt auch deren Wasseraufnahmefähigkeit ab. Bodenmikroorganismen spielen nicht nur eine entscheidende Rolle in

Bodenprozessen, sondern sind auch der Ursprung von Mikroorganismen im menschlichen Körper, insbesondere im Darm. Mikrobielle Vielfalt im Darm wird hauptsächlich durch die Nahrung beeinflusst. Seit den letzten Jahrzehnten sorgt die intensive Landwirtschaft für eine Verringerung der mikrobiellen Vielfalt im Boden und somit auch in Nutzpflanzen. In Kombination mit intensiver Lebensmittelverarbeitung nimmt die mikrobielle Vielfalt im menschlichen Darm weiterhin ab, was sich erheblich auf die menschliche Gesundheit auswirkt.

Daher ist es entscheidend, Maßnahmen zu ergreifen, um die Bodendegradation zu reduzieren und die Bodenqualität zu verbessern. Im landwirtschaftlichen Sektor sollten diese Maßnahmen auf folgende Aspekte abzielen: (1) weitgehende Bodenbedeckung, (2) Minimierung von Bodenstörungen, (3) Pflanzenvielfalt im Anbau, (4) kontinuierliche Durchwurzelung des Bodens und (5) Integration von Nutztieren in Agroökosysteme. Dies kann durch organische Düngung und Maßnahmen zur Anreicherung von organischer Substanz erreicht werden, was wiederum dem Bodenmikrobiom und den physikochemischen Qualitäten – Lebensmittelproduktion und Wasseraufbereitung – zugutekommt. Zu diesen Maßnahmen gehören beispielsweise eine gut durchdachte Fruchtfolge, Zwischenfrüchte und Mischkulturen. Die Politik sollte die konservierende Bodenbearbeitung und den biologischen Pflanzenschutz anstelle von Agrochemikalien unterstützen. Programme zur Förderung und Umsetzung von Agroforstsystemen und „Water Harvesting“ Methoden könnten die Bodengesundheit in

Sarah Wiener



Agroökosystemen weiter unterstützen. Für Grünland sind extensive Beweidung und Mahd entscheidend, beispielsweise durch Rotationsbeweidung und/oder Wiedervernässung. Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) ist ein wichtiges Instrument, welches stärker auf die Unterstützung von Bodengesundheit ausgerichtet werden sollte.

In der Forstwirtschaft wird empfohlen, (1) die Baumvielfalt zu erhöhen, indem Wälder von Monokulturen auf regional angepasste Mischkulturen umgestellt werden, und (2) die Holzernte zu optimieren. Dies könnte heißen: Verbot von Kahlschlägen und den Wechsel zur Einzelbaum-Ernte, Optimierung der Erntezeiten, um Verdichtung zu vermeiden (z.B. nur im Winter, wenn der Boden gefroren ist), gut geplante Erntewege und die Verlängerung von Umtriebszeiten. Die Entnahme ganzer Bäume sollte verboten werden, damit organische Rückstände und Totholz im Wald verbleiben. Waldbrände zu vermeiden und zu bekämpfen ist ein weiterer wichtiger Bestandteil von Bodengesundheit in Wäldern. Auch Extensivierungs- und Wiedervernässungsprojekte können für Waldböden von Vorteil sein.

In urbanen Gebieten sind folgende Aspekte wichtig: (1) Einrichtung von Hochwasserschutz- und Wasserretentionsmaßnahmen im Zusammenhang mit Bodenoberflächenpermeabilität, (2) flächenmäßige Ausbreitung von Vegetation zum Schutz vor städtischen Wärmeinseln und (3) die (Bio) Remediation von kontaminierten Böden. Hochwasserschutz- und Wasserretentionssysteme sollten auf dem „Schwamm-

stadtprinzip“ basieren, also einem System, das eingeleitetes Wasser längerfristig speichert. Naturnahe Ansätze wie grüne Infrastrukturen zur Wasserrückhaltung können damit sowohl zum Hochwasserschutz beitragen als auch die Effekte von Wärmeinseln reduzieren und sollten daher in der strategischen Stadtplanung mit einbezogen werden. Begrünung von ungenutztem Land und/oder alter Infrastruktur könnte eine weitere Möglichkeit sein, den Anteil an Vegetation in stark besiedelten Gebieten zu erhöhen. Die biologische Sanierung von Böden sollte sich auf die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen fokussieren, anstatt auf ihre Gesamtkonzentration – mögliche Maßnahmen sind Pflanzen-basierte Ansätze wie Phytosanierung, Phytostabilisierung oder Phytomanagement. Die Revitalisierung von Brachflächen könnte eine wertvolle Option zur Reduzierung des Gesamtflächenverbrauchs und somit zur Verringerung der Bodenversiegelung sein.

Es besteht dringender Handlungsbedarf, da die Bodendegradation ein fortlaufender Prozess ist, der den Boden und seine weitreichenden Funktionen gefährdet – als Grundlage für die Lebensmittelproduktion und Trinkwasser, als Teil von kohlenstoffspeichernden Ökosystemen, Wasserkreisläufen, sowie lokaler Kühlung und Luftreinhaltung. Bodengesundheit und menschliche Gesundheit in Europa könnten gefördert werden durch ordnungsgemäße Überwachung von Belastungen und durch konkrete, greifbare Maßnahmen innerhalb von Rahmenbedingungen und Richtlinien sowie Vorschriften.



# 1





## Böden – eine komplexe und wertvolle Ressource

**Böden sind die grundlegende Basis terrestrischen Lebens.** Sie bilden eine dünne Schicht, welche die Erdkruste bedeckt – oft weniger als einen Meter tief. Als eines der komplexesten Ökosysteme der Erde beherbergen sie eine enorme Artenvielfalt und Mikroorganismen, Pilzen, Algen und Tieren und unterstützt das pflanzliche Leben auf der Erde, einschließlich der Landwirtschaft.

Böden sind ein **hochkomplexes Material**, welches aus anorganischen und organischen Bestandteilen besteht. Zu den anorganischen Bestandteilen gehören Bodenminerale, Wasser und Luft. Die organischen Bestandteile umfassen die organische Bodensubstanz und alle lebenden Organismen. Die gruppierten festen Partikel des Bodens (Aggregate) bilden ein poröses System mit großen Oberflächen. Diese sind der Lebensraum für eine enorme Anzahl von Bodenorganismen. In nur einem Teelöffel Boden können über 1 Million verschiedene Organismengruppen vorkommen, die meisten davon Mikroben.<sup>1</sup>

Böden **unterstützt** eine Reihe von **Ökosystemfunktionen**, sind aber auch für den menschlichen Wohlstand von grundlegender Bedeutung. Böden sind entscheidend für Ernährungssicherheit und ökologische Stabilität, aber auch für die Gewinnung von sauberem Trinkwasser, und sie bieten Raum für verschiedene menschliche Aktivitäten. Nach den Ozeanen sind Böden die größten Kohlenstoffspeicher der Erde. In diesem Zusammenhang kann die Gesundheit des Bodens definiert werden als „die anhaltende Fähigkeit des Bodens, als lebendiges Ökosystem zu funktionieren, welches Pflanzen, Tiere und Menschen ernährt“.<sup>2</sup>

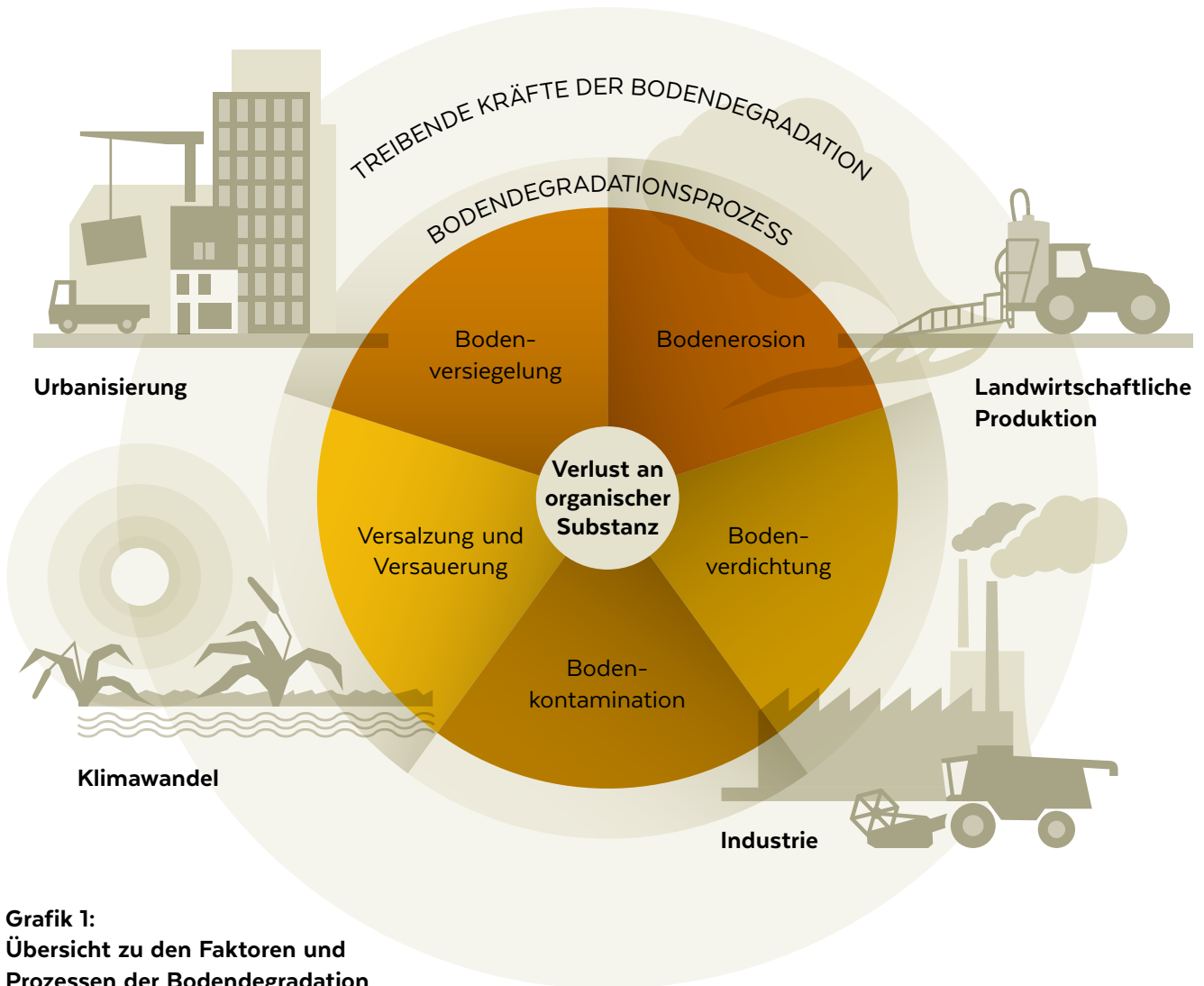
**Die meisten Bodenfunktionen hängen von der Gesundheit des Bodens** ab – ein gedeihender Boden mit einem florierenden Mikrobiom und vielen Interaktionsprozessen zwischen Boden, Pflanze, Wasser und

Atmosphäre ist das Rückgrat der Bodenfunktionen, welche die menschliche Gesundheit unterstützen. Zu diesen Funktionen gehören Filterung, Pufferung und Umwandlung von Stoffen wie Nähr- und Schadstoffen, welche den Nährstoffkreislauf und die Reinheit unseres Trinkwassers gewährleisten. Darüber hinaus bilden Böden die Grundlage für die Nahrungsmittelproduktion und -sicherheit, welche für das menschliche Wohlergehen von wesentlicher Bedeutung sind. Mehrere Funktionen unterstützen sich gegenseitig und sind miteinander verwoben, was den Boden zu einem hochkomplexen, lebenden Metaorganismus macht – ähnlich zum Menschen selbst. Die verschiedenen Bestandteile des Bodens (Partikel, Organismen, Luft, Wasser) existieren nicht einfach nebeneinander, sondern sind durch verschiedene Prozesse eng miteinander verbunden. Die meisten Wechselwirkungen zwischen Organismen, Nährstoffen und Schadstoffen finden in Porenräumen zwischen Bodenpartikeln statt. Diese Wechselwirkungen bestimmen, wie viele Nähr- und Schadstoffe im Bodenwasser vorkommen. Dies ist entscheidend für die Aufnahme von Nähr- und Schadstoffen in Pflanzen oder den Transport in andere Ökosysteme, wie die Atmosphäre und Gewässer. Je nach Standort, Ausgangsgestein, lokalem Klima und den inhärenten Bodeneigenschaften gibt es viele verschiedene Bodentypen, welche unterschiedliche Ökosystemleistungen erbringen. Böden sind dynamische Systeme – ein gesunder Boden ist in seinen Bestandteilen, Organismen und den Wechselwirkungen zwischen ihnen ausgewogen.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> van Gestel, C.A. et al. (2021) Soil Biodiversity: State-of-the-Art and Possible Implementation in Chemical Risk Assessment. *Integr Environ Assess Manag.* 17, 541-551.

<sup>2</sup> U.S. Department of Agriculture (2019) Natural Resources Conservation Service. Soil Health, <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>. Accessed 18/08/2023.

<sup>3</sup> Keesstra, S. et al. (2021) The role of soils in regulation and provision of blue and green water. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 376.



**Grafik 1:**  
Übersicht zu den Faktoren und  
Prozessen der Bodendegradation

## Gefährdete Böden – Degradationsprozesse

Trotz ihrer Bedeutung als natürliche Ressource für Wohlstand und Wohlergehen des Menschen sind Böden stark bedroht. Intensive Landwirtschaft, Urbanisierung, industrielle Aktivitäten usw. haben zu **Bodendegradation und Bodenverlust** geführt. Erosion durch Wind und Wasser, aber auch Bodenversiegelung führen zum Verlust von Boden. Der Abbau von organischer Substanz im Boden, Verdichtung, Versalzung, Versauerung sowie Verunreinigung sind die Hauptursachen für die Verschlechterung der Bodenqualität. Infolgedessen werden Böden in ihrer Funktion gestört, was eine Reihe negativer Auswirkungen auf ihre Ökosystemleistungen und für den Menschen grundlegenden Funktionen hat. So führen beispielsweise die Umwandlung von natürlichen in landwirtschaftlich genutzte Böden und die Entwaldung zu massiven Verlusten an organischer Substanz und Kohlenstoffvorräten – gleiches gilt für die intensive Nutzung von Böden. Dadurch werden eine Reihe von Prozessen und

Wechselwirkungen in Böden verändert, was häufig zu einer verminderten Bodenstabilität und -fruchtbarkeit führt. Auch in bereits bestehenden Agrarökosystemen ist der Boden von Degradation bedroht: Agrochemikalien wie Düngemittel oder Pestizide, Monokulturen und Überweidung entziehen den Böden ihre organische Substanz, was zu einer Verarmung des so wichtigen Mikrobioms führt. Die wichtigsten Bedrohungen für europäischen Böden werden im Folgenden dargestellt.

Einer der wichtigsten Prozesse der Bodendegradation ist die **Bodenversiegelung**<sup>4</sup> – der Prozess der Bedeckung des Bodens mit einem undurchlässigen Material wie Beton oder Asphalt. In den Jahren 2012-2018 wurden jährlich ca. 400 km<sup>2</sup> Boden durch Versiegelung verbraucht<sup>5</sup>. Durch Versiegelung werden fast alle Bodenfunktionen auf einmal ausgelöscht, da alle Interaktionen mit Wasser, Luft und Pflanzen unterbrochen werden. Haupttreiber sind die industrielle und urbane Entwicklung sowie Infrastrukturen im Zusammenhang mit Mobilität und Tourismus.



Die Bodenversiegelung führt zu einem irreversiblen Verlust aller Bodenfunktionen:<sup>6</sup>

- macht die Nahrungsmittelproduktion unmöglich, insbesondere wenn fruchtbare Böden versiegelt werden
- verhindert die Wasserinfiltration und -speicherung, was zu Oberflächenabfluss führt und die Hochwassergefahr erhöht
- hebt die lokale Klimaregulierung auf: ohne Vegetation steigt die Oberflächentemperatur an, was zum städtischen Wärmeinseleffekt führt
- beseitigt die Filter-, Immobilisierungs- und Reinigungskapazität für organische und anorganische Schadstoffe
- verhindert die Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff
- vernichtet Lebensräumen für Bodenorganismen, Pflanzen und Tiere durch Zerstörung und Fragmentierung, was zum Verlust der biologischen Vielfalt führt
- beeinträchtigt Landschaften und kulturelles Erbe

Versiegelung und begrenzte Oberflächendurchlässigkeit, z.B. durch Beton, machen Städte zu Hotspots für Überschwemmungen und Hitzeinseln. Dies ist besonders besorgniserregend, wenn man die hohe Bevölkerungsdichte in den europäischen Städten und die möglichen Bedrohungen der Lebensgrundlagen durch Überschwemmungs- und Hitzesrisiken bedenkt. Die Begrenzung der Versiegelung und die Wiederherstellung der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens sind daher in städtischen Gebieten von großer Bedeutung. Konzepte wie das sogenannte „Schwammstadtprinzip“ zielen darauf ab, die Versiegelung rückgängig zu machen und die Durchlässigkeit der Böden zu erhalten, um den Hochwasser- und Hitzeschutz zu verbessern. Das Hauptziel ist, dass der Boden viel Wasser aufnehmen und speichern kann (wie ein Schwamm). Mehr Vegetationsbedeckung und durchlässige Oberflächen wie Gras-Kies-Mischungen oder durchlässige

Beläge können die Bodendegradation in expandierenden und stark versiegelten Städten umkehren und/oder begrenzen (weitere Einzelheiten ab Seite 37).

**Erosion** ist ein weiterer wichtiger Degradationsprozess<sup>7</sup> – in der Europäischen Union (EU) werden jedes Jahr ca. eine Milliarde Tonnen Boden erodiert.<sup>8</sup> Erosion tritt typischerweise auf Böden ohne oder mit geringer Vegetationsdecke und geringer struktureller Stabilität in Verbindung mit starken Regenfällen oder starkem Wind auf.<sup>9</sup> Durch Erosion gehen Bodenpartikel – und mit ihnen Nährstoffe und organisches Material – unwiderruflich an andere Ökosysteme, z.B. Gewässer, verloren, wo sie schwerwiegende Probleme wie Algenblüten verursachen können. Der Verlust von Böden ist ein großes Problem für die Landwirtschaft, da die Bildung von 1-10 cm fruchtbarem Boden mehrere tausend Jahre dauert. Die Bodenfruchtbarkeit kann durch Erosionsprozesse stark beeinträchtigt werden.

Die **Bodenverdichtung** ist ein weiteres sehr häufiges Problem, insbesondere bei landwirtschaftlichen Böden, und wird durch den Einsatz schwerer Maschinen, die Bodenbearbeitung und die Überweidung verursacht. Rund 23 % der Böden in der EU sind in kritischem Maße verdichtet. Die Bodenstruktur wird gestört, die Porosität und Durchlässigkeit verringert und damit die Wasserinfiltration und -speicherkapazität reduziert. Dies führt zu erhöhtem Oberflächenabfluss oder Staunässe, verstärkt Erosion, Erdbeben und Überschwemmungen.<sup>10</sup> Darüber hinaus erschwert Verdichtung Durchwurzelung, beeinträchtigt den Nährstoff- und Gasaustausch (Sauerstoffmangel kann die Emission von Treibhausgasen erhöhen) und beeinträchtigt die biologische Vielfalt des Bodens. Durch die Verdichtung verursachte Bodenrisse führen auch zum Transport von Schadstoffen in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser. All diese Auswirkungen der Verdichtung auf die Bodenfunktionen führen zu einer Verringerung der Ernteerträge um 2,5-50 %, zu einer Verringerung der Befahrbarkeit des Bodens und der

<sup>4</sup> Dragović, N., Vulević, T., (2020) Soil Degradation Processes, Causes, and Assessment Approaches, in: Leal Filho, W. et al., Life on Land. Springer International Publishing, 1-12

<sup>5</sup> European Environment Agency (2023) Land take and net land take. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/land-take-statistics#tab-based-on-data>. Accessed 13/10/2023

<sup>6</sup> Ferreira, C.S.S. et al. (2022) Soil Degradation in the European Mediterranean Region: Processes, Status and Consequences. Science of The Total Environment 805.

