

7.4 Maßnahmen zur Verbesserung und Regeneration des Bodenzustands

HEINZ-CHRISTIAN FRÜND

Bei einem guten Bodenzustand erfüllt der Boden seine Funktionen als Puffer, Filter, Transformator und Lebensraum in hohem Maße. Düngung, Kalkung und Bodenbearbeitung sind klassische Maßnahmen zur Bodenregeneration, deren Prinzipien und Grenzen aufgezeigt werden. Die Anlage von Pflanzgruben wird als integrierte ökologische Maßnahme in einem Desertifikationsgebiet in Burkina Faso vorgestellt. Möglichkeiten des Managements von Pflanzen und Bodenorganismen zur Verbesserung des Bodenzustandes werden diskutiert. Bei der Standortmelioration in Deutschland wurden natürliche Feuchtstandorte für den Ackerbau entwässert, was für die Entwicklung der Landwirtschaft eine große Bedeutung hatte. Die Terrassierung von Hängen ist eine wirkungsvolle Maßnahme zur Schaffung anbaufähiger Böden in Bergregionen.

Measures to improve and regenerate the condition of the soil: *If a soil is in good condition, it delivers ecosystem services acting as buffer, filter, transformer and living space. Fertilization, liming and tillage are classical measures to regenerate degraded soil. Their general functioning and their limits are explained. Planting pits in a desertification area in Burkina Faso are presented as an integrated ecological measure of soil restoration. It is discussed, how soil conditions may be improved by managing plants and soil biota. The drainage of wetlands as a measure of site melioration was a key factor for the expansion of agriculture in Germany. Terracing of slopes is effective for the creation of cultivable soils in mountain areas.*

Medidas para mejorar y regenerar el estado del suelo: *Cuando el suelo está en buen estado cumple en gran medida sus funciones de amortiguador, filtro, transformador y hábitat. La fertilización, el encalado y el cultivo del suelo son medidas clásicas para la regeneración del suelo, cuyos principios y límites se muestran. La creación de hoyos de plantas se presenta como una medida ecológica integrada en una zona de desertificación en Burkina Faso. Se discuten las posibilidades del manejo de plantas y organismos del suelo para mejorar la condición del suelo. Durante la mejora del sitio en Alemania, se drenaron los sitios húmedos naturales para la agricultura, lo que fue de gran importancia para su desarrollo. Las terrazas de las laderas son una forma eficaz de crear tierras cultivables en las zonas montañosas.*

In mehreren Kapiteln dieses Buches wurde betrachtet, wie Böden sich in ihrem Zustand verschlechtern haben. Die Verschlechterung des Bodenzustands kann der natürliche Ausdruck von Alterungsprozessen sein. Sie kann aber auch anthropogenen Ursprungs sein. Zum Beispiel als Versauerung durch Industrieabgase, als Verarmung durch Übernutzung des Pflanzenbestandes, als Versalzung, als Verdichtung. Alterung geschieht vor allem durch die fortschreitende Verwitterung und Auswaschung der Mineralien im Boden.

Was ist ein guter Bodenzustand? Das ist ein Zustand, in dem der Boden seine Funktionen als Puffer, Filter, Transformator und Lebensraum in hohem Maß erfüllt:

- Der Boden kann Niederschlagswasser aufnehmen, speichern und an das Grundwasser weiterleiten.
- Der Boden bietet eine gute Grundlage für das Pflanzenwachstum. Dazu gehört 1) die Bereitstellung von Pflanzennährstoffen, 2) eine gute Durchwurzelbarkeit – die Wurzelausbreitung ist weder durch Sauerstoffmangel noch durch mechanische Barrieren behindert, 3) eine ausbalancierte Gemeinschaft der Bodenorganismen – Symbionten und das Pflanzenwachstum fördernde Bodenorganismen haben die Überhand über Phytopathogene.
- Im Boden werden Xenobiotika und aufsteigendes Methan abgebaut. Kohlenstoff wird als Humus gespeichert.
- Der Boden bietet einer vielfältigen Organismengemeinschaft Lebensraum.
- Für die moderne Landwirtschaft mit Maschinen kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu: Ein guter Bodenzustand ist gegeben, wenn der Boden tragfähig ist und die mechanische Beanspruchung durch das Befahren ohne bleibende Schäden verkraftet.

