



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung



Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft

# Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit



## Liebe Leserinnen und Leser,

### **sind Böden uns noch fremd!**

“In the end we will conserve only what we love, we will love only what we understand and we will understand only what we are taught.”

„Am Ende werden wir nur erhalten, was wir lieben, werden wir nur lieben, was wir verstehen, und wir werden nur verstehen, was wir gelehrt werden.“

(Bada Dioum, Senegalesischer Umweltschutzexperte auf der UN Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro, 1992)

Böden sind Lebensraum für Pflanzen und Tiere, sie erfüllen wesentliche Aufgaben für unsere Trinkwasserversorgung, liefern Nahrungsmittel, tragen Wälder, dienen der Erzeugung von Rohstoffen, sind einer der größten Kohlenstoffspeicher der Welt und sind ein bedeutendes Archiv der Natur- und Kulturgeschichte.

### **Zusammengefasst: Böden sind unsere Lebensgrundlage**

Daher ist der Schutz unserer Böden lebensnotwendig. Um ihre Leistungsfähigkeit sicherzustellen, müssen wir die Bodenfruchtbarkeit erhalten.

Böden in Deutschland sind sehr fruchtbar und sichern hohe landwirtschaftliche Erträge. Unsere Böden sind gleichzeitig aber auch vielen Gefährdungen ausgesetzt: der Wasser- und Winderosion, schädlicher Verdichtung, Kontamination durch eingetragene Schadstoffe, Versauerung und Versalzung bis hin zu flächenhafter Versiegelung durch Siedlung und Verkehr. Deshalb brauchen Böden unseren Schutz.

Diese Broschüre bietet Informationen zur Bodenfruchtbarkeit, den Einflussgrößen und Maßnahmen zum Erhalt und zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit.

Die Beschäftigten in der Land- u. Forstwirtschaft und der Kommunalplanung und wir alle zusammen haben die Aufgabe uns für unsere Böden einzusetzen.

Wir wünschen allen Lesern, dass unsere Broschüre Anregungen dazu gibt.  
Gehen wir hinaus, und schauen uns die Böden gemeinsam mit Bodenspezialisten an.

Ihre  
Redaktion Landwirtschaft  
Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL)



# Inhalt

Mitglieder der Expertengruppe .....	6
Vorwort .....	7
<b>1 Bodenfruchtbarkeit und rechtlicher Rahmen des Bodenschutzes, Ziel der Broschüre .....</b>	<b>8</b>
Hubert Honecker, Meinhard List, Karl Severin .....	8
<b>2 Der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ von Albrecht Thaer bis heute.....</b>	<b>13</b>
2.1 Historische Entwicklung (Frank Ellmer) .....	14
2.2 Natürliche Bodenfruchtbarkeit (Thomas Vorderbrügge) .....	16
2.3 Relevante Bodenfunktionen für die Bodenfruchtbarkeit (Susanne Schroetter) ...	19
2.3.1 Produktionsfunktion .....	20
2.3.2 Filter- und Pufferfunktion .....	22
2.3.3 Lebensraumfunktion (Christoph Emmerling und Stefan Schrader) .....	25
2.3.4 Fazit .....	26
<b>3 Standort und Nutzung setzen Rahmenbedingungen .....</b>	<b>27</b>
3.1 Vielfalt und Leistung der Bodenorganismen (Christoph Emmerling und Stefan Schrader) .....	28
3.2 Spezielle Aspekte des Grünlandes (Katrin Kuka) .....	30
3.2.1 Bodenstruktur und Wurzelsystem in Abhängigkeit von der Landnutzungsintensität .....	32
3.2.2 Einfluss der Bewirtschaftung auf die Speicherung organischer Bodensubstanz ...	32
3.2.3 Einfluss der Klimaänderung auf die Kohlenstoffspeicherung .....	33
3.2.4 Einfluss von erhöhtem Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) in der Atmosphäre .....	34
3.2.5 Fazit .....	34
<b>4 Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit .....</b>	<b>35</b>
4.1 Bodengefüge (Joachim Brunotte, Rainer Duttmann, Marion Senger) .....	36
4.1.1 Bodengefüge zwischen Gesetz und Anspruch .....	36
4.1.2 Beeinträchtigung des Bodengefüges .....	37
4.1.3 Feldgefügeansprache .....	38
4.1.4 Fazit .....	38
4.2 Wasser- und Lufthaushalt (Frank Ellmer) .....	39
4.2.1 Grundlagen .....	39
4.2.2 Fallbeispiel: Dauerfeldversuch .....	41
4.2.3 Fazit .....	43
4.3 Wurzelwachstum (Susanne Schroetter) .....	44
4.3.1 Durchwurzelbarkeit .....	44
4.3.2 Durchwurzelungsintensität .....	45
4.3.3 Effektive Durchwurzelungstiefe .....	47
4.3.4 Faktoren, die das Wurzelwachstum beeinflussen .....	47
4.3.5 Fazit .....	49
4.4 Nährstoff- und Humusversorgung (Hartmut Kolbe) .....	50
4.4.1 Nährstoffversorgung .....	50
4.4.1.1 Grundlagen .....	50
4.4.1.2 Nährstoffbilanzierung .....	51
4.4.1.3 Grund- und Mikronährstoffe .....	55

4.4.2	Humusversorgung	55
4.4.2.1	Grundlagen	55
4.4.2.2	Möglichkeiten zur Einschätzung der Humusversorgung	56
4.4.2.3	Humusbilanzierung	56
4.4.3	Fazit	58
4.5	Bodenazidität und Kalkbedarf (Karl Severin)	58
4.6	Bodenbiologische Aktivität (Christoph Emmerling, Stefan Schrader)	61
4.7	Schwermetalle (Sylvia Kratz)	62
4.7.1	Definition und Bedeutung von Schwermetallen für die Bodenfruchtbarkeit	62
4.7.2	Toxikologische Relevanz	62
4.7.2.1	Pflanzentoxizität	62
4.7.2.2	Toxizität für Tiere und Menschen	63
4.7.2.3	Toxizität für das Bodenleben	63
4.7.3	Eintragungspfade von Schwermetallen in den Boden	64
4.7.3.1	Atmosphärische Deposition	64
4.7.3.2	Quellen von Schwermetallen in Phosphor (P)-Düngern	64
4.7.3.3	Schwermetallzufuhr mit der P-Düngung	65
4.7.4	Risikoabschätzung auf Basis von Hintergrund- und Vorsorgewerten für Schwermetalle in Böden	65
4.7.5	Handlungsoptionen zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen	66
4.7.6	Fazit	68
4.8	Veränderungen der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenerosion (Rainer Duttmann, Michael Kuhwald, Joachim Brunotte)	69
4.8.1	Ausmaß und Formen der Bodenerosion	69
4.8.2	Wirkungen der Bodenerosion	71
4.8.3	Bodenerosion durch Wasser	71
4.8.3.1	Faktoren der Wassererosionsgefährdung	74
4.8.3.2	Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung durch Wasser	76
4.8.4	Bodenerosion durch Wind	76
4.8.4.1	Faktoren der Winderosionsgefährdung	77
4.8.4.2	Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind	79
4.8.5	Bewertung der Bodenfruchtbarkeitsgefährdung durch Bodenerosion	79
4.8.6	Fazit	80
<b>5 Bodenbewirtschaftung und Bodenfruchtbarkeit</b>		<b>81</b>
5.1	Fruchtfolge und Bodenfruchtbarkeit	82
5.1.1	Bedeutung von Vor- und Zwischenfrucht (Heinz-Josef Koch, Bernhard C. Schäfer)	82
5.1.1.1	Grundlagen	82
5.1.1.2	Vorfruchteffekte auf Winterweizen	83
5.1.1.3	Vorfruchteffekte auf Zuckerrüben	83
5.1.1.4	Vorfruchteffekte von Zwischenfrüchten	84
5.1.2	Fruchtfolge aus Sicht der Humusversorgung sowie des ökologischen Landbaus (Hartmut Kolbe)	85
5.1.2.1	Einfluss der Fruchtarten auf Ernte- und Wurzelrückstände sowie den Humusumsatz	85
5.1.2.2	Einfluss der Fruchtfolge auf $N_{\min}$ und Vorfruchteignung im ökologischen Landbau	86
5.1.2.4	Fazit	89
5.1.3	Fruchtfolgen steuern Bodenorganismen und deren Leistungen (Christoph Emmerling, Stefan Schrader)	89

<b>5.2 Ackerbauliche Maßnahmen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit – Bodenschutz und Bodenschonung</b> .....	<b>91</b>
5.2.1 Bodenbearbeitung (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	91
5.2.1.1 Systematik .....	91
5.2.1.2 Bodenbearbeitung und Arbeitstiefe .....	91
5.2.1.3 Bodenbearbeitung steuert Bodenorganismen und deren Leistungen (Christoph Emmerling, Stefan Schrader) .....	93
5.2.2 Strohmanagement (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	95
5.2.3 Stoppelbearbeitung (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	97
5.2.4 Mulch- und Direktsaat (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	98
5.2.5 Streifenbearbeitung und Aussaat (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	99
5.2.6 Auswirkung unterschiedlicher Bearbeitung auf Bodenbedeckung und Energieverbrauch (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte) .....	100
5.2.7 Schutzmaßnahmen gegen Bodenerosion (Rainer Duttmann, Michael Kuhwald, Joachim Brunotte) .....	101
5.2.7.1 Vorsorge .....	101
5.2.7.2 Fazit .....	101
5.2.8 Bodenschonendes Befahren (Joachim Brunotte, Rainer Duttmann, Michael Kuhwald) .....	103
5.2.8.1 Bodenphysikalische Parameter .....	103
5.2.8.2 Pflanzenbauliche Parameter .....	104
5.2.8.3 Schlussfolgerungen – bodenschonender Technikeinsatz zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. ....	106
5.2.8.4 Fazit .....	107
<b>5.3 Organische Düngung (Hartmut Kolbe)</b> .....	<b>108</b>
5.3.1 Einfluss der organischen Materialien auf den Humusumsatz .....	108
5.3.2 Anhebung der Humusgehalte und Einsatz von Biokohle .....	110
5.3.3 Fallbeispiel: Verbesserungsvorschläge für Betriebe mit unausgeglichener Versorgung bei der organischen Substanz .....	110
5.3.3.1 Unterversorgung .....	110
5.3.3.2 Überversorgung .....	111
<b>5.4 Kalkdüngung (Karl Severin)</b> .....	<b>113</b>
<b>5.5 Schutz von Bodenorganismen im Zulassungsverfahren von Pflanzenschutzmitteln (Bernd Hommel, Dieter Felgentreu)</b> .....	<b>116</b>
5.5.1 Einleitung .....	116
5.5.2 Rechtlicher Rahmen für das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (PSM) ...	116
5.5.3 Bewertung der Auswirkungen von PSM auf den Boden .....	117
5.5.4 Ermittlung der Auswirkungen von PSM auf Bodenmakroorganismen .....	118
5.5.5 Ermittlung der Auswirkungen von PSM auf Bodenmikroorganismen .....	119
5.5.6 Verfügbarkeit von für Regenwürmer und Bodenmikroorganismen schädlichen PSM .....	120
5.5.7 Fazit .....	121
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>122</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>124</b>
Literaturverzeichnis .....	125
Autorenverzeichnis .....	135
KTBL-Veröffentlichungen .....	141
Impressum .....	143

## Mitglieder der Expertengruppe

- PD Dr. Joachim Brunotte**, Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig
- Prof. Dr. Rainer Duttmann**, Christian-Albrechts-Universität, Kiel
- Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer (i. R.)**, Humboldt-Universität zu Berlin
- Prof. Dr. Christoph Emmerling**, Universität Trier
- Dr. Dieter Felgentreu**, Julius Kühn-Institut, Berlin
- Wilfried Henke**, BZL in der BLE, Bonn
- Dr. Bernd Hommel**, Julius Kühn-Institut, Berlin
- Hubert Honecker (i. R.)**, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn
- Dr. Heinz-Josef Koch**, Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ), Göttingen
- Dr. Hartmut Kolbe (i. R.)**, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen
- Dr. Sylvia Kratz**, Julius Kühn-Institut, Braunschweig
- Dr. Michael Kuhwald**, Christian-Albrechts-Universität, Kiel
- Dr. Katrin Kuka**, Julius Kühn-Institut, Braunschweig
- Dr. Meinhard List**, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn
- Kirstin Marx**, Umweltbundesamt, Dessau
- Berthold Ortmeier (i. R.)**, Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig
- Prof. Dr. Bernhard Carl Schäfer**, Julius-Kühn-Institut, Braunschweig
- Prof. Dr. Stefan Schrader**, Thünen-Institut für Biodiversität, Braunschweig
- Dr. Susanne Schroetter (i. R.)**, Julius Kühn-Institut, Braunschweig
- Marion Senger**, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover
- Dr. Karl Severin (i. R.)**, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover
- Dr. Barbara Urban**, Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig
- Dr. Thomas Vorderbrügge (i. R.)**, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- PD Dr. Hans-Heinrich Voßhenrich (i. R.)**, Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig

# Vorwort

## Liebe Leserinnen und Leser,

Die vorliegende Broschüre ist eine redaktionell überarbeitete Neuauflage der 1. Auflage (2016), die sich mit der besonderen Bedeutung der Bodenfruchtbarkeit für den Bodenschutz im Rahmen der ‚Guten fachlichen Praxis‘ (BBodSchG § 17, 1998) befasst. Sie stützt sich auf umfassendes Expertenwissen und langjährige Praxiserfahrungen zum Thema Ackerbau und Grünlandbewirtschaftung. Wegen der erfreulichen Nachfrage lag es nahe, die Broschüre mit ihrer praxisorientierten und erkenntnisreichen Beschreibung des Gesamtkomplexes ‚Bodenfruchtbarkeit‘ - als Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines Bodens bei landwirtschaftlicher Nutzung - weiter zur Verfügung zu haben.

Für heutige Herausforderungen, mit ackerbaulichen Produktionssystemen Grundnahrungs-, Futtermittel und nachwachsende Rohstoffe nachhaltiger zu erzeugen, sind Erhalt und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit unabdingbar.

Dem Landwirt sind an seinem Standort die Einflussgrößen der natürlichen Bodenfruchtbarkeit wie Bodenart, Bodentyp und Klima vorgegeben. Umso mehr sind für ihn als Bewirtschafter existentiell wichtig Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Nährstoff- und Humusversorgung, Schadstoffeinträge und die Bodenorganismen. Die Bodenfunktionen, an denen der Fruchtbarkeitszustand landwirtschaftlich genutzter Böden gemessen wird, sind die Produktions-, Filter/Puffer- und Lebensraumfunktion. Sie zu erhalten, dafür gilt es, die Hauptgefährdungen, wie Bodenerosion, Bodenverdichtungen, Humusabbau und Schadstoffeinträgen vorsorgend entgegenzuwirken. Den Bodenbedeckungsgrad durch Reststoffe kennt der Landwirt als die zentrale Steuerungsgröße. Er kann ihn durch eine Vielzahl von Managementmaßnahmen beeinflussen wie: aufgelockerte Fruchtfolgen mit humusmehrenden Kulturen, Zwischenfruchtanbau und nichtwendende Bodenbearbeitung. Für letztere ist heute der

Pflanzenschutzmitteleinsatz eine spezielle Herausforderung – ein Weniger an Pflanzenschutz darf nicht ein Mehr an mechanischer Eingriffsintensität in den Boden bedeuten. Ein zweiter wichtiger Risikofaktor für die Bodenfruchtbarkeit kann die Bodenverdichtung sein, verursacht durch den Einsatz leistungsstarker Landtechnik bei verdichtungsempfindlichem Bodenzustand. Gerade für dieses Problem werden heute innovative, durch digitale Technologie unterstützte Verfahren und Maschinen entwickelt, die sich an den kritischen Bodenzustand anpassen.

Heute befindet sich die Landbewirtschaftung wieder einmal im Umbruch. Speziell der Ackerbau steht aktuell vor großen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Herausforderungen: viele Ackerbauer sind erhöhtem wirtschaftlichem Druck ausgesetzt, pflanzenbauliche Produktionsverfahren stehen zunehmend in der Kritik und sollen neben der Ernährungssicherung einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Biodiversität leisten. D. h., die Lösungsansätze zur Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit haben die auf EU-Ebene geschaffene Wachstumsstrategie „Green Deal“ mit den Herausforderungen zu Klimaschutz, Biodiversität und Artenvielfalt zu unterstützen.

Die in Deutschland entwickelte „Ackerbaustrategie 2035“ des BMEL (August 2021) bietet mit den 12 Handlungsfeldern eine Vielzahl von Maßnahmen zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit an. In diesem Sinne kann auch die vorliegende Neuauflage einen Beitrag leisten, bleibt doch die Bodenfruchtbarkeit ein Grundpfeiler jeglichen Ackerbaus über den Tag hinaus.