<sup>7</sup> IPCC (2019) Land Degradation. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

<sup>8</sup> European Environment Agency (2023) Land take and net land take. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/land-take-statistics#tab-based-on-data>. Accessed 13/10/2023

<sup>9</sup> Panagos, P. et al. (2015) The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environ Sci Policy 54, 438-447.

<sup>10</sup> Schjøning, P. et al. (2015) Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective. Advances in Agronomy 133, 183-237.

Anzahl der bearbeitbaren Tage. Die Auswirkungen sind oft irreversibel oder dauern über Jahrzehnte an.<sup>11</sup>

Industrietätigkeiten, Bergbau und Mülldeponien führen durch die Freisetzung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen zu **Bodenverunreinigen** – was nicht nur die Bodengesundheit, sondern auch die menschliche Gesundheit stark beeinträchtigt. Je nach Bodeneigenschaften, Art und Konzentration der Schadstoffe kann der Boden seine Fähigkeit verlieren, Schadstoffe zu filtern und zurückzuhalten (zu puffern). Die Ablagerung von Schadstoffen verändert die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens, indem sie z.B. die mikrobielle Aktivität verringert, die Struktur der Lebensgemeinschaften verändert und die Artenvielfalt reduziert. Dies kann sich auf die organische Substanz des Bodens und die Bodenstabilität auswirken, wodurch die Erodierbarkeit und damit das Risiko der Ausbreitung von Schadstoffen und verunreinigtem Boden über größere Flächen und in Gewässer erhöht wird.

Bewässerung, ungeeignete Entwässerungssysteme, Überbeanspruchung des Grundwassers und der Anstieg des Meeresspiegels führen zur **Versalzung** des Bodens. Eine übermäßige Salzkonzentration im Boden verändert den mikrobiellen Stoffwechsel, beeinträchtigt den Nährstoffabbau und schränkt letztlich die Bodenfruchtbarkeit ein. Dies wiederum beeinträchtigt die Pflanzengesundheit und die Erträge und macht den Boden anfälliger für Erosion und weitere Verschlechterung.

Die meisten der oben genannten Abbauprozesse führen letztlich zur **Verringerung der organischen Bodensubstanz** – diese ist jedoch Dreh- und Angelpunkt für viele wichtige Bodenfunktionen und die Grundlage für der Bodenfruchtbarkeit. Der Abbau der organischen Substanz schränkt die Abundanz und Vielfalt des Bodenmikrobioms ein, welche wiederum für den Nährstoffkreislauf, die Kohlenstoffbindung und die Ernährung der Pflanzen essenziell ist. Ein Mangel an organischer Bodensubstanz verringert die Filter- und Pufferkapazitäten und reduziert die Wasseraufnahme und -speicherung im Boden erheblich. Organische Substanz ist auch das strukturelle Rückgrat von Böden – ist sie dezimiert, ist der Boden anfälliger für weitere Verschlechterungen und Störungen.

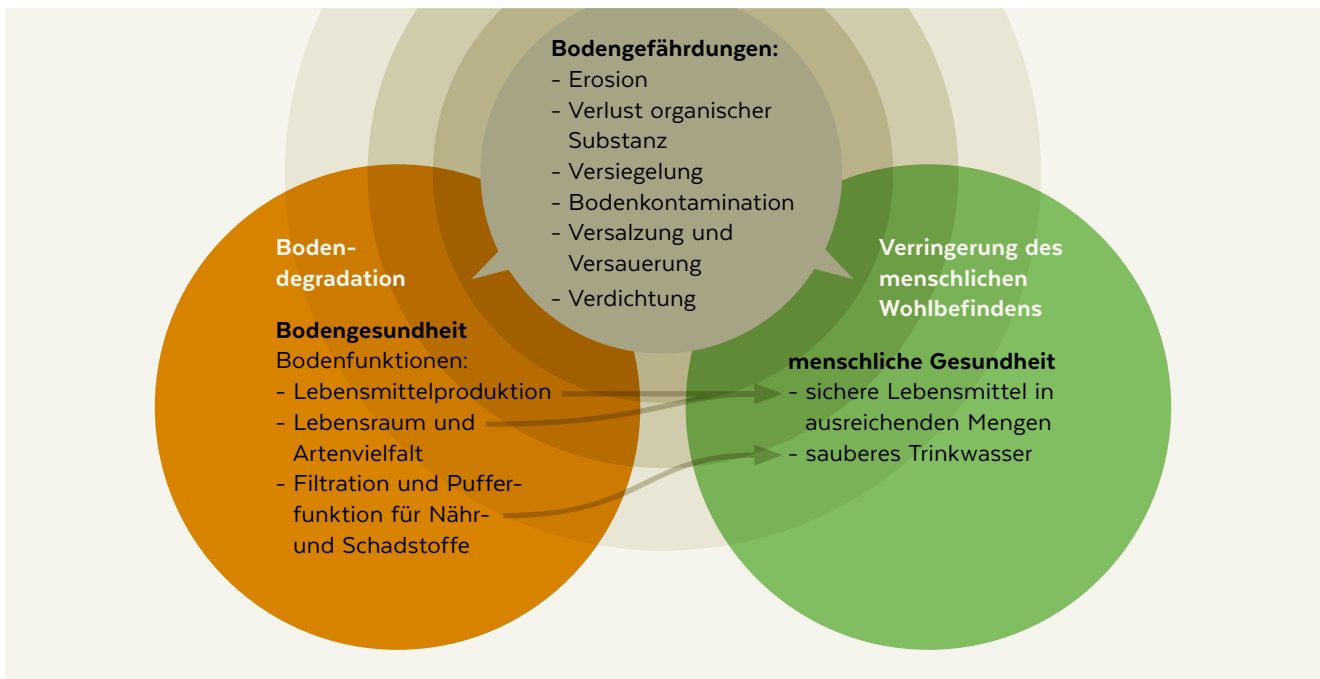
Schließlich beeinflusst auch der **vom Menschen verursachte Klimawandel** die Bodendegradation. Er verschärft die bereits bestehenden Belastungen und führt neue Degradationsprozesse ein. Die Auswirkungen ergeben sich aus höheren Temperaturen, veränderten Niederschlags- und Windverhältnissen und

häufigeren, intensiveren und extremen Wetterereignissen.<sup>12</sup> Die Kombination dieser Faktoren verstärkt bereits bestehende Probleme wie Bodenerosion durch Wind und Wasser. Nach längeren Dürreperioden kann der Boden nur noch wenig Wasser aufnehmen (wie ein sehr trockener Schwamm). Kommt es dann zu einem Starkregenereignis, kann das meiste Wasser nicht in den Boden einsickern, sondern wird an der Oberfläche weggespült und reißt Bodenpartikel mit sich. Im Allgemeinen werden bei stärkeren Regenfällen mehr Bodenpartikel mitgerissen und der Boden mit Wasser vollgesogen, was zu zahlreichen Problemen in der Landwirtschaft führen kann. Außerdem erhöhen solche Extremereignisse die Wahrscheinlichkeit von Erdbeben und drastischer Bodendegradation, was die Gesundheit und Sicherheit der Menschen beeinträchtigt. Ein Extremereignis, z.B. ein sehr starker Regen, kann die Landschaft über mehrere Jahrzehnte hinweg beeinflussen. Vor allem der Mittelmeerraum wird mit solchen Belastungen konfrontiert sein. Der Klimawandel bringt auch intensivere Winde und Stürme mit sich, welche Erosion weiter beschleunigen dürften – vor allem auf landwirtschaftlichen Flächen, wenn der Boden unbedeckt (d.h. ohne Vegetation) ist: Die Bodenverluste werden in vielen Gebieten bei fortschreitendem Klimawandel um mehr als 50% steigen.<sup>13</sup> Eine verstärkte Bewässerung infolge häufigerer und intensiverer Dürreereignisse kann zu einer Versalzung der Böden führen. Auch Brände in bewirtschafteten Gebieten wie Wäldern und Ackerland werden mit dem Klimawandel zunehmen und die Bodendegradation verstärken. Der Klimawandel führt auch zu Veränderungen in mikrobiellen Gemeinschaften von Böden, was in den meisten Fällen zu einer Verarmung der organischen Bodensubstanz führt. Veränderte Temperaturen und eine veränderte mikrobielle Aktivität stören den Kreislauf der organischen Substanz im Bodensystem – in vielen Fällen wird mehr organische Substanz in Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) umgewandelt, was den Klimawandel verstärkt. Somit wirken sich viele Abbauprozesse auf die eine oder andere Weise auf die organische Substanz aus und stellen eine Verbindung zwischen den Böden und dem Klimasystem her.

<sup>11</sup> Ferreira, C.S.S. et al. (2022) Soil Degradation in the European Mediterranean Region: Processes, Status and Consequences. Science of The Total Environment 805.

<sup>12</sup> IPCC (2019) Land Degradation. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

<sup>13</sup> Li, Z. and Fang, H. (2016) Impacts of climate change on water erosion: A review. Earth-Sci. Rev. 163, 94–117.



**Grafik 2: Bodengefährdungen und ihre Einflüsse auf das menschliche Wohlbefinden**

Die Bodendegradation gefährdet die Gesundheit und das Wohlergehen der Menschen – nicht nur bei extremen Wetterereignissen, sondern auch im Zusammenhang mit der Lebensmittel- und Wassersicherheit. Durch den Klimawandel wird dieses Thema noch akuter – allerdings können Bewirtschaftungsoptionen die Bodendegradation und ihre bedrohlichen Auswirkungen verringern oder umkehren (siehe Kapitel 5 zu Bewirtschaftungsaspekten).

### Bodengesundheit für die Gesundheit des Planeten und des Menschen

Die Bedeutung des Bodens und weitreichenden Folgen der Bodenverschlechterung machen ihn zu einem **zentralen Element der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (UN SDGs)**. Sie bieten eine „Blaupause für Frieden und Wohlstand für die Menschen und den Planeten“, und der Boden spielt eine zentrale Rolle bei der Verwirklichung dieses Ziels: z.B. in SDG 2 (kein Hunger), SDG 3 (gute Gesundheit und Wohlbefinden, einschließlich der Verringerung der Risiken durch Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung), SDG 6 (sauberes Wasser und sanitäre Einrichtungen), SDG 13 (Klimaschutz, z.B. Verbesserung der Kohlenstoffbindung im Boden) und SDG 15 (Leben auf dem Land)<sup>14</sup>. Als Rückgrat der Ernährungssicherheit unterstützt die Bodengesundheit unsere Ernährung und ist ein zentrales Element der nachhaltigen Landwirtschaft (SDG 2). Sie trägt dazu bei, die Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von sauberem Trinkwasser zu

gewährleisten (SDG 6) und ist von zentraler Bedeutung für die Umkehrung der Bodendegradation (SDG 15).

Wie oben erläutert, bietet der Boden vielfältige Ökosystemleistungen und Funktionen, von denen Menschen direkt oder indirekt abhängig sind. Der **Boden bildet im Wesentlichen die Grundlage des planetaren Lebens und der menschlichen Gesundheit**. Die menschliche Gesundheit wurde 1948 von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) als „ein Zustand vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Gebrechen“ definiert.<sup>15</sup> Später wurde das Konzept der „One Health“ entwickelt – bei diesem Konzept wird berücksichtigt, dass die menschliche Gesundheit nicht isoliert ist, sondern mit der Gesundheit von Pflanzen, Tieren und der Umwelt verbunden ist.<sup>16</sup> Die menschliche Gesundheit hängt unter anderem stark von der Bodengesundheit ab. Verschiedene Wechselbeziehungen zwischen Bodenmerkmalen, Bodenprozessen und menschlicher Gesundheit werden in dieser Studie dargestellt.

<sup>14</sup> **Rodrigo-Comino, J.** et al. (2020) Soil Science Challenges in a New Era: A Transdisciplinary Overview of Relevant Topics. Air, Soil and Water Research 13.

<sup>15</sup> World Health Organization (1946) Constitution of the World Health Organization, <http://apps.who.int/gb/bd/PDF/bd47/EN/constitution-en.pdf>. Accessed 18/08/2023.

<sup>16</sup> <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/one-health>. Accessed 18/08/2023.



# 2



# Boden- und Wasserqualität

Böden sind einerseits von zentraler Bedeutung für **die Wasserregulierung sowie -reinigung** und andererseits bestimmt die Bodenqualität die Qualität des Oberflächen- und Grundwassers. 75 % des europäischen Süßwassers sind in Oberflächengewässer (wie Flüssen und Seen) vorhanden, während der Anteil des Grundwassers nur 25 % beträgt.<sup>17</sup> Jedoch stammt das europäische Trinkwasser zu 65 % aus dem Grundwasser.<sup>18</sup> Die größten Bedrohungen für europäischen Gewässer sind Raubbau und Verschmutzung. Gesunde Böden spielen eine entscheidende Rolle im Wasserkreislauf, da sie die Regenwasserversickerung (Prozess, bei dem Wasser von der Bodenoberfläche in den Boden gelangt) regulieren und Wasser speichern, welches den Pflanzen zur Verfügung steht. Außerdem verhindern sie Überschwemmungen sowie Erdbeben und filtern Wasser, bevor es das Grundwasser erreicht. Die Fähigkeit des Bodens, diese Funktionen zu erfüllen, ist jedoch begrenzt. Intensive Landwirtschaft, Verstädterung, Industrie und Bergbau sowie die schlechte Abfallwirtschaft setzen die bodenbezogene Wasserqualität und -quantität unter Druck. Versiegelung, Verdichtung und Bodenbearbeitung beeinflussen Wasseraufnahme, Wasserspeicherkapazität, Versickerung und die Filtration.

## Interaktionen zwischen Wasser und Boden

Der Wasserkreislauf umfasst die Verdunstung aus Ozeanen, Meeren und Seen, die Aufnahme und Transpiration durch Pflanzen (Wasserdampf, der von den Blättern in die Atmosphäre abgegeben wird), die Kondensation, den Niederschlag, die Infiltration und die Versickerung im Boden zur Zwischenspeicherung oder zum Transport ins Grundwasser. Im Allgemeinen wird das Verhalten von Wasser im Boden durch die Textur des Bodens und dessen Struktur bestimmt. Die Textur beschreibt die Partikelgrößenverteilung zwischen den wichtigsten anorganischen Bodenbestandteilen wie Sand, Schluff und Ton, und die Struktur ist die Partikelanordnung, d.h. Größe und Form von Aggre-

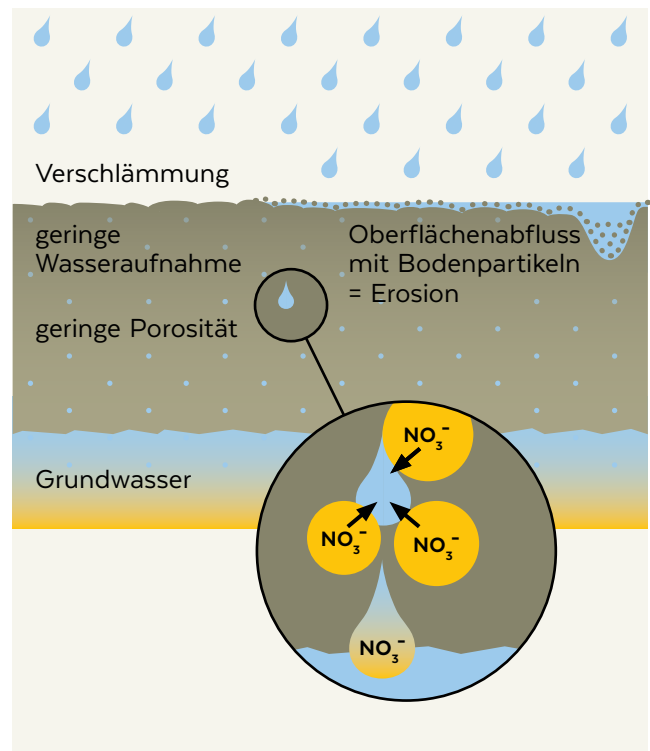
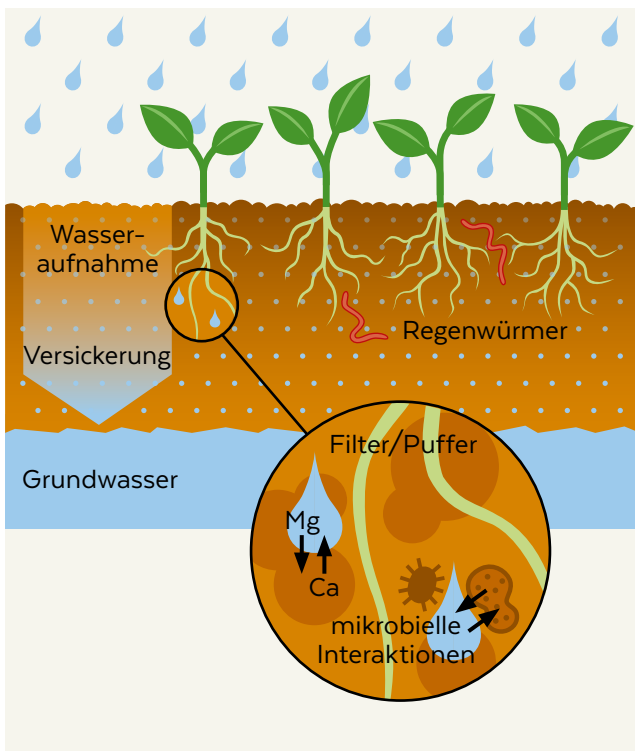
gaten. Aggregate beschreiben Granulate aus Sand, Schluff und Ton, welche durch organisches Material miteinander verbunden sind. Zusammen mit Wurzeln und bodenbewohnenden Tieren wie Regenwürmern bilden die Bodenbestandteile ein **Porensystem mit vielen funktionalen Oberflächen**. Dieses komplexe Gefüge beeinflusst bzw. bestimmt die Wasseraufnahme, -speicherung, und -verfügbarkeit für Pflanzen sowie den Transport in tiefere Schichten. Ein gesunder Boden hat eine hohe **Aggregatstabilität**, da Bodenorganismen wie Bakterien, Pilze, Regenwürmer und Pflanzen Verbindungen ausscheiden, welche Bodenpartikel miteinander verbinden. Böden mit einer Vielzahl verschiedener Bodenhilfsstoffe weisen eine bessere Struktur auf und können mehr pflanzenverfügbares Wasser aufnehmen und speichern. Ein guter Bodenaufbau bzw. -struktur weist eine höhere Infiltrationsrate, eine größere Wasserspeicherkapazität, eine bessere Struktur- und Aggregatstabilität sowie eine größere Makroporosität auf und verringert das Abfluss- und Erosionsrisiko.<sup>19</sup> Neben den Aggregaten bestimmt auch die Korngrößenverteilung im Boden die Wasserdynamik im Boden. Das Wasser bewegt sich rascher durch sandige Böden, die Wasserspeicherung ist gering und sie trocknen schneller aus. Während Böden mit hohem Lehmgehalt mehr Wasser speichern, Regen aber langsamer eindringt und oft abfließt, was zu Bodenerosion führt. Die Zugabe **organischer Substanz unterstützt eine stabile Aggregatbildung**, um den Boden widerstandsfähiger gegen Verdichtung zu machen und die Wasserrückhaltung und -speicherung zu erhöhen.

<sup>17</sup> <https://water.europa.eu/freshwater/europe-freshwater/freshwater-themes/water-resources-europe>. Accessed 04/09/2023.

<sup>18</sup> European Environment Agency (2022) Europe's Groundwater : A Key Resource under Pressure (Office des publications de l'Union européenne), <https://doi.org/10.2800/50592>. Accessed 04/09/2023.

<sup>19</sup> **Keesstra, S.** et al. (2021) The role of soils in regulation and provision of blue and green water. *Phil. Trans. R. Soc. B* 376.