In einem guten Boden herrschen thermodynamisch unwahrscheinliche Zustände: Chemische Konzentrationen sind kleinräumig nicht im Gleichgewicht. Es gibt Hohlsysteme, die komplexer und voluminöser sind, als nach einer der Schwerkraft folgenden Sedimentation zu erwarten wäre. Grund dafür sind Lebensprozesse, bei denen letztlich Strahlungsenergie in die Bodenenergie investiert wird: Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen transportieren Stoffe und reichern sie an. Sie bohren und graben. Sie nehmen Einfluss auf die Bewegungen des Wassers im Boden. Sie produzieren Humus. Maßnahmen zur Wiederherstellung degradierter Böden müssen deshalb die Lebensprozesse mit einbeziehen, wenn sie langfristig erfolgreich sein sollen.

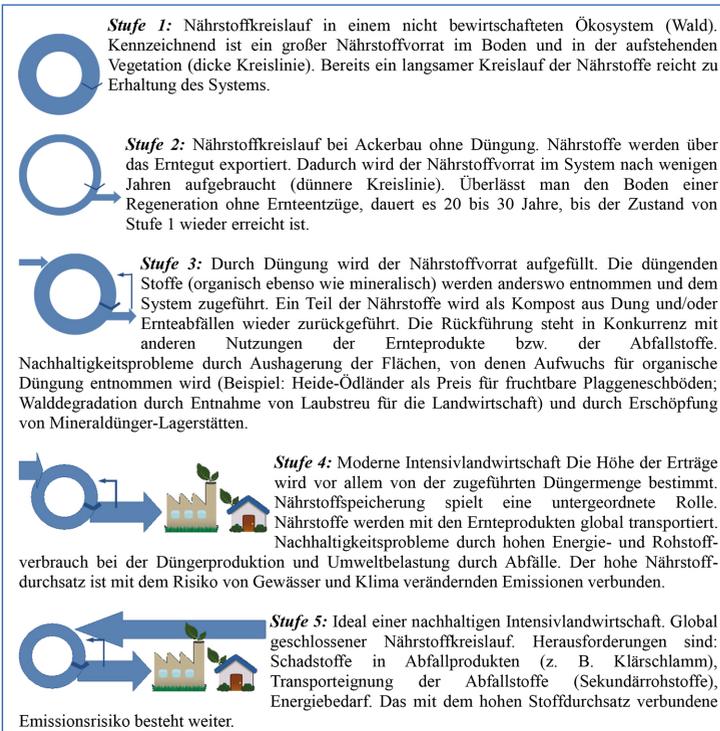
Maßnahmen zur Regeneration des Bodenzustands

Maßnahmen gegen chemische Bodendegradation

Aushagerung. Wird einem Ökosystem durch Ernte Pflanzenbiomasse entzogen, kommt es zu einer Unterbrechung des Nährstoffkreislaufs und zur allmählichen Erschöpfung der Nährstoffvorräte im Boden (Aushagerung, »nutrient depletion«). Bei der Düngung werden Pflanzennährstoffe dem Boden von außen zugeführt. Die Ertragskraft des Bodens wird regeneriert, aber in der Gesamtbetrachtung tun sich Nachhaltigkeitsprobleme auf, die in Box 1 dargestellt sind.

Die wichtigsten Närelemente für das Pflanzen-

Box 1: Schemazeichnungen zur Nachhaltigkeit der Düngung als Maßnahme zur Verbesserung des Bodenzustands