PD Dr. Joachim Brunotte  
Thünen-Institut für Agrartechnologie



# 1

(Foto: Landpixel)

## Bodenfruchtbarkeit und rechtlicher Rahmen des Bodenschutzes, Ziel der Broschüre

Boden hat eine herausragende Bedeutung als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen. Er sichert die Ernährung und den Wohlstand. Im Boden werden Nährstoffe gebunden. Der Boden ist einer der größten Kohlenstoffspeicher der Welt. Damit kommt ihm auch eine hohe Bedeutung im Hinblick auf unser Klima zu. Böden reinigen durch ihre Filtereigenschaften eindringendes Wasser, speichern es und sind ein wichtiger Baustein für den Gewässer- und Hochwasserschutz. Der Schutz unserer Böden ist lebensnotwendig.

Hubert Honecker, Meinhard List, Karl Severin

Da Boden nicht vermehrbar ist, kommt es den Bewirtschaftern in der Landwirtschaft zu, bei ackerbaulicher Nutzung und auch bei der Grünlandbewirtschaftung die Qualität der Böden zu erhalten und wenn möglich zu verbessern.

*„Wenn wir von Boden sprechen, meinen wir damit eine dünne Schicht zwischen dem unbelebten Material des Erdinneren und der Atmosphäre. Die Umwandlung der Erdkruste unseres Planeten in fruchtbare Böden, die Pflanzen und damit auch Tieren und Menschen die Lebensgrundlage bilden, verdanken wir in erster Linie der Aktivität von Lebewesen. Böden sind lebendige Systeme, Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen, die wir möglichst vorsichtig und umsichtig behandeln sollten.“*

B. Schmid/O. Schelske, 1997

Deutschland verfügt über eine Bodenfläche von rd. 35,7 Mio. Hektar. Davon sind etwa 18,1 Mio. Hektar Landwirtschaftsfläche, etwa 10,7 Mio. Hektar sind Waldfläche. Siedlungs-, Verkehrs- und Wasserfläche sowie Unland machen etwa 7,5 Mio. Hektar aus. Von den agrarstatistisch erfassten rund 16,6 Mio. Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche werden etwa 70 Prozent als Ackerland und 28 Prozent als Dauergrünland genutzt.

Die Böden in Mitteleuropa und insbesondere in Deutschland sind sehr fruchtbar. Darüber hinaus sind die in Mitteleuropa vorherrschenden Klimaverhältnisse besonders geeignet, qualitativ und mengenmäßig hohe und sichere Erträge zu liefern.

Der Ausdruck für die Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines Bodens ist die **Bodenfruchtbarkeit**. Sie ist entscheidend für die Ertragsfähigkeit eines Bodens.

Die **Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit** (s. Kap. 4) sind in zwei Gruppen einzuteilen:

- **nicht anthropogen beeinflussbar** an einem Standort sind Bodenart, Bodentyp, Klima, natürliche Wasserversorgung und Niederschlagsverteilung.
- **anthropogen beeinflussbar**, also insbesondere durch den Landwirt als Bewirtschafter, sind Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Bodenerosion, Bodenverdichtung, Nährstoffversorgung, pH-Wert, Humusgehalt, Nützlingsvorkommen, Schädlingsbefall und Schadstoffeinträge.

Die Broschüre „**Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit**“ (BZL, 2022) beschreibt eine Vielzahl an Einzelementen und Maßnahmen, die die Bodenfruchtbarkeit eines Standortes beeinflussen. In Abbildung 4.1 werden die wesentlichen Faktoren dargestellt.

Besonderes Augenmerk gilt dem **Humusgehalt** (s. Kap. 4.4.2), der durch das Klima, die Bodenart, den Wasserhaushalt, die Zufuhr organischer Masse im Rahmen der Fruchtfolge, die Nährstoffversorgung sowie Erosionsereignisse, Entwässerung oder Grünlandumbruch beeinflusst wird. Wichtig ist dabei, den standorttypischen Humusgehalt zu erhalten bzw. zu erreichen.

**Erosionsereignisse** (s. Kap. 4.8 und 5.2.7) durch Wind oder Wasser sind stets durch Bodenabträge und damit durch Humusverluste gekennzeichnet. Dabei können Nährstoff- und Sedimenteinträge in Gewässer erfolgen sowie Aufschüttungen auf Straßen und Wegen.

**Bodenverdichtungen** (s. Kap. 5.2.8) beeinflussen die ungestörte Erschließung des Bodens durch die Pflanzenwurzel. Sie behindern die Durchlüftung des Bodens, den Wasserhaushalt und die Nährstoffaufnahme.

Eine angepasste **Nährstoffversorgung** (s. Kap. 4.4.1, Kap. 5.3 und 5.4) ist ein wesentlicher Bestandteil einer hohen Bodenfruchtbarkeit. Sie ist am Bedarf der angebauten Kulturpflanzen auszurichten.

Um dauerhaft gesunde Nahrungs- und Futtermittel erzeugen zu können, sind **Schadstoffeinträge** (s. Kap. 4.7) weitestmöglich zu verhindern.

Die **Wasserversorgung** (s. Kap. 4.2) eines Standortes hat in vielen Regionen ausschlaggebende Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. Oft reicht das natürliche Wasserangebot nicht aus, um das theoretische Ertragspotenzial eines Bodens zu nutzen.

**Über mehrere Jahrhunderte** wurde die Fruchtbarkeit unserer Böden sukzessive gesteigert und ausgebaut. Dazu haben zahlreiche Maßnahmen beigetragen, die verstärkt im 18. Jahrhundert begannen und bis Mitte des 20. Jahrhunderts fortgeführt wurden. Darunter fallen die Entwässerung und Dränung Grundwasser beeinflusster und staunasser Standorte, das Brechen von Ortstein und Orterden, die Krumentiefung durch sukzessive tieferes Pflügen und die Aufdüngung der Nährstoffvorräte an Hauptnährstoffen, Kalk und Spurennährstoffen. Wichtig ist auch die über Jahrzehnte erfolgte Anhebung der Humusvorräte nach der Krumentiefung durch regelmäßige Zufuhr organischer Substanz. Bodenabträge durch Wind- und Wassererosion wurden mittels der Anlage von Hecken, Knicks und Terrassen eingeschränkt. Die Einführung von miteinander und in zeitlicher Folge verträglichen Kulturpflanzenanbauten im Rahmen von Fruchtfolgen hat dazu beigetragen, dass das Schädlingspotenzial und der Infektionsdruck bodenbürtiger pilzlicher Krankheitserreger begrenzt werden konnte.

Die konsequente Anwendung **Guter fachlicher Praxis** in der Bodenbewirtschaftung (Brunotte et al., 2015) ließ zum Ende der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts die heutige hohe Bodenfruchtbarkeit erreichen. Dies dokumentiert sich in der Vervierfachung der Getreideerträge und der Verdoppelung der Hackfruchterträge in den letzten 50 Jahren. Neben der hohen Bodenfruchtbarkeit haben aber auch andere wichtige Maßnahmen, wie der züchterische Fortschritt und die Gute fachliche Praxis im Pflanzenschutz wie auch in der Landtechnik, zu den gestiegenen Erträgen beigetragen.

Um die Bodenfruchtbarkeit langfristig sichern zu können, bedarf es auch zukünftig hoher Standards der Guten fachlichen Praxis in der Bewirtschaftung und Pflege unserer Böden. Die Gute fachliche Praxis ist einer fortlaufenden Weiterentwicklung unterworfen, indem sie sich stetig an die neuesten Erkenntnisse aus der wissenschaftlichen Forschung, den sich verändernden klimatischen Bedingungen und neuer technischer Möglichkeiten, der Beratung und Praxis anpasst und diese schnellstmöglich in die aktuellen Bewirtschaftungssysteme integriert.

Diese wichtige Integration hat seit 1998 auch eine gesetzliche Grundlage. Die Bodenfruchtbarkeit spielt im **rechtlichen Rahmen des Bodenschutzes** eine dominante Rolle.

**Im Fachrecht** gilt das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (**Bundes-Bodenschutzgesetz** – BBodSchG) vom 17.03.1998, zuletzt geändert am 25.02.2021. Das Gesetz soll sowohl vorsorgend den Boden schützen („vorsorgender Bodenschutz“), als auch für bereits eingetretene Beeinträchtigungen des Bodens eine Wiederherstellungspflicht erzeugen („nachsorgender Bodenschutz“).

In § 1 BBodSchG werden der Zweck und die Grundsätze des Gesetzes wie folgt festgelegt:

- Die Funktionen des Bodens sind nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen
- Schädliche Bodenveränderungen sind abzuwehren
- Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerunreinigungen sind zu sanieren
- Es ist Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen

Insbesondere die Vorsorgepflicht gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen wird in § 7 BBodSchG festgehalten. Hierunter fallen auch Bodenschadverdichtungen durch nicht sachgerechten Maschineneinsatz. Daher ist die Landwirtschaft verpflichtet, im Sinne des BBodSchG im Rahmen der Anwendung der Guten fachlichen Praxis den Maschineneinsatz so zu planen, dass Bodenverdichtungen soweit als möglich vermieden werden. Die Gute fachliche Praxis dient damit der nachhaltigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit der Böden.

Die Grundsätze der Guten fachlichen Praxis im Sinne des BBodSchG sind im § 17 Abs. 2 BBodSchG genannt und umfassen:

- eine standortangepasste Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung
- den Erhalt der Bodenstruktur
- die Vermeidung von Bodenverdichtungen
- die Verhinderung von Bodenabträgen (Erosion)
- den Erhalt von Strukturelementen
- die Förderung der biologischen Aktivität des Bodens durch Fruchtfolgegestaltung und
- die langfristige Sicherung des standorttypischen Humusgehaltes.

Damit werden die oben angesprochenen Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit weitgehend bereits durch das seit 1998 geltende Bodenrecht in Deutschland geschützt.

Ferner gibt es im **Förder- und Beihilferecht Festlegungen zum Schutz des Bodens** und der Bodenfruchtbarkeit. Dem Förder- und Beihilferecht liegen oft unionsrechtliche Beihilferegelungen zugrunde, deren Tatbestandsvoraussetzungen



Mulchsaat von Zuckerrüben (Foto: H. Honecker)

erfüllt werden müssen, um die aus diesen EU-Rechtsakten resultierenden Zuwendungen zu erhalten.

So müssen gemäß Verordnung (EU) Nr. 1307/2013 die Betriebsinhaber, die die Basisprämie beantragen, seit 2015 bestimmte dem Klima- und Umweltschutz förderliche Landbewirtschaftungsmethoden einhalten. Dafür erhalten sie eine Zahlung, die als „Greeningprämie“ bezeichnet wird. Eine Fördervoraussetzung dieser Prämie ist im Regelfall die Verpflichtung zur Anbaudiversifizierung. Hierdurch werden Mindestanforderungen hinsichtlich der Anzahl und der maximal zulässigen Anteile einzelner landwirtschaftlicher Kulturen am gesamten Ackerland des geförderten Betriebsinhabers vorgeschrieben. Der Landwirt muss auf seinem Ackerland gemäß EU-Vorgaben mindestens zwei verschiedene landwirtschaftliche Kulturen anbauen, wenn er zwischen 10 und 30 Hektar Ackerland hat. Dabei darf die Hauptkultur nicht mehr als 75 % des Ackerlandes einnehmen. Bei mehr als 30 Hektar Ackerland müssen mindestens drei verschiedene landwirtschaftliche Kulturen angebaut werden, wobei die Hauptkultur nicht mehr als 75 % bzw. die beiden größten Kulturen nicht mehr als 95 % des Ackerlandes einnehmen dürfen.

Die Basisprämie wird bei nichtproduktiver Nutzung landwirtschaftlicher Flächen nur dann gewährt, wenn diese Flächen in einem bestimmten Zustand erhalten werden oder auf ihnen eine Mindesttätigkeit ausgeübt wird. Dies fördert ebenfalls den Schutz des Bodens. Die vom Betriebsinhaber gemäß § 2 Direktzahlungen-Durchführungsverordnung auf diesen Flächen jährlich auszuübende Mindesttätigkeit besteht im Regelfall entweder aus dem Mähen des Aufwuchses und dem Abfahren des Mähguts oder aus dessen Zerkleinerung und ganzflächiger Verteilung. Sollte diese Mindesttätigkeit nicht ausgeübt werden, so fehlt es an der notwendigen Beihilfefähigkeit der genannten Flächen. Ausnahmen von dieser Mäh- und Mulchpflicht sind u. a. im Rahmen von Naturschutzprogrammen möglich. Damit bleiben auch extensive Verfahren zur Bodennutzung beihilfefähig und dienen ebenfalls dem Bodenschutz.

Ferner ist jeder Empfänger landwirtschaftlicher Direktzahlungen der 1. Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik, bestimmter flächen- und tierbezogener Zahlungen der 2. Säule und bestimmter flächenbezogener Zahlungen im Weinsektor im Rahmen von **Cross-Compliance** gemäß Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 dazu verpflichtet, seine Flächen in einem **guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (GLÖZ)** nach Anhang II der genannten Verordnung zu erhalten. Die konkreten Ausgestaltungen dieser GLÖZ-Standards sind in Deutschland in der Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung festgelegt.

Neben den GLÖZ-Anforderungen gehört zur Cross-Compliance eine Liste von 13 EU-Rechtsakten (sog. Grundanforderungen an die Betriebsführung (GAB) nach Anhang II der Verordnung (EU) Nr. 1306/2013). Diese Rechtsakte sind

Fachrecht und gelten daher unabhängig von evtl. gewährten Agrarzahlungen. Die Einhaltung der GLÖZ-Standards und der GAB werden im Rahmen der Cross-Compliance nach unionsrechtlichen Regelungen systematisch kontrolliert. Verstöße gegen diese Standards oder Anforderungen können zur Kürzung der genannten Zahlungen führen. Diese Kürzungen treten ggf. neben die Verhängung eventueller Bußgelder aufgrund von Verstößen gegen das entsprechende Fachrecht ein.

Deutschland hat verbindliche **GLÖZ-Standards** zum Erosionsschutz, zum Erhalt der organischen Substanz und zu den Mindestanforderungen an die Bodenbedeckung erlassen.

Bei der **Vorsorge gegen Bodenerosion** erfolgte die Umsetzung des EU-Rechtes in nationales Recht durch § 6 der Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung. Danach müssen die Länder auf ihrem Hoheitsgebiet wind- und wassererosionsgefährdete Flächen nach einem vorgegebenen Bestimmungsschlüssel identifizieren, für die gewisse Mindestanforderungen im Rahmen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung eingehalten werden müssen. In der landwirtschaftlichen Praxis stehen insbesondere Bodenabträge im Fokus, die aufgrund der Bewirtschaftung von Flächen entstehen können (Onsite-Schäden). Dabei kommt es häufig zu Schäden der Feldfrucht, zu einer Minderung der Krumenmächtigkeit, zu grabenartigen Wasserrinnen und damit insgesamt zu einem Verlust an wertvoller Oberbodensubstanz. Neben den Schäden auf den von der Erosion betroffenen Flächen müssen aber auch Folgeschäden der Erosion beachtet werden. Dazu zählen Hochwasserschäden, Eutrophierung und Bodenablagerungen auf anderen landwirtschaftlichen oder Siedlungs- und Verkehrsflächen (Offsite-Schäden).

Der Schutz des Bodens durch **Erhalt der organischen Substanz** ist in § 7 der Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung geregelt und verbietet das Abbrennen von Stoppelfeldern.

Der GLÖZ-Standard „Mindestanforderungen an die **Bodenbedeckung**“ ist in § 5 der Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung normiert. Dieser betrifft in erster Linie die Pflicht zur Begrünung von Ackerland, das durch den Landwirt als sog. ökologische Vorrangfläche im Rahmen der dem Klima- und Umweltschutz förderlichen Landbewirtschaftungsmethoden ausgewiesen wird und auf dem keine oder nur eine eingeschränkte Produktion erlaubt ist. Diese Begrünungspflicht gilt auch auf brachliegendem bzw. stillgelegtem Ackerland außerhalb des Greenings. Ein Umbruch dieser Flächen in der Förderperiode ist nur unter sehr eng gefassten Ausnahmen möglich. Auf den genannten Flächen ist ferner der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verboten. Bis zum 15. Februar des auf das Antragsjahr folgenden Jahres sind Zwischenfrüchte und Begrünungen, die als ökologische Vorrangflächen ausgewiesen sind bzw. Winterkulturen oder Winterzwischenfrüchte, die nach stickstoffbindenden Pflanzen im Rahmen des Greenings angebaut werden,

grundsätzlich auf der Fläche zu belassen. Gewisse Abweichungen – insbesondere aufgrund von Landesrecht – sind möglich.