**Grafik 3:**  
**Boden-Wasser-Interaktion**

Wasser ist eine Schlüsselkraft in Böden – es ist entscheidend für den Transport von Partikeln und Verbindungen (einschließlich Nährstoffen und Schadstoffen) innerhalb des Bodens, aber auch auf der Bodenoberfläche. Das **Porensystem des Bodens filtert Wasser** mechanisch, chemisch und biologisch. **Reaktive Oberflächen** entlang der Poren halten Nähr- und Schadstoffe aus dem Bodenwasser zurück. Die Umwandlung von Substanzen im Boden beeinflusst deren Löslichkeit, ihre Verfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen sowie ihre Mobilität im Boden und in aquatischen Systemen. **Mikroorganismen**, welche in Bodenporen oder in der Nähe von Wurzeln leben, können organische Schadstoffe abbauen, diese und überschüssige Nährstoffe immobilisieren und so die Verschmutzung des Grundwassers verhindern. Die Effizienz des Bodens als Filter hängt von den Bodeneigenschaften ab, insbesondere von der Zusammensetzung und Aktivität der mikrobiellen Gemeinschaft, aber auch vom Verhalten der Schadstoffe.

**Auswaschung** ist ein Prozess, bei dem Nährstoffe und Schadstoffe mit Regen- oder Bewässerungswasser durch den Boden nach unten zum Grundwasser transportiert werden (siehe unten). Über **Erosion** gelangen viele an Bodenpartikeln gebundene Nähr- und Schadstoffe in Oberflächengewässer wie Flüsse und Seen – und landen schließlich in Küstengewässern. Beide Prozesse können Gewässer verschmutzen und

zu Eutrophierung und Algenblüten führen. In weitere Folge kann dies Sauerstoffmangel und die Freisetzung toxischer Verbindungen hervorrufen, welche die Funktionen des aquatischen Ökosystems, aber auch die Sicherheit und Gesundheit des Menschen bedrohen. Erosion bedeutet, dass der Boden mit Wasser, das an der Bodenoberfläche abfließt, weggespült wird und somit Bodenverlust verursacht. Dieser Prozess kann durch eine verminderte Wasseraufnahmekapazität des Bodens ausgelöst werden – ein degradiertes Boden mit einem geschädigten Porensystem oder ein sehr trockener Boden ist in seiner Fähigkeit, größere Wassermengen aufzunehmen, stark eingeschränkt. Darüber hinaus kann die kinetische Energie von Regentropfen Bodenaggregate zerstören, was Poren verstopft und zu Schlammbildung führt. Der Schlamm wiederum versiegelt den Oberboden, verhindert das Eindringen von Wasser bei zukünftigen Niederschlagsereignissen und verstärkt dadurch die Erosion – dieser Prozess wird als **Verschlammung** bezeichnet. Wenn die Wasserversickerungsfähigkeit des Bodens begrenzt ist, werden das Wasser und die Oberfläche des Bodens weggespült, was in Folge zu Erosion, Bodenverlust und schließlich zu **Eutrophierung und Verstopfung von Infrastrukturen** (z.B. Kanalisation) führt.

Eine stabile und gut entwickelte **Pflanzendecke ist der Schlüssel zur Verringerung von Erosion**: Pflanzenblätter mindern die Kraft der Regentropfen und ermög-



lichen eine langsamere somit effizientere Infiltration des Regenwassers in Böden. Darüber hinaus stabilisieren Wurzeln den Boden, sodass dieser mehr Wasser aufnehmen und speichern kann. Ohne Vegetationsdecke können Bodenstruktur und -poren durch die kinetische Energie der Regentropfen zerstört werden, wie oben erläutert. Letztendlich sind **ein hoher Gehalt an organischer Substanz bzw. der Aufbau organischer Substanz im Boden** von grundlegender Bedeutung für die Verringerung des Erosionsrisikos. Organische Substanz ist essenziell für die Stabilisierung der Bodenstruktur und somit Verbesserung der Wasserinfiltration bzw. Erhöhung der Wasserspeicherkapazität.

## Bodenbezogene Gefährdung von Wasservorräten

Die Hauptstressoren für die Wasserqualität sind **Agrochemikalien** wie Düngemittel und Pestizide sowie ihre Metaboliten (Zwischenprodukte aus Stoffwechselprozessen). Vor allem deshalb, weil sie in großem Maßstab ausgebracht werden und eine punktuelle Kontamination verursachen, welche schwer zu handhaben ist. Darüber hinaus wird das Bodenleben oft durch Agrochemikalien negativ beeinflusst, wodurch Bodenfunktionen und die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber Stressoren verringert werden.

**Stickstoff und Phosphor** sind essenzielle Makronährstoffe für das Leben auf der Erde. In den letzten Jahrzehnten jedoch haben übermäßiger Düngemittelsatz und die Zunahme städtischer sowie industrieller Abfälle zu einer dramatischen Freisetzung dieser Nährstoffe aus den Böden in aquatische Ökosysteme und in die Atmosphäre geführt. Im Allgemeinen gelangen nur 35 % des Stickstoffs<sup>20</sup> und 12 % des Phosphors<sup>21</sup> aus mineralischen Düngemitteln in Pflanzen. Dies weist auf enorme Ineffizienz und dramatische Verluste hin. Pflanzen nehmen entweder direkt anorganischen Stickstoff und Phosphor – in Form von Nitrat, Ammonium und Phosphat im Bodenwasser gelöst – oder sie beziehen diese Nährstoffe aus weniger verfügbaren organischen Quellen, z.B. durch mikrobielle Mineralisierungsprozesse in der Wurzelumgebung. Die Nutzung dieser Wechselwirkungen ist besonders wichtig, um einerseits den Nährstoffkreislauf zu stärken und andererseits den Einsatz von Mineraldünger zu reduzieren – letzterer führen nämlich zum Rückgang der Bodenbiodiversität und der Verschlechterung der Wasserqualität. Nitrat wird vom Boden nur schwach zurückgehalten und kann daher leicht mit Niederschlagswasser oder Wasser aus Bewässerungssystemen ins Grundwasser gelangen. Stickstoff kann außerdem unter bestimmten Bedingungen (warme Temperaturen,

ausreichende Bodenfeuchtigkeit, Bodenbearbeitung), welche mikrobielle Aktivität fördern, in Treibhausgase, z.B. Distickstoffmonoxid, umgewandelt werden, welches in die Atmosphäre entweicht.<sup>22</sup> Charakteristisch für Phosphat ist eine starke Interaktivität mit dem Boden und rasche Immobilisierung durch die mikrobielle Aufnahme. Im Gegensatz zu Stickstoff ist Phosphor weniger anfällig für Auswaschungen, aber anfällig für den Transport in aquatische Systeme bei Bodenerosionsereignissen.

**Stickstoff und Phosphor** aus Gülle und Pflanzenresten können von Mikroorganismen zeitverzögert in anorganische und damit pflanzenverfügbare Formen umgewandelt werden. Dieser Vorgang wird als Mineralisierung bezeichnet. Im Gegensatz zu mineralischen Düngemitteln werden die in der organischen Substanz gebundenen Nährstoffe nur allmählich freigesetzt und verringert somit die Anfälligkeit für Auswaschungen. Aber auch organische Düngemittel bedürfen einer sorgfältigen Bewirtschaftung. Wenn keine Pflanzendecke vorhanden ist, welche die mobilisierten Nährstoffe aufnehmen, können auch diese ins Grundwasser ausgewaschen oder mit Bodenpartikeln in Flüsse und Bäche gespült werden. Dies ist vor allem im Spätherbst, im milden Winter und im anfänglichen Frühjahr der Fall, wenn die mikrobielle Aktivität noch hoch ist und die Vegetationsdecke reduziert oder sogar ganz entfernt wird.

Übermäßiger Stickstoff- und Phosphorgehalt in Seen und Ozeanen verursachen Verschmutzung und Eutrophierung. Dies führt zu einem übermäßigen Wachstum von Algen, die wiederum außerordentlich viel Sauerstoff verbrauchen und Giftstoffe produzieren. Diese Giftstoffe können sich in Muscheln und Fischen anreichern. Der Verzehr von kontaminierten Meeresfrüchten kann in weiterer Folge beim Menschen schwere Krankheiten hervorrufen, die von Magen-Darm-Problemen über Herz-Kreislauf-Erkrankungen bis hin zu langfristigen neurologischen Symptomen und sogar zum Tod reichen.<sup>23</sup> Die Häufigkeit und Intensität schädlicher Algenblüten wird wahrscheinlich mit dem Klimawandel zunehmen und damit den Erholungs- und Wirtschaftswert der Küstenregionen beeinträchtigen.

<sup>20</sup> Omara, P. et al. (2019) World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends: Review and Current Knowledge. *Agrosystems Geosci. Environ.* 2, 1–8.

<sup>21</sup> Yu, X. et al. (2021) Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security*,

<sup>22</sup> Cameron, K. C. et al. (2013) Nitrogen losses from the soil/plant system: a review: Nitrogen losses. *Ann. Appl. Biol.* 162, 145–173.

<sup>23</sup> Grattan, L. M. et al. (2016) Harmful algal blooms and public health. *Harmful Algae* 57, 2–8.

Hinsichtlich des **Nitrats im Trinkwasser** wurden gesetzliche Grenzwerte festgelegt, da zu hohe Konzentrationen gesundheitliche Schäden verursachen können – z.B. zum Schutz von Babys vor Methämoglobinämie (Blue-Baby-Syndrom). Aber auch bereits niedrigere Nitratkonzentrationen können Krebs- und Herzerkrankungen verursachen.<sup>24</sup> Eine Regulierung des Stickstoffgehalts im Grundwasser ist daher zu befürworten, da dieser bereits in den letzten Jahren gestiegen ist<sup>25</sup>. Als Ursachen sind hier insbesondere übermäßige Nährstoffeinträge und -akkumulationen (Altlasten) sowie die aktuelle Bodenmisswirtschaft zu nennen.

**Der Umgang mit Nährstoffverunreinigungen stellt eine Herausforderung dar**, da diese Art der Verschmutzung sowohl von gegenwärtigen als auch früheren Düngemittelleinträgen beeinflusst wird. Nährstoffe haben sich durch übermäßigen Eintrag und Fixierung in Böden angesammelt. Diese Rückstände können leicht remobilisiert und zeitverzögert in Gewässer transportiert werden. Das bedeutet auch, dass die Auswirkungen der aktuellen und zukünftigen Politik der Europäischen Union (EU) (z.B. Reduzierung des Düngemittelleinsatzes um 20 %, um die Nährstoffverluste bis 2030 um 50 % zu reduzieren und damit Nährstoffeffizienz zu erhöhen) nicht sofort wirksam werden und zudem schwer zu überwachen sind. Diese „Altnährstoffe“ im weit verbreiteten Einzugsgebiet von Flüssen machen es sehr schwierig, die Ziele für die Süßwasserqualität (z.B. Wasserrahmenrichtlinien, EU Green Deal) zu erreichen.<sup>26</sup>

Der weit verbreitete Einsatz von **Pestiziden** zum Schutz von Nutzpflanzen vor Insekten, Beikräutern und Pilzen hat zwischen 2013 und 2019 zu hohen Konzentrationen von Pestiziden und ihren Metaboliten in 13–30 % aller europäischen Oberflächen- und Grundwässer geführt.<sup>27</sup> Während die meisten Pestizide in der Landwirtschaft eingesetzt werden, sind auch industrielle Quellen, wie die Holzindustrie, oder die Nutzung im Haus- und Gartenbereich sowie in öffentlichen Bereichen nicht zu vernachlässigende Quellen. Pestizide enthalten hohe Konzentrationen organischer Verbindungen, wie z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe, Organophosphate, Carbamate, aber auch einige giftige Schwermetalle und Halbmetalle, wie Kupfer, Blei, Quecksilber und Arsen. Die Wirkung der Pestizide hängt von dessen Eigenschaften und Transport ab, wie z. B. Löslichkeit in Wasser, Persistenz gegen Abbau und Wechselwirkungen mit Bodenpartikeln. Pestizide, welche nicht Pflanzen nicht aufnehmen werden entweder vom Boden zurückgehalten oder in andere chemische Formen abgebaut, welche anderen Löslichkeits- und Toxizitätseigenschaften als die Aus-

gangsverbindung besitzen. Lösliche Pestizide können bei Niederschlagsereignissen ins Grundwasser gelangen. Nicht lösliche Pestizide können fest an Bodenpartikel gebunden werden und sich im Mutterboden anreichern. Hier können sie durch Erosion in Oberflächengewässer transportiert oder zu löslicheren Verbindungen abgebaut und im Laufe der Zeit ebenfalls ins Grundwasser ausgewaschen werden.<sup>28</sup>

Der Mensch ist Pestiziden durch Hautkontakt oder Einatmung, insbesondere bei der Ausbringung, oder durch die Aufnahme über die Nahrung (siehe Kapitel 3) und Trinkwasser ausgesetzt. Pestizide können akute Auswirkungen, wie Kopfschmerzen, Übelkeit, Durchfall, Erbrechen, Koma und sogar Tod verursachen.<sup>29</sup> Weitere damit verbundene Gesundheitsrisiken sind Immunsuppression, Hormonstörungen, Fortpflanzungsstörungen, Krebs, neurologische Auswirkungen und Asthma. Die Entfernung dieser Schadstoffe aus dem Trinkwasser ist sehr kostspielig und darüber hinaus sind nicht alle Stoffe extrahierbar.

Alternativen sind Biopestizide, die weniger giftig sind, spezifischer auf Schädlinge abzielen, in niedrigeren Dosen wirksam sind oder schneller abgebaut werden. Als Beispiele sind hierfür Mikroorganismen, wie Viren, Bakterien, Pilze oder pflanzliche Pestizide, die auf natürliche Weise schädlingsabwehrende Chemikalien produzieren, zu nennen.<sup>30</sup>

**Rückstände von Antibiotika** in Gülle beeinträchtigen die Bodengesundheit und die Wasserqualität ebenso. Sie stammen aus Arzneimitteln, welche zuvor Nutztieren verabreicht wurden. Die Gülledüngung

<sup>24</sup> Ward, M. et al. (2018) Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1557.

<sup>25</sup> Harrison, P. A. et al. (2021) Identifying and prioritising services in European terrestrial and freshwater ecosystems. *Biodivers. Conserv.* 19, 2791–2821.

<sup>26</sup> Bieroza, M. Z. et al. (2021) What is the deal with the Green Deal: Will the new strategy help to improve European freshwater quality beyond the Water Framework Directive? *Sci. Total Environ.* 791, 148080.

<sup>27</sup> European Environment Agency (2022) Europe's Groundwater : A Key Resource under Pressure (Office des publications de l'Union européenne) Accessed 04/09/2023.

<sup>28</sup> Wolejko, E. et al. (2020) Soil Biological Activity as an Indicator of Soil Pollution with Pesticides – A Review. *Applied Soil Ecology* 147: 103356. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.006>.

<sup>29</sup> Syafrudin, M. et al. (2021) Pesticides in Drinking Water—A Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 468.

<sup>30</sup> Rad, S. M. et al. (2022) Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Clean Technol.* 4, 1088–1102.

zur Erhöhung der Nährstoffe und des organischen Kohlenstoffs im Boden kann auch zum Eintrag von Substanzen, Bakterien und Genen führen, die gegen Antibiotika sowie Schwermetalle (Kupfer, Zink) oder Desinfektionsmittel resistent sind. Das Verhalten von Veterinärantibiotika im Boden hängt von Reaktionen mit Partikeln des Bodens (Sorptions), mikrobieller oder physikalischer Umwandlung und Mineralisierung zu anorganischen Verbindungen ab. Die Mineralisierung betrifft jedoch nur eine geringe Menge an zugesetzten Antibiotika (weniger als 2%), während ein großer Teil vom Boden gebunden oder in kleinen Poren eingeschlossen (sequestriert) und so vor mikrobiellem Abbau geschützt wird. Dies führt zu einer Anreicherung von Antibiotika im Boden und einer möglichen Freisetzung im Laufe der Zeit. Einige Verbindungen neigen dazu, ins Grundwasser auszuwaschen. Antibiotika gelangen überwiegend über den Oberflächenabfluss und Erosion in Oberflächengewässer und beeinträchtigen so die Wasserqualität. Darüber hinaus verändern antibiotikaresistente Bakterien oder Gene, welche über Düngung in den Boden eingebracht werden, die mikrobielle Zusammensetzung und Aktivität des Bodens. Einige Organismengruppen (Taxa) werden angereichert, während andere unterdrückt werden. Dies beeinflusst das komplexe regulatorische Netzwerk des Bodenmikrobioms und beeinflusst Prozesse wie den mikrobiellen Nährstoffkreislauf, den Schadstoffabbau und das Pflanzenwachstum. Die Auswirkungen von Antibiotika auf die mikrobielle Gemeinschaft im Boden könnten nur vorübergehend sein, da die Häufigkeit der Resistenzgene im Laufe der Zeit abnimmt und so die Wiederherstellung des Bodenmikrobioms ermöglicht. Der Verzehr resistenter Bakterien mit ungekochtem Gemüse oder Obst kann jedoch das menschliche Mikrobiom beeinträchtigen und birgt die Gefahr unheilbarer Infektionen beim Menschen (vgl. Kapitel 4).<sup>31</sup>

**Mikro- und Nanoplastik**<sup>32</sup> entsteht, wenn Kunststoff mechanisch oder photochemisch zu kleineren Partikeln abgebaut wird. Diese Kleinstpartikel können auch biologisch aktiv werden. Beispiele sind Phthalate, Bisphenole, Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol, Polyurethan und Polycarbonate. Einige dieser Verbindungen sind krebserregend und wirken endokrin (hormonverändernd) oder neurotoxisch. Wissenschaftliche Belege über die (schädlichen) Auswirkungen von Mikroplastik im menschlichen Körper sind jedoch noch begrenzt. Auch deshalb, weil einige Auswirkungen auf Schadstoffe und Krankheitserreger zurückzuführen sind, die an Kunststoffe gebunden sind. Nano- und Mikroplastik wird vom Menschen vor allem über Meeresfrüchte, durch Einatmung von kontaminiertem Bodestaub oder durch Trinkwasser aufgenommen.<sup>33</sup> Zu den Quellen gehören die direkte Anwendung als

Kunststoffmulch, Gewächshausgebäude oder Bodenzugabestoffe (z.B. Plastiktüten im Kompost oder Düngemittel aus Biogas- oder Kläranlagen). Aber auch die indirekte Freisetzung, insbesondere durch Reifenabrieb auf Straßen oder Abwasser, trägt wesentlich zur Bodenverschmutzung mit Mikroplastik bei<sup>34</sup>. Böden und Oberflächen- sowie Grundwässer fungieren als Senken, in welchen sich Schadstoffe letztendlich sammeln. Die hohe Mobilität von Kunststoffen zwischen den Ökosystemen führt dazu, dass Mikro- und Nanoplastik aufgrund dessen geringer Größe sich bereits in vielen Grundwasserkörpern verteilt haben. Die Retention und Mobilität von Kunststoffen in Böden hängen von den Wechselwirkungen zwischen Boden und Kunststoff selbst sowie von dessen Abbau- und Umwandlungsprozessen ab.<sup>35</sup>

**Schwermetalle und Halbmetalle** stammen aus Düngemitteln, Klärschlamm, atmosphärischen Ablagerungen von Verkehrs- und Industrieabgasen oder Staub aus Bergbaustandorten. Daher reichern sich diese Schadstoffe typischerweise im Mutterboden an. Im Gegensatz zu organischen Schadstoffen können Metalle und Halbmetalle im Boden nicht abgebaut werden. Abhängig von ihrer Bioverfügbarkeit können diese Metalle von Nutzpflanzen aufgenommen werden und schließlich in die menschliche Nahrungskette gelangen. Langfristig kann dies zu chronischen Metalltoxizitätskrankheiten führen. Die langfristige Exposition gegenüber cadmiumreichen Lebensmitteln kann zum Beispiel zu Nierenerkrankungen oder Knochenerweichung führen. Bei starker Verschmutzung können Bodenmikroorganismen oder -pflanzen sogar unter akuter Toxizität leiden. Dies führt einerseits zu einer verminderten mikrobiellen Funktion und andererseits zu einem verminderten Pflanzenwachstum. Durch Wind- und Wassererosion können Metallschadstoffe auch in Gewässer gelangen oder sich als Staub in Wohngebieten anreichern. In Böden mit eingeschränkter Pufferfunktion können Metalle auch in das Grundwasser gelangen, was wiederum eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellt.

<sup>31</sup> Jechalke, S. et al. (2014) Fate and effects of veterinary antibiotics in soil. *Trends in microbiology* 22, 536-545.