wachstum sind Stickstoff (N), Kalium (K), Calcium (Ca), Phosphor (P), Magnesium (Mg) und Schwefel (S). Dazu kommen noch notwendige Spurenelemente (z.B. Fe, Zn, Mn, Cu, Mo, B). Mineralische Dünger sind Salze der Nährelemente. Sie werden aus dem Bodenwasser oder von Oberflächen im Boden direkt von der wachsenden Pflanze aufgenommen. In organischen Düngern sind die Nährstoffe hingegen gebunden und werden erst nach der Zersetzung und Mineralisierung der organischen Stoffe pflanzenverfügbar. Das durch Düngung verbesserte Pflanzenwachstum (ober- und unterirdisch) bewirkt eine stärkere Beschattung der Bodenoberfläche, eine Förderung der Bodenorganismen und der Aggregatbildung durch das Wurzelsystem. Luftstickstoff bindende (»diazotrophe«) Bakterien können auch den Stickstoff aus der Luft biologisch verfügbar machen – besonders wirkungsvoll in Symbiose mit Leguminosen. Auch der Humusvorrat des Bodens wird durch Düngung vermehrt, am wirksamsten bei einer Kombination von organischer und mineralischer Düngung. Global bestehen sehr große Unterschiede in der Verfügbarkeit und Einsatzmenge von organischen Düngern. In Regionen mit ausgehagerten Böden ist häufig zu wenig organischer Dünger verfügbar, um die Nährstoffbilanz auszugleichen. In Regionen mit Massentierhaltung gibt es dagegen ein Überangebot, und es kommt zu Entsorgungsproblemen. Die externe Nährstoffanreicherung im globalen Ökosystem zeigt sich an einer Zunahme düngewirksamer Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre. Die Ergebnisse einer globalen Modellierung der atmosphärischen N-Deposition im Raster 5° geographische Länge und 3,75° geographische Breite für die Jahre 1860, 1993 und 2050 sind im Internet abrufbar (DENTENER 2006). Über Landflächen wurde für das Jahr

1860 eine Spanne von 0,3 bis 8 kg N/(ha×Jahr) berechnet (mit einem Hotspot in Nordindien bis zu 17 kg N/(ha×Jahr)). Für das Jahr 1993 sind die Werte wesentlich höher und reichen von 1 bis 33 kg N/(ha×Jahr) mit Hotspots in Mitteleuropa und China bis zu 83 kg N/(ha×Jahr).

Versauerung. Die Versauerung der Böden ist vor allem unter feuchten Klimabedingungen ein Problem. Bei positiver Wasserbilanz werden mit dem Sickerwasser die Basen im Boden allmählich ausgewaschen. Die geringe Fruchtbarkeit saurer Böden beruht unter anderem darauf, dass bei niedrigen pH-Werten (< pH 4,5) toxische Ionen (vor allem Al³⁺) in die Bodenlösung gelangen, was die Durchwurzelung und das Bodenleben beeinträchtigt. Der Bodenversauerung kann durch Kalkdüngung begegnet werden. Kalk neutralisiert Bodensäure, verbessert die Struktur von Lehm- und Tonböden, aktiviert das Bodenleben und steigert die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen. Als Düngekalke werden vermahlene Kalkgesteine, aber auch industrielle Nebenprodukte (Hüttenkalk, Konverterkalk, Carbokalk) verwendet. In vorindustrieller Zeit wurden lockere, kalkhaltige Sedimente (Mergel) auf den Acker gebracht. Nach den Empfehlungen der Agrarberatung soll ein mittelschwerer Ackerboden in Deutschland (600-750 mm Jahresniederschlag) pro Hektar 2-8 t kohlensaurer Kalk zu jeder Fruchtfolge (3-4 Jahre) bekommen. Für tropische Böden liegen die Empfehlungen in ähnlichen Größenordnungen. Zur Kompensation der Bodenversauerung in deutschen Waldböden ist es üblich, pro Hektar 3 t dolomitischen Kalk (enthält Ca & Mg) alle 10-30 Jahre auszubringen, häufig per Hubschrauber.

Die Zustandsverbesserung eines versauerten Bodens beschränkt sich bei oberflächlicher Kalkausbringung nur auf die obersten 10 cm des Bodens. Ein Beispiel ist die Wirkung der Kalkung im Stadtwald Essen. Dort wurden dem ermittelten Kalkbedarf entsprechend sehr große Kalkmengen ausgebracht (bis zu 15 t/ha über 10 Jahre verteilt). Zwölf Jahre nach der ersten Kalkung wurde der Tiefenverlauf der Bodenversauerung, das Vorkommen von Regenwürmern und Enchyträen und die Krautvegetation untersucht (MEUSER et al. 2004). An den gekalkten Standorten war der pH in der Streuauflage und den obersten 10 cm deutlich erhöht, aber unterhalb gab es keinen Unterschied zu den ungekalkten Vergleichsparzellen (Abb. 7.4-1). Die veränderte Krautvegetation