In der neuen Förderperiode ab 2023 gehen das bisher geltende Greening und Cross Compliance über in die sogenannte Konditionalität. Deren Einhaltung ist die Grundbedingung für den Bezug von Direktzahlungen und bestimmter Zahlungen der 2. Säule. Insbesondere mit dem neu hinzugekommenen Standard GLÖZ 2 „Schutz von Feuchtgebieten und Mooren“ wird ein besonderer Fokus auf den Aspekt Klimaschutz und Böden gelegt. Die übrigen bisher geltenden, für den Bodenschutz wichtigen GLÖZ-Standards (Erosionsschutz, Mindestbodenbedeckung, Fruchtwechsel...) sowie der Erhalt und Schutz von Dauergrünland und Landschaftselementen, die Flächenstilllegung und die Pufferzonen an Wasserläufen haben weiter Bestand, zum Teil mit verschärften Anforderungen. Die Anforderungen für die neuen, freiwilligen Öko-Regelungen und für Maßnahmen der 2. Säule müssen über die „Grundlinie“ der Konditionalität hinausgehen, um Ausgleichszahlungen bzw. Pauschalen dafür erhalten zu können.

Eingebettet in diesen rechtlichen Rahmen soll **die vorliegende Broschüre** den aktuellen Stand des Wissens zum Themenkomplex ‚Bodenfruchtbarkeit‘ darstellen und zur Weiterentwicklung der „Guten fachlichen Praxis“ in der Bodenbewirtschaftung beitragen.

Zu Beginn steht eine Abhandlung über die zeitliche Wandlung des Begriffs ‚Bodenfruchtbarkeit‘, mit den Komponenten ‚natürlich‘ und ‚kulturbedingt‘, von Albrecht Thaer bis heute. Dazu gehören die Rahmenbedingungen, die der Standort setzt.

Es folgen Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit und wie diese durch das Bodenmanagement zu beeinflussen sind.



Dabei wird nicht der Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, vielmehr sollen bestimmte relevante Aspekte wie Fruchtfolge (s. Kap. 5.1), ackerbauliche Maßnahmen (s. Kap. 5.2), Düngung (s. Kap. 5.3 und 5.4) und schließlich zum Umgang mit Pflanzenschutzmitteln (s. Kap. 5.5) herausgestellt und die komplexen Wirkzusammenhänge mit Blick auf eine weitere Verbesserung der „Guten fachlichen Praxis“ aufgezeigt werden. Die Broschüre gibt die fachliche Auffassung der beteiligten Autoren wieder und ist kein Positionspapier des BMEL.

**Die Broschüre ist als Grundlage für Landwirte, Berater, Fachbehörden und insbesondere für die Ausbildung junger Landwirte und Studierender gedacht. Damit soll auch der Transfer des aktuellen Fachwissens in die Praxis beschleunigt werden.**

Sie ergänzt die Reihe der Fachschriften des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) um ein weiteres wichtiges Thema, das sich mit der Bodenfruchtbarkeit auseinandersetzt. Insbesondere um die vielen Facetten der Bodenfruchtbarkeit, die als übergeordnetes Thema oft nicht so präzise zu fassen ist. Die vorliegende Schrift wurde auf Initiative des BMEL im Rahmen einer Expertengruppe von Wissenschaftlern des Thünen-Institutes unter Koordinierung von PD Dr. Joachim Brunotte und 13 weiterer Institutionen erarbeitet. Die Redaktion und Drucklegung erfolgte durch den aid infodienst (vorliegender, korrigierter Nachdruck wurde vom BZL bearbeitet).

(Foto: P. Meyer, BLE)

# 2

## Der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ von Albrecht Thaer bis heute

Schon vor mehr als 500 Jahren stellte Leonardo da Vinci (1452–1519) fest: „Wir wissen mehr über die Bewegung der Himmelsgestirne als über den Boden unter unseren Füßen“ (zitiert bei Montgomery, 2010). Heute wissen wir, dass der „Dreck“ unter unseren Füßen einer der wichtigsten Lebensgrundlagen für Pflanzen, Tiere und Menschen ist, die geschützt werden muss. Als dem Menschen noch keine Produktionsmittel zur Verfügung standen, hat sich die Bodenfruchtbarkeit natürlich entwickelt. Erst in den letzten beiden Jahrhunderten wurde sie zunehmend anthropogen beeinflusst durch Technik, Düngung und Pflanzenschutz. In jüngster Zeit wird aus Gründen der Spezifizierung sowohl zwischen physiologischen, phytosanitären und technologischen Funktionen als auch zwischen bodenchemischen, bodenphysikalischen und bodenbiologischen Aspekten unterschieden. Dies dient dem Ziel, die Bodenfruchtbarkeit mithilfe interdisziplinärer Sichtweisen in ihrem Ursachen-Wirk-Geflecht näher zu beschreiben, um sowohl unerwünschte Nebenwirkungen als auch gewünschte Effekte zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit steuern zu können.

## 2.1 Historische Entwicklung

(Frank Ellmer)

Der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ ist an die Entwicklung der ackerbaulichen Bodennutzung gebunden und hat im Laufe der Zeit diverse Wandlungen erfahren. Frühe Hinweise auf das Beurteilen der Fruchtbarkeit von Böden im Zusammenhang mit der Tätigkeit des Ackerbau treibenden Menschen können dem Werk des römischen Schriftstellers Lucius Junius Moderatus Columella (geb. in Gades, gest. um 70 n. Chr.) entnommen werden. Im ersten seiner zwölf Bücher über Landwirtschaft hat er einleitend folgendes hinterlassen:

*„Oft höre ich, wie die Ersten unserer Bürger bald über die Unfruchtbarkeit der Äcker klagen, bald über die Ungunst des Wetters, die schon lange den Früchten schade; manche höre ich auch, die diese Klagen sozusagen durch eine bestimmte Begründung abschwächen, weil sie meinen, durch allzu große Ergiebigkeit in der Vergangenheit sei der Boden völlig erschöpft und ausgemergelt und könne daher nicht in der früheren Fülle den Menschen Nahrung bieten. Diese Gründe ... sind, wie ich überzeugt bin, von der Wahrheit weit entfernt. ... Demnach glaube ich, daß wir nicht infolge der Gewalt der Witterung unter jener Unfruchtbarkeit leiden, sondern daß wir selber daran schuld sind, die wir die Landwirtschaft dem allerschlechtesten Sklaven wie einem Henker zur Bestrafung auszuliefern pflegen, während doch von unseren Vorfahren stets gerade die besten sich nach ihrem besten Vermögen ihr gewidmet haben“ (Ahrens, 1976).*

Seit den Zeiten Columellas mussten 1800 Jahre vergehen, ehe sich im Rahmen der europäischen Aufklärung allmählich

ein zunehmend fundiertes Wissen zu formieren begann, mit dem das Phänomen Boden besser verstanden werden konnte. Diese Neuzeit der agronomischen Entwicklung wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts maßgeblich durch den Agrarreformer Albrecht Daniel Thaer (1752–1828; Abb. 2.1) eingeleitet.

Als ausgebildeter Mediziner legte er seinen empirischen Studien naturwissenschaftliche Kenntnisse zugrunde und war damit zu der Auffassung gelangt, dass Humus die Fruchtbarkeit der Böden bestimmt. In seinem Hauptwerk „Grundsätze der rationellen Landwirtschaft“ (1810) schrieb er dazu folgendes:

*„Der Humus macht einen mehr oder minder großen Bestandteil des Bodens aus. Die Fruchtbarkeit des Bodens hängt eigentlich ganz von ihm ab, denn außer dem Wasser ist er es allein, was den Pflanzen im Boden Nahrung gibt. ... So wie der Humus eine Erzeugung des Lebens ist, so ist er auch die Bedingung des Lebens. Er giebt die Nahrung dem Organismus. Ohne ihn läßt sich daher kein individuelles Leben, wenigstens der vollkommenen Thiere und Pflanzen, auf dem Erdboden denken“ (Thaer, 1810).*

Damit hat Thaer eine Sichtweise auf Boden und Pflanze begründet, die als sogenannte „**Humustheorie**“ die Entwicklung der Agronomie bis weit in das 19. Jahrhundert prägte.

Aus seiner Schule sind Persönlichkeiten hervorgegangen, die seine Auffassungen weiter entwickelten, später aber auch zu



Abb. 2.1: Porträt Albrecht Daniel Thaer von Johann Jacob de Lose (1803) (Foto: Ellmer, 2015)



Abb. 2.2: Reliefbildnis Carl von Wulffen (Gut Pietzpuhl, Sachsen-Anhalt) (Foto: Ellmer, 2008)

deren Überwindung beitragen. Sein Schüler Carl von Wulffen (1785–1853; Abb. 2.2) stand noch ganz auf dem Grund der Thaer'schen Lehre und hat in seiner Theorie der Statik des Landbaus die damalige Vorstellung von der Fruchtbarkeit des Bodens in eine mathematische Gleichung gefasst. Dazu schrieb er im Jahr 1818:

*„Zur mehreren Vollständigkeit meiner kleinen Schrift, gebe ich Ihnen die Auflösung dieser Aufgabe in größter Kürze, doch nicht als Versuch einer Näherung, sondern mit mathematischer Schärfe. ... Die Grundform der Theorie ist allemal wenn wir mit R die Grade des Reichthums, mit T die Thätigkeit und mit F die aus der Wirkung beider Potenzen sich erzeugende Fruchtbarkeit ausdrücken:  $RT = F$ “ (v. Wulffen, 1818).*

Diese Theorie entwickelte er auf der Grundlage empirisch erworbener Kenntnisse weiter und führte 1823 zur Idee der Statik des Landbaus folgendes aus:

*„Die Reste des organischen Reichs werden nach und nach in Nahrungsstoff der Gewächse verwandelt, indem sie mit Zerstörung des lebenden Organismus den chemischen Verwandtschaftsgesetzen folgen, und nun, im Zustand der Entmischung und neuer Verbindungen, eine Reihe von Veränderungen durchlaufen, bis sie, zum Theil in gasförmiger, zum Theil in flüchtiger Gestalt, von den Pflanzen aufgenommen, wieder den vitalen Gesetzen angehören.*

*Indem sich der Reichthum des Bodens durch die entnommenen Ernten nach und nach immer vermindert, wird dieser Verlust auf eine zweifache Weise ersetzt:*

- *dadurch, dass wir ihn auf kürzere oder längere Zeit der Erzeugung seiner natürlichen Produkte oder auch angesäeter Kräuter überlassen, die gewöhnlich durch den Weidegang*



Abb. 2.3: Porträt Carl Philipp Sprengel von Paul Stankiewicz (1878) (Foto: Ellmer, 2015)

*unserer Haustiere benutzt werden, deren Abgänge zum Theil dafür zurückbleiben;*

- *durch Düngung, aus der mannigfaltigsten Zusammensetzung animalischer und vegetabilischer Substanzen.*

*Der Ersatz beruht also in beiden Fällen auf der Zurückführung des durch das Pflanzenwachstum dem Boden entzogenen Stoffs, und der Ertrag eines Bodens wird sich, bei unveränderter Thätigkeit, gleich bleiben, wenn der Ersatz der Erschöpfung gleich bleibt; er wird sich bereichern, wenn der Ersatz die Erschöpfung übersteigt; er wird im Ertrage sinken und am Ende verarmen, wenn der Ersatz die Erschöpfung nicht erreicht“ (v. Wulffen, 1823).*

Als v. Wulffen's Schrift im Jahr 1823 veröffentlicht wurde, war bereits ein neues Zeitalter angebrochen. Dieses wird durch den Agrikulturchemiker Carl Philipp Sprengel (1787–1859; Abb. 2.3) markiert. Er gehörte zu den ersten Schülern Thaers und war unter anderem vier Jahre als Wirtschaftsinспекtor des Gutsbetriebes für Thaer in Möglin tätig. Ab 1821 studierte er an der Universität Göttingen Naturwissenschaften und wurde 1823 dort zum Dr. phil. promoviert. Im Jahr 1826 veröffentlichte er einen Beitrag „Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure Salze“ und wies nach, dass die düngende Wirkung von Humus auf die in ihm enthaltenen Mineralstoffe zurückzuführen ist. Damit war die bis dato allgemein anerkannte Humustheorie faktisch widerlegt. Wenngleich lange Zeit Justus von Liebig (1803–1873) als der Begründer der Mineralstofftheorie der Pflanzenernährung galt, gebührt dieser Verdienst Carl Sprengel, der allerdings bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts völlig im Schatten Liebig's stand.

Nach umfangreichen Versuchen und Studien, die er auf naturwissenschaftlicher Basis durchführte, gab er 1845 in Leipzig ein Buch unter dem Titel „Die Lehre vom Dünger oder Beschreibung aller bei der Landwirthschaft gebräuchlicher vegetabilischer und mineralischer Düngermaterialien nebst Erklärungen ihrer Wirkungsart“ heraus. In der Einleitung schrieb er:

*„Die Lehre vom Dünger handelt im Allgemeinen von den Materialien, welche man dem Boden mittheilt, um ihn zu befähigen, bessere Früchte, als er bisher hervorbrachte, zu tragen; ... Mit dem Namen „Dünger“ im weitesten Sinne des Wortes hat man selbst alles das zu bezeichnen, was zu den Nahrungsmitteln der Gewächse oder zu ihrer chemischen Constitution gehört. ... Wollen wir genau erfahren, was man zum Dünger zu rechnen habe, so bleibt uns nichts anderes übrig, als die Pflanzen in ihre entfernten oder letzten Bestandtheile zu zerlegen, denn da wir hierbei in allen mehr oder weniger Kalk, Talk, Natron, Kali, Alaunerde, Kieselerde, Eisen, Mangan, Chlor, Phosphorsäure, Schwefelsäure, Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff finden, so dürfen wir auch annehmen, dass alle Materialien, welche einen oder mehrere dieser Stoffe enthalten, ... zu den Düngungsmitteln gehören werden...“ (Sprengel, 1845).*

Zusammen mit dem epochalen Werk von Justus von Liebig, welches sich insbesondere in der Schrift „Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie“ (1840) niederschlug, waren damit die naturwissenschaftlichen Voraussetzungen für die allmähliche Intensivierung des Landbaus gegeben. In dem Zusammenhang erfuhr der Terminus „Bodenfruchtbarkeit“ insbesondere im 20. Jahrhundert verschiedene Wandlungen und wechselhafte Interpretationen, die bis heute nicht abgeschlossen sind.

Eine auf dem Stand der Zeit umfassende Abhandlung zum Themenkomplex Bodenfruchtbarkeit wurde von Peter Kundler und Mitarbeitern im Jahr 1989 vorgelegt. Unter dem Titel „Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit“ ist das agronomische Wissen gebündelt und die Zusammenhänge zu den Komplexen Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung, Gefügemelioration und Bodenschutz sowie Bodenwasserregulierung und Beregnung dargelegt worden. Ausgangspunkt dafür war eine Definition des Terminus Bodenfruchtbarkeit als „...Wirkungsanteil des Bodens an der Produktivität und Effektivität der Pflanzenproduktion“. Die Autoren gingen davon aus, dass sich die Bodenfruchtbarkeit auf physiologische, phytosanitäre und technologische Funktionen des Bodens gründet.

*„Die physiologische Funktion besteht in der bedarfsgerechten Vermittlung von Nährstoffen, Wasser, Luft und Wärme an die Wurzeln der Kulturpflanzen, die vor allem vom Transformations- und Speicherungsvermögen, der Leitfähigkeit und der Durchwurzelbarkeit des Bodens abhängt. Die phytosanitäre Funktion kommt im Einfluss auf den Gesundheitszustand der Pflanzen zum Ausdruck und wird durch den Gehalt an Schadherregern, Schädlingen und Schadstoffen sowie die Dynamik ihrer Anreicherung und ihres Abbaus im Boden bedingt. Die technologische Funktion wirkt sich im Einfluss auf die Anbauverfahren aus und kommt in der Bearbeitbarkeit sowie in den Bedingungen für Düngung, Aussaat, Schutz und Ernte der Pflanzenbestände zum Ausdruck“ (Kundler et al., 1989).*

Auf der Grundlage dieses Verständnisses und weiterführend hat Detloff Köppen im Jahr 2004 Bodenfruchtbarkeit im Agroökosystem sehr umfassend und detailreich dargestellt. Ausgangspunkt der Abhandlung ist, dass „...*Bodenfruchtbarkeit ein Wirkungsgefüge ist, das sich als offenes dynamisches restriktiv selbstregulierendes System und in seiner Eignung für und durch die Bodennutzung auf der Grundlage natürlicher Standortfaktoren und Prozesse herausbildet und entwickelt, das mit Systemen gleicher, über- und untergeordneter Ebenen in Wechselwirkung steht und über seine durch die Umwelt geprägten nachhaltigen Wirkungen auf den Boden und die Kulturpflanzen unter Funktions-, Struktur und Systemaspekten beurteilt werden kann*“ (Köppen et al., 2004).