<sup>32</sup> Velazquez-Meza, M.E. et al. (2022) Antimicrobial resistance: One Health approach. *Vet World* 15, 743-749.

<sup>33</sup> Münzel, T. et al. (2023) Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about? *Cardiovasc. Res.* 119, 440-449.

<sup>34</sup> Beste, A. (2020) Leben im Plastoän. *Der kritische Agrarbericht 2020*. [https://www.gesunde-erde.net/media/beste\\_leben-im-plastozaen.pdf](https://www.gesunde-erde.net/media/beste_leben-im-plastozaen.pdf). Accessed 13/10/2023.

<sup>35</sup> Boyle, K., Örmeci, B. (2020) Microplastics and Nanoplastics in the Freshwater and Terrestrial Environment: A Review. *Water* 12, 2633.



# 3



# Boden- und Lebensmittelqualität

**Böden bilden die Grundlage für die Lebensmittelproduktion sowie für Ernährungssicherheit** und sind daher eng mit menschlicher Ernährungsgesundheit verbunden. Nur ein gesunder Boden kann eine Vielfalt von Nutzpflanzen bereitstellen, welche alle notwendigen und nützlichen Nährstoffe in ausreichender Menge enthalten.

## Die ernährungsphysiologische Qualität von Lebensmitteln

Die **ernährungsphysiologische Qualität** der von uns verzehrten Lebensmittel ist entscheidend für unsere Ernährungsgesundheit. Mängel an Mikronährstoffen stellen weltweit eine Herausforderung für die menschliche Gesundheit dar, auch in Europa.<sup>36</sup> Mangelerscheinungen werden hauptsächlich durch eine ungesunde Ernährung verursacht: kalorienreiche, nährstoffarme, stark verarbeitete Lebensmittel und wenig Gemüse und Obst. Mängel werden aber auch durch **sinkende Qualitäten der Nahrungsmittel** selbst hervorgerufen, welche wiederum **durch Bodendegradation** entstehen.

Die ernährungsphysiologische Qualität unserer Lebensmittel wird bestimmt durch die **Fülle und Vielfalt** an Mineralstoffen, Vitaminen, Proteinen und anderen

Makro- sowie Mikronährstoffen und Spurenelementen. Darüber hinaus sind auch nicht-essenzielle Nährstoffe wie **Sekundäre Pflanzenstoffe (SPS)** bekannt für ihren großen therapeutischen Nutzen für den Menschen. SPS sind eine äußerst vielfältige Gruppe an Metaboliten, welche im Boden und in Pflanzen vorkommen: z.B. Polyphenole, Flavonoide, Terpene und Alkaloide. Sie vermindern negative Auswirkungen von Krankheitserregern, unterstützen die Funktion des Immunsystems, haben entzündungshemmende, antioxidative und probiotische Wirkungen und sollen das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs senken.<sup>37 38</sup> Somit wird empfohlen, Sekundäre Pflanzenstoffe in Konzepte für eine gesunde Ernährung zu integrieren. Eine Übersicht über wichtige Nährstoffe, einschließlich SPS, befindet sich in Tabelle 1.

<sup>36</sup> **Ritchie, H. and Roser, M.** (2017) Micronutrient Deficiency. <https://ourworldindata.org/micronutrient-deficiency>. Accessed 04/09/2023.

<sup>37</sup> **Reeve, J.R.** et al. (2016) Chapter Six - Organic Farming, Soil Health, and Food Quality: Considering Possible Links. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy, Advances in Agronomy*. Academic Press, 319-367.

<sup>38</sup> **Townsend, J.R.** et al. (2023) Foundational Nutrition: Implications for Human Health. *Nutrients* 15.

Nährstoffe		Funktion
<b>Makronährstoffe - in größeren Mengen benötigt</b>	Kohlenhydrate, Fette, Proteine	Grundlegende Energieversorgung
<b>Mikronährstoffe - in kleineren Mengen benötigt</b>	Vitamine	Vitamine A, B, C, D, E, K Verschiedene Funktionen, z.B. Unterstützung des Metabolismus und des Immunsystems
	Mineralien	Kalzium, Magnesium, Natrium, etc. Verschiedene Funktionen, z.B. als Elektrolyte, wichtiger Bestandteil vieler Enzyme
	Spurenelemente, benötigt in sehr kleinen Mengen	Zink, Eisen, Iod, etc. Unterstützung des Immunsystems und Herz-Kreislauf-Gesundheit
<b>Sekundäre Pflanzenstoffe (SPS)</b>	Antioxidantien	Polyphenole, Flavonoide, Terpene, etc. entzündungshemmende Effekte, probiotische Effekte, Unterstützung des Immunsystems, Verringerung der Auswirkung von Krankheitserregern, Reduktion des Risikos für Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen

**Tabelle 1: Überblick über die wichtigsten Nährstoffe der menschlichen Ernährung und deren Zusammenhang mit menschlicher Gesundheit.**

## Bodeneigenschaften beeinflussen die ernährungsphysiologische Qualität unserer Lebensmittel

Ein gesunder Boden produziert gesunde Lebensmittel – **umgekehrt gefährdet ein kontaminierter oder degraderter Boden die Lebensmittelsicherheit.** Pestizidrückstände auf Nutzpflanzen wie Obst oder Schwermetalle in Gemüse können die Unbedenklichkeit der von uns verzehrten Lebensmittel bedrohen. Schädliche Substanzen können aus dem Boden aufgenommen werden (z.B. Schwermetalle), stammen aber auch direkt aus Pflanzen, beispielsweise durch die Anwendung von Pestiziden und anderen Pflanzenschutzmitteln. Während es in der EU-Gesetzgebung Grenzwerte für schädlichen Substanzen in Lebensmitteln gibt (Ratsverordnung 315/93/EWG), enthalten viele Kulturen – insbesondere Obst wie Trauben und Blattgemüse wie Rucola – oft alarmierende Mengen an Pestizidrückständen.

**Verschiedene Bodeneigenschaften beeinflussen die Qualität der Ernte** und somit die Qualität der von uns verzehrten Lebensmittel. Ein robustes und intaktes System aus Pflanze-Boden-Mikroben mit einer reichhaltigen, vielfältigen Bodenfauna ist entscheidend für die Bereitstellung von Lebensmitteln mit hoher Qualität.<sup>39</sup> Dies bedarf weit mehr als nur das Vorhandensein von essenziellen Nährstoffen im Boden. Hochwertige Böden zeichnen sich durch einen **hohen Anteil an organischer Substanz** und ein reichhaltiges und vielfältiges

Mikrobiom aus, insbesondere im Bereich der Wurzeln – der sogenannten Rhizosphäre.

Das Mikrobiom fördert die Stoffwechselaktivität und schafft **Synergien zwischen Nährstoffen und Mikroorganismen.**<sup>40</sup> In diesen Synergien zirkulieren Nährstoffe durch das System aus Pflanze-Boden-Mikroben und schaffen ein optimales Gleichgewicht und Bioverfügbarkeit von Nährstoffen. Unter diesen Bedingungen können Pflanzen alle Mineralstoffe aufnehmen und alle Vitamine und Nährstoffe produzieren, die wir benötigen. Im Vergleich zu Nahrungsmittel von degradierten Böden haben Nahrungsmittel von gesunden Böden einen höheren Gehalt und eine bessere Qualität an Mineralstoffen, Vitaminen, Spurenelementen und Proteinen.<sup>41 42 43 44</sup>

<sup>39</sup> Reeve, J.R. et al. (2016)

<sup>40</sup> Townsend, J.R. et al. (2023)

<sup>41</sup> Reeve, J.R. et al. (2016)

<sup>42</sup> Aulakh, C. S. et al. (2022). A review of the influences of organic farming on soil quality, crop productivity and produce quality. J. Plant Nutr. 45, 1884-1905.

<sup>43</sup> Bertola, M. et al. (2021) Improvement of Soil Microbial Diversity through Sustainable Agricultural Practices and Its Evaluation by -Omics Approaches: A Perspective for the Environment, Food Quality and Human Safety. Microorganisms 9.

<sup>44</sup> Montgomery, D. R. and Bickel, A. (2021) Soil Health and Nutrient Density: Beyond Organic vs. Conventional Farming. Front. Sustain. Food Syst. 5.



Dies ist besonders relevant für Sekundäre Pflanzenstoffe (SPS) – sie werden in Pflanzen produziert, die von einem gesunden Bodenmikrobiom im Nährstoffgleichgewicht umgeben sind.<sup>45</sup> SPS unterstützen hauptsächlich die Pflanzengesundheit, fördern aber auch die menschliche Gesundheit. Innerhalb der Pflanze wirken sie als Abwehr gegen Krankheitserreger, als Schutz vor Umweltstress wie Dürre oder extreme Temperaturen und zur Anziehung von nützlichen Organismen wie Bestäubern und mikrobiellen Symbionten. SPS fördern Nährstoffkreisläufe im Boden, indem sie Nährstoffe mobilisieren und das Wachstum nützlicher Bakterien unterstützen sowie Bodennährstoffe mineralisieren und für Pflanzen verfügbar machen. Abgesehen davon verleihen SPS Gemüse und Früchten ihre charakteristische Farbe und ihren Geschmack: ein Beispiel sind Weintrauben und Beeren, deren dunkle Farbe von SPS stammt.

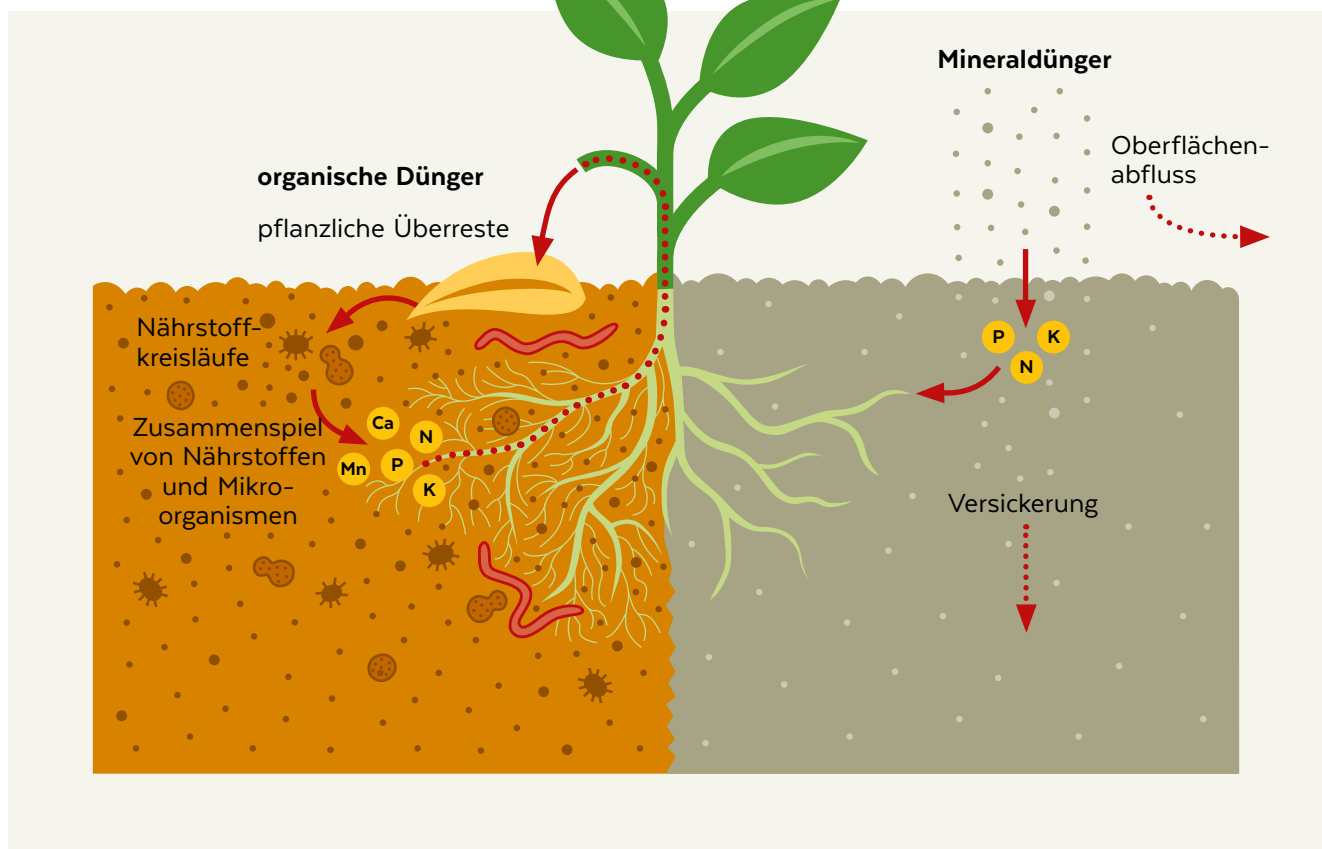
<sup>45</sup> Clemensen, A.K. et al. (2020) Ecological Implications of Plant Secondary Metabolites - Phytochemical Diversity Can Enhance Agricultural Sustainability. *Front. Sustain. Food Syst.* 4.

## Bodenmanagement beeinflusst die ernährungsphysiologische Qualität unserer Lebensmittel

Pflanzen können Sekundäre Pflanzenstoffe (SPS) nur unter bestimmten Umständen produzieren – vor allem dann, wenn ihre eigenen Abwehrmechanismen aktiv sind. Dies ist der Fall, wenn ein gesundes, vielfältiges, reichhaltiges und aktives Mikrobiom die Pflanze umgibt und besiedelt. Die Gesundheit des Mikrobioms wiederum hängt von der Menge und Qualität der organischen Bodensubstanz ab.

Die Menge an organischem Material im Boden wird durch viele weit verbreitete Bewirtschaftungsmaßnahmen verringert, z.B. Düngung mit mineralischem Dünger, Anwendung von Pestiziden und regelmäßige Bodenbearbeitung. Diese Maßnahmen degradieren das Bodenmikrobiom und begrenzen somit die Produktion von SPS und die Produktion von Mineralstoffen und Vitaminen. Pestizide bekämpfen beispielsweise Krankheitserreger, ersetzen jedoch natürliche Abwehrmechanismen der Pflanzen – daher werden weniger SPS produziert. Auf diese Weise fehlen Lebensmitteln die gesundheitsfördernden Vorteile von beispielsweise Polyphenolen. Pflügen kann Unkraut bekämpfen und

**Grafik 3:**  
**Nährstoffkreisläufe**



den Boden für die Aussaat vorbereiten, zerstört jedoch gleichzeitig die komplexe Bodenstruktur, reduziert den Gehalt an organischer Substanz und verändert die Zusammensetzung des Mikrobioms. Dies wiederum reduziert die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen, verlangsamt den Nährstoffkreislauf und minimiert die Aufnahme von Mineralstoffen sowie die Produktion von Sekundären Pflanzenstoffen. Mineraldünger bieten für Pflanzen leicht verfügbare Makronährstoffe (insbesondere Stickstoff, Phosphor, Kalium), verändern jedoch das Nährstoffverhältnis und verdünnen damit weniger mobile Nährstoffe wie Mikronährstoffe (z.B. Eisen, Mangan). Folglich nehmen Pflanzen weniger von diesen Mikronährstoffen und Spurenelementen auf und entwickeln eine geringere Nährstoffdichte. Mit ihren sofort verfügbaren Pflanzennährstoffen verarmen Mineraldünger das Mikrobiom – welches sich von organischer Substanz ernährt. Die leicht zugänglichen Nährstoffe führen zur Degradation des Mikrobioms und damit zur Bodendegradation, zur Veränderung der Nährstoffverhältnisse und zur Beeinträchtigung natürlicher Abwehrmechanismen der Pflanzen. Diese Prozesse verringern die ernährungsphysiologische Qualität der Ernte und erhöhen ihre Anfälligkeit für Krankheiten.

Abgesehen von der Bodenbewirtschaftung spielt auch die Auswahl der Sorte eine entscheidende Rolle für die Nahrungsmittelqualität der Ernte – viele ältere Sorten

weisen eine höhere Nährstoffdichte auf als moderne Sorte.<sup>46</sup> Zum Beispiel können wilde Formen von Salat bis zu dreimal mehr Beta-Carotin, ein leistungsstarkes Antioxidans, enthalten als moderne Salatsorten.<sup>47</sup> Dies gilt auch für Grundnahrungsmittel wie Weizen: moderne Sorten haben zwar höhere Erträge, aber eine geringere Konzentration an Mineralstoffen. Folglich müssen wir größere Mengen an Lebensmitteln konsumieren, um die gleiche Menge an Nährstoffen zu uns zu nehmen. Zum Beispiel musste ein durchschnittlicher Erwachsener 10 Scheiben Brot aus alten Weizensorten verzehren, um seinen empfohlenen Zinkbedarf zu decken. Heutzutage wären bereits 15 Scheiben erforderlich.<sup>48</sup> Moderne Bodenbewirtschaftung simplifiziert und intensiviert Agrarökosysteme – z.B. Monokulturen mit geringer struktureller Vielfalt. Sie reduziert die Pflanzenvielfalt im System, was die biochemische Vielfalt verringert und somit die Produktion von SPS und die Verfügbarkeit von Mineralstoffen und Vitaminen begrenzt.<sup>49</sup>

<sup>46</sup> **Reeve, J. R.** et al. (2016)

<sup>47</sup> **Mou, B.** (2005) Genetic Variation of Beta-carotene and Lutein Contents in Lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci. Jashes* 130, 870–876.

<sup>48</sup> **Murphy, K. M.** et al. (2008) Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. *Euphytica* 163, 381–390.

<sup>49</sup> **Clemensen, A. K.** et al. (2020)







# 4



# Das Mikrobiom im Boden und im menschlichen Darm

## Das Bodenmikrobiom und seine Funktionen

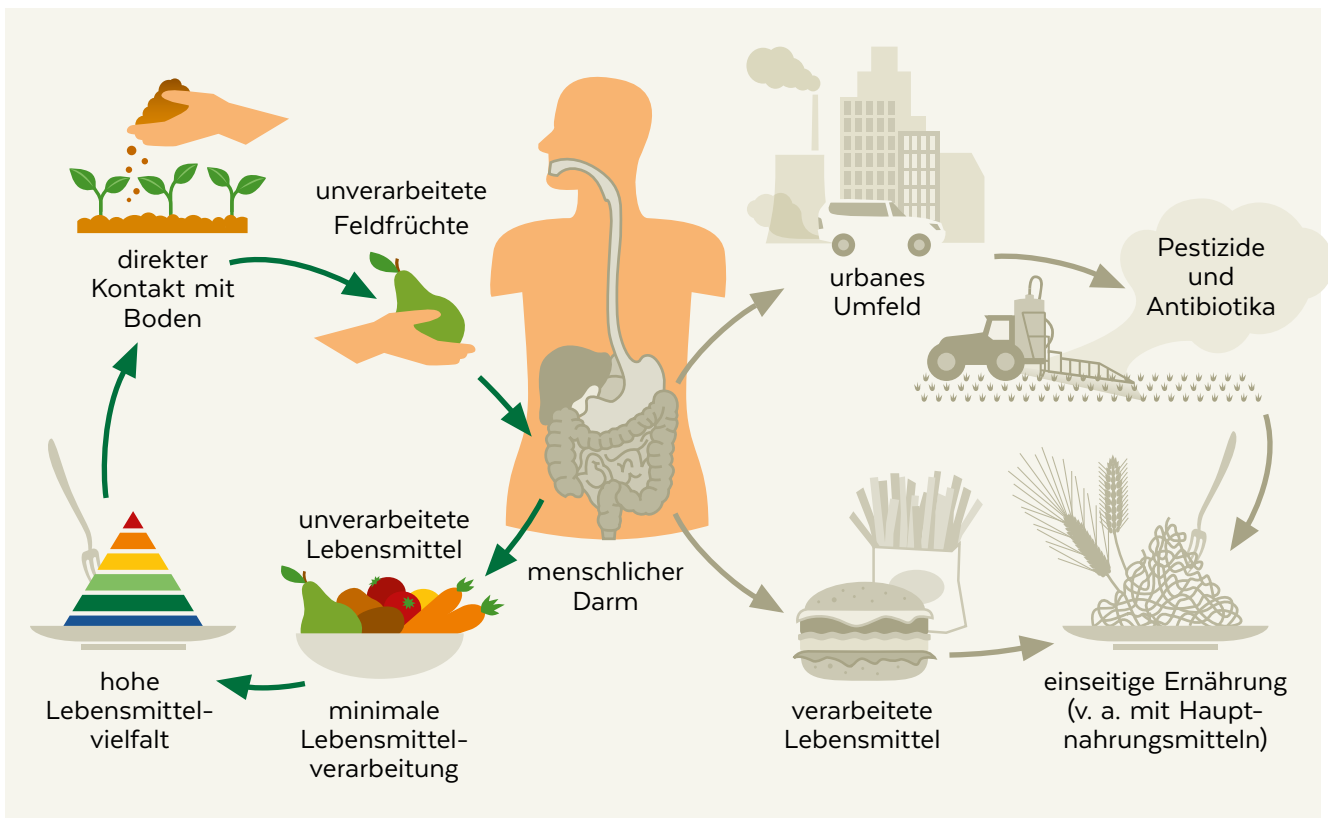
Der Boden beherbergt eine unermessliche Vielfalt an Mikroorganismen, also an Pilzen, Bakterien und Algen. Der Boden ist somit das artenreichste Ökosystem der Erde. Die Gesamtheit aller Mikroorganismen in einem Ökosystem oder Biotop wird als Mikrobiom bezeichnet. Das **Mikrobiom des Bodens ist für seine Funktionen von essentieller Bedeutung**. Die Bakterien und Pilze sind Schlüsselorganismen in den Nährstoffkreisläufen und beim Abbau der organischen Substanz und seiner Stabilisierung in Form von Humus. Mikroorganismen tragen auf diesem Weg zur Nährstoffversorgung von Pflanzen bei, schützen aber auch die Pflanzen vor Krankheiten und vor Stress. Eine hohe Biodiversität an Mikroorganismen ist dabei der Schlüssel für all diese Prozesse, weil nur die Artenvielfalt die Voraussetzung schafft, dass auch die passenden Mikroorganismen den unterschiedlichen Pflanzenarten zur Verfügung stehen und die entsprechenden Schutz- und Versorgungsfunktionen erfüllen können.