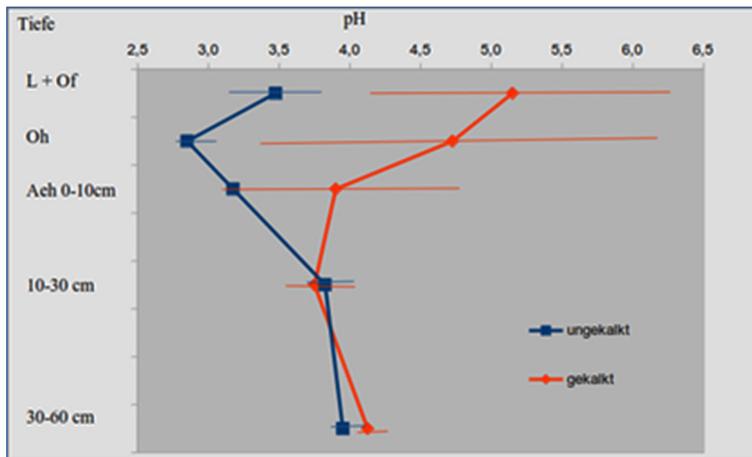


Abb. 7.4-1: Boden-pH-Werte in der Streuauflage und in drei Mineralbodentiefen in gekalkten und ungekalkten Waldparzellen im Stadtwald Essen (Mittelwert und Standardabweichung von vier Vergleichspaaren). Nach MEUSER et al. 2004

zeigte an, dass aus dem Abbau der Humusaufflage Stickstoff freigesetzt wird. Auch in der Humusaufflage lebende Enchyträen und Regenwürmer waren gefördert. Die den Boden durchmischenden endogäischen Regenwürmer waren aber nur dort häufig, wo eine gewisse Neutralisierungswirkung (Basensättigung >14%) bis in die Schicht 10-30 cm vorgedrungen war. Man darf nicht hoffen, dass Regenwürmer das schnelle Einarbeiten des Kalks in saure Bodenschichten übernehmen. Aber sie intensivieren die Durchmischung, sobald das chemische Milieu für sie tolerabel ist. Für eine Neutralisierungswirkung im Unterboden hat sich die Ausbringung von Gips (CaSO_4) bewährt (SUMNER 1995). CaSO_4 ist leichter löslich und im Boden mobiler als Kalk (CaCO_3).

Bodenkontamination. Auch die Kontamination eines Bodens mit Giftstoffen wie Blei oder Cadmium kann als Schädigung des Bodenzustandes bezeichnet werden. Dabei ist das Problem in der Regel die gesundheitliche Verträglichkeit der geernteten Nahrungsmittel für den Menschen. Nur in Ausnahmefällen kommt es zu deutlichen Beeinträchtigungen der ökosystemaren Bodenfunktionen, insbesondere dann, wenn Regenwürmer auf Grund der Kontamination ausfallen. Die Beseitigung von Bodenkontaminationen soll in diesem Kapitel nicht näher angesprochen werden. Eine umfassende Behandlung dieser Thematik findet sich bei MEUSER (2012).

Maßnahmen gegen physikalische Bodendegradation

Physikalische Bodendegradation betrifft Veränderungen, die den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens beeinträchtigen, was sich wiederum auf die Durchwurzelung, das Pflanzenwachstum und die biologische Bodenaktivität auswirkt.

Bei der Bodenverschlammung (*soil sealing*) setzen sich die Poren an der Bodenoberfläche unter dem Einfluss von aufprallendem Wasser zu. Niederschlagswasser fließt ab, anstatt zu infiltrieren. *Soil sealing* ist bei Desertifikation häufig und besonders dort ein Problem, wo Starkregen auf unbedeckte und ausgetrocknete Böden niedergehen. Eine allgemein verbreitete Maßnahme gegen die Bodenverschlammung ist das Bedecken der Bodenoberfläche durch Mulch oder deckende Vegetation. Dies setzt allerdings voraus, dass die Witterung und die Ertragskraft des Bodens ein entsprechendes Vegetationswachstum zulassen.