Dieses Verständnis geht vom Systemcharakter des Phänomens Bodenfruchtbarkeit aus und betont die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten. Dabei wirken bodenchemische, bodenphysikalische und bodenbiologische Aspekte und Prozesse wechselseitig zusammen und bedingen sich gegenseitig (Abb. 2.4).

Ausgehend von dieser Sichtweise zeigt sich, dass Bodenfruchtbarkeit nicht anhand disziplinärer Erklärungen der Bodenkunde, der Agrikulturchemie oder der Agronomie interpretiert werden kann. Vielmehr sind disziplinübergreifende Ansätze erforderlich, um das Verständnis dieser für die heutige und zukünftige Existenz des Menschen grundlegenden Kategorie weiter zu entwickeln.

Zusammenfassend hat der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ im Laufe der Zeit verschiedene Wandlungen erfahren. Während er zu Beginn der wissenschaftlichen Betrachtung des Landbaus ausschließlich auf den Humus bezogen wurde, ist er später im Blick auf die Pflanzennährstoffe im Boden vornehmlich agrikulturchemisch interpretiert worden. Heute wird von einem Systemverständnis ausgegangen, mit dem das wechselseitige Zusammenwirken von bodenchemischen, bodenphysikalischen und bodenbiologischen Prozessen erklärt wird. Der bodenbiologischen Komponente kommt dabei zunehmend größere Bedeutung zu.

## 2.2 Natürliche Bodenfruchtbarkeit

(Thomas Vorderbrügge)

Bereits in den 50er und 60er Jahren sowie Mitte der 90er Jahre des vorherigen Jahrhunderts fand in der Fachliteratur zu Ackerbau und Bodenkunde im Rahmen der umfangreichen Diskussionen zur Deutung des Begriffes „Bodenfruchtbarkeit“ eine intensive Debatte zur Definition der „**Natürlichen Bodenfruchtbarkeit**“ statt (z. B.: Mückenhausen, 1956; Scheffer und Lieberoth, 1957; Klapp, 1958; Boguslawski, 1965; Frese, 1969; Kuntze, 1972; Bauemer, 1991a, 1992; Heyland, 1996). Ein Ziel war es, den „**Wirkungsanteil des Bodens**“ an Wachstum und Entwicklung der Pflanzen und damit den

Ertrag herauszuarbeiten (Scheffer und Lieberoth, 1957). Ähnlich klar ist der damalige Ansatz von Klapp (1958). Er versteht unter Bodenfruchtbarkeit „**das dem Boden eigene Maß natürlicher, nachhaltiger Leistungsfähigkeit**, das ihn von anderen Böden unterscheidet“. Interessant ist aus heutiger Sicht der direkte Bezug zur „Nachhaltigkeit“, da „nachhaltig“ den Fokus auf das Gleichgewicht zwischen Entzug und Nachlieferung legt und deshalb gerade in Bezug auf die „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ ein wichtiges Kriterium ist. Eine ähnliche Definition liefert Heyland (1996). Er versteht unter

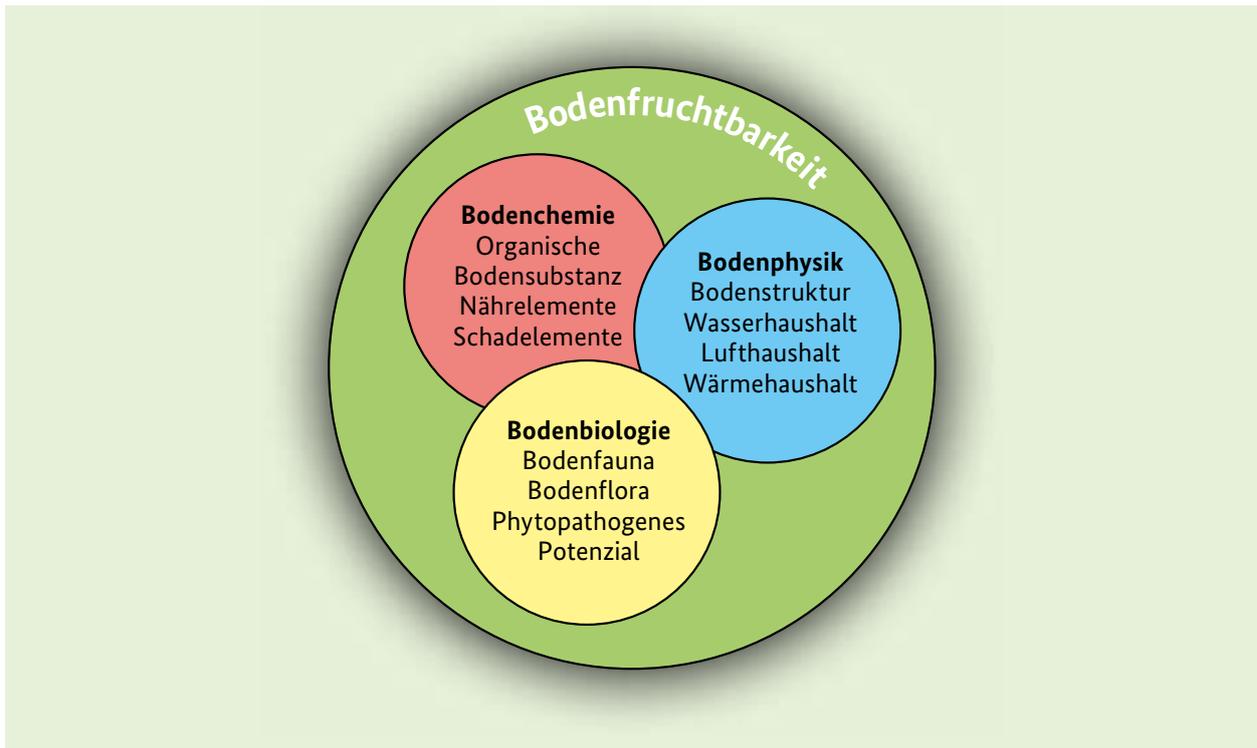


Abb. 2.4: Bodenfruchtbarkeit als Funktion bodenchemischer, bodenphysikalischer und bodenbiologischer Zustandsgrößen (Ellmer et al., 2012)

„Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ die natürliche Fähigkeit eines Bodens, dauerhaft hohe pflanzliche Erträge, ohne besondere Zusatzmaßnahmen (Düngung, Bewässerung, usw.) hervorzubringen. Allen drei Ansätzen gemeinsam ist die Betrachtung der Wirkung des Bodens und nicht des Standortes bzw. der Bewirtschaftung.

Scheffer und Lieberoth (1957) definieren den „Wirkungsanteil an Wachstum und Entwicklung der Pflanzen und damit den Ertrag“ und die „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ wie folgt:

*„Diese Wirkung kommt in der Fähigkeit des Bodens zum Ausdruck, aufgrund der Wechselwirkungen bestimmter physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften geschlossenen Beständen von vorwiegend höheren Pflanzen Nährstoffe und Wasser zu vermitteln sowie den Gasaustausch regeln und ein Edaphon (Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen) beherbergen zu können“.*

Damit bringen sie, ähnlich wie Klapp (1958) oder Heyland (1996), zum Ausdruck, dass bei den heutigen Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung, nur noch bedingt von „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ gesprochen werden kann. Durch den Einfluss einer mehr oder weniger intensiven, langjährigen Inkulturnahme, verbunden mit einer Vielzahl von, teils tiefgreifenden, Maßnahmen der physikalischen und stofflichen „Bodenverbesserung“, bzw. häufig eher einer Bewirtschaftungsverbesserung, in den Ackerböden, wäre deshalb heute eher von einer „kultur- oder bewirtschaftungsbedingten Bodenfruchtbarkeit“ zu sprechen.

Da die „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ das Ergebnis der Bodenbildungsfaktoren wie Bodenausgangsgestein, Klima, Relief und natürlicher Vegetation ist (Gisi, 1990), hat der Ansatz einer ausschließlich am Boden und nicht an den aktuellen sonstigen Standorteigenschaften orientierten Definition gewisse Vorteile. Zum einen, um den Einfluss (positiv – fördernd oder negativ – mindernd) der Bewirtschaftung durch den Menschen, also die sogenannte „Kultur- oder Bewirtschaftungsbedingte Bodenfruchtbarkeit“ von der „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ abgrenzen zu können. Zum anderen, um einzelnen Bodentypen ein unterschiedliches Niveau der „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ als Referenz zuzuordnen zu können.

**Kriterien** einer hohen „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ aus Sicht der Bodenkunde und des Ackerbaus sind:

- Wurzelraum von mindestens 120 cm Tiefe
- uneingeschränkte Durchwurzelbarkeit bis in den tieferen Unterboden, keine Verdichtungen im Übergangsbereich zwischen humosem Oberboden und dem Unterboden, stabiles Bodengefüge mit hohem Anteil an biogenen Makroporen
- ausgeglichener Wasserhaushalt mit hohem bis sehr hohem nutzbarem Wasserspeichervermögen (18 – 22 Vol.-% je dm<sup>3</sup>) sowie hoher gesättigter und ungesättigter Wasserleitfähigkeit
- günstiger Grundwasserflurabstand
- uneingeschränkte Bodendurchlüftung (Gasaustausch, Makroporen 8 – 10 Vol.-%)
- uneingeschränkter Wärmeaustausch

**Böden mit sehr hoher „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“**

(Fotos: Dietz/Weigelt, LfL Bayern)



Schwarzerden

Parabraunerden

Kalkmarschen

- hohes physikochemisches Austausch- und Retentionsvermögen (Tongehalt 20 – 30%, Kationenaustauschkapazität (KAK) 100 – 200 mmolc kg<sup>-1</sup>, Nährstoffe)
- stabiler Humusgehalt (1 – 3%) und ausgeglichene Humusbilanz
- Mindestgehalt an Kalk, basischen Nährstoffen und ein pH-Wert zwischen 5,5 – 6,8
- hohe Biodiversität, hohe biologische Aktivität und optimale Lebensbedingungen für das Bodenleben (Edaphon)
- keine Belastung mit organischen und anorganischen Schadstoffen
- frei von phytotoxischen Substanzen
- frei von das Edaphon beeinträchtigenden Substanzen
- bei Direktaufnahme von Boden keine Gefährdung für Mensch und Tier

Anhand solcher Kriterien lassen sich durchaus Böden unterschiedlicher „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ charakterisieren.

Böden mit sehr hoher „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ sind z. B. Schwarzerden, Parabraunerden, Kalkmarschen, Auenböden wie die Tschernitza oder die Vega. All diese Böden sind gekennzeichnet durch einen mächtigen Wurzelraum, hohes bis sehr hohes Bindungs- und Nachlieferungspotenzial an Wasser und Nährstoffen, ausgewogenes Filter- und Puffervermögen sowie hohe bis sehr hohe biologische Aktivität.

Böden mit sehr geringer „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ sind z. B. flachgründige Böden wie Rendzinen, Ranker oder Regosole, die gekennzeichnet sind durch geringes bis sehr geringes Bindungs- und Nachlieferungspotenzial an Wasser und Nährstoffen, unausgewogenes Filter- und Puffervermögen sowie geringe biologische Aktivität.

Bei tiefgründigen Böden wie Kolluvien, Eschböden oder rekultivierten Böden aus Löß im Rheinischen Braunkohletagebau, auf denen heute ähnlich hohe oder sogar höhere Erträge erzielt werden können wie auf Schwarzerden oder Parabraunerden aus Löß, ist der Anteil der „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ mittel bis gering. Zwar verfügen sie häufig auch über ein hohes bis sehr hohes Bindungs- und Nachlieferungspotenzial an Wasser und Nährstoffen, ausgewogenes Filter- und Puffervermögen sowie eine hohe biologische Aktivität,

doch sind diese häufig verbunden mit einem Verlust an „Natürlicher Bodenfruchtbarkeit“ infolge von Bodeninkulturnahme und -bewirtschaftung. So sind die Eschböden das Ergebnis des Transfers von Bodenmaterial und Nährstoffen aus der engeren Umgebung der jetzigen Eschböden. Dieser Transfer hat zu einer Verarmung der „Natürlichen Bodenfruchtbarkeit“ in den Liefergebieten geführt. Das gleiche gilt für die tiefgründigen Kolluvien auf vielen Ackerstandorten. Sie sind das Ergebnis von Erosion, das heißt die Umlagerung von Bodenmaterial, Humus und Nährstoffen innerhalb eines Ackerschlaues oder einer Gemarkung infolge der Bewirtschaftung der Böden durch den Menschen. Streng genommen sind diese Böden somit gekennzeichnet durch eine hohe „Kultur- oder Bewirtschaftungsbedingte Bodenfruchtbarkeit“ und eine geringe „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“.

Allerdings sollte bei allen Überlegungen zur Bodenfruchtbarkeit berücksichtigt werden, dass in den Böden immer eine Vielzahl von einander bedingenden Umsetzungs-, Austausch- und Transportprozessen gleichzeitig und kontinuierlich ablaufen. Böden sind somit dynamische Systeme, deren Status der Fruchtbarkeit sich mehr oder weniger stetig ändert.

Aus heutiger Sicht wäre die „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ somit ein *„dynamisches System, welches aufgrund physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften und Prozesse geschlossenen Beständen von vorwiegend höheren Pflanzen der Verankerung dient, ihnen und dem Bodenleben die benötigten Wärme, Nährstoffe, Luft und Wasser vermittelt, den Stoff-, Gas-, Wärme- und Wasseraustausch regelt sowie dem Edaphon als Lebensraum und -grundlage dient. Die auf ihm gewachsenen Pflanzen und ihre für den Verzehr geeigneten Produkte sind zudem frei von organischen und anorganischen Schadstoffen“*.

Im Hinblick auf eine Anwendung dieses Begriffs vor allem in Wissenschaft und Rechtsprechung (BBodSchG, BNatSchG) müsste er allerdings strengen Kriterien genügen. Diese sind nach Bauemer (1991a, 1992) Eindeutigkeit, Prüfbarkeit, Objektivität und Tauglichkeit zur Klärung komplexer Sachverhalte und damit zur Begründung von Theorien. „Natürliche Bodenfruchtbarkeit“ ist somit streng genommen kein wissenschaftlicher (Sticher, 2000) und ebenso wenig ein justiziabler Begriff. Als Grundlage zur Klassifizierung von



Böden im Hinblick auf ihr natürliches Leistungsvermögen zur Produktion von unbelasteten Nahrungsgütern könnte man ihn aber nutzen. Auch könnte er bei der Abschätzung

des Anteils bzw. der Förderung oder Gefährdung der „Kulturbedingten Bodenfruchtbarkeit“ (s. Kap. 4) als Referenz dienen.

## 2.3 Relevante Bodenfunktionen für die Bodenfruchtbarkeit (Susanne Schroetter)

Böden sind über einen langen Zeitraum entstandene Naturkörper, die je nach Bodentyp spezifische, meist oberflächenparallel verlaufende Zonen aufweisen – die Bodenhorizonte (Abb. 2.5). Insbesondere die oberen Bodenhorizonte unterliegen durch Verwitterung, Mineralisierung, Zersetzung und Humifizierung, durch die Aktivität von Bodenorganismen, durch Verlagerungsvorgänge infolge Wind- und Wassererosion und durch die Nutzung durch den Menschen einer stetigen Wandlung.

Ertragsbestimmende Bodeneigenschaften wie Struktur, Humusgehalt, Wasserleitfähigkeit und Wasserspeicherkapazität oder Nährstoffgehalt verändern sich und dadurch

auch der Bodenfruchtbarkeitsstatus eines Standortes. Die Bodenfruchtbarkeit ist nach Köppen (2002) ein dynamisches und selbstregulierendes Wirkungsgefüge, das sich durch die Bodennutzung auf der Grundlage natürlicher Standortfaktoren und Prozesse herausbildet, mit Systemen gleicher, über- und untergeordneter Ebenen in Wechselwirkung steht und über seine durch die Umwelt geprägten nachhaltigen Wirkungen sowohl das Wachstum der Pflanzen als auch die Funktionen selbst, die ein Boden im Ökosystem hat, beeinflusst.

Die Bodenfunktionen werden in drei Hauptgruppen unterteilt, für die wiederum Teilfunktionen definiert sind.



Diese werden anhand festgelegter Kriterien bewertet (BBodSchG, 1998; GLA und LfU, 2003; Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005):

- **Natürliche Bodenfunktionen**  
 Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen und Lebensraum für Bodenorganismen  
 Bestandteil der Wasser- und Nährstoffkreisläufe im Naturhaushalt  
 Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften
- **Archivfunktionen**  
 Archiv der Naturgeschichte  
 Archiv der Kulturgeschichte
- **Nutzungsfunktionen**  
 Rohstofflagerstätte  
 Fläche für Siedlung und Erholung  
 Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung  
 Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung

Der Boden ist ein offenes und veränderliches Ökosystem, gekennzeichnet durch Energie- und Stoffflüsse in das System hinein, aus ihm heraus und innerhalb des Systems selbst (Abb. 2.6).