Ein beträchtlicher Teil der Mikroorganismen in der Pflanze ist auch in der Lage, die Pflanze selbst zu besiedeln, und zwar entweder im Wurzelraum der Pflanzen (in der sog. Rhizosphäre), an der Oberfläche von Blatt und Stamm (der sog. Phyllosphäre) oder innerhalb der pflanzlichen Organe bzw. Gewebe (in der sog. Endosphäre). Diese Pflanzen-assoziierten Mikroorganismen unterstützen die Pflanzen in ihrer Gesundheit auf verschiedensten Wegen, in dem sie deren Resistenz gegenüber Stress oder Krankheitserregern verbessern. Wurzel-assoziierte Mikroorganismen, vor allem die in der Wurzel-Endosphäre lebenden Bakterien, können den Nährwert der besiedelten Pflanze direkt beeinflussen, indem sie über ihre Wirkung auf die Pflanze zu einer Erhöhung des Gehaltes an Mineralien und Spurenelementen, Vitaminen und Antioxidantien beitragen (siehe Kapitel 3).

Das **Mikrobiom des Bodens hat sich in den letzten Jahrzehnten teilweise drastisch verändert**, wobei diese Änderungen in erster Linie auf die intensive Landwirtschaft und die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Bodendegradationsprozesse zurückzuführen sind. Auf intensiv landwirtschaftlich genutzten Böden ist es vor allem die Anwendung von Mineraldüngern und Pestiziden sowie die Fokussierung auf Monokulturen und die Änderungen in der Fruchtfolge, die zu einer Reduktion der mikrobiellen Diversität geführt haben. Also Konsequenz daraus hat sich über die zuvor beschriebenen Zusammenhänge die pflanzliche Qualität und die pflanzliche Gesundheit verschlechtert. Die voranschreitenden Bodendegradationsprozesse und der Klimawandel werden voraussichtlich zu einer weiteren Verringerung der mikrobiellen Vielfalt im Boden führen.

## Der Zusammenhang zwischen dem Bodenmikrobiom und dem menschlichen Darmmikrobiom

Erst in den letzten Jahren hat sich herausgestellt, dass viele **Mikroorganismen eine Art Bindeglied zwischen den verschiedenen Hauptkomponenten der terrestrischen Ökosysteme**, also der Böden, der Pflanzen, der Tiere und des Menschen, darstellen. Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Reihe von **Mikroorganismen sowohl im Boden als auch in der Pflanze und letztlich auch im Mikrobiom des menschlichen Darms vorkommen**. Durch die Konsumation von Pflanzen als auch die absichtliche (die sogenannte Geophagie) oder unabsichtliche (z.B. bei spielenden Kindern am Boden oder im Kontakt mit Exkrementen) Aufnahme von Bodenpartikeln gelangen die Mikroorganismen in den menschlichen Körper und können sich in Folge dort ansiedeln, z.B. auf der Haut, im Mund oder im Darm. Vor allem letzterer ist von einer unglaublichen Vielzahl und Vielfalt an Mikroorganismen gekennzeichnet.



**Grafik 5:**  
**Darmgesundheit**

In Analogie zum Bodenmikrobiom wird auch bei der Gesamtheit der Mikroorganismen im **menschlichen Darm** vom Darm-Mikrobiom gesprochen. Das Ausmaß des gesamten menschlichen Mikrobioms ist beeindruckend: es gibt ca. zehnmal so viele Bakterienzellen als menschliche Zellen im Körper, und das gesamte mikrobielle Genom ist mehr als 100 mal so groß wie das menschliche. Die Entwicklung des Darm-Mikrobiom beginnt bereits vor der Geburt und ist bereits nach 2-3 Jahren voll entwickelt. Die Geburt ist der erste große Anstoß zur Entwicklung des Darm-Mikrobioms und beginnt sich dann mit der Aufnahme von Nahrung und auch von Bodenpartikeln (siehe oben) weiter zu entwickeln. Im Laufe des menschlichen Lebens ist vor allem die Ernährung für die Zusammensetzung des Darm-Mikrobioms entscheidend. Viele Studien zeigen, dass die Ernährungsgewohnheiten weitaus mehr Einfluss ausüben als der genetische Hintergrund. Studien zeigen auch, dass kohlenhydrat- und ballaststoffreiche Nahrung die Biodiversität des Darm-Mikrobioms erhöht und dass damit auch gezielt die für die menschliche Gesundheit zuträglichen Mikroorganismen gefördert werden.

Wie auch im Boden sind die Mikroorganismen im Darm für **die Produktion von Nährstoffen und den Nährstoffkreislauf**. Viele Bestandteile der menschlichen

Nahrung können von den Enzymen des menschlichen Körpers nicht zerlegt werden. Deswegen sind der Abbau dieser Bestandteile und die daraus produzierten Nährstoffe für die menschliche Gesundheit von essenzieller Bedeutung. Darüber hinaus stehen die Aktivitäten des Darm-Mikrobioms auch mit der Regulierung des menschlichen Immunsystems und dem Auftreten von Krankheiten wie Diabetes, Adipositas sowie neurologischen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen im Zusammenhang. Frühere menschliche Gesellschaften standen in viel direkterem Kontakt mit dem Boden, vor allem durch die Aktivitäten in der Landwirtschaft und in der Tierhaltung. Durch den **Verlust des Kontaktes mit dem Boden**, aber auch mit unverarbeiteten pflanzlichen Produkten, hat sich das Darm-Mikrobiom vor allem der städtischen Bevölkerung stark verändert und die Biodiversität hat stark abgenommen. Ohne Zweifel haben verbesserte hygienische Lebensbedingungen sowie der Einsatz von Antibiotika bzw. auch der Entwicklung produktiver landwirtschaftlicher Methoden natürlich auch zu einer umfassenden Verbesserung der Lebensbedingungen und der Lebenserwartung geführt. Auf der anderen Seite hat die starke Reduktion des direkten Kontaktes mit dem Boden und generell mit der Umwelt und den darin vorkommenden Mikroorganismen über die damit einhergehende Abnahme der mikrobiellen Vielfalt im menschlichen Körper und



speziell im Darm zu einem Anstieg an Allergien und Autoimmunerkrankungen geführt.

Mit dem sogenannten „**westlichen Lebensstil**“, der auf intensiver landwirtschaftlicher Produktion und einem hohen Anteil an industriell verarbeiteten Lebensmitteln beruht, ist es zu einer Abnahme der Vielfalt im menschlichen Darm gekommen.<sup>50</sup> Nichtsdestotrotz ist es auch in einem urbanen Umfeld möglich, über den Konsum von **lokal und nachhaltig produzierten Lebensmitteln** ein Stück weit den Lebensstil früherer Generationen in den heutigen Alltag zu integrieren. Auf diese Weise würde nicht nur die Vielfalt und die Funktionalität des menschlichen Darm-Mikrobioms profitieren, sondern über die nachhaltige Produktion auch das Bodenmikrobiom und die Qualität bzw. Funktionalität der Böden verbessert werden, was letztlich zu einer Verbesserung der gesamten terrestrischen Umwelt beitragen würde.

Der Boden beherbergt allerdings nicht nur förderliche Mikroorganismen, sondern auch **Krankheitserreger**. Bodenbakterien wie z.B. *Bacillus anthracis*, der Erreger von Milzbrand – einer potenziell tödlichen Krankheit für Mensch und Tier, sind global weit verbreitet und könne auch über die direkte und indirekte Aufnahme von Bodenpartikeln infektiös wirken. Allerdings sind das Auftreten und die Pathogenität sehr stark von der mikrobiellen Vielfalt im Boden abhängig. Viele Studien haben gezeigt, dass eine ausgeprägte Biodiversität der Mikroorganismen im Boden die Infektiosität von Krankheitserregern stark reduziert. Das gilt sowohl für die Erreger von Krankheiten bei Mensch und Tier als auch bei Erreger von Pflanzenkrankheiten.<sup>51</sup>

Der **Klimawandel** führt wie bereits in früheren Kapiteln beschrieben zu einer **Beschleunigung von Bodendegradationsprozessen**. Das trägt auch zu einer Beeinträchtigung des Bodenmikrobioms, was sich in weiterer Folge auch auf das menschliche Mikrobiom beeinträchtigt. Eine kürzlich publizierte Studie hat gezeigt, dass davon die weniger häufigen Mikroorganismen stärker als die dominierenden Arten betroffen sind.<sup>52</sup> Da gerade die weniger häufigen Arten für die Artenvielfalt und damit für die Funktionalität entscheidend sind, ist diese Änderung von kritischer Bedeutung.

<sup>50</sup> **Hirt, H.** (2020) Healthy soils for healthy plants for healthy humans. EMBO Reports 21.

<sup>51</sup> **Singh, B. K.** et al. (2023) Soil microbiomes must be explicitly included in One Health policy. Nat Microbiol 8, 1367-1372.

<sup>52</sup> **Zhou, Z.** et al. (2020) Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality. Nat. Commun. 11, 1-10.

# 5





# Maßnahmen zur Verbesserung der Bodengesundheit und Verringerung von Bodendegradation

**Jegliche Interaktion mit Böden beeinflusst deren Gesundheit und damit auch das Bodenmikrobiom, Wasserqualität und Lebensmittelqualität.** Bodenverlust und -degradation können reduziert, umgekehrt und verlangsamt sowie Bodengesundheit unterstützt und erhalten werden. Einige mögliche Maßnahmen und Potenziale werden in diesem Kapitel erörtert. Der Fokus liegt auf Sektoren, welche in enger Interaktion mit Böden stehen und diese beeinflussen, namentlich Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Urbanisierung sowie Bodenkontaminationen.

## Maßnahmen für Bodengesundheit in der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist zweifellos einer der flächenmäßig größten und intensivsten menschlicher Eingriffe in Böden. Kein anderer Sektor ist so stark auf die Bodengesundheit angewiesen wie die Landwirtschaft, mit weitreichenden Auswirkungen auf Ernährungssicherheit, globalen Lebensmittelhandel und menschliche Gesundheit. Abgesehen davon macht die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) etwa 33% des EU-Haushalts aus, was die Landwirtschaft in der EU auch zu einem wichtigen Wirtschaftssektor macht. Für finanzielle und umweltbezogene Nachhaltigkeit ist daher eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Boden entscheidend. Mit deren Degradation und Erschöpfung riskiert die EU eine Landwirtschaft, welche nicht in der Lage ist, nachhaltige Ernährung, die Unversehrtheit der Umwelt und finanzielle Machbarkeit zu garantieren. Viele bodenbezogene Ökosystemdienstleistungen hängen von dessen Gesundheit ab – daher sollte die Bodengesundheit das zentrale Element der GAP sein.

<sup>53</sup> Guo, M. (2021) Soil Health Assessment and Management: Recent Development in Science and Practices. Soil Systems 5.4.

<sup>54</sup> Bertola, M. et al. (2021)

<sup>55</sup> Montgomery, D. R. and Biklé, A. (2021)

Die folgenden **Grundsätze für Bodengesundheit**<sup>53</sup> werden als Leitlinien für die landwirtschaftliche Praxis in der gesamten EU empfohlen:

1. **So weit wie möglich eine kontinuierliche Bodenbedeckung halten**
2. **Minimieren von Bodenstörungen**
3. **Vielfalt im Pflanzenanbau**
4. **Kontinuierliche Durchwurzelung des Bodens**
5. **Integration von Nutztieren in Agrarökosysteme**

Im Folgenden werden spezifische Bewirtschaftungsoptionen für intensiv und extensiv genutzte Flächen vorgestellt – alles im Einklang mit den oben genannten Grundsätzen für Bodengesundheit.

Die Bodenbewirtschaftung beeinflusst in hohem Maße die Boden- und Lebensmittelqualität und sollte daher auf Bodengesundheit ausgerichtet sein. Bewirtschaftungspraktiken sollten ein **gesundes Bodenmikrobiom aufbauen, aufrechterhalten und unterstützen**.<sup>54 55</sup> Die Erhöhung der organischen Substanz ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels, da das Bodenmikrobiom von organischer Substanz lebt. Sie kann gefördert werden durch organische Düngung mit Stallmist oder stickstofffixierenden Pflanzen (Leguminosen). Eine **minimale und gezielte Anwendung von Pestiziden** fördert das Mikrobiom und ermöglicht es der Pflanze, ihre eigenen Abwehrmechanismen zu entwickeln. **Wenig oder keine Bodenbearbeitung** bewahrt eine intakte Bodenstruktur, verbessert die Wasserdurchlässigkeit und -verfügbarkeit und ermöglicht es Regenwürmern, stabile Ton-Humus-Komplexe zu bilden, welche für langfristige Bodenfruchtbarkeit entscheidend sind. Eine **dauerhafte Bodenbedeckung** verbessert ebenfalls die Bodenstruktur, reduziert Erosion und bringt organische Substanz in den Boden. Zwischenfruchtsaat, Deckfruchtsaat und organischer Mulch sind Managementoptionen welche gleichzeitig den Boden bedecken und das Bodenmikrobioms durch die Bereitstellung von organischer Substanz ernähren.



## Maßnahmenkatalog für Bodengesundheit im Ackerbau

Die Bodengesundheit profitiert erheblich davon, **mineralische Düngemittel durch organische Düngemittel zu ersetzen und organische Substanz zuzuführen**.<sup>56</sup> Beispiele für organische Düngemittel sind Kompost, Mulch, Mist, Pflanzenkohle oder das Anbauen von Leguminosen. Einige von ihnen bedecken den Boden (wie Mulch), im Einklang mit Grundsatz 1, andere beinhalten tierische Produkte (wie Mist), im Einklang mit Grundsatz 5. Organische Düngemittel verbessern die Bodenstruktur durch Aggregation, unterstützen die Wasseraufnahme und -haltekapazität, fördern die mikrobielle Aktivität sowie Nährstoffkreisläufe und können Krankheiten unterdrücken. Allerdings erfordert dies eine sorgfältige Bewirtschaftung, um Nährstoffauswaschungen zu verhindern. Am wichtigsten ist, dass die Freisetzung von Nährstoffen aus organischen Düngemitteln durch Mineralisierung mit dem Nährstoffbedarf der Kulturen zeitlich abgestimmt wird.<sup>57</sup>

**Fruchtfolgen** sind eine weitere Maßnahme zur Unterstützung der Bodengesundheit.<sup>58</sup> Sie stehen im Zusammenhang mit Grundsatz 3, da sie die Kulturen zeitlich diversifizieren. Diese Praxis unterstützt die Bekämpfung von Krankheiten auf verschiedene Weisen: Sie unterbricht den Krankheitszyklus, da die Wirtspflanze nicht immer vorhanden ist, und Exsudate einer Pflanze können Krankheitserreger anderer Pflanzen bekämpfen. Bei Fruchtfolgen tragen Pflanzenrückstände und Wurzeln zum Eintrag von organischer Substanz bei, z.B. über Wurzelrückstände. Sie unterstützen auch das Nährstoffgleichgewicht, da verschiedene Kulturen dem Boden verschiedene Nährstoffe entziehen und so ein einseitiger Nährstoffverbrauch verhindert wird. Kulturen innerhalb einer Fruchtfolge können sich gegenseitig unterstützen – z.B. liefert der Anbau von Leguminosen vor Stickstoff-zehrenden Pflanzen den benötigten Stickstoff und reduziert somit die Notwendigkeit für Düngemittel.

**Deckfrüchte und Zwischenfruchtbau** sind weitere zentrale Maßnahmen für Bodengesundheit in der Landwirtschaft.<sup>59</sup> Sie stehen im Einklang mit den Grundsätzen 1, 3 und 4, indem sie Böden bedecken und durchwurzeln sowie vorhandene Vegetation diversifizieren. Deckfrüchte und Zwischenfrüchte bedecken den Boden mit ihren Blättern und verhindern so Erosion und Verschlammung. Ihre Wurzeln sorgen für strukturelle Stabilität, Belüftung und verbessern die Wasseraufnahme und -haltekapazität. Darüber hinaus bringen die Wurzeln und Pflanzenrückstände organische Substanz in das System und unterstützen den Nährstoffkreislauf durch mikrobielle Aktivität. Zwischenfrüchte

können Hauptkulturen stärken, aber auch hier ist eine sorgfältige Auswahl und Kombination von Pflanzen erforderlich, um mögliche Vorteile zu maximieren und unerwünschte Effekte zu minimieren – z.B. reduziert die Kombination von Gräsern und Leguminosen die Wahrscheinlichkeit der Nährstoffauswaschung.

Ein Best-Practice-Beispiel für ein gemischtes Anbausystem ist der Leuchtturm-Bauernhof ERF BV in den Niederlanden (Bild 1). Ihr biologisches Anbausystem arbeitet mit Strip-Cropping, einer Methode zur Diversifizierung der Landwirtschaft im großen Maßstab.<sup>60</sup>

Die **konservierende Bodenbearbeitung** ist eine weitere Stütze für Bodengesundheit im Ackerbau.<sup>61</sup> Sie unterstützt Grundsätze 2 und 4, indem sie mechanische Störungen (Bodenbearbeitung, Pflügen) reduziert und gleichzeitig die Wurzeln im Boden hält (auch nach der Ernte der Kultur selbst). Konservierende Bodenbearbeitung kann pflugloses Arbeiten, Strip-Tillage und Ridge-Tillage, usw. umfassen. Häufig sind es die sekundären Effekte der reduzierten Bodenbearbeitung, welche sich positiv auf die Bodengesundheit auswirken: dies trifft v.a. auf die kontinuierliche Durchwurzelung des Bodens zu. Daher ist es wichtig, reduzierte Bodenbearbeitung mit einer angepassten Fruchtfolge mit Deck- und Zwischenfrüchten zu kombinieren – nur so kann die Durchwurzelung und bodenfördernde Effekte sichergestellt werden. Die Kombination dieser Maßnahmen erhält die Bodenstruktur und Aggregatstabilität, reduziert Erosionsrisiken und verbessert die Wasseraufnahme- und -haltekapazität. Dieser Bewirtschaftungstyp konserviert organische Substanz zumindest in den obersten Bodenschichten und kann zu einer gleichmäßigeren Freisetzung von Nährstoffen führen, sodass diese weniger schnell ausgewaschen werden. Im Vergleich dazu kann konventionelles Pflügen Aggregatstrukturen aufbrechen, was zuvor gebundene organische Substanz freisetzt – der darin enthaltene Kohlenstoff wird dann möglicherweise von Mikroben zu mineralisiert und als CO<sub>2</sub> in die

<sup>56</sup> Tahat, M.M. (2020) Soil Health and Sustainable Agriculture, Sustainability 12.