Wo diese Voraussetzungen nicht gegeben sind, können Inseln oder ökologische Trittschritte geschaffen werden, in denen die knappen Ressourcen auf ein für das Pflanzenwachstum wirksames Niveau angereichert werden. Ein Beispiel: Bauern im nördlichen Burkina Faso entwickelten das Zai-System, mit dem die verbackene Bodenkruste durchbrochen wird (DANJUMA & MOHAMMED 2015). Es handelt sich um 10-15 cm tiefe Gruben mit einem Durchmesser von 15-20 cm. Sie werden in einem Raster mit 70-80 cm Abstand angelegt (Abb. 7.4-2). In die Grube wird Dung oder Kompost und das Saatgut gegeben. Termiten werden durch die organische Substanz angelockt und tragen zur Verbesserung der Bodenstruktur bei. Die Wasserhaltefähigkeit des Bodens in den Zai-Gruben ist um ein Vielfaches höher als im umliegenden Boden. Zudem wirken Zai als Sammler für das auf der umliegenden Fläche niedergehende Wasser. Oft werden kleine Wälle aus Boden-

aushub oder Steinen zwischen den Gruben angelegt, die zusätzlich als Abflusshindernisse wirken. Die Ernteerträge werden durch Zai deutlich gesteigert und die Resilienz gegenüber Witterungsschwankungen nimmt zu. Das Verfahren ist anerkannt und in Westafrika verbreitet, obwohl der Arbeitskraftbedarf für die manuelle Anlage der Zai sehr hoch ist (500-700 Stunden/ha). Eine mechanisierte Variante ist die Anlage von kurzen Furchen (»Halbmonde«) mit einem speziellen Pflug (www.vallerani.com).

Von **Bodenschadverdichtung** spricht man, wenn durch Druck von oben (Befahren mit Maschinen) eine verdichtete Zone im Boden entstanden ist, die das Vordringen der Pflanzenwurzeln behindert. Dabei spielt nicht nur die mechanische Festigkeit des Bodens eine Rolle. Die Wurzeln werden zusätzlich durch Sauerstoffmangel geschwächt, weil die Verdichtung die Bodenbelüftung einschränkt. Bodenschadverdichtungen entstehen vor allem dann, wenn der Boden in feuchtem Zustand befahren wird. Auch die Trittbelastung durch Rinder kann den Boden stark verdichten.

Bodenverdichtungen werden häufig mechanisch aufgelockert: Pflügen, Grubbern, Eggen in der Ackerkrume; spezielle Anbaugeräte und Maschinen für die Unterbodenlockerung (z.B. Parapflug, Stechhublockerer). Die mechanische Bodenlockerung macht den Boden instabil, so dass vor allem bei Unterbodenlockerung eine besonders schonende Bodenbewirtschaftung und eine biologische Stabilisierung des Bodens notwendig ist, um eine Schadensvergrößerung durch Neuverdichtungen zu vermeiden (HORN 2011). Die biologische Stabilisierung geschieht zum Beispiel durch mehrjährigen Anbau von tief wurzelnden Pflanzen wie Luzerne (DUMBECK 2012). Bei verdichteten Fahrspuren in einem Waldboden hat sich die Anpflanzung von Erlen in Verbindung mit Kompost zur Bodenregeneration bewährt (MEYER 2012). Erlen leiten über ihr Aerenchym Sauerstoff zu den Wurzeln, so dass diese auch in anoxischem Umfeld wachsen können. Bei Bodenverdichtungen um Stadtbäume wird biswei-

len Druckluft über eingestochene Lanzen in den Boden gepresst. Der Nutzen dieser Maßnahme ist jedoch umstritten (MACDONALD et al. 1993). Bei Sportrasen ist das Einstechen von Löchern in die Grasnarbe üblich („Aerifizieren“, 80-200 Löcher pro m²). Oft ist jedoch bereits Bodenruhe eine wirksame Maßnahme zur Regeneration von Bodenverdichtungen. Die Geschwindigkeit der Strukturregeneration im Boden ist dabei stark von den Standortverhältnissen und der Tiefenlage der Verdichtung abhängig. Fahrspuren in biologisch aktiven Ackerböden können sich in einem bis zwei Jahren oberflächlich regenerieren. In sauren Waldböden braucht es dafür Jahrzehnte (MÜLLER-INKMANN & FRÜND 2021). Tief liegende Verdichtungszone sind problematischer als Verdichtungen im Oberboden, weil sie weniger den natürlichen Regenerationskräften ausgesetzt sind.