Der Boden ist Produktionsgrundlage für Land- und Forstwirtschaft sowie Gartenbau. Die natürlichen Bodenfunktionen, an denen der Fruchtbarkeitszustand landwirtschaftlich genutzter Böden gemessen wird, sind die

- Produktionsfunktion (s. Kap. 2.3.1)
- Filter- und Pufferfunktion (s. Kap. 2.3.2)
- Lebensraumfunktion (s. Kap. 2.3.3)

### 2.3.1 Produktionsfunktion

Der Boden bildet die Lebensgrundlage für Pflanzen, er dient als Standort, die Wurzeln der Pflanzen sind im Boden

verankert. Der Boden liefert Nährstoffe und Wasser, bodenlebende Organismen sorgen für die Zersetzung von Pflanzen- und Wurzelresten, leben zum Teil mit den Pflanzen in Symbiose und sorgen für den Stoffaustausch im wurzelnahen Raum.

Die Grundstruktur eines mineralischen Bodens besteht aus dem Bodenskelett (Bodenteilchen größer 2 mm) und einem

Tab. 2.1: Zusammensetzung des Bodens einer landwirtschaftlich genutzten Ackerfläche (nach Schroeder, 1992, verändert)

mineralische Bodenbestandteile		Korngröße
Grobboden (Bodenskelett)	Steine/Geröll/Kies/Grus	>2 mm
Feinboden	Sand	2-0,063 mm
	Schluff	0,063-0,002 mm
	Ton	<0,002 mm
organische Bestandteile		
Humus	alle abgestorbenen organischen Bestandteile	
Ausgangsmaterial für die Humusbildung	Wurzeln, Streu (Blätter, Halme...), Ernterückstände, organische Dünger	
Bodenfauna	Regenwürmer, Asseln, Vielfüßer, Insektenlarven, Enchyträen, Springschwänze, Milben, Fadenwürmer, Protozoen...	
Bodenflora	Algen, Pilze, Bakterien	
Bodenwasser		
Haftwasser	durch Adsorption an Bodenpartikeln, in Kapillaren und Poren festgehalten	
Sickerwasser	durchsickert den Boden und bildet Grund- oder Stauwasser	
Bodenluft		

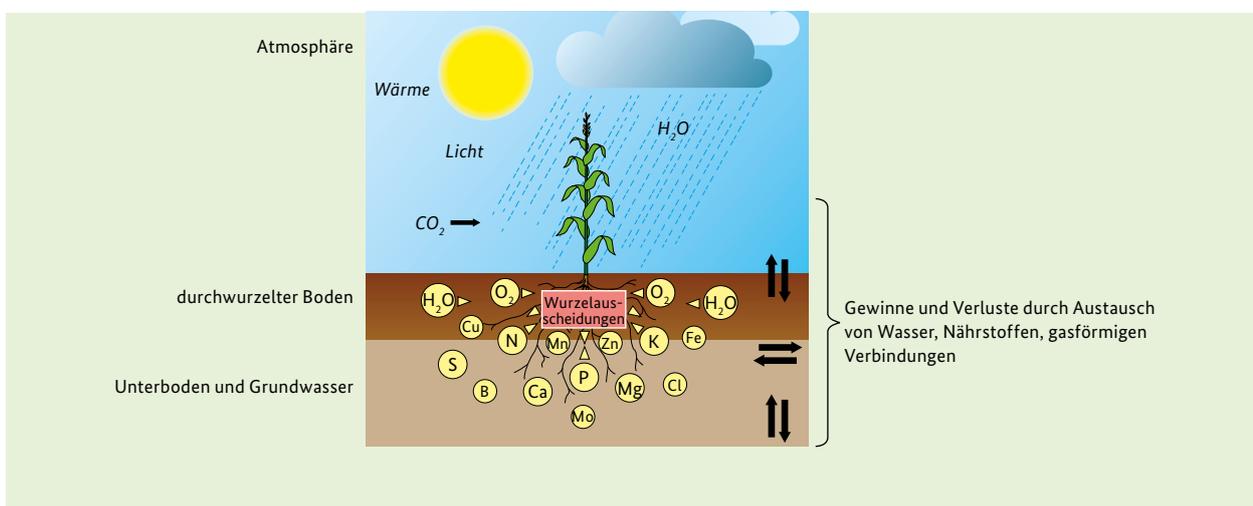


Abb. 2.6: Stoff- und Energieflüsse im offenen Ökosystem Boden-Pflanze-Atmosphäre (nach Schroeder, 1992, verändert)



Es werden keine Geräte oder Chemikalien benötigt.

Der Boden muss ausreichend feucht sein.

Durch Reiben und Kneten zwischen den Fingern wird die Körnung ermittelt und die Bodenart bestimmt.



Tab. 2.2: Physikalische Eigenschaften der Bodenarten-Hauptgruppen (nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005; DIN 19682-2, 2007)

Kornfraktion	Eigenschaften
Ton	gut formbar, klebrig, bindig, Feinsubstanz haftet an den Fingern, zeigt glänzende Gleitflächen
Schluff	kaum formbar, von samtig-mehligter Beschaffenheit, nicht klebrig, es haftet keine Feinsubstanz an den Fingern, zeigt raue Gleitflächen
Sand	nicht formbar, sicht- und fühlbar körnig, es haftet keine Feinsubstanz an den Fingern
Lehm	enthält alle drei Kornfraktionen in unterschiedlichen Anteilen; die dominierende Kornfraktion bestimmt seine überwiegenden Merkmale

Abb. 2.7: Bestimmung der Bodenart im Gelände mit Hilfe der Fingerprobe nach DIN 19682-2:2007-11 (nach Schroetter et al., 2012) (Fotos: U. Funder, JKI)

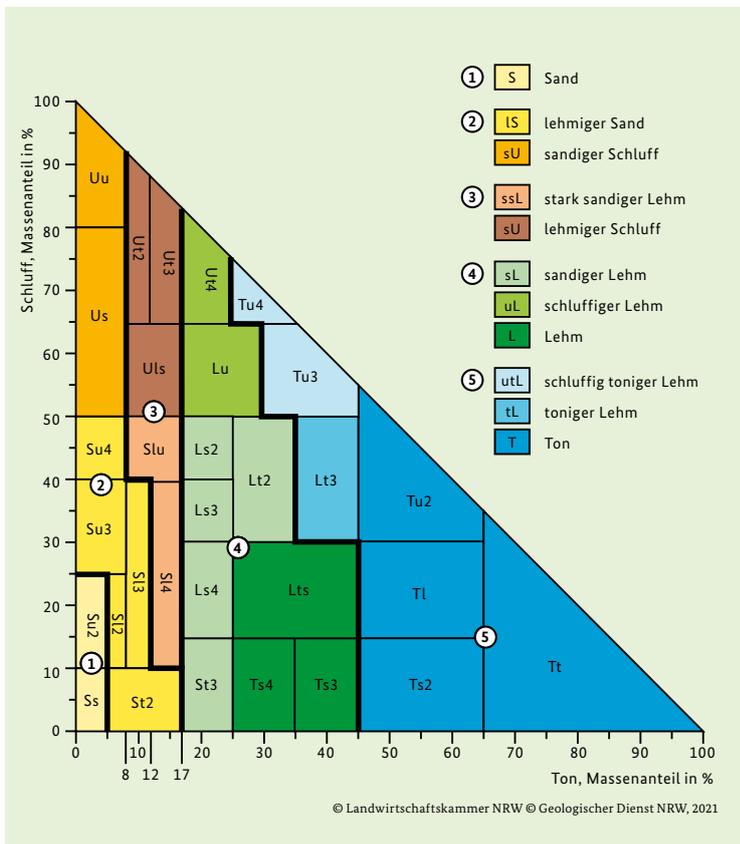


Abb. 2.8: Feinbodenartendiagramm: Klassifikation der Bodenarten in Abhängigkeit vom Ton- und Schluffanteil (zitiert aus Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005)

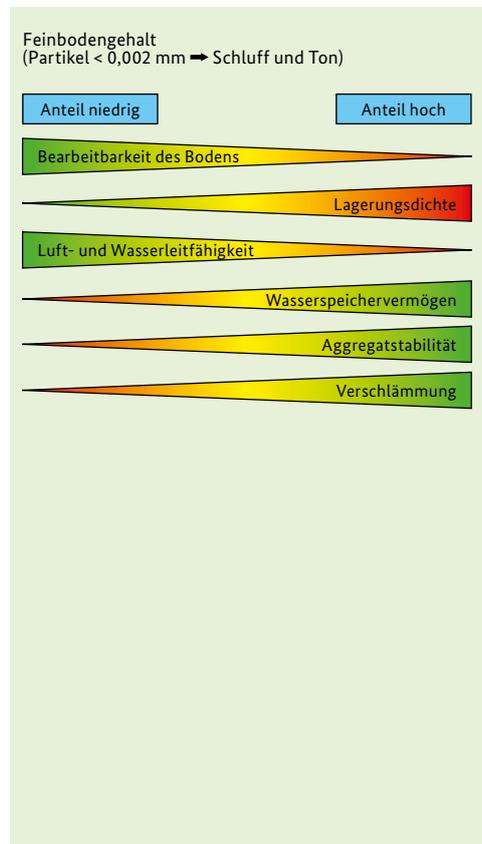


Abb. 2.9: Einfluss der Bodentextur auf physikalische Bodeneigenschaften (Schroetter et al., 2012)

Gemenge an Feinboden unterschiedlicher Korngrößen (Schluff, Ton und Sand), deren jeweilige Mengenanteile die Textur eines Bodens und damit die Bodenart bestimmen. Die anderen maßgeblichen Komponenten, von denen die Funktionalität eines Bodens abhängt, sind die organische Bodensubstanz (Bodenorganismen, abgestorbene pflanzliche und tierische Substanz, Huminstoffe) sowie Bodenwasser und Bodenluft (Tab. 2.1).

Eine einfache, subjektive Möglichkeit, die Bodenart vor Ort zu ermitteln, ist die Fingerprobe (Abb. 2.7).

Bei dieser Methode werden Körnigkeit, Mehligkeit und Bindigkeit einer ausreichend feuchten Bodenprobe angesprochen (Tab. 2.2).

Die Zuordnung zu einer Bodenart erfolgt in einer vorgegebenen Schrittabfolge anhand eines Bestimmungsschlüssels, dem das Feinbodenartendiagramm der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005) zugrunde liegt (Abb. 2.8).

Vom prozentualen Anteil der Kornfraktionen am Feinboden werden sowohl physikalische Bodeneigenschaften, die für die Ertragsfähigkeit eines Standortes ausschlaggebend sind (Abb. 2.9), als auch wichtige chemische Bodeneigenschaften wie das Nährstoffnachlieferungsvermögen, die Ionenaustauschkapazität und die Bodenreaktion (pH-Wert) entscheidend beeinflusst.

Rottländer et al. (1997) geben den nachfolgenden Überblick zu den allgemeinen Beziehungen zwischen Bodenart und Bodenfruchtbarkeit:

- **Sandböden**  
Böden mit hohem Sandanteil sind insgesamt wenig ertragsfähig. Der Nährstoffgehalt ist niedrig und die Nährstoffbindigkeit schwach ausgeprägt. Der hohe Anteil an großen Poren führt zu intensiver Belüftung aber auch geringem Wasserhaltevermögen. Sie sind unabhängig vom Feuchtezustand leicht zu bearbeiten.
- **Tonböden**  
Böden mit hohem Tonanteil sind mäßig ertragsfähig, trotz des meist hohen Nährstoffgehaltes und der gut ausgeprägten Nährstoffbindigkeit. Der geringe Anteil an weiträumigen Poren führt zu schlechter Durchlüftung und geringer nutzbarer Wasserkapazität. Sie sind sowohl in nassem als auch in trockenem Zustand schwer zu bearbeiten, nur ein begrenzter Feuchtebereich lässt die Bearbeitung zu (Minutenböden).
- **Lehmböden/Schluffböden**  
Böden mit ausgewogenem Anteil an Lehm und Schluff werden als die ertragreichsten eingeschätzt. Mittlere bis hohe Nährstoffreserven zeichnen sie aus. Aufgrund der guten Bodenstruktur mit ausreichendem Porenvolumen ist die Durchlüftung gut und es wird genügend nutzbares Wasser gespeichert. Die Bearbeitung ist bei entsprechender Feuchtigkeit problemlos möglich.

In diesem Zusammenhang nennen Kundler et al. (1989) neben Körnung und Mineralbestand, organischer Bodensubstanz, Makro- und Mikronährstoffen, Ionenaustauschkapazität, Bodenreaktion, Bodenwasser und Durchlüftung weitere Parameter, die die Qualität der Versorgungsfunktion und der phytosanitären<sup>1</sup> und technologischen Funktionen eines Bodens maßgeblich beeinflussen: Bodengefüge, Bodenwärme und Durchwurzelbarkeit. Zudem haben klimabedingte Verwitterungsabläufe einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Veränderungen der natürlichen Bodenfruchtbarkeit am jeweiligen Standort (Rottländer et al., 1997). Vom komplexen Wirkungsgefüge aller physikalischen, chemischen und biochemischen Bodeneigenschaften sind das optimale Pflanzenwachstum und somit Ertrag und Ertragsstabilität abhängig.

### 2.3.2 Filter- und Pufferfunktion

Innerhalb des **Naturhaushaltes** hat der Boden **Regulationsfunktionen** für Wasser, Luft, Wärme, Kohlenstoff sowie Makro- und Mikronährstoffe zu erfüllen, die in direktem Zusammenhang mit seiner Funktion als Pflanzenstandort und landwirtschaftliche Produktionsgrundlage stehen. Wasseraufnahmekapazität, Wasserspeichervermögen und Wasserleitfähigkeit sind die für den **Bodenwasserhaushalt** (s. Kap. 4.2) und damit für Abflussregulierung und Grundwasserneubildung (Sickerwasserrate) entscheidenden Parameter. Wasser ist eine Grundvoraussetzung für das pflanzliche Leben. Ohne genügend Wasser kann die Pflanzenwurzel die im Boden vorhandenen Nährstoffe nicht aufnehmen. Menge und zeitliche Verteilung des im Verlauf einer Vegetationsperiode zur Verfügung stehenden Wassers bestimmen Wachstum und Ertragsbildung. Idealerweise steht immer genau so viel Wasser zur Verfügung, wie der Boden aufnehmen und in tiefer gelegene Schichten ableiten kann. Wie lange die Bodenoberfläche nach Starkregen von Wasser bedeckt ist, hängt von der Infiltrationsrate des Bodens ab: sie bestimmt die Wassermenge, die pro Zeiteinheit im Boden versickern kann.

Bodentextur und Bodenstruktur sind dafür von grundlegender Bedeutung. Die höchste Infiltrationsrate haben Sandböden aufgrund des hohen Grobporenanteils, gefolgt von Lehm- und Schluffböden. Die geringste Wasserdurchlässigkeit haben reine Tonböden wegen des hohen Anteils an Feinporen. Auf sandigen Standorten nimmt die natürliche Wasserleitfähigkeit mit Zunahme des Gehaltes an Lehm und Schluff ab.