<sup>57</sup> Rayne, N. and Aula, L. (2020) Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. Soil Systems 4.4

<sup>58</sup> Yang, T. et al. (2020) Cropping Systems in Agriculture and Their Impact on Soil Health-A Review. Global Ecology and Conservation 23

<sup>59</sup> Bertola, M. et al. (2021)

<sup>60</sup> <https://www.lighthousefarmnetwork.com/lighthouse-farms/erf>. Accessed 11/10/2023.

<sup>61</sup> Clemensen, A. K et al. (2020)

Atmosphäre freigesetzt.<sup>62</sup> Wie anderen Maßnahmen muss auch die konservierende Bodenbearbeitung in ein ganzheitliches Maßnahmendesign eingebettet werden – z.B. sollten Alternativen zur Unkrautbekämpfung (wie Mulchen und Fruchtfolgen) erforscht werden. Auch Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen sollten bedacht werden – kombiniert man z.B. konservierender Bodenbearbeitung mit mineralischem Dünger (oder anderen wasserlöslichen Düngemitteln) auf unbedecktem Boden, so können Nährstoffe durch Oberflächenabfluss leichter ausgewaschen werden, da diese nicht in den Boden eingearbeitet werden. Wie bei allen Maßnahmen beeinflusst die Gesamtheit der Maßnahmen und deren Zusammenspiel deren Effizienz und Sinnhaftigkeit.

Es gibt eine laufende Debatte darüber, ob pfluglose Systeme im Gegenzug eine starke Verwendung von Herbiziden zur Beikrautbekämpfung erfordern. Wenn das Management jedoch sorgfältig durchdacht ist, können der Einsatz von Herbiziden und die Bodenbearbeitung drastisch reduziert werden. Fruchtfolgen, kontinuierliche Bodenbedeckung und -durchwurzelung sind wesentliche Elemente für herbizidfreie, pfluglose Systeme. Dazu sind auch neue, innovative Ansätze erforderlich, welche über bisherige Praktiken hinausgehen. Dennoch muss man bedenken, dass der vollständige Pflugverzicht auch dazu führen, dass es zu Bodenverdichtung kommt und damit die Lachgas-Emissionen ansteigen. Aus diesem Grund ist in bestimmten Situationen (z.B. bei schweren Böden) nicht der vollständige Verzicht auf den Pflug, sondern die Reduktion des Einsatzes vorzuziehen.<sup>63</sup>

Die **Verwendung biologischer Pflanzenschutzmittel** anstelle von konventionellen Pestiziden unterstützt ebenfalls die Bodengesundheit.<sup>64</sup> Dies erhält ein diverses Mikrobiom und aktiviert pflanzeigene Abwehrmechanismen. Das führt wiederum zur Bildung von sekundären Pflanzenverbindungen und erhöht den Nährwert von Lebensmitteln. Nicht nur Böden, sondern auch Gewässer profitieren von der Umstellung von konventionellen auf biologischen Pflanzenschutz. Wie in der Bodenstrategie 2030 vorgesehen, sollten Wasserflächen bis 2050 einen guten ökologischen und chemischen Status erreichen – die Verwendung von biologischem Pflanzenschutz ist eine unbedingte Maßnahme zur Erreichung dieses Ziels. Die Bodenstrategie 2030 sieht bereits die Überarbeitung der Leitlinien für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden vor und sollte ebenfalls Leitlinien für biologischen Pflanzenschutz miteinschließen.

Eine **größere Sortenvielfalt** fördert Bodengesundheit und Widerstandsfähigkeit des gesamten Agroökosys-

tems.<sup>65</sup> Bestimmte Sorten sind sowohl nahrhafter als auch widerstandsfähiger gegenüber Krankheitserregern und Umweltstress als andere (v.a. trifft dies auf ältere Sorten zu). Dies reduziert den Bedarf an Agrochemikalien und Bewässerung und hält somit Böden gesünder. Diversifizierung ist Außerdem in Einklang mit Grundsatz 3 der Bodengesundheit.

**Agroforstwirtschaft** ist ein wesentliches Schlüsselkonzept im Kontext von nachhaltigen Ernährungssystemen – es unterstützt nicht nur Bodengesundheit, sondern fördert auch die Widerstandsfähigkeit und Autarkie von Agroökosystemen und trägt zu heterogenen Landschaften mit hoher Artenvielfalt bei.<sup>66 67</sup> Das Konzept lässt sich sowohl auf intensiv als auch auf extensiv genutzte Systeme anwenden und konzentriert sich hauptsächlich auf die Kombination von Bäumen und Sträuchern mit einjährigen Kulturen in unterschiedlichen Komplexitätsgraden. Agroforst steht im Einklang mit den Grundsätzen 3 und 4, indem es die Landschaft diversifiziert und lebenden Wurzeln der Bäume und/oder Sträucher über mehrere Jahre bis Jahrzehnte im Boden hält. Generell imitieren Agroforstsysteme natürliche Systeme. Neben den Vorteilen für den Boden verbessern sie auch die Artenvielfalt und das Mikroklima (z.B. weniger Verdunstung durch weniger Wind), was zu einer besseren Wasserverfügbarkeit für die einjährigen Kulturen führt. Bäume und Sträucher reduzieren die Erosion, indem sie a) eine langsamere Wasseraufnahme in den Böden durch Interzeption am Kronendach ermöglichen und b) die Windgeschwindigkeit reduzieren. Ihre Wurzeln dienen als eine Art „Auffangnetz“ gegen Nährstoffauswaschung und „pumpen“ Nährstoffe und Wasser in oberen Bodenschichten. Pflanzen- und Wurzelrückstände (z.B. Laubfall) bringen organische Materie ins System ein und unterstützen das Bodenmikrobiom. Agroforstwirtschaft kombiniert viele Vorteile in einem einfachen

<sup>62</sup> Tiefenbacher, A. et al. (2021) Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis. *Agronomy* 11, 882.

<sup>63</sup> Colbach, N. and Cordeau, S. (2022) Are No-Till Herbicide-Free Systems Possible? A Simulation Study. *Front. Agron.* 4.

<sup>64</sup> Mou, B. (2005)

<sup>65</sup> Sarkar, D. et al. (2021) Organic Interventions Conferring Stress Tolerance and Crop Quality in Agroecosystems during the United Nations Decade on Ecosystem Restoration. *Land Degradation & Development* 32.17, 4797–4816.

<sup>66</sup> Fahad, S. et al. (2022) Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability*, 14.22.

<sup>67</sup> Gupta, V.P. (2020) Role of agroforestry in soil conservation and soil health management: A review. *J Pharmacogn Phytochem* 9, 555–558, and references therein.





Bildrechte: mit freundlicher Genehmigung von Alfred Grand, Grand Farm

**Bilder 1 und 2:  
Agroforstsystem der Grand Farm in Österreich**

und effektiven Ansatz. Ein gut gestaltetes Agroforstsystem trägt nicht nur zur höheren Widerstandsfähigkeit des Agroökosystems bei, sondern unterstützt auch Artenvielfalt, und letztlich das Wohlergehen lokaler Gemeinschaften. Der EU wird empfohlen, gemeinsam mit ihren Mitgliedstaaten rechtliche Hindernisse für die nationale und internationale Anerkennung und Unterstützung von Agroforstsystemen abzubauen.

Ein Best-Practice-Beispiel für Agroforstwirtschaft in einem regenerativen landwirtschaftlichen System ist der Leuchtturm-Bauernhof La Junquera in Spanien.<sup>68</sup> Das System kombiniert verschiedene Maßnahmen wie konservierende Bodenbearbeitung, Mulchen, Water Harvesting-Methoden (s. u.) und die Einbeziehung von holzigen Arten in die Landschaft. Ein weiteres Beispiel für Agroforst auf der Grand Farm in Österreich ist in Bild 1 und 2 zu sehen.

Neben diesen Bewirtschaftungsmaßnahmen können auch andere Eingriffe wie die „**Bodenimpfung**“ mit **nützlichen Mikroorganismen** wie Rhizobien und My-

korrhiza zur Bodengesundheit beitragen. Maßnahmen zur Verhinderung der Bodendegradation sind in jeder Art von Landwirtschaft unerlässlich, sei es im intensiven Ackerbau oder auf extensiven Weiden. Hierzu gehören z.B. Erosionskontrolle durch Erosionsstreifen oder Schutz vor Auswaschung durch **begrünte Pufferstreifen**.

Insbesondere in trockenen bis ariden Regionen können **Methoden zur Wassergewinnung (sogenannte „Water Harvesting“-Methoden)** die Bodengesundheit unterstützen. Anhaltende Dürreperioden machen Böden und Kulturen zu schaffen und fördern die Bodendegradation. Daher ist es entscheidend, Wasser in der Landschaft zu halten – außerdem verringert dies den Bedarf an Bewässerung und das Erosionsrisiko. Water Harvesting-Methoden fangen Wasser auf und sammeln dieses gezielt – dies reicht von hochtech-

<sup>68</sup> <https://www.lighthousefarmnetwork.com/lighthouse-farms/la-junquera>. Accessed 11/10/2023.





Bildrechte: mit freundlicher Genehmigung von Alfred Grand, Grand Farm

nischen bis zu einfachen, kleinskaligen Eingriffen.<sup>69</sup> Wassergewinnung ist besonders wichtig und effektiv in Hanglagen, wo Wasser tendenziell in eine bestimmte Richtung abfließt. Hier kann es durch Gräben, Dämme und Mikro-Stauanlagen („Mikro-Catchments“) aufgefangen werden. Im Fall des sogenannten „Keyline Designs“ werden Dämme höhenlinienparallel gebaut. Regenwasser wird vor den durch Bepflanzung stabilisierte Dämmen aufgefangen – von dort aus kann es langsam in den Boden infiltrieren. Kleine Teiche und natürliche Vertiefungen können ebenfalls als Water Harvesting Instrumente dienen. In kleinem Maßstab fangen Mikro-Catchments wie Gruben um die Pflanze, Vegetationsstreifen und kleine Erdwälle Wasser nahe den Wurzelzonen auf – dadurch gelangt dies in den lokalen Wasserkreislauf zwischen Boden, Pflanzen und Atmosphäre, anstatt in Flüsse abgespült zu werden. Nebelnetze sind eine weitere Möglichkeit, Wasser in der Landschaft zurückzuhalten, insbesondere in Gebieten mit sehr geringem Niederschlag. Water Harvesting-Methoden erhalten derzeit verstärkte Aufmerksamkeit, da sie vielversprechende Werkzeuge zur

Anpassung an den Klimawandel zu sein scheinen: mit zunehmenden extremen Dürren und starken Regenfällen steigt das Risiko von Oberflächenabfluss, was bedeutet, dass weniger Wasser aufgenommen und in der Landschaft gespeichert wird. Unregelmäßige Niederschlagsereignisse (in Häufigkeit und Intensität) stellen eine Herausforderung für die Landwirtschaft dar – Water Harvesting Methoden können negativen Auswirkungen mildern, indem sie Wasser dort auffangen und speichern, wo es benötigt wird.<sup>70</sup>

<sup>69</sup> **Mekdaschi Studer, R. and Liniger, H.** (2013) Water Harvesting: Guidelines to Good Practice. Centre for Development and Environment (CDE), The International Fund for Agricultural Development (IFAD), Rome.

<sup>70</sup> **McTavish M.J.** et al. (2021) Chapter 4 - Sustainable Management of Grassland Soils. In: Stanturf, J.A. and Callahan M.A (2021) (Ed.), Academic Press, 95-124.

## Maßnahmenkatalog für die Bodengesundheit in Grünlandsystemen

Grünlandböden unterliegen anderen Belastungen als Ackerland. Management für Bodengesundheit sollte in erster Linie Überweidung und übermäßiges Mähen vermeiden. Grundsätzlich kann Beweidung die Bodengesundheit durch Ankurbeln des Nährstoffkreislaufs, Eintrag von organischer Substanz und durch erhöhte Pflanzenvielfalt fördern. Übermäßige Beweidung und Mahd – zu intensiv oder zu häufig – degradiert Böden jedoch. **Rotierende anstatt dauerhafter Mahd und Beweidung** erlaubt eine Kohlenstoffspeicherung im Boden und verhindert übermäßige Verdichtung durch Nutztiere und/oder schwere Maschinen. Eine angemessene **zeitliche Abstimmung der Beweidung und des Mähens**, d.h. keine Beweidung und kein Mähen auf feuchtem Boden, ist ein weiterer Schlüsselaspekt zur Vermeidung von Bodenverdichtung und Grünlanddegradation. Darüber hinaus fördert eine **höhere Pflanzenvielfalt** die Bodengesundheit und bietet vielfältige Lebensräume für Grünlandarten. Insgesamt ist die **Extensivierung** der Grünlandnutzung die ultimative Maßnahme für Bodengesundheit.

In einigen Regionen kann dies auch die **Wiedervernässung** der Landschaft mit einschließen – Entwässerungssysteme haben über die Jahre hinweg Feuchtgebiete degradiert und organische, feuchte Böden wurden zu einer Quelle von Treibhausgasemissionen. Wiedervernässungen haben das Potenzial, diese einzigartigen Böden und ihre Kohlenstoffspeicherkapazität wiederherzustellen, Wasserrückhaltevermögen zu verbessern und wertvolle Lebensräume zu schaffen. Gerade in Zeiten des Klimawandels und des Biodiversitätsverlustes sind diese Bemühungen von besonderer Bedeutung.

Wiedervernässung erfordert sorgfältige Planung und Durchführung, um negative Auswirkungen auf Boden und Umwelt zu vermeiden. Je nach Feuchtgebietstyp (z.B. Niedermoore oder Hochmoore) und der hydrologischen Situation des Standorts sind verschiedene Bewirtschaftungskonzepte erforderlich.<sup>71</sup> Die EU sollte Wiedervernässungsprogramme wie LIFE Peat Restore fortsetzen, zuvor entwässerte Landschaften identifizieren und Maßnahmen zur Wiedervernässung unterstützen.

Darüber hinaus könnten bei ausgewählten Standorten der Grundwasserspiegel (temporär) angehoben und naturverträgliche Anbaukulturen (z.B. Paludikultur)

erprobt werden. Diese erhaltende Nutzung kultivierter Feuchtgebiete ist ein relativ neuer Ansatz und bedarf Unterstützung seitens der EU, beispielsweise durch Initiativen zur Identifizierung geeigneter Standorte, bei der technischen Realisierung von Restaurationen und bei der Vermarktung der Produkte.<sup>72</sup>

## Politische Handlungsempfehlungen für Bodengesundheit in der Landwirtschaft

Wie bereits erwähnt sollte die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) und die Bodenstrategie 2030 sowohl **Bodengesundheitsprinzipien** als auch spezifische Maßnahmen und Prozesse zur Erreichung von Bodengesundheitszielen beinhalten. Für alle landwirtschaftlichen Bodeneingriffe, unabhängig von ihrer Intensität, ist ein **ganzheitliches und integriertes Design von Maßnahmen** erforderlich. Darin sollten Maßnahmen zusammenwirken, um Synergien zu schaffen und Arbeitsaufwände so gering wie möglich zu halten. Ein Design sollte auf lokaler Ebene in enger Zusammenarbeit mit örtlichen **Bodengesundheitsexpert\*innen** durchgeführt werden, welche Landwirt\*innen bei der Gestaltung und Umsetzung ihres lokal angepassten Bewirtschaftungskonzepts unterstützen. Die Bodenstrategie 2030 schlägt bereits eine kostenlose Bodenuntersuchung für jede\*n Grundstückseigentümer\*innen vor und könnte durch eine kostenlose Erstberatung zum Bodengesundheitsmanagement durch örtliche Bodengesundheitsexpert\*innen erweitert werden. Ein regionales, nationales und internationales Expert\*innen-Netzwerk für Bodengesundheit sollte den Wissensaustausch und das Teilen von Best-Practice-Beispielen fördern.

Wie bereits erwähnt, sollte ein Rahmen für die **EU-weite Anerkennung und Unterstützung von Agroforstwirtschaftssystemen und Wiedervernässungsprojekten** einen weiteren Schritt zur Verringerung der Bodendegradation darstellen. Die Bodengesundheit hängt nicht nur von der aktuellen, sondern auch von der vergangenen Bodenbewirtschaftung (sogenannte „legacy“ Effekte) ab, und Sanierungen dauern bis zu mehrere Jahrzehnte – daher sollten alle Maßnahmen **Langzeiteffektivität und mögliche Zeitverzögerungen** berücksichtigen.

<sup>71</sup> Joosten, H. (2022), Global Guidelines for Peatland Rewetting and Restoration. Ramsar Technical Report No. 11. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetlands.

<sup>72</sup> Geitner, C. et al. (2019): Tiroler Moore unter Landwirtschaft - Datenlage und Flächenanteile, Nutzungsgeschichte und Zukunftsperspektiven, diskutiert am Beispiel des Viller Moors bei Innsbruck. In: Innsbrucker Geographische Gesellschaft (ed.). Innsbrucker Jahresbericht 2018 - 2019. Innsbruck: Innsbrucker Geographische Gesellschaft, 30 - 50.



**Anhang I** des Vorschlags für ein Bodenüberwachungsgesetz enthält umfassende Bodenparameter, anhand dessen Bodenzustände, Landnahme und Bodenversiegelung bewertet werden. Zusätzliche Parameter könnten Bodenaggregatstabilität, Nährstoffauswaschung (als Erweiterung des Nährstoffüberschusses), Menge an Agrochemikalienrückständen (Pestizide, Herbizide, Antibiotika) sowie Mikro- und Nanoplastikrückstände einschließen. Auch die Bodengesundheitsprinzipien des **Anhangs III** sind bereits umfassend, könnten jedoch um Prinzip 4 (eine kontinuierliche Durchwurzelung) und Prinzip 5 (die Integration von Nutztieren und Nutztierprodukten) erweitert werden, welche bisher nicht konkret erwähnt werden.

Um einige der oben genannten Maßnahmen in der Landwirtschaft umzusetzen, sollte die EU die **bereits bestehenden Konditionalitäten des ersten Pfeilers der GAP erweitern**: der Flächenanteil, welcher für Landschaftselemente vorgesehen ist könnte erhöht werden, um Agroforstelemente zu unterstützen. Darüber hinaus ist die Fruchtfolge bereits eine der Konditionalitäten – die Bodenbedeckung sollte ebenfalls zu diesen Konditionalitäten gehören. Böden sollten nur für eine begrenzte Zeit im Jahr unbedeckt sein dürfen, um Anreize für Zwischenfruchtsaat und Mulchen zu schaffen. Eine weitere Konditionalität des ersten Pfeilers der GAP könnte eine verpflichtende Auftragung einer bestimmten Menge an organischer Substanz pro Jahr sein (in Form von Kompost, Mulch, Dünger, Leguminosen, Pflanzenkohle, Ernterückständen, usw.). Dies sollte begleitet werden von Good-Practice-Leitlinien zur Kohlenstoffhaltung im Boden. Im Fall von Pflanzenkohle muss berücksichtigt werden, dass neben positiven Auswirkungen auf Bodenqualität und Pflanzenwachstum, ebenfalls einige negative Auswirkungen auftreten können.<sup>73</sup> Darüber hinaus variieren Eigenschaften von Pflanzenkohle erheblich, und die Verfügbarkeit ist noch begrenzt. Um Bodenkontaminationen zu vermeiden, wird dringend empfohlen, nur Pflanzenkohle anzuwenden, welche den Qualitätskriterien gemäß Europäischem Pflanzenkohle Zertifikat (EBC) entspricht.<sup>74</sup>

Es reicht nicht aus, ehrgeizige Ziele für die Bodengesundheit festzulegen – realistische Meilensteine sollten einen Prozess zur Erreichung dieser Ziele anstoßen und bei Nichterreichung dieser Ziele Konsequenzen durchsetzen. Ebenfalls ist es nicht ausreichend, allein landbasierte Maßnahmen zu fördern. Tatsächlich scheint es unrealistisch, allein durch Änderung des landwirtschaftlichen Bodenmanagements gesunde Böden zu erreichen. Weitreichende, systemische Veränderungen sind unerlässlich für langfristige Bodengesundheit, z.B. die Umstellung unseres Ernährungssystems,

einschließlich individueller Ernährungsumstellungen und Vermeidung von Lebensmittelverschwendung. Ganzheitlich ausgerichtete Konzepte umfassen Agroökologie, Regenerative Landwirtschaft, Restaurationslandwirtschaft, Kohlenstofflandwirtschaft und Agroforstwirtschaft.