Allgemein gilt, dass das Vermeiden von Schadverdichtungen Vorrang vor der Schadensreparatur hat. Hierfür sind die Begrenzung der Maschinengewichte, die Reduzierung des Auflastdrucks (z.B. durch Bänder oder Breitreifen) und der Verzicht auf das Befahren nassen Bodens die entscheidenden Stellgrößen. Die Beschränkung des Fahrens auf dauerhaft festgelegte Spuren bei gleichzeitiger Schonung der übrigen Fläche ist in der Forstwirtschaft vieler Länder inzwischen die Norm. In der Landwirtschaft wird sie erwogen und z. B. in Australien praktiziert (ANTILLE et al. 2019).

Management des Bodenlebens

Mit der Wahl der angebauten Pflanzen und der Entscheidung für die forstlich geförderten Bäume hat der Mensch großen Einfluss auf den Bodenzustand. Wurzelsysteme prägen das Bodengefüge und den Wasserhaushalt des Bodens. Nährstoffaufnahme und Streuproduktion der Pflanzen beeinflussen den Säure-Base-Status des Bodens und die Aktivität der Bodenorganismen. Die Menge und Struktur des Pflanzenaufwuchses schützt die Bodenoberfläche in unterschiedlicher Weise vor Wind und Regen. Fruchtfolgen in der Landwirtschaft haben das Ziel, die Bodenressourcen ausgewogen zu nutzen und die Zunahme von Schadorganismen zu verhindern. In den fünf- bis sechsjährigen Fruchtfolgen des ökologischen Landbaus spielen Leguminosen eine besondere Rolle für die Stickstoffversorgung des Bodens (vgl. Kap. 6.7). Zwischenfrüchte (z.B. Senf nach der Hauptkultur) dienen der Vermeidung von Stickstoffausträgen und fördern durch Beschattung und Durchwurzelung das Bodenleben. Mischkulturen (verschiedene Pflanzen auf derselben Fläche) und Agroforstsysteme ermöglichen eine weitere Ausnutzung ökologischer Wechselwirkungen, sollen aber hier nicht weiter behandelt werden.



Abb. 7.4-2: Zai-Pflanzgruben in Burkina Faso (aus DANJUMA & MOHAMMED 2015).

Einige Bodenorganismen haben eine besondere Schlüsselrolle für den Bodenzustand. Regenwürmer und Termiten arbeiten Pflanzenreste ein, durchmischen und strukturieren den Boden. Rhizobien bringen als Symbiosepartner Stickstoff in den Stoffkreislauf ein. Mykorrhizapilze erschließen für die mit ihnen verbundenen Pflanzen schwer erreichbare Phosphat- und Wasservorräte und ermöglichen einen Stoffaustausch zwischen verschiedenen Pflanzen. Es gibt deshalb immer wieder Versuche, den Bodenzustand durch Ansiedlung bzw. Animpfen dieser Schlüsselorganismen zu verbessern. Europäische Regenwürmer wurden in Neuseeland angesiedelt, um neu geschaffenes Weideland zu verbessern. Weitere wissenschaftlich begleitete Regenwurmansiedlungen geschahen in holländischen Polderböden, auf großen Rekultivierungsflächen und zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit in Wüstenoasen (BAKER et al. 2006). Es wurde auch versucht, Regenwürmer zur Wirkungsverbesserung nach Waldkalkung anzusiedeln (BEYLICH & GRAEFE 1996). Fazit dieser Vorhaben ist: In Böden mit einem für Regenwürmer günstigen chemischen Bodenzustand kann durch die Ansiedlung eine Bodenverbesserung mit einem Zeitvorsprung bis zu zehn Jahren gegenüber der spontanen Einwanderung oder Einschleppung von Regenwürmern erreicht werden. Die Umwandlung von chemisch ungünstigen Böden mit Hilfe von Regenwürmern ist nicht möglich. Der Aufwand für eine systematische Regenwurmansiedlung ist allerdings nur selten gerechtfertigt, weil bei guter Bodenbewirtschaftung bereits wenige Verschleppungsereignisse für den Neuaufbau der Regenwurmbesiedlung ausreichen (FRÜND et al. 2004). Sinnvoller ist es, die gewünschten Bodenwühler durch die Bodenbewirtschaftung zu fördern. Dies geschieht durch bedarfsgerechte Kalkung, Belassen von Erntabfällen auf dem Boden, organische Düngung und Bodenruhe. Der Nahrungsbedarf einer Regenwurmpopulation ist erheblich und kann auf mehrere Tonnen Stroh pro Hektar geschätzt werden (JÖRGENSEN et al. 2019). Die Bodenruhe wird vor allem durch den Verzicht auf das Pflügen erreicht. Pfluglose Bewirtschaftung fördert besonders stark die tief grabenden (anecischen) Regenwürmer. Dabei wird allerdings routinemäßig - ohne Schaden für die Regenwürmer - die unkrautbekämpfende Wirkung des Pflügens durch ein Totalherbizid ersetzt.