Der Gehalt eines Bodens an organischer Substanz ist von der Flächennutzung abhängig und wirkt sich direkt auf die Infiltrationsleistung einer Fläche aus. Naturbelassene Areale wie Wälder oder Flächen unter natürlicher Selbstbegrünung

<sup>1</sup> phytosanitär: die Gesundheit der Pflanze betreffend

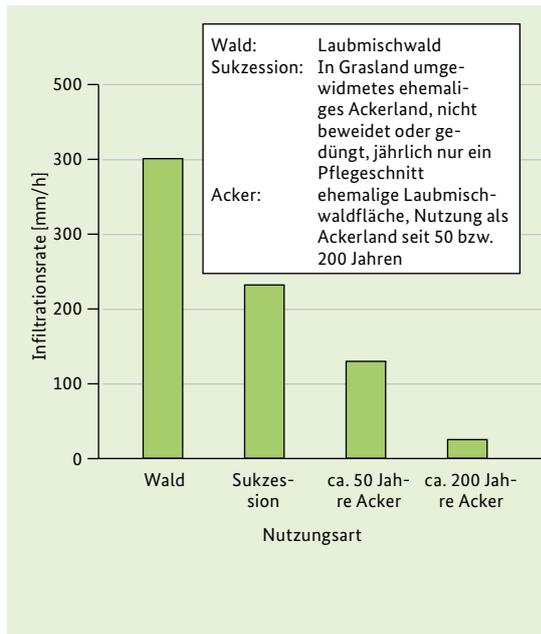


Abb. 2.10: Infiltrationsrate eines sandigen Schluffbodens bei verschiedener Nutzung am Standort Braunschweig, Versuchsfeld Süd, 2006 (nach Alhassoun, 2009)

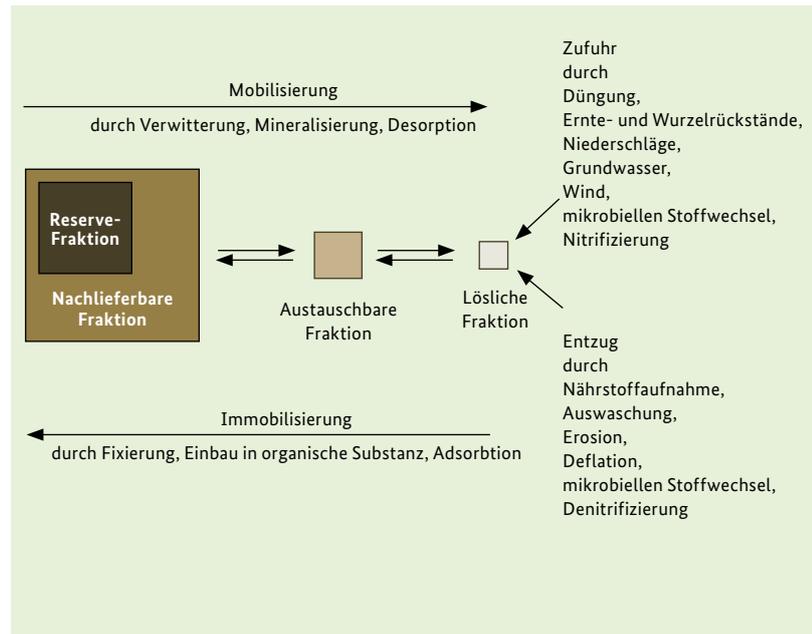


Abb. 2.11: Wirkungsschema von Bodenprozessen und Bewirtschaftung auf die Verfügbarkeitsfraktionen der Pflanzennährstoffe (nach Schroeder, 1992, verändert)

(Sukzession) können in relativ kurzer Zeit große Wassermengen aufnehmen. Im Vergleich dazu nimmt die Infiltrationsrate bei landwirtschaftlicher Nutzung einer Fläche mit Zunahme der Nutzungsdauer ab. Wird eine Ackerfläche still gelegt und der Selbstbegrünung überlassen, steigt die Infiltrationsleistung schon nach wenigen Jahren wieder deutlich an (Abb. 2.10).

Die organische Substanz im Boden in Form von Humus und seinen Vorstufen (in Zersetzung befindliches organisches Material) fördert das Bodenleben, vergrößert und stabilisiert in Abhängigkeit vom Zersetzungsgrad das Porenvolumen und erhöht durch Lebendverbauung<sup>2</sup> die Aggregatstabilität und auch die Pufferkapazität bezüglich Nährstoffen oder Schadstoffen. Durch standortangepasste Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, organische Düngung...) kann nutzungsabhängig der Humusgehalt eines Bodens gesteuert und so die Infiltrationsleistung verbessert werden.

Böden mit einem sehr hohen Schluffanteil neigen wegen des weniger stabilen Bodengefüges zu Verschlammung und Verdichtung. Böden mit einem hohen Tonanteil sind ebenfalls verdichtungsgefährdet und es besteht die Gefahr des Vernässens (Rottländer et al., 1997). Infolge starker Niederschläge kann es auf diesen Standorten zu Boden- und Nährstoffverlusten durch Wassererosion kommen. Auf sandigen Böden wird Wasser besser in den Untergrund abgeleitet, sie trocknen aber wegen der geringen Wasserspeicherkapazität schneller aus. Das kann zu erheblichem Bodenabtrag durch Winderosion führen. Die Bodenverlagerung

durch Winderosion auf diesen Substraten geht immer mit Nährstoffverlagerungen einher, geländeabhängig auch über weitere Distanzen, was zu unerwünschten Nährstoffeinträgen in benachbarte natürliche Biotope und Oberflächengewässer führen kann.

**Die Nährstoffspeicherungs- und Nachlieferungsfunktion** (s. Kap. 4.4) eines Bodens basiert ebenfalls auf den physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften eines Standortes. Die Haupt- und Spurenelemente, die eine Pflanze für ihr Wachstum braucht, liegen im Boden in mineralischer, organischer und sorptiver<sup>3</sup> Bindung vor oder gelöst in der Bodenlösung (Schroeder, 1992). Der Bindungszustand entscheidet über die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe. Nach Schroeder (1992) liegt der größte Anteil der Bodennährstoffe mehr oder weniger fest mineralisch/organisch gebunden vor und ist nur lang- bis mittelfristig verfügbar (Nährstoffreserve, nachlieferbare Fraktion) (Abb. 2.11). Ein weitaus geringerer Anteil ist der austauschbaren Fraktion zuzurechnen, hierzu zählen adsorbierte Nährelemente mit leichter und kurzfristiger Verfügbarkeit, die durch Ionenaustausch in die Bodenlösung abgegeben werden. Die wasserlösliche Fraktion bilden die im Bodenwasser gelösten Nährstoffe, die als freie Ionen direkt von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können.

Die oben genannten Nährstoffpools sind nicht als statisch anzusehen, im System Boden-Pflanze besteht ein Fließgleichgewicht zwischen Nährstoffreserve, schwerer und leichter verfügbaren Makro- und Mikronährstoffen und der für Pflanzen und Mikroorganismen frei zugänglichen

<sup>2</sup> Lebendverbauung: „Stabilisierung von Bodenaggregaten durch die Tätigkeit von Organismen, z. B. die Myzeldurchflechtung des Bodens durch Pilze oder gallertartige Ausscheidungen von Bakterien“ (Schaefer, 2012)

<sup>3</sup> sorptiv: austauschbar an der Oberfläche von Bodenkolloiden

Ionen-Fraktion (Schroeder, 1992). Die Mobilisierungs- bzw. Immobilisierungsprozesse werden durch Bodentextur, Humusgehalt, Humuszusammensetzung (Anteil der Fulvosäuren, Huminsäuren und Humine) und Ionenaustauschkapazität beeinflusst. Weitere wichtige Faktoren sind Bodenfeuchte, pH-Wert und Redoxpotenzial<sup>4</sup> sowie die Bodentemperatur. Nährstoffzufuhr über Düngung, Spreu, Ernte- und Wurzelrückstände oder Bodenorganismen regen Immobilisierungsvorgänge im Ökosystem Boden an, Nährstoffentzug durch Pflanzen und Mikroben, Auswaschung oder Bodenabtrag aktivieren die Nachlieferung (Schroeder, 1992).

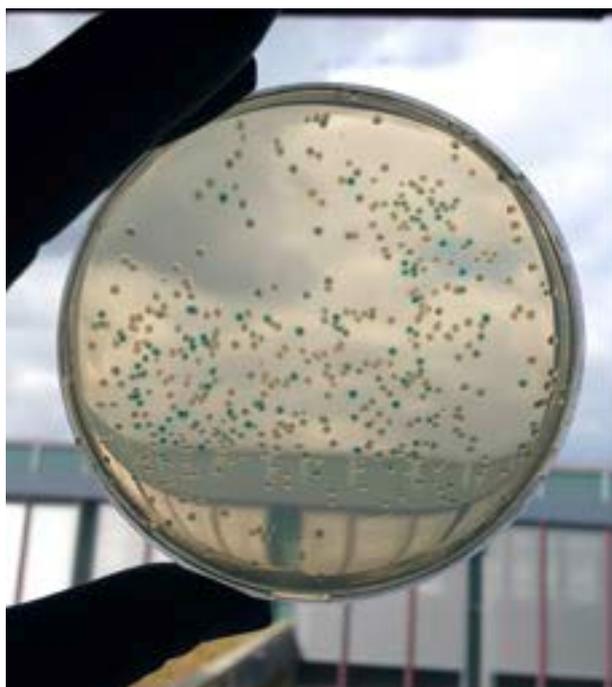
Die **Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaufunktion** (s. Kap. 4.7) der Böden beruht auf ihren natürlichen Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften. Die gleichen Mechanismen, die bei der Nährstoffspeicherung, -freisetzung und -festlegung zum Tragen kommen, wirken auf unerwünschte anorganische und organische Schadstoffe, die auf unterschiedlichen Pfaden (z. B. durch organische und mineralische Düngung, Pflanzenschutzmitteleinsatz, Industrieemissionen...) in den Boden eingetragen werden können. Fruchtbare Böden haben die Fähigkeit, Schadstoffe mechanisch zu filtern, durch Absorption und Fällung chemisch zu puffern und mittels mikrobieller biochemischer Um- und Abbauvorgänge zu transformieren (Schroeder, 1992). In Hinblick auf den Grundwasserschutz und die Reinhaltung von Oberflächengewässern sollten die Schadstoffe aus dem Stoffkreislauf durch Abbau entfernt oder dauerhaft zurückgehalten

werden. Das Rückhaltevermögen eines Bodens für Schadstoffe ist vor allem abhängig vom pH-Wert sowie vom Ton- und Humusgehalt. Für die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen sind vorrangig puffernde Substanzen mineralischen Ursprungs (z. B. Carbonate, Silikate) und Kolloide (Tonminerale, Humus, Eisenhydroxide), die den pH-Wert eines Bodens regeln, von Bedeutung. Die meisten anorganischen Schadstoffe werden verstärkt im sauren Bodenmilieu freigesetzt (MUNLV NRW, 2007). Für die Mobilität belastender organischer Schadstoffe, die fast ausschließlich anthropogenen Ursprungs sind (z. B. Dioxine, Furane, PAK<sup>5</sup>), zeichnet die organische Bodensubstanz verantwortlich. Bindung an stabile Humuskomplexe oder mikrobieller Abbau tragen zur Neutralisierung derartiger Schadstoffe bei und verhindern deren unmittelbaren oder mittelbaren Eintrag in das Grundwasser und in die Nahrungskette.

Durch nachhaltige, standortangepasste Bewirtschaftung werden Funktionalität und Fruchtbarkeit landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzter Böden erhalten. Die Bodentextur und damit die Bodenart sind standortabhängig vorgegeben; ihre Eigenschaften bilden die Grundlage, auf der die Gestaltung des landwirtschaftlichen Managements aufbauen muss. Bodenstruktur, Wasser- und Nährstoffhaushalt sowie die biologische Aktivität sind Bodeneigenschaften, die durch optimal angepasste Flächennutzung, bodenschonende Fruchtfolgen, bedarfsorientierte mineralische und organische Düngung, bedarfsgerechte Bewässerung und verantwortungsvollen Pflanzenschutzmitteleinsatz gesteuert werden können.

<sup>4</sup> Redoxpotenzial: Zusammenspiel von Reduktions- und Oxydationsprozessen im Boden in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt, der Wassersättigung und dem Gehalt an leicht umsetzbarer organischer Substanz (Schroeder, 1992; Fiedler, 2001)

<sup>5</sup> PAK: Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe



Bodenmikroorganismen in einer Petrischale  
(Foto: Ch. Emmerling)



Lumbricus terrestris im Boden mit Stroh  
(Foto: F. Wolfarth)

Tab. 2.3: Wichtige Leistungen der Bodenorganismen für die Bodenfruchtbarkeit

Gruppe	Leistung	chemisch	physikalisch	biologisch
Bakterien, Archaeen Algen	Oxidation + Reduktion von N, Mn, S und C-Verbindungen Förderung der Bodengesundheit durch Abbau von Schadstoffen Stabilisierung von Aggregaten Bindung von Luft-Stickstoff Biologische Verwitterung	x x x x		
Pilze und Actinomyceten	Humifizierung Stabilisierung von Aggregaten Vergrößerung des Wurzelraumes, Abwehr von Schaderregern und Versorgung mit Nährstoffen (Mykorrhiza)	x x	x x	x
Mikrofauna z. B. Ciliaten, Flagellaten, Nematoden	Verbreitung von Mikroorganismen Erhöhung der mikrobiellen Aktivität			x x
Mesofauna z. B. Milben, Springschwänze, Enchytraeiden	Zerkleinerung und Abbau organischer Substanz Erhöhung der mikrobiellen Aktivität, selektiver Fraß (u. a. von Schaderregern) Verbesserung der Bodenstruktur durch Bioturbation und Aggregatbildung (insb. Enchytraeten)	x x	x x	x
Makrofauna z. B. Asseln, Tausendfüßer, Regenwürmer	Zerkleinerung und Abbau organischer Substanz Verbesserung der Bodenstruktur durch Bioturbation und Aggregatbildung Steigerung der Wasserinfiltration und des Gasaustauschs Förderung der Bodengesundheit durch Fraß von Schaderregern und Abbau von Schadstoffen Verbreitung von Pflanzen durch Transport von Samen	x x	x x x	x x

### 2.3.3 Lebensraumfunktion (Christoph Emmerling und Stefan Schrader)

Die Bodenfruchtbarkeit ist ein wesentlicher Faktor, der die Produktionsfunktion genutzter Böden bestimmt. Mit der Produktionsfunktion ist die Lebensraumfunktion des Bodens eng verzahnt. Abgesehen von bodenbürtigen Schaderregern wie z. B. einigen phytopathogenen Pilzen und parasitierenden Wurzelnematoden, fördern Bodenorganismen allgemein die Bodenfruchtbarkeit signifikant. Es besteht eine positive Wechselwirkung zwischen nachhaltiger landwirtschaftlicher Produktion und einem funktionierenden Lebensraum im Boden. Diesem Aspekt wird im §2 des BBodSchG (1998) Nachdruck verliehen, in dem Beeinträchtigungen der Lebensraumfunktion als Teil der natürlichen Bodenfunktionen und der Funktion als Standort landwirtschaftlicher Nutzung durch Vorsorge entgegengewirkt werden soll.

Bodenorganismen erfüllen allgemein wichtige Funktionen im Boden, aus denen die Bodenfruchtbarkeit fördernde chemische, physikalische und biologische Leistungen resultieren (Tab. 2.3). Dazu zählen z. B. die Zersetzung organischer Substanz (z. B. Erntereststoffe), die Fixierung von Luftstickstoff durch bestimmte Bakterien und Algen (Anbau von

Leguminosen), die Förderung der Pflanzenversorgung mit Phosphor durch spezielle Pilz-Pflanze-Symbiosen (Mykorrhiza) oder die Speicherung von Nährelementen und Energie in der mikrobiellen Biomasse (Schutz vor Auswaschung), aber auch Fraß von Schaderregern und Abbau von Schadstoffen (Förderung der Bodengesundheit).

Die praktische Bedeutung von Bodentieren, insbesondere die des Regenwurms, z. B. für den Aufbau stabiler Aggregate und damit einer tragfähigen Bodenstruktur oder der Schaffung stabiler, kontinuierlicher senkrecht verlaufender Grobporen als Voraussetzung einer günstigen Infiltrationskapazität eines Bodens ist heute unumstritten.

Bodenmikroorganismen umfassen Archaeen, Bakterien, Algen, Pilze und Protozoen (Einzeller wie z. B. Ciliaten und Flagellaten). Sie unterstützen die Mehrheit enzymatischer Prozesse in Böden und speichern Energie und Nährstoffe in ihrer Biomasse. Mykorrhiza-Pilze haben durch ihre enge Symbiose mit Wurzeln für das Pflanzenwachstum besondere und unmittelbare Bedeutung. Wegen des viel geringeren Durchmessers der Pilzhypen im Vergleich zu Wurzelhaaren können kleinere Poren im Boden erschlossen und somit die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen verbessert werden. Außerdem erhöht die Mykorrhiza den Schutz vor Schaderregern. Die mikrobielle Gemeinschaft ist in

komplexen Nahrungsnetzen organisiert, die von Bodentieren kontrolliert werden (Brussard et al., 2004).

Bodenmikroorganismen bewerkstelligen die eigentliche Zersetzung (Mineralisation) und Humifizierung, d. h. den Aufbau stabiler organischer Verbindungen (Huminstoffe). Weitere wichtige Funktionen der Bodenmikroorganismen sind die Förderung des Pflanzenwachstums durch Wachstumsstoffe, phytosanitäre Wirkungen, die Stabilisierung von Aggregaten durch Schleimstoffe und Polysaccharide und die Erhöhung der hydrophoben aliphatischen Fraktion der organischen Bodensubstanz. Mikrofauna und Mesofauna sind ebenfalls an der Zersetzung organischer Substanz beteiligt. Darüber hinaus findet eine Erhöhung der Nährstoffumsetzungen und mikrobiellen Aktivität durch Beweidung und selektiven Fraß statt. Letzteres hat noch eine regulatorische Funktion besonders hinsichtlich der Unterdrückung von Schaderregern.