### Kernbotschaften zur Bodengesundheit in der Landwirtschaft:

Die Politik und das Management landwirtschaftlicher Flächen sollten sich auf Nachahmung natürlicher Prozesse konzentrieren (z.B. Integration von Gehölzarten, kontinuierliche Bodenbedeckung), auf die Speicherung von organischer Substanz und Kohlenstoff im Boden und die Anwendung lokal angepasster integrierter Bewirtschaftungskonzepte, welche in Zusammenarbeit mit örtlichen Bodengesundheitsexpert\*innen erarbeitet wurden.

### Maßnahmen für Bodengesundheit in der Forstwirtschaft

#### Maßnahmenkatalog für den Forstsektor

Neben der Landwirtschaft greift auch die Forstwirtschaft erheblich in Böden ein und ist gleichermaßen von Bodengesundheit abhängig. Das Konzept der Nachhaltigkeit stammt aus der Forstwirtschaft – die Holzproduktion und damit verbundene Ökosystemdienstleistungen finden auf längeren Zeitskalen als beispielsweise die Landwirtschaft statt. Auswirkungen einer nicht nachhaltigen Waldbewirtschaftung können sich daher bereits während einer Umtriebszeit manifestieren. Die EU-Bodenstrategie 2030 hebt die Bedeutung der bodenbezogenen Belastungen in der Forstwirtschaft nicht ausreichend hervor: Klimawandel und Verlust der Artenvielfalt sind zwei sehr wichtige Aspekte für Waldböden (z.B. über die Speicherung von Bodenkohlenstoff und die Vielfalt der Bodenfauna). Sie resultieren jedoch aus einer Kombination von Eingriffen und grundlegendem Fehlmanagement, teilweise über mehrere Jahrzehnte. Die Politik sollte sich auf diese Auslöser konzentrieren und konkrete Leitlinien für nachhaltige Bewirtschaftung von Waldböden umsetzen. Einige Beispiele werden im Folgenden erörtert.

<sup>73</sup> Verheijen, F. et al. (2010) Biochar application to soils. [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC55799/jrc\\_biochar\\_soils.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC55799/jrc_biochar_soils.pdf). Accessed 12/10/2023.

<sup>74</sup> The European Biochar Certificate (EBC) (2023) <https://www.european-biochar.org/en/ct/1>. Accessed 12/10/2023.



Eine wesentliche Maßnahme zur Unterstützung von Waldbodengesundheit ist der **Umstieg von Monokulturen auf Mischkulturen**.<sup>75</sup> In vielen gemäßigten Zonen Europas bedeutet dies auch den Wechsel von Nadelholzplantagen zu Laubbaumarten. Der Anbau einer Mischkultur mehrt organische Bodensubstanz und mikrobielle Vielfalt, z.B. durch diversen Laubfall und Wurzelexsudate. Nadel- und Laubbäume speichern Kohlenstoff unterschiedlich im Boden: Ersteres erhöht die Kohlenstoffvorräte im Oberboden, letzteres erhöht die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden.<sup>76</sup> Die Kombination beider Arten bietet somit eine vielfältige Speicherung von Kohlenstoffvorräten. Ein Blätterdach aus Laub führt zu einer stärkeren Wasserrückhaltung auf Blattoberflächen, somit zu langsamerer Wasserinfiltration und geringeren Erosionsrisiken. Laubbäume versorgen Böden mit Feuchtigkeit und führen zu einem besseren Wasserhaushalt als Böden mit trockenem Nadelstreu. Mischkulturen sind robuster gegenüber großflächigem Schädlingsbefall wie z.B. Ausbrüchen des Borkenkäfers – in einem vielfältigen Wald können einige Arten verlorene Ökosystemfunktionen anderer Arten ausgleichen und ersetzen. Dies verhindert, dass große Waldgebiete von einer einzigen Käferart zerstört werden (wie z.B. im Harz Nationalpark in Deutschland). Großflächige Waldzerstörungen durch Schädlinge haben ähnliche Umweltauswirkungen wie Kahlschläge, v.a. in Bezug auf Erosionsrisiken, Nährstoffauswaschung und Verlust von organischer Bodensubstanz. Bei der Durchmischung von Arten sollte nicht nur die Anzahl der Arten berücksichtigt werden, sondern auch der Typ an Arten und deren Fähigkeit, mit aktuellen und zukünftigen klimatischen Belastungen umzugehen.

Kahlschläge durch **Einzelbaumernte** zu ersetzen ist ein weiterer zentraler Schritt zur Unterstützung der Bodengesundheit.<sup>77</sup> Während und nach Kahlschlägen sind Waldböden am anfälligsten. Einzelbaumernten reduziert im Vergleich zu Kahlschlägen das Risiko von

Wind- und Wassererosion, da der Boden weiterhin bewachsen und somit geschützt ist. Sie reduzieren auch das Risiko von Nährstoffauswaschungen, da lebende Wurzeln im Gegensatz zu Kahlschlägen immer noch Nährstoffe aufnehmen und der Nährstoffkreislauf weiterhin in moderatem Tempo abläuft. Dies erhält organischen Kohlenstoff im Boden, anstatt ihn schnell in atmosphärisches CO<sub>2</sub> abzubauen. Während Kahlschlägen wird eine große Fläche stark von Bodenverdichtung beeinflusst. Die Einzelbaumernte vermeidet großflächige Bodenverdichtung und reduziert bei guter Planung die Häufigkeit und Intensität dieser.

Die **Optimierung von Erntemethoden**<sup>78</sup> beeinflusst ebenfalls maßgeblich die Bodengesundheit. Die derzeit größte Herausforderung ist die Bodenverdichtung, die manchmal irreversibel ist und minimiert werden sollte. Befahrungen und Trassensteigung zu reduzieren kann zum Waldbodenschutz beitragen. Fahrwege, sogenannte Rückegassen, sollten gut durchdacht angelegt, dann aber nicht mehr verlassen werden. Mulchen nach der Ernte kann Erosionsverluste verhindern. Ernte mithilfe von Tieren (z.B. Rückepferde) anstatt schweren Maschinen ist eine altbekannte, ökologisch verträgliche Methode der Bodenerhaltung. Die Optimierung von Ernte- und Transportwegen ist ebenfalls entscheidend, um so viel Boden wie möglich ungestört zu lassen und Bodenerosion sowie Versiegelung zu verhindern.

Die folgenden Bilder 3 und 4 zeigen Beispiele für optimierte Erntemethoden: Bild 3 zeigt eine permanente Feinerschließung des Waldes für Rückegassen, Bild 4 zeigt eine tragseilgebundene Holz-ernte durch einen Gebirgsharvester, welcher bodenschonende Ernte in steilem Terrain ermöglicht.

Wenn Eingriffe nicht vermeidbar sind, sollten sie **zum richtigen Zeitpunkt**<sup>79</sup> erfolgen. Die Verwendung von schweren Maschinen auf feuchtem Waldboden birgt ein wesentlich größeres Risiko für Bodenverdichtung als auf gefrorenem oder trockenerem Boden. Abgesehen davon reduzieren **längere Umtriebszeiten** mögliche Eingriffe und senken somit Risiken von Erosion, Auswaschung und Bodenverdichtung. Umtriebszeiten werden verlängert durch Pflanzung weniger produktiver Arten, welche langsamer Biomasse produzieren. Bei geringerer Eingriffshäufigkeit haben Böden mehr Zeit zur Regeneration, was zu einem gesünderen und fruchtbareren Boden führt.

Der **Verbleib von Totholz, Laubstreu und Ästen im Wald** ist entscheidend für die langfristige Bodengesundheit und Bodenfruchtbarkeit. Diese Rückstände liefern organische Substanz an das Bodenmikrobiom,

<sup>75</sup> Liu, C.L.C. et al. (2018) Mixed-Species versus Monocultures in Plantation Forestry: Development, Benefits, Ecosystem Services and Perspectives for the Future. *Global Ecology and Conservation* 15.

<sup>76</sup> Mayer, M. et al. (2020) Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management* 466.

<sup>77</sup> Worrell, R. and Hampson, A. (1997) The Influence of Some Forest Operations on the Sustainable Management of Forest Soils— a Review. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 70.1, 61-85.

<sup>78</sup> Picchio, R. et al. (2020) How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands?. *Current Forestry Reports* 6.2, 115-28.

<sup>79</sup> Worrell, R. and Hampson, A. (1997)



Bildrechte: mit freundlicher Genehmigung des BFW Österreich



**Bild 3:**  
Permanente Feinerschließung des Waldes für Rückegassen

Bildrechte: mit freundlicher Genehmigung des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW), Österreich



**Bild 4:**  
Tragseilgebundene Holzernte durch einen Gebirgschärvester, welcher bodenschonende Ernte in steilem Terrain ermöglicht



fördern somit den Nährstoffkreislauf und schaffen eine gesunde, gut belüftete Bodenstruktur mit hoher Wasseraufnahmefähigkeit.

Die Prävention und Bewältigung von Waldbränden sind ein weiterer wichtiger Aspekt für die Bodengesundheit in brandgefährdeten Gebieten.<sup>80</sup> Ähnlich wie nach Kahlschlägen sind Gebiete nach Waldbränden besonders anfällig für Erosion, Nährstoffauswaschung und Kohlenstoffverlust. Präventivmaßnahmen gegen Waldbrände wie das Ausdünnen und kontrollierte Verbrennen können mit anderen Maßnahmen zur Bodengesundheit (z.B. Aufrechterhaltung von Totholz) im Konflikt stehen. In solchen Fällen sollte eine lokal angepasste Risikoanalyse durchgeführt werden, welche notwendige Prioritäten festlegt.

Schließlich unterstützen Extensivierung und Wiedervernässung ebenfalls die Waldbodengesundheit. Extensivierung beinhaltet z.B. Wälder von einem Nutzwald zu einem Schutzwald umzuwandeln oder Eingriffe so anzupassen, dass jene natürliche Störungen imitieren. Wiedervernässung ist – ähnlich wie die Wiedervernässung von landwirtschaftlichen Flächen – anspruchsvoll und erfordert sorgfältige Planung und Bewirtschaftung. Sie kann jedoch erhebliche Vorteile für die Bodengesundheit, den Klimaschutz und die Artenvielfalt im Wald bieten.<sup>81</sup> Viele europäische Forstböden – ähnlich wie landwirtschaftliche Böden – wurden intensiv entwässert, was wertvolle Moorböden degradierte und überschwemmte Wälder (z.B. Sumpf- oder Auenwälder) stark gefährdete. Wiedervernässung bietet die Möglichkeit zur Wiederherstellung einzigartiger Waldböden mit gefährdeten Arten und einem hohen Kohlenstoffspeicherpotenzial.

## Politische Handlungsempfehlungen für Bodengesundheit in der Forstwirtschaft

Im Gegensatz zur Landwirtschaft verfügt die EU nicht über eine gemeinsame Waldpolitik – die Forstwirtschaft fällt weitgehend in den Zuständigkeitsbereich der Nationalstaaten. Diese juristischen Unterschiede zwischen Landwirtschaft und Forstwirtschaft erschweren verbindlicher Vorschriften und Gesetzgebungen für Waldbodengesundheit. Dennoch besitzt die EU eine Waldstrategie 2030 (ähnlich wie die Bodenstrategie 2030). Dies ist entscheidend, da die Forstwirtschaft in der EU – direkt nach der Landwirtschaft – eine der Hauptlandnutzungsarten ist und somit die Böden in den EU-Mitgliedsstaaten erheblich beeinflusst. Die EU „Leitlinien für eine naturnähere Waldbewirtschaftung“<sup>82</sup> enthalten weitreichende Maßnahmen zur nachhaltigen Forstwirtschaft, einschließlich einiger der

oben genannten Maßnahmen (Einführung von Mischkulturen, Beständen ungleichen Alters und Dauerwälder, Bereitstellung von Totholzvorräten und Schutz von Lebensräumen, usw.). Die spezifischen Instrumente zur Umsetzung dieser Leitlinien sind jedoch bisher hauptsächlich freiwillig und könnten erweitert werden, um eine ordnungsgemäße Anwendung sicherzustellen.

Generell sollten **Kahlschläge und die Entnahme von ganzen Bäumen (also inklusive Äste, Laub und Rinde) auf allen Flächen verboten** werden. Dies wäre eine einfache, aber wirksame Maßnahme, die häufig auftretende Probleme wie Erosion, Nährstoffauswaschung und Bodenverdichtung reduziert und gleichzeitig Ökosystemdegradierung in Wäldern stoppen und die Kohlenstoffakkumulation fördern könnte.

Bodenverdichtung ist einer der Hauptverursacher von Bodendegradation in Waldökosystemen und muss daher durch politische Maßnahmen angegangen werden. Verdichtung tritt hauptsächlich auf, wenn schwere Maschinen auf feuchtem Boden eingesetzt werden. Dies führt zu einer geringeren Wasseraufnahmekapazität und somit zu vermehrtem Oberflächenabfluss und Erosion. Ein mögliches Instrument könnte ein **Bodenfeuchtigkeit-Schwellenwert** sein, ab dem Waldböden nicht mehr befahren werden dürfen.

Die Diversifizierung von Baumbeständen ist ein entscheidender Faktor zur Unterstützung der Bodengesundheit des Waldes. Sie unterstützt nicht nur mikrobielle Gemeinschaften im Boden, bietet vielfältige organische Substanz und verbessert den lokalen Wasserhaushalt. Diversifizierung erhöht auch die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) eines Waldes gegenüber Störungen wie Pathogene oder Waldbrände. Dies ist insbesondere im Kontext klimawandelbedingter Belastungen von großer Bedeutung. Bestandsdiversifizierung ist jedoch nicht so einfach, wie es klingt – lokale Gegebenheiten wie Niederschlag, Temperatur und Bodenverhältnisse und lokale Belastungen durch Waldbrände, Pathogene, Windwurf, Erosion usw. schaffen eine große Vielfalt an Ausgangssituationen, welche

<sup>80</sup> Agbeshie, A.A. et al. (2022) A Review of the Effects of Forest Fire on Soil Properties. *Journal of Forestry Research*, 33.5, 1419–41.

<sup>81</sup> Escobar, D. et al. (2022) Back to the Future: Restoring Northern Drained Forested Peatlands for Climate Change Mitigation. *Frontiers in Environmental Science* 10.

<sup>82</sup> European Commission (2023) Guidelines on Closer-to-Nature Forest Management [https://environment.ec.europa.eu/system/files/2023-07/SWD\\_2023\\_284\\_F1\\_STAFF\\_WORKING\\_PAPER\\_EN\\_V2\\_P1\\_2864149.PDF](https://environment.ec.europa.eu/system/files/2023-07/SWD_2023_284_F1_STAFF_WORKING_PAPER_EN_V2_P1_2864149.PDF). Accessed 10/10/2023.



vielfältige und lokale Lösungen erfordern. Beispielsweise kann in Breitengraden wie Skandinavien nicht die gleiche Artenvielfalt angebaut werden wie in gemäßigten Breiten, und Orte wie das Mittelmeer sind anderen Belastungen, z.B. durch Waldbrände, ausgesetzt als Mitteleuropa. Daher sollte eine lokale Bewertung der Diversifizierungsmöglichkeiten vorgenommen werden. Basierend auf den lokalen Bedingungen und Risiken könnte ein **Diversifizierungsindex** ausgearbeitet werden, welcher die mögliche Artenzahl, die Verteilung und Standorteignung der Baumarten berücksichtigt.

Im Allgemeinen sollten **finanzielle Anreize** den Waldumbau gemäß naturnäher Waldbewirtschaftung fördern – ein Netzwerk von Bewirtschafter\*innen könnte Auswirkungen auf Landschaftsebene (über den einzelnen Bestand hinaus) sicherstellen. Wälder sind europaweite Ökosysteme – obwohl eine zusammenhängende europäische Politik fehlt, sollte die EU seinen Mitgliedsstaaten dennoch ermöglichen, ihre Bemühungen zu vernetzen und zu koordinieren.

## Maßnahmen für Bodengesundheit in städtischen und kontaminierten Gebieten

### Maßnahmenkatalog für städtische und kontaminierte Gebiete

Städtische und industrielle Gebiete sind ein weiterer entscheidender Teil bodenbezogenen menschlichen Eingriffe. Bodenpolitik in diesem Sektor sollte sich auf die Erhöhung der Oberflächenpermeabilität, der Flächenbegrünung und der Sanierung kontaminierter Standorte konzentrieren.

Bodenversiegelung (siehe Kapitel 1) ist einer der Hauptprozesse der Bodendegradation in Europa und besonders in urbanen Regionen und deren Umland weit verbreitet. Bodenversiegelung führt zu einem vollständigen Verlust der Bodenpermeabilität, was bedeutet, dass Wasser nicht mehr in den Boden eindringen kann, sondern auf der Oberfläche abfließt (Oberflächenabfluss). Im Stadtgebiet gelangt das Wasser anschließend in die Kanalisation. Mit der zunehmenden Intensität von Regenfällen aufgrund des Klimawandels steigen die zu bewältigenden Wassermengen und damit der Druck auf Abwassersysteme. Als Folge werden Abwassersysteme überlastet, überschüssiges Wasser gelangt in Flüsse und Bäche und trägt letztendlich zu Überschwemmungen großer Gebiete bei, was Infrastruktur beschädigen und die Sicherheit von Anwohner\*innen in betroffenen Gebieten erheblich gefährden kann. Bodenversiegelung ist einer der Hauptursachen für Hochwasserrisiken in stark besiedelten Gebieten. Geringe

Oberflächenpermeabilität reduziert die Grundwasserneubildung und erhöht somit Risiken für Dürren und Probleme der Wasserversorgung.

Das sogenannte „**Schwammstadtprinzip**“ bezieht Böden in den Wasser- und Wärmehaushalt von städtischen Gebieten mit ein. Es berücksichtigt die Fähigkeit von Böden, Wasser aufzunehmen und zu speichern, um sowohl Überschwemmungen als auch Wassermangel zu verhindern und eine kühlende Wirkung zu erzielen. Es zielt darauf ab, die Wasseraufnahme- und Speicherkapazität zu maximieren, indem ein ausgedehntes und gut durchdacht angelegtes System unter der Oberfläche angelegt wird. Darüber hinaus muss jegliche **vorhandene Oberflächenpermeabilität geschützt und erhalten werden**. Vorschriften könnten sicherstellen, dass jedes Bauprojekt einen **obligatorischen Prozentsatz an permeabler, also wasserdurchlässiger, Oberfläche** erhält.<sup>83</sup> Zum Beispiel könnten Vorschriften die Verwendung von Rasenpflastersteinen anstelle von Beton oder Asphalt für Parkplätze festlegen.

Böden sollten darüber hinaus auch begrünt werden. **Vegetation auf dem Boden** spielt in städtischen Gebieten eine entscheidende Rolle. Sie ermöglicht eine effizientere Wasserinfiltration, eine höhere Porosität durch Wurzeln und organische Substanz sowie eine kühlende Wirkung. Die Vegetation hilft somit, Wasser in Städten aufzunehmen und zu speichern und ist entscheidend für die Dämpfung von Hitzewellen. Vorschriften über den **obligatorischen Prozentsatz an begrünten Böden** könnten ein weiteres Instrument für Bodengesundheit in städtischen Kontexten sein.