Rhizobien-Impfpräparate zur Steigerung der Stickstoffmenge, die in den Wurzelknöllchen der Leguminosen verfügbar gemacht wird, haben eine lange Tradition. Das erste Patent wurde 1896 in den USA erteilt. Es gibt eine große Vielfalt von Wurzelknöllchensymbiosen. Verschiedene Pflanzenarten haben unterschied-

liche Symbiosepartner und können sich mit mehr oder weniger effektiven Rhizobien verbinden. Eine Animpfung ist vor allem dort sinnvoll, wo die entsprechende Kulturpflanze (z. B. Sojabohne) bisher nicht angebaut wurde und die Symbiosepartner im Boden fehlen bzw. nur in schwachen Populationen vorhanden sind. Es wird aber auch versucht, wenig effektive indigene Rhizobien durch effektivere Arten bzw. Stämme zu verdrängen, die dem Boden oder dem Saatgut zugegeben werden. Durch die biologische Stickstofffixierung werden hohe Erträge ohne mineralischen Stickstoffdünger möglich. Die kommerzielle Entwicklung und Produktion von Impfpräparaten befindet sich weltweit in einem Aufschwung und erstreckt sich auch auf weitere pflanzenfördernde Mikroorganismen. Ein führendes Land ist Brasilien. SANTOS et al. (2019) geben eine aktuelle Übersicht.

Maßnahmen zur Standortmelioration

Unter der Melioration von Standorten versteht man die Veränderung natürlicher Böden, so dass sie für den Ackerbau geeignet werden. Dabei geht es meistens um die Regulierung des standörtlichen Wasserhaushalts. Die Entwässerung von Sumpfgebieten war in Deutschland bis in die 1960er Jahre ein wesentliches Mittel zur Ausweitung des Ackerlandes. Heute ist ein großer Anteil (45% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland mit Dränagen ausgestattet (SCHNEIDER & DON 2019). In ariden und semiariden Regionen gibt es auch wasserbauliche Maßnahmen mit dem Ziel, Niederschlagswasser in landwirtschaftlichen Flächen anzureichern. Die Anlage von Terrassen an Berghängen hat eine mehr als tausendjährige Tradition und dient dem Aufbau nachhaltig fruchtbarer Anbauflächen (Abb. 7.4-3). Der Boden in der Terrasse wird durch verlangsamten Niederschlagsabfluss oder auch durch gezielte Bewässerung mit Wasser versorgt. Zusätzlich steigert sich seine Wasserhaltefähigkeit und seine Nährstoffspeicherung, weil es zur Akkumulation von Humus und Feinsediment kommt (WEI et al. 2016). Bei der Melioration von Podsolböden und Lateritböden sollen durch tiefes Pflügen verdichtete Bodenhorizonte (»Ortstein«) aufgebrochen werden.

Schlussfolgerung

Es lässt sich schlussfolgern, dass die Erhaltung und der Schutz eines im Sinne der Bodenfunktionen guten Bodenzustands Vorrang vor dem Hinnehmen von Schäden mit anschließender Reparatur haben muss. Dabei sollte dem Zustand des Unterbodens besondere Aufmerksamkeit gelten, wo die biologisch getriebenen Regenerationsprozesse nicht mehr wirksam sind.



Abb. 7.4-3: Terrasierter Hang im Atlasgebirge, Süd-Marokko (Aufnahme Feb. 1999, H.-C. Fründ)