Bodentieren kommen vorrangig die mechanische Zerkleinerung organischer Abfälle, der Aufbau von Bodenaggregaten, das Anlegen von Porensystemen und die Einmischung organischer Substanz in den Mineralboden zu. Vertreter der Makrofauna, insbesondere Regenwürmer, nehmen hierbei eine Schlüsselstellung ein. Sie werden deshalb heute als ‚Ökosystem-Ingenieure‘ bezeichnet. Hierin kommt zum Ausdruck, dass sie ihren Lebensraum durch die Grabaktivität selbst gestalten und für andere Organismen modifizieren können. Regenwürmer haben einen signifikanten Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen (Makeschin, 1997). In ihrer Losung und in den Gangwandungen sind pflanzenverfügbare Nährstoffe akkumuliert. Dies ist insbesondere für Stickstoff und Phosphor relevant. Es gibt zahlreiche Hinweise, dass in den Ausscheidungsprodukten von Regenwürmern

nicht nur die N- und P-Gehalte höher als im umgebenden Boden sind, sondern dass auch die Verfügbarkeit dieser Reserven höher ist (Van der Werff et al., 1995). Zudem wirken Regenwürmer maßgeblich an der Stabilisierung des Bodengefüges mit (Schrader und Zhang, 1997). Durch die Grabaktivität wird ein komplexes Porensystem im Boden aufgebaut, was wiederum Effekte auf die Wasserleitfähigkeit, das Infiltrationsvermögen und den Gashaushalt von Böden hat (Ernst et al., 2009).

#### 2.3.4 Fazit

.....

Aus ökologischer Sicht lassen sich die Bodenfunktionen in drei Aspekte einteilen: Die Produktionsfunktion als Grundlage für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie organischer Rohstoffe. Optimales Pflanzenwachstum hängt von dem komplexen Wirkungsgefüge physikalischer, chemischer und biochemischer Bodeneigenschaften ab. Die Filter- und Pufferfunktion reguliert Wasser (bis zur Grundwasserneubildung), Luft, Wärme, Kohlenstoff und Nährstoffe und basiert ebenfalls auf physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften. Schließlich stellt die Lebensraumfunktion eine ganz wesentliche Grundlage für die Bodenfruchtbarkeit dar, für die der Besatz an Regenwürmern und die mikrobielle Biomasse einschließlich ihrer Aktivitäten aussagekräftige Indikatoren darstellen. Bodentiere erledigen die mechanische Zerkleinerung organischer Reststoffe sowie deren Einmischung in den Boden und sind entscheidend an der Entstehung des Poren- und Aggregatsystems im Boden beteiligt; Bodenmikroorganismen bewerkstelligen die Mineralisierung und Humifizierung.

# 3

(Foto: Th. Vorderbrügge)

## Standort und Nutzung setzen Rahmenbedingungen

Ob die natürliche oder kulturbedingte (s. Kap. 4) Bodenfruchtbarkeit betrachtet wird, kann nicht losgelöst von den Standortbedingungen passieren mit ihren Bodenarten, Niederschlägen, Bodentemperaturen, Höhenlagen und Hangcharakteristika. Sie bestimmen im Wesentlichen die Nutzungsform als Acker, Grünland oder Wald. Sowohl das Ertragspotenzial, die Leistungsfähigkeit der Filter- und Pufferfunktionen und die Ausgestaltung der biologischen Aktivität werden hauptsächlich vom Standort vorgegeben. Deshalb kommt es bei der Bewirtschaftung darauf an, Faktoren standortspezifisch zu stärken, die zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit führen. Klimaänderungen führen dabei zu ganz verschiedenen Anpassungsstrategien.

## 3.1 Vielfalt und Leistung der Bodenorganismen

(Christoph Emmerling und Stefan Schrader)

Bodenorganismen sind im Boden nicht gleichmäßig, sondern vorwiegend in sogenannten Hotspots konzentriert und aktiv (s. Kap. 4.6). Diese machen schätzungsweise weniger als 10% des gesamten Bodenvolumens aus, in denen allerdings ca. 90% der gesamten biologischen Aktivität herrschen. Hotspots sind insbesondere der Wurzelraum (Rhizosphäre) von Pflanzen, die Wandbereiche von Regenwurmgingen inklusive ihrer Losungshaufen (Drilosphäre), die Oberfläche von Bodenaggregaten (Aggregatosphäre) oder die organische Bodensubstanz (Detritusphäre). Insbesondere in der Rhizosphäre von Pflanzen ist die Zahl der Bakterien, Actinomyceten, Pilze sowie der Vertreter der Bodenmikrofauna (z. B. Einzeller, freilebende Nematoden) und der Bodenmesofauna (z. B. Collembolen, Milben, Enchytraeiden) im Vergleich zum umgebenden Boden um das 10- bis 100-fache erhöht.

Ein typischer Gehalt an mikrobieller Biomasse in einem Ackerboden liegt bei 350 mg/kg Boden. In der mikrobiellen Biomasse sind darüber hinaus beträchtliche Mengen an Nährstoffen, wie N und P, gespeichert (Tab. 3.1). Da sich Wald- und Grünlandböden zumeist durch höhere Humusgehalte, eine intensivere Durchwurzelung und eine günstigere Aggregation auszeichnen, sind folglich auch die bodenmikrobiologischen Aktivitäten deutlich erhöht (Tab. 3.1).

Bei gleichem Klima und gleicher Bodenbewirtschaftung und -bearbeitung werden bodenmikrobiologische Eigenschaften, wie die Höhe der mikrobiellen Biomasse und ihre Aktivität in Böden, im Wesentlichen vom pH-Wert, vom Humusgehalt bzw. der Humusqualität und von der Bodenart bestimmt. So steigen mit zunehmendem Tongehalt z. B. die mikrobielle Biomasse und Enzymaktivitäten in Böden eines lehmigen

Sandes über einen sandigen Lehm zu einem schluffigen oder tonigen Lehm an (Abb. 3.1). Mit abnehmendem pH-Wert nehmen dagegen auch die Gehalte an mikrobieller Biomasse und ihre Aktivitäten ab.

Aus dieser Kenntnis ist es heute möglich, die Höhe der mikrobiellen Biomasse bei Eingabe einiger weniger Ausgangsgrößen vorherzusagen und anhand von Sollwerten zu beurteilen (Emmerling und Udelhoven, 2002). Auf der Basis von insgesamt 239 untersuchten Oberböden konnte mittels eines multiplen linearen Regressionsmodells eine gute Vorhersage, z. B. der Gehalte an mikrobieller Biomasse in den Böden, erzielt werden (Tab. 3.2). Hoch signifikante Einflussgrößen waren pH-Wert, Tongehalte und lösliche organische Substanz (Regressionsgleichung siehe Tab. 3.2).

Das Modell war zur Berechnung der mikrobiellen Biomasse in Böden für verschiedene Teilräume und Bewirtschaftungssysteme sowie für verschiedene Anbaukulturen geeignet. Für den ökologischen Landbau sowie Leguminosenanbau und Grünland zeigte sich eine Unterschätzung von 10 – 20%, für Maisanbau eine Überschätzung von 21% (Tab. 3.2).

Für Vielfalt und Aktivität der Bodentiere sind neben Humusgehalt, Bodenfeuchte und Temperatur der pH-Wert und die Bodenart entscheidende Standortfaktoren. So bevorzugen z. B. Regenwürmer und ihre kleineren Verwandten, die Enchytraeiden, schwach saure bis schwach alkalische Böden und finden ihr Optimum im neutralen Bereich. Dagegen können Collembolen, Milben und Nematoden auch saure Böden tolerieren. Regenwürmer meiden sandige Standorte und bevorzugen lehmige bis tonige Böden.

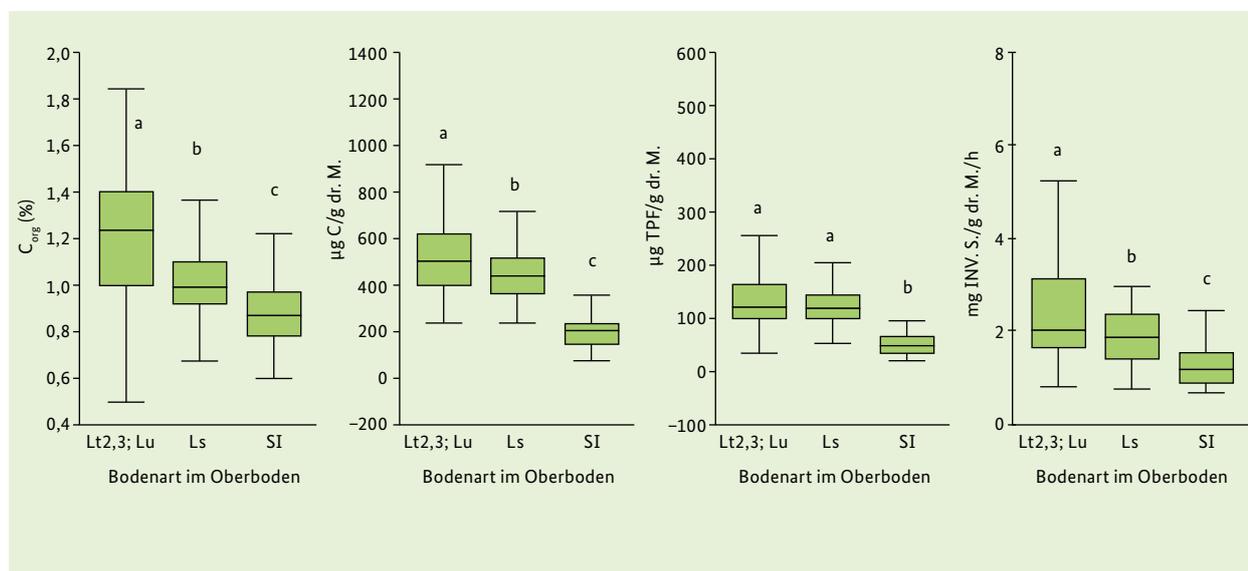


Abb. 3.1: Einfluss der Bodenart auf die Gehalte an organischer Bodensubstanz, mikrobieller Biomasse und Enzymaktivitäten (Dehydrogenase-, Saccharaseaktivitäten) [n = 360]. Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodenarten

Die Bodenart ist auch ein entscheidender Faktor hinsichtlich ökologischer Dienstleistungen durch Bodentiere. Dieses lässt sich am Beispiel der Unterdrückung bodenbürtiger Schadpilze der Gattung *Fusarium* und der Reduktion ihrer Mykotoxine durch pilzfressende Nematoden (hier *Aphelenchoides saprophilus*) und Collembolen (hier: *Folsomia candida*) eindrucksvoll nachweisen (Wolfarth et al., 2013). Neben dem Fraß an den Schadpilzen ist die Reduktion der Gehalte des weitverbreiteten Mykotoxins Deoxynivalenol bei beiden Tiergruppen in Sand- und Schluffböden um ein Mehrfaches höher als in Tonböden (Tab. 3.3). Das gilt ebenfalls für die tierfreie Kontrolle, in der ausschließlich mikrobielle Aktivität herrschte. Allerdings liegen die Werte meistens deutlich unter denen der Tiervarianten. Die höchste Toxin-Reduktion von mehr als 90% erfolgt, wenn beide Tiergruppen gemeinsam in einer Wechselbeziehung stehen und die Nahrungsquelle in Sand- oder Schluffböden vorliegt (Tab. 3.3). Dieses Beispiel zeigt auch, dass Standortbedingungen natürliche Selbstregulationsmechanismen im Boden kontrollieren können.

Bodeneigenschaften und Bodenzustand bestimmen zudem maßgeblich das Vorkommen und die Aktivität von Organismen und Enzymen in Böden. Mit zunehmendem pH-Wert (vom sauren bis zum schwach alkalischen Bereich) sowie zunehmendem Humus- und Tongehalt nehmen zum Beispiel die bodenmikrobiologischen Eigenschaften einschließlich der Stickstoff-Mineralisierungsrate zu, während umgekehrt mit steigendem Anteil an pflanzenverfügbaren Phosphorgehalten die Phosphataseaktivität (Enzym im P-Kreislauf) in der Regel abnimmt (Tab. 3.4). Externe Einflüsse, wie Pflanzenschutzmitteleinsatz oder schädliche Bodenverdichtung wirken sich ebenfalls zumeist negativ auf bodenbiologische Eigenschaften von Böden aus.

Tab. 3.1: Typische Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) in Böden, sowie die in der mikrobiellen Biomasse gespeicherten Vorräte an Stickstoff ( $N_{\text{mik}}$ ) und Phosphor ( $P_{\text{mik}}$ ) (nach Jörgensen, 1995)

mg kg <sup>-1</sup> TS	$C_{\text{mik}}$	$N_{\text{mik}}$	$P_{\text{mik}}$
Ø alle Böden	488	80	43
MIN	151	20	10
MAX	2970	508	263
Ø Acker	345 a	50 a	34 a
Ø Grünland	848 b	129 c	64 b
Ø Wald	830 b	90 b	61 b

Tab. 3.2: Gemessene und berechnete Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$  [mg kg<sup>-1</sup> TS]) in Böden in Abhängigkeit verschiedener unabhängiger Faktoren. Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Untergruppen (Tukey-B-Test;  $P < 0,05$ )

Faktoren		multiples lineares Regressionsmodell 1 ( $R^2 = 0,65$ ; $n = 239$ ) $C_{\text{mik}} = -366,6 + 0,31 \text{ Ch.w.l} + 49,8 \text{ pH} + 4,4 \text{ Tongehalt}$ ( $P < 0,001$ )		
		$C_{\text{mik}}$ gemessen	$C_{\text{mik}}$ berechnet	% Abweichung
Raum	Hunsrück	324,7 a	300,3	- 8,1
	T. Talweite	174,5 b	182,5	+ 4,5
	Eifel	447,9 c	418,3	- 6,6
System	Konventionell	320,3 a	318,7	- 0,5
	Integriert	322,0 a	314,8	- 2,2
	Ökologisch	382,9 b	327,6	- 14,4
Kultur	Getreide	303,4 a	283,9	- 6,4
	Mais	242,3 b	294,0	+ 21,3
	Raps	262,8 b	282,8	+ 7,5
	Kartoffeln	208,1 b	220,0	+ 5,7
	Leguminosen	403,6 c	323,4	- 19,9
	Grünland	457,0 c	408,6	- 10,6

Tab. 3.3: Reduktion der Mykotoxin-Gehalte (hier: Deoxynivalenol) in *Fusarium*-infiziertem Weizenstroh durch Nematoden, Collembolen, Interaktion beider Gruppen und in einer tierfreien Kontrolle in Abhängigkeit der Bodenart (nach Wolfarth et al., 2013)

Bodenart	Nematoden [%]	Collembolen [%]	Interaktion [%]	Kontrolle [%]
Sandboden	90	67	92	83
Schluffboden	79	88	95	65
Tonboden	6	34	39	20

Tab. 3.4: Gradienten mikrobiologischer Eigenschaften in Böden in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, Nährstoffversorgung und Pflanzenschutz. Beispiel: Die Höhe der mikrobiellen Biomasse und ihrer Aktivität sowie der relative Anteil an Bakterien nehmen mit steigendem pH-Wert des Bodens zu, während der relative Anteil von Pilzen in gleicher Richtung abnimmt

Einflussfaktoren	Mikrobiologische Eigenschaften	Gradient niedrig ----> hoch
Bodeneigenschaften: pH, OBS, Tongehalt (Bodenart) }	mikrobielle Biomasse mikrobielle Aktivität Enzymaktivität allgemein Anteil Bakterien Anteil Pilze	zunehmend zunehmend zunehmend zunehmend abnehmend
Düngung/Nährstoffe: N P	Netto-N-Mineralisation Phosphataseaktivität	zunehmend abnehmend
PSM Einsatz	mikrobiol. Eigenschaften allgemein	abnehmend
Verdichtung	mikrobiol. Eigenschaften allgemein	abnehmend

Eine umfangreiche Analyse von Standortfaktoren für unterschiedliche Landnutzungsformen in Deutschland unter Berücksichtigung der biologischen Vielfalt im Boden haben kürzlich Römbke et al. (2012) vorgelegt. Für Regenwürmer und Enchytraeiden existieren inzwischen weitreichende Bewertungen ihres Vorkommens und ihrer ökologischen Dienstleistungen für unterschiedliche Bodenregionen in Deutschland, die anhand detaillierter Verbreitungskarten dokumentiert sind (Jänsch et al., 2013; Römbke et al., 2013).

Die zugrunde liegenden Daten zur Verbreitung der Regenwürmer und Enchytraeiden sowie weiterer funktionell bedeutsamer Bodentiergruppen sind mit den dazugehörigen Standortfaktoren in dem GBIF-Informationssystem Edaphobase öffentlich zugänglich und unter <http://portal.edaphobase.org> abrufbar. In der dynamisch wachsenden Datenbank sind für Deutschland bislang rund 240.000 georeferenzierte Datensätze von 13.000 Standorten erfasst (Burkhardt et al., 2014).

## 3.2 Spezielle Aspekte des Grünlandes

(Katrin Kuka)

Grünlandnutzung wird hauptsächlich auf Flächen betrieben, wo eine ackerbauliche Nutzung aufgrund der klimatischen, pedogenen und geomorphologischen Gegebenheiten, charakterisiert unter anderem durch hohe Niederschläge, hohe Grundwasserstände, hohe Tongehalte oder extreme Hangneigungen schwieriger ist. Unter den hiesigen Klimabedingungen würde sich Wald als natürliche Vegetation, die sogenannte Klimaxvegetation, entwickeln. Zur Erhaltung der Grünlandvegetation ist daher dringend eine landwirtschaftliche Nutzung bzw. sind Pflegemaßnahmen notwendig. Während die Produktivität natürlicher Grünlandflächen relativ gering ist, wird auf bewirtschafteten Grünlandstandorten teilweise eine sehr hohe Produktivität erreicht (Whitehead, 1995).

Grünland sind Ökosysteme mit einer ganzjährig geschlossenen Pflanzendecke aus Gräsern und Kräutern. Damit gelten Grünlandflächen dank der neutralen bis positiven Gesamtbilanz der Kohlenstoffdioxidaufnahme mit einer Aufnahme von bis zu über 8 t C ha/a (Jones und Donnelly, 2004) in das System Pflanze-Boden als Kohlenstoffspeicher bzw. -senke (Wang et al., 2015) und damit als wichtige Landschaftseinheiten zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit aber auch zur Klimaregulation.

Die Grasnarbe schützt den Boden nachhaltig vor Wind- und Wassererosion, da ein Bodenabtrag durch eine geschlossene Pflanzendecke verhindert wird. Das ausgeprägte Wurzelsystem einer Grünlandfläche trägt zu einem gut strukturierten Boden bei, der eine besonders gute Wasseraufnahmekapazität und gute Filtereigenschaften besitzt und auf diese Weise dem Wasserrückhalt, dem Hochwasserschutz, dem Abbau von Schadstoffen und als Filter und Puffer gegen Nährstoffausträge in Grund- und Oberflächengewässer dient (Auerwald, 2009).

Die potenzielle Durchwurzelungstiefe beträgt unter Dauergrünland meist bis zu 1 m (Whitehead, 2001). In den meisten Grünlandökosystemen befindet sich die Wurzelbiomasse jedoch zu 75-80% im Oberboden zwischen 0-30 cm Bodentiefe (Follett, 2000). Die Feinwurzeln im Grünland werden ca. 1,7 Jahre ( $\pm 0,4$  a) alt, dabei nimmt das Alter mit steigender Pflanzendiversität und Anzahl von mehrjährigen Arten zu (Solly et al., 2013). Im durchwurzelten Bodenraum werden die Pflanzenwurzeln in einem Kreislauf von Wurzelneubildung und Absterben zu Bodenkohlenstoff umgesetzt (Guo und Gifford, 2002). Daneben tragen die Wurzelexsudate (Ausscheidungsprodukte der Wurzeln) und die Wurzelhäutung zum Kohlenstoffinput in den Boden, der sogenannten



Abb. 3.2: Unterschiedlich intensiv bewirtschaftete Grünlandflächen (Bodentyp: Rendzina) auf der Schwäbischen Alb (Fotos: K. Kuka)

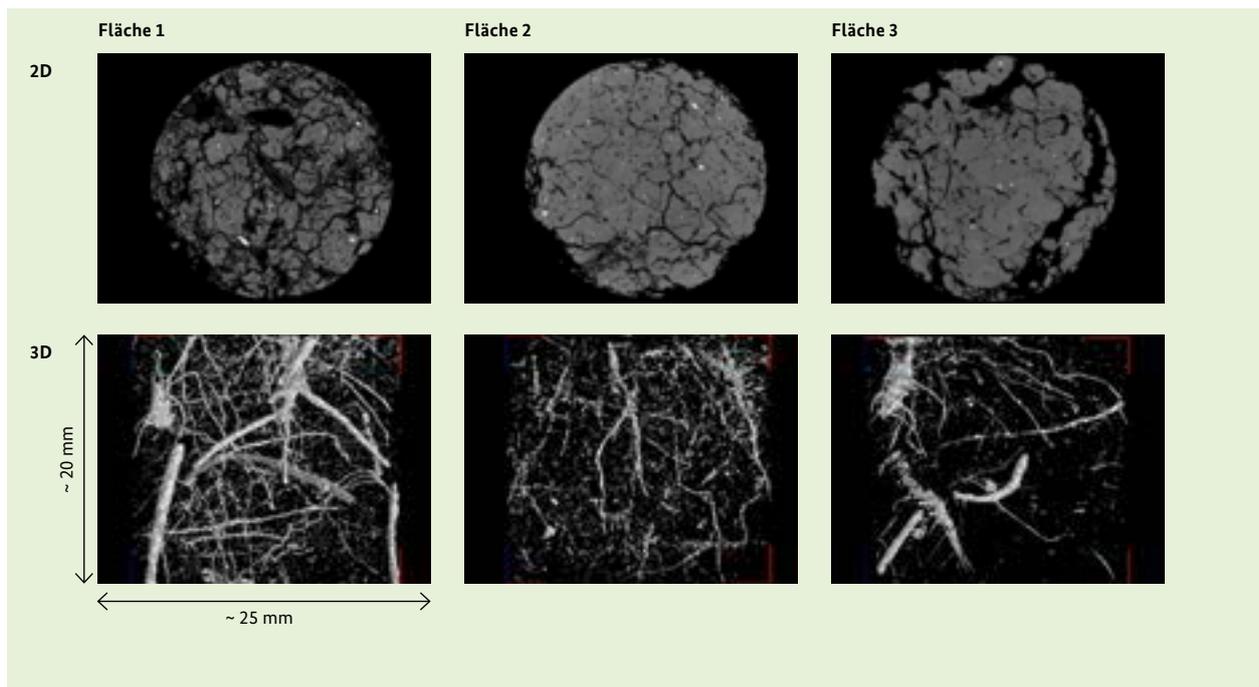


Abb. 3.3: 2D- $\mu$ CT-Bilder der Festphase des Bodens und zugehörige 3D-Bilder segmentierter Wurzeln (Kuka et al., 2013)

Rhizodeposition, bei (Van Veen et al., 1991). Auch die mikrobielle Biomasse produziert den Wurzelexsudaten ähnliche Abbauprodukte, die man nur schwer von den pflanzlichen Exsudaten unterscheiden kann (Paul et al., 1979). Des Weiteren tragen abgestorbene oberirdische Pflanzenteile, Tierexkremente und organische Dünger zum Aufbau der organischen Bodensubstanz bei.

Im Grünland wird der Kohlenstoff in verschiedenen stabilen Pools im Boden und in den Wurzeln der Pflanzen gespeichert (Hungate et al., 1997). Die Kohlenstoffspeicherung und die -vorräte werden neben den standörtlichen Bedingungen im Wesentlichen von der Bewirtschaftung, dem Klima und durch die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre beeinflusst.

Im Folgenden werden vier besondere Aspekte des Grünlandes kurz beleuchtet.

### 3.2.1 Bodenstruktur und Wurzelsystem in Abhängigkeit von der Landnutzungsintensität

Die Mikro-Röntgencomputertomographie ( $\mu$ CT) bietet die Möglichkeit, verschiedene Kompartimente unterschiedlicher Dichte in einer ungestörten Bodenprobe zu differenzieren und ist daher eine geeignete Untersuchungsmethode, um gleichzeitig die Bodenstruktur und das Wurzelsystem in einer 3-dimensionalen Perspektive zu untersuchen (Kuka et al., 2012).

Am Beispiel von drei ausgewählten Flächen aus der Schwäbischen Alb (Abb. 3.2), welche einen breiten Landnutzungsgradienten aufweisen, wurde exemplarisch gezeigt, dass die Intensivierung der Landnutzung zu einer Abnahme der Strukturierung des Bodens und des Wurzelwachstums geführt hat (Kuka et al., 2013).

In Abbildung 3.3 sind die verschiedenen 3D-Wurzelmuster mit den entsprechenden 2D-Röntgen Mikro-CT- Bildern der drei ausgewählten Parzellen dargestellt.

Der Boden der nicht mineralisch gedüngten und nur zeitweise von Schafen beweideten Fläche 1 ist sehr gut strukturiert. Die Wurzeln sind gleichmäßig im Boden verteilt und reichen in der Größenordnung von grob über mittel bis zu sehr feinen Wurzeln. Die 2D- Röntgen-Mikro-CT- Bilder der gedüngten Wiese der Fläche 2 zeigen dagegen einen fein strukturierten Boden. Dieser Boden wird von Landmaschinen, aber nicht durch Beweidung beeinflusst. Die Wurzeln

im Boden der Fläche 2 scheinen im Vergleich zu den anderen Proben kleiner im Durchmesser und gleichmäßiger verteilt. Die Festphase im Boden der Fläche 3 ist indessen relativ verdichtet, was darauf hindeutet, dass die landwirtschaftlichen Maschinen und Beweidung die Bodenstruktur beeinflussen. Die Wurzelquantität ist in diesem Boden am geringsten (Kuka et al., 2013). Als Ergebnis dieser Untersuchung werden aufgrund der sehr guten Strukturierung und der Vielzahl an Wurzeln die beste Filterfunktion und der höchste Input an organischem Kohlenstoff im Boden der Fläche 1 mit der geringsten Landnutzungsintensität erwartet.

Diese Studie deutet an, dass die verschiedenen Managementmaßnahmen Einfluss auf die Bodenfunktionen ausüben und daher einer sorgfältigen Prüfung in puncto Zeitpunkt, Intensität und Notwendigkeit im Hinblick auf eine langfristige Nachhaltigkeit bedürfen.

### 3.2.2 Einfluss der Bewirtschaftung auf die Speicherung organischer Bodensubstanz

Die Bodenfruchtbarkeit von Grünlandböden wird u. a. von der Bewirtschaftungsform beeinflusst. Managementmaßnahmen, die zu einem Rückhalt von organischer Bodensubstanz beitragen, wie z. B. die Umwandlung von Acker zu Dauergrünland, haben das größte Potenzial zur Kohlenstoffsequestrierung (Jones und Donnelly, 2004). Dabei wird die organische Bodensubstanz nach einer Landnutzungsänderung zu Grünland vor allem im Oberboden gespeichert.

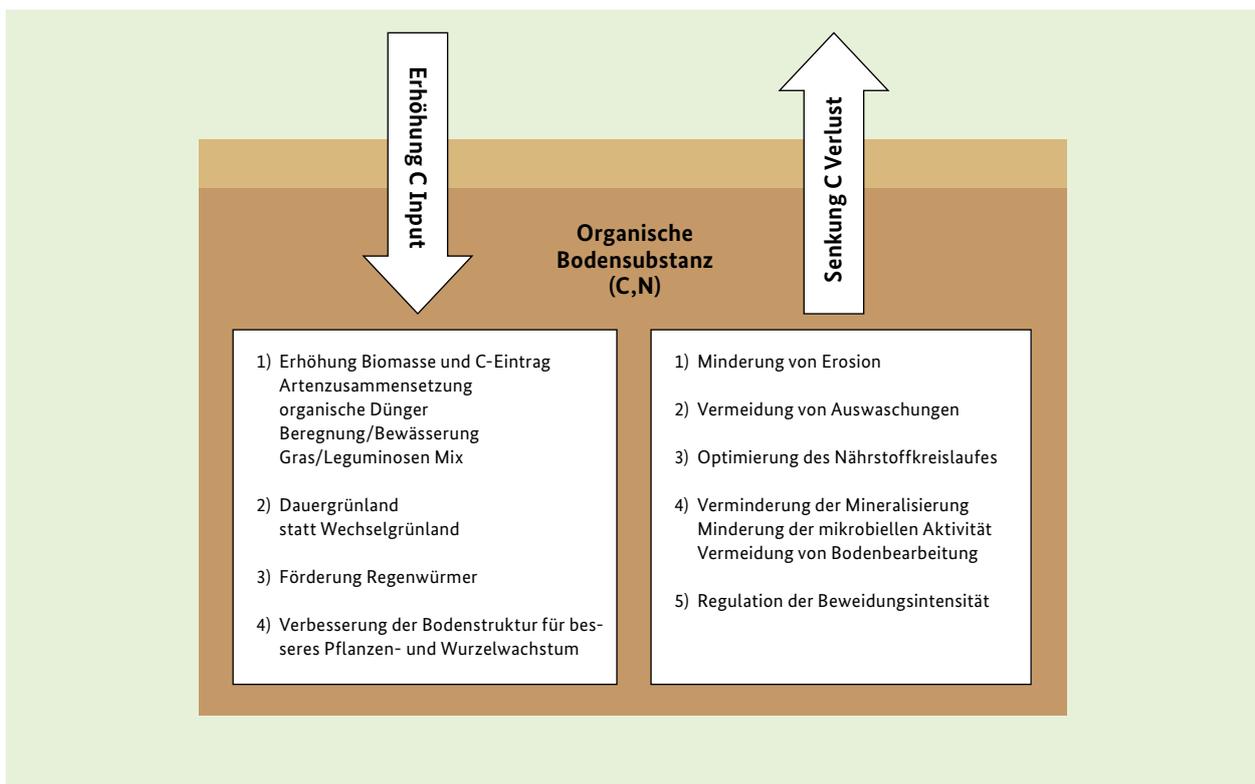


Abb. 3.4: Maßnahmen zum Aufbau organischer Bodensubstanz im Grünlandökosystem (nach Jones und Donnelly, 2004)



Lumbricus terrestris (Foto: J. H. Moos)

Beim Umbruch von Dauergrünland zur Nutzung als Ackerland gehen dagegen im Durchschnitt 60% des gespeicherten Kohlenstoffs verloren (Guo und Gifford, 2002).

Zu den ertragsteigernden Maßnahmen im Grünland gehört die Intensivierung der Futterproduktion durch Düngung, Beregnung und der Ein- bzw. Nachsaat von Gras, insbesondere von produktivem Futtergras und Leguminosen (Conant et al., 2001). Mit Rohr-Schwingelgras und Wehrloser Trespe wurde eine Zunahme des Kohlenstoffpools um 17,2% gegenüber der vorherigen Bewirtschaftung erreicht (Lal, 1998).

Die wichtigsten Faktoren, die zu einer Zunahme der Kohlenstoffspeicherung führen, sind (siehe Abb. 3.4):

- Zunahme des Inputs an organischer Substanz
- Senkung der Umsatzgeschwindigkeit
- Tiefenspeicherung organischer Bodensubstanz
- Erhöhung des physikalischen Schutzes

Grünlandböden mit einer vormals humuszehrenden Bewirtschaftung haben bei Optimierung der Bewirtschaftung ein großes Potenzial für die Zunahme an Bodenkohlenstoff und damit dem Entzug von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre.

Auf intensiv genutzten Weiden gehören die Nutzung als Umtriebsweide sowie der optimierte Einsatz von Düngern und auf extensiv genutzten Weiden die Tierbesatzdichte und die Frequenz der Beweidung zu den Hauptmaßnahmen, welche den Kohlenstoffhaushalt besonders beeinflussen (Jones und Donnelly, 2004). Aufgrund des höheren jährlichen Pflanzensprossumsatzes und einer Umverteilung des Kohlenstoffs im Pflanzen-Boden-System infolge der Änderung der Artenzusammensetzung hin zu Pflanzen mit einer höheren Bestockungsdichte und einem dichteren, faserigeren

Wurzelsystem fördert Beweidung die Bildung und Akkumulation organischer Bodensubstanz (Reeder und Schuman, 2002). Es wird eine geringe bis mittlere Tierbesatzdichte und die Erhaltung einer diversen Pflanzengemeinschaft mit einem dichten Wurzelsystem empfohlen (LeCain et al., 2002; Reeder und Schuman, 2002). In einer Studie von Schuman et al. (1999) wurde nachgewiesen, dass im Vergleich zu einer Schnittwiese sowohl intensiv als auch extensiv genutzte Weiden nach zwölf Jahren höhere Kohlenstoffgehalte im Oberboden aufweisen. Eine moderate erhöhte Stickstoffdüngung kann proportional zu einem höheren Input an organischer Substanz führen. Allerdings führen hohe Stickstoffgaben zu einer starken Stimulation der Mineralisation und damit zu einem Verlust an Kohlenstoff, der durch den höheren Input an organischer Substanz unter Umständen nicht wieder ausgeglichen werden kann (Soussana et al., 2004).

Bereits optimiert bewirtschaftete Flächen mit einer hohen Bodenfruchtbarkeit weisen hingegen beträchtliche Kohlenstoffreservoirs auf, deren Speicherkapazität kann allerdings bereits erschöpft sein. Hier besteht die Gefahr, bei Umstellungen des Managements Kohlenstoff wieder frei zu setzen (Jones und Donnelly, 2004).

Generell bestehen allerdings noch gewisse Unsicherheiten bezüglich der Kohlenstoffspeicherung bzw. des -verlustes nach Bewirtschaftungsänderungen (Soussana et al., 2004).

### 3.2.3 Einfluss der Klimaänderung auf die Kohlenstoffspeicherung

Das