Für bereits bestehende urbane Infrastruktur sollte die Permeabilität so weit wie möglich erhöht werden. Blaue und grüne Infrastruktur (Wasserretentionsflächen, Vegetationselemente) sind zentral für sogenannte **Naturbasierte Lösungen (NbS, Nature-based Solutions)**, also kostengünstigsten Hochwasserschutz- und Hitzeschutzmaßnahmen. Sie erfordern wenig technischen und baulichen Aufwand und wenig Wartung und reduzieren Auswirkungen von Starkregenereignissen und deren potenzielle Schäden. NbS können die Permeabilität bereits vorhandener Infrastruktur erhöhen, z.B. durch die Schaffung von durchlässigen Bodenflächen mit Vegetation entlang versiegelter Flächen wie Straßen oder Parkplätzen. Einige Optionen sind: Biofiltermulden, natürliche Rückhaltebecken, Vegetations-

<sup>83</sup> C40 Cities Climate Leadership Group, Inc. (2023) Flooding: How to increase your city's permeability [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Flooding-How-to-increase-your-city-s-permeability?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Flooding-How-to-increase-your-city-s-permeability?language=en_US). Accessed 05/10/2023.

filterstreifen, Entwässerungssysteme in die Nähe der Wurzelzone, Regengärten, Randsteinöffnungen und seitliche Einlässe am Straßenrand.<sup>84</sup> Diese kleinteiligen Lösungen nehmen Regenwasser vor Ort auf, speichern und filtern es, bevor es ins Grundwasser gelangt, und verhindern mögliche Erosion. Ein Mosaik kleinteiliger NbS kann den Druck auf das Kanalsystem an kritischen Stellen verringern und zur lokalen Kühlung in öffentlichen Räumen beitragen. Einige europäische Städte NbS bereits umfangreich angewandt, z.B. London in seinem „Nachhaltigen Entwässerungssystem“ und Kopenhagen in seinem „Cloudburst Management Plan“ – einige Best-Practice-Beispiele sind in den folgenden Bildern dargestellt.

Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Bodengesundheit in Städten ist die **Umwandlung ungenutzter Infrastruktur** (z.B. alte Eisenbahnen oder Brachflächen) **in begrünte Gebiete**. Dies trägt nicht nur zum Hochwasserschutz bei und verringert die Auswirkungen von Hitzewellen, sondern bietet auch Freizeitmöglichkeiten für Anwohner\*innen und Lebensräume für Artenvielfalt.

Die städtebauliche Planung sollte immer eine **strategische Planung mit einbeziehen**, welche versiegelte Flächen minimiert, Zersiedlung reduziert und somit Bodendegradation vorbeugend verhindert. Darüber hinaus sollten **Hochwasser- und Hitzeschutzpläne nicht nur Abwassersysteme und Wasserflächen, sondern auch Böden mitberücksichtigen**. Bodenversiegelung wird zwar in der Bodenstrategie 2030 thematisiert, es fehlen jedoch konkrete Maßnahmen und Vorschriften zur Erhaltung der Bodenpermeabilität während und nach Bauprojekten, zu Investitionen in innovative NbS und in integrierte Raumplanung.

**Bodenkontamination** ist eine weitere Nebenwirkung von Urbanisierung und industriellen Aktivitäten. Die Bodensanierung ist eine der zentralen Visionen der Bodenstrategie 2030 – ein neuer gesetzlicher Rahmen zur Sanierung kontaminierter Standorte ist geplant. Einige der folgenden Maßnahmen könnten in den Rahmen integriert werden.

**Bioremediation (biologische Altlastensanierung)** von kontaminierten Standorten ist eine NbS, welche Schadstoffe abbaut, immobilisiert und/oder extrahieren kann und somit im Laufe der Zeit die Bodengesundheit verbessert.<sup>85</sup> Sanierungen und Begrünungen können durch a) das Hinzufügen von Oberboden und b) der Zuschlag von ausgewählten Materialien (z.B. organische Substanz aus behandeltem Klärschlamm) unterstützt werden.<sup>86</sup> Dies begünstigt die Etablierung einer dichten Vegetationsdecke. Die Anwendung be-

stimmter Pflanzenarten ist die Grundlage für phytoremediative Ansätze.<sup>87</sup> Pflanzen, welche Metalle aufnehmen damit sogar zur Entfernung metallischer Schadstoffe aus dem Boden beitragen können. In Phytostabilisierungs- oder Phytomanagement-Konzepten werden schadstofftolerante Pflanzen angebaut, um Schadstoffe zu immobilisieren – dies führt zu einem verringerten Risiko der Übertragung von Schadstoffen in Nahrungsketten oder ins Grundwasser. Bodenhilfsstoffe (z.B. Kalk, Eisenoxide, Pflanzenkohle) können außerdem die Stabilisierung von Schadstoffen unterstützen. Bei schwer verschmutzten Standorten ermöglichen diese Maßnahmen die Etablierung einer Vegetationsdecke auf ansonsten unbedeckten Böden. Die genannten Ansätze stabilisieren Schadstoffe vor Ort sowohl chemisch (z.B. durch Verbesserung der Bindungsfestigkeit an Bodenmineraloberflächen) als auch physikalisch (durch Verringerung von Wind- und Wassererosionsprozessen).

**Organische Schadstoffe (z.B. Pestizide oder Ölrückstände) können von Mikroorganismen abgebaut werden.** Verschmutzte Böden sind jedoch oft nährstoffarm und leiden darüber hinaus unter anderen Bodendegradationsprozessen. Das Inokulieren (Beimpfen) des Bodens mit speziellen Mikroorganismen, welche Schadstoffe abbauen können, leitet Abbauprozesse ein. Im weiteren Verlauf sind Pflanzen jedoch essenziell, um die mikrobielle Aktivität zu unterstützen und zu fördern: Pflanzenwurzeln setzen eine Vielzahl von Verbindungen frei, welche mikrobielle Prozesse unterstützen. Der Boden um die Wurzeln herum, die sogenannte Rhizosphäre, ist ein Hotspot mikrobieller Aktivitäten im Boden. Somit ermöglichen synergistische Wirkungen von Mikroorganismen und Pflanzen einen effizienten biologischen Abbauprozess zur Entfernung organischer Schadstoffe.

<sup>84</sup> United States Environmental Protection Agency (2023) Green Streets Handbook. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/green\\_streets\\_design\\_manual\\_feb\\_2021\\_web\\_res\\_small\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/green_streets_design_manual_feb_2021_web_res_small_508.pdf). Accessed 05/10/2023.

<sup>85</sup> Siebielec, G. et al. (2010) Handbook for Measures Enhancing Soil Function Performance and Compensating Soil Loss during Urbanization Process. [https://www.researchgate.net/publication/301766106\\_Handbook\\_for\\_measures\\_enhancing\\_soil\\_function\\_performance\\_and\\_compensating\\_soil\\_loss\\_during\\_urbanization\\_process](https://www.researchgate.net/publication/301766106_Handbook_for_measures_enhancing_soil_function_performance_and_compensating_soil_loss_during_urbanization_process). Accessed 10/13/2023.

<sup>86</sup> Kumar, K. and Hundal, L.K (2016) Soil in the City: Sustainably Improving Urban Soils. *Journal of Environmental Quality* 45,1, 2-8.

<sup>87</sup> Yadav, K.K. et al. (2018) Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering* 120,274-298.

Bioremediations- und Phytoremediationsansätze sind wertvolle Optionen für Standorte, an denen technische Lösungen nicht angewendet werden können, da entweder Kosten die verfügbaren Ressourcen übersteigen oder weil der Standort unzugänglich für technische Sanierungslösungen ist. Auch auf zugänglichen Standorten könnten Bioremediations- und Phytoremediationsansätze kosteneffizienter sein – dabei sollte berücksichtigt werden, dass biologische Optionen möglicherweise mehr Zeit in Anspruch nehmen als technische Lösungen. Aufgrund ihrer einzigartigen Bedingungen können sanierte Standorte sich jedoch zu wertvollen Ökosystemen mit seltenen Arten entwickeln und möglicherweise für Schutz in Betracht gezogen werden.

Schadstoffe treten normalerweise in verschiedenen Fraktionen im Boden auf. Diese Fraktionen unterscheiden sich in ihrer Mobilität und Bioverfügbarkeit. Die nationale Gesetzgebung berücksichtigt oft immer noch nur die Gesamtkonzentrationen. Mit diesem Ansatz werden Umweltrisiken, die mit Schadstoffen verbunden sind, oft unzureichend berücksichtigt. Bioremediations- und Phytoremediationsmöglichkeiten führen oft hauptsächlich zu Veränderungen in der **bioverfügbaren Fraktion von Schadstoffen**, und nur teilweise in der Gesamtkonzentration. Dies kann die Anwendung biologischer Sanierungsoptionen behindern. Daher wird dringend empfohlen, dass nationale Rahmen auch Methoden zur Beurteilung der bioverfügbaren Schadstofffraktionen im Boden integrieren.

Auch wenn keine Altlasten vorhanden sind, erfordern ehemalige Industriestandorte, sogenannte Brachflächen, dennoch Sanierungsmaßnahmen. Die **Begrünung von Brachflächen** ist bereits in der Bodenstrategie 2030 angesprochen und unterstützt die Wiederverwendung von Flächen (anstatt neue zu beanspruchen) und reduziert somit die Gesamtflächen-nutzung.

## Politische Handlungsempfehlungen für Bodengesundheit in städtischen und kontaminierten Gebieten

Das **Schwammstadtprinzip und andere naturbasierte Lösungen sollten in zukünftigen Bodenstrategien als Leitkonzept aufgenommen werden**. Darüber hinaus sollte die EU einen Good-Practice-Rahmen für **integrierte städtische Planung** anbieten und die Mitgliedstaaten finanziell darin unterstützen, Böden als zentrales Element in ihre Hochwasser- und Hitzeschutzkonzepte aufzunehmen. Wissenszentren und lokale Bodenexperten könnten das Rückgrat für die Implementierung von Naturbasierten Lösungen und grüner Infrastruktur in Städten bilden.

Für jedes Bauprojekt könnte die **obligatorische Konsultation einer/s lokalen Bodengesundheitsexpert\*in** (oben erwähnt) vorgeschrieben werden – dieses Instrument könnte die nachteiligen Auswirkungen von Bauprojekten auf Bodenressourcen reduzieren. Darüber hinaus könnte eine Vorschrift einen obligatorischen **Schwellenwert für die Oberflächenpermeabilität** festlegen, welche während und nach jedem Bauprojekt erhalten werden muss. Dies könnte sogar um einen obligatorischen Schwellenwert für Begrünung bei jedem Bauprojekt erweitert werden. Lokale Wasserspeicherung und allgemeine Abkühlung in Städten kann nur durch ein Mosaik an mehreren begrünten Flächen sichergestellt werden.

Die Bioremediation und die Überwachung von Kontaminationen sollten nicht nur auf den Schadstoffkonzentrationen selbst basieren, sondern auch auf deren Bioverfügbarkeit. Genauer gesagt sollte der Aspekt „Bodenkontamination“ von **Anhang I** des Vorschlags für ein Bodenüberwachungsgesetz „Schadstoff-Bioverfügbarkeit“ als Parameter beinhalten, nicht nur die Gesamtschadstoffkonzentration.



# 6

## Schlussfolgerungen



**Böden sind eine komplexe, wertvolle und wichtige Ressource für Menschen und den gesamten Planeten.** Ihre einzigartigen Merkmale und Bedeutung für den Menschen, aber auch ihre machen ihren Schutz äußerst relevant. Diese Studie zeigt, dass Boden und sein Gesundheitszustand die menschliche Gesundheit auf vielfältige Weise beeinflussen. Die Bodengesundheit bestimmt im Wesentlichen die Nährstoffqualität der von uns verzehrten Lebensmittel und die Reinheit des von uns getrunkenen Wassers, was grundlegend für unser Wohlbefinden ist. Darüber hinaus beeinflusst die Qualität des Bodens seine Rolle im Kohlenstoffkreislauf, seine Fähigkeit den Klimawandel zu mildern, seine Potential, nachwachsende Rohstoffe zu liefern, seine Fähigkeit Schadstoffe zu immobilisieren oder abzubauen, und seine Schutzfunktion gegenüber Überschwemmungen und Hitze. Boden ist jedoch kein unabhängiges System, sondern Teil eines komplexen Gefüges aus Böden, Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen, Luft und Wasser, welche ein hochkomplexes Ökosystem bilden und mit anderen System (z.B. die Atmosphäre) in enger Interaktion stehen. Angemessene Bodenbewirtschaftung gewährleistet dessen Gesundheit und Funktionsfähigkeit in seinem spezifischen ökologischen Kontext. Ein gesunder Boden zeichnet sich im Allgemeinen durch eine widerstandsfähige Struktur, widerstandsfähige Prozesse, einen hohen Gehalt an organischem Material sowie eine hohe mikrobielle Aktivität und Vielfalt aus. Diese Merkmale müssen in großem Umfang geschützt und wiederhergestellt werden.

Es gibt zweifellos viele **vom Menschen verursachte Bodendegradationsprozesse**, welche weltweit tendenziell an Schwere und Umfang zunehmen. Auslöser von Bodendegradation sind vielfältig und komplex und sollten an ihrer Wurzel angegangen werden. Diese Wurzeln liegen in der Art und Weise, wie der Mensch mit der Ressource Boden interagiert - Versiegelung, Kontamination, Erosion und Verdichtung sind die Folge anthropogener Aktivitäten. Jeder Eingriff in den Boden, sei es in der Landwirtschaft, Forstwirtschaft oder Stadtentwicklung, muss sorgfältig geplant, überwacht und reguliert werden.

Die EU zeigt bereits viele Ansatzpunkte auf, z.B. die Bodenstrategie 2030, die Forststrategie 2030 und aktuelle Verhandlungen über ein Bodenüberwachungsgesetz. Dennoch setzen sich viele bodenbezogene Belastungen und ihre nachteiligen Auswirkungen auf

die Bodengesundheit täglich fort, was Maßnahmen zur Förderung der Bodengesundheit dringlich macht. Mögliche Maßnahmen, welche die EU ergreifen könnte, sind:

1. Überwachung lokaler Auswirkungen von Bodendegradationsprozessen
2. Schaffung von Rahmenordnungen für Bodengesundheit in verschiedenen Sektoren, wie z.B. Regenerative oder Restaurative Landwirtschaft, Agroforstwirtschaft, Agroökologie, nachhaltige Forstwirtschaft, Raumplanung, Bioremediation, etc. - innerhalb dieser Rahmenordnungen könnte die EU Leitlinien zur Unterstützung der Bodengesundheit oder zur Reduzierung nachteiliger Auswirkungen bereitstellen.
3. Soweit möglich sollte die EU Vorschriften für Maßnahmen zur Förderung der Bodengesundheit erlassen, wie z.B. die dauerhafte Bodenbedeckung in der Landwirtschaft, Mindestanforderungen an die Oberflächenpermeabilität bei Bauprojekten, und/oder das Verbot von Praktiken, welche die Bodengesundheit verschlechtern (z.B. Kahlschläge in der Forstwirtschaft).

Betrachtet man das größere Bild, so kann die Förderung der Bodengesundheit mit der Stärkung lokaler Ernährungssysteme und der Selbstwirksamkeit lokaler Strukturen kombiniert werden. **Integrierte, ganzheitliche Ansätze** könnten unsere Ernährung in Bezug auf Vielfalt und Regionalität grundlegend verändern und Lebensmittelverschwendung reduzieren, z.B. durch lokale Lebensmittelnetzwerke. Die Förderung von Bodengesundheit unterstützt die Kohlenstoffspeicherung in vielen Ökosystemen, wie z.B. in Wäldern, fördert lokale Wasserkreisläufe, Luftreinigung und Kühlung. Darüber hinaus kommt der Schutz des Bodens auch Artenschutz zugute und fördert die Lebensraumvielfalt. Er erhöht die Lebensqualität von Städten und ihre Widerstandsfähigkeit gegen Überschwemmungen und Hitze. Bodenbezogene Fragen sind äußerst dringlich, da viele Menschen auf die Funktionen des Bodens direkt - als Grundlage für die Lebensmittelproduktion - aber auch indirekt - zur allgemeinen Existenzsicherung - angewiesen sind. Aus diesem Grund sollte die EU **bodenbezogene Themen in allen relevanten Sektoren einbeziehen** und den **Schutz sowie die Unterstützung der Bodengesundheit fördern**.

## Glossar

<b>Auswaschung</b>	Verlust wasserlöslicher Substanzen aus dem Boden in Oberflächengewässer oder Grundwasser
<b>Bodendegradation</b>	Verlust an Bodenfunktionen, z.B. durch verringerte Bodenfruchtbarkeit, strukturelle Schäden oder Bodenverlust
<b>Bodenmikrobiom</b>	Gesamtheit aller Bodenmikroben, sie bilden das Rückgrat von Bodengesundheit, Bodenfunktionen und sind zentrales Element wichtiger Bodenprozesse wie dem Nährstoffkreislauf
<b>Bodenstruktur</b>	Bodenpartikelzusammensetzung und Verbindung zu Aggregaten, bestimmt Bodencharakteristiken wie Wasseraufnahme- und Wasserhaltekapazität sowie Transport von Wasser und Luft
<b>Bodentextur</b>	Anteil an Sand, Schluff und Ton Fraktionen, bestimmt Bodencharakteristika wie Wasserbewegung, -speicherung und -aufnahmekapazität sowie Erosionsrisiken
<b>Erosion</b>	Prozess, bei welchem Bodenpartikel durch Wasser oder Wind abtransportiert werden
<b>Evapotranspiration</b>	Prozess der Evaporation und Transpiration: Evaporation beschreibt den Übergang von Wasser im flüssigem zu gasförmigem Zustand, Transpiration beschreibt den Prozess des Wassertransportes aus der Pflanze in die Atmosphäre via Spaltöffnungen in Blättern
<b>Metabolite</b>	Zwischen- oder Endprodukte des Metabolismus, z.B. von Zersetzungsprozessen
<b>Mineralisierung</b>	Transformation und Zersetzung von organischer Substanz in seine anorganischen Bestandteile (z.B., CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), oft mit Zwischenprodukten (Metabolite)
<b>Nährstoffkreislauf</b>	Prozess eines kontinuierlichen, dynamischen Transfers an Nährstoffen von anorganischen Bodenbestandteilen zu organischen Bestandteilen und Organismen und zurück, ausgelöst durch mikrobielle Aktivität und Pflanzenwachstum - der Prozess stellt Nährstoffe im Boden bereit
<b>Oberflächenabfluss</b>	Wasser, welches nicht vom Boden aufgenommen wird, sondern an der Oberfläche abfließt
<b>Organische Substanz/ organische Materie</b>	Dunkler Anteil des Bodens, bestehend aus zersetzten organischen Verbindungen wie Organismen- und Pflanzenüberresten und die Grundlage für Bodenfruchtbarkeit und das Bodenmikrobiom



<b>Porensystem</b>	Gesamtheit der Hohlräume zwischen Bodenpartikeln, in welchen mikrobielle Aktivitäten, Wasser- und Lufttransport sowie -speicherung stattfindet
<b>Verdichtung</b>	Prozess, welcher den Porenraum des Bodens reduziert und Aggregate aufbricht, z.B. durch Drucklast und mechanische Störung anhand von schweren Maschinen
<b>Versalzung</b>	Erhöhte Salzkonzentration aufgrund von Fehlbewässerung und Drainage, häufig in Kombination mit aridem Klima
<b>Verschlämmung</b>	Prozess, welcher Aggregate zerstört und somit in Kombination mit Wasser einen Schlamm kriert, welcher das Porensystem verstopft
<b>Versiegelung</b>	Bedeckung von Boden mit undurchlässigen Materialien, vernichtet fast alle Bodenfunktionen auf einmal

## Abkürzungen

<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>GAP</b>	Gemeinsame Agrarpolitik
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas
<b>NbS</b>	Naturbasierte Lösungen <i>Nature-based Solutions</i>
<b>SPS</b>	Sekundäre Pflanzenstoffe
<b>UN SDGs</b>	United Nations Sustainable Development Goals
<b>WHO</b>	Weltgesundheitsorganisation World Health Organization

**Bildnachweis:**

Titel: © adobestock / Phoebe

S. 3: © Christian Kaufmann

S. 4: © pexels / Muffin Creatives

S. 10: © pexels / Thanh Nguyễn

S. 16: © pexels / Maarten van den Heuvel

S. 20: © pexels / OleksandrP

S. 22: © pexels / Zen Chung

S. 26: © pexels / Anna Shvets

S. 40: © pexels / Sippakorn Yamkasikorn

**Layout und Grafiken:**

Studio Twistel / wingratgestaltung.de