Literatur

- ANTILLE, D. L., S. PEETS, J. GALAMBOŠOVÁ, G. F. BOTTA et al. (2019): Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research* 17: 653–82. <https://doi.org/10.15159/AR.19.133>
- BAKER, G. H., G. BROWN, K. BUTT, J. P. CURRY & J. SCULLION (2006): Introduced earthworms in agricultural and reclaimed land: their ecology and influences on soil properties, plant production and other soil biota. *Biological Invasions* 8: 1301–16. DOI:10.1007/s10530-006-9024-6
- BEYLICH, A. & U. GRAEFE (1996): Die Ansiedlung mineralbodenbewohnender Regenwürmer als ergänzende Maßnahme zur Regradation von Waldböden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 81: 137–40.
- DANJUMA, M. N. & S. MOHAMMED (2015): Zai pits system: a catalyst for restoration in the dry lands. *Journal of Agriculture and Veterinary Science* 8: 1–4. DOI: 10.9790/2380-08210104.
- DENTENER, F. J. (2006): Global Maps of Atmospheric Nitrogen Deposition, 1860, 1993, and 2050. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/830>.
- DON, A. (2019): Root-restricting layers in German agricultural soils II. Adaptation and melioration strategies. *Plant and Soil* 442: 419–432. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04186-8>.
- DUMBECK, G. (2012): Umgang mit Bodenverdichtungen bei der Wiederherstellung von Lössböden im rheinischen Braunkohlenrevier. In: FRÜND, H.-C. & O. HEMKER (eds.) *Bodenschadverdichtungen: Vermeidung, Regeneration, Überwachung*, Beiträge Diskussionsforum Bodenwissenschaften 12: 39–50. https://www.geographie.uni-osnabrueck.de/fileadmin/user_upload/studium/MBGA/docs/Tagungsberichte/2012_Tagungsband_Bodenschadverdichtung.pdf; Abruf 25.06.2021.
- FRÜND, H.-C., EGBERT, E. & G. DUMBECK (2004): Spatial distribution of earthworms [Lumbricidae] in recultivated soils of the Rhenish lignite-mining area, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167: 494–502. DOI: 10.1002/jpln.200421372.
- HORN, R. (2011): Sanierung verdichteter Böden. In: BLUME, H.-P., R. HORN & S. THIELE-BRUHN (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes*, vierte Auflage, Wiley-VCH Weinheim, S. 662–666.
- JÖRGENSEN, R. G. (Hrsg.) (2019): *Bodenfruchtbarkeit: verstehen, erhalten und verbessern*. Themenbibliothek Pflanzenproduktion. Clenze: Erling Verlag. ISBN 978-3-86263-126-1.
- MAC DONALD, J. D., L. R. COSTELLO & T. BERGER (1993): An evaluation of soil aeration status around healthy and declining oaks in an urban environment in California. *Journal of Arboriculture* 19: 209–19.
- MEUSER, H. (2012): *Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land*. Springer Science & Business Media, 2012.
- MEUSER, H., H.-C. FRÜND & U. GRAEFE (2004): Amelioration of acidified urban forest soils by liming—evaluation of effects on soil chemistry, soil biology and vegetation. In horizon, 6:1–8. Freiburg i. Br.: Citeseer. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?DOI=10.1.1.510.2769&rep=rep1&type=pdf>; Abruf 25.06.2021.
- MEYER, C. (2012): Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden. In: FRÜND, H.-C. & O. HEMKER (eds.) *Bodenschadverdichtungen: Vermeidung, Regeneration, Überwachung*, Beiträge Diskussionsforum Bodenwissenschaften 12: 37–38. https://www.geographie.uni-osnabrueck.de/fileadmin/user_upload/studium/MBGA/docs/Tagungsberichte/2012_Tagungsband_Bodenschadverdichtung.pdf; Abruf 25.06.2021.
- MÜLLER-INKMANN, M. & H.-C. FRÜND (2021): Glucose amendment influences restructuring of compacted soil blocks – Results of a field Experiment with varying soil-site conditions. *Soil and Tillage Research* 211: 105025. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105025>.
- SANTOS, M. S., M. A. NOGUEIRA & M. HUNGRIA (2019): Microbial inoculants: Reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express* 9: 1–22. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.
- SUMNER, M. E. (1995): Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYWARDANE, N. S. & B. A. STEWART (eds.) *Subsoil Management Techniques*. CRC Press, Boca Raton.
- WEI, W., D. CHEN, L. WANG, S. DARVANTO et al. (2016): Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. *Earth-Science Reviews* 159: 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.010>.

Kontakt:

Prof. i. R. Dr. Heinz-Christian Fründ
Bodenbiologie, Bodenökologie, Ökotoxikologie
Hochschule Osnabrück
hc.fruend@hs-osnabrueck.de

FRÜND, H.-C. (2021): Maßnahmen zur Verbesserung und Regeneration des Bodenzustands. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 342–347. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.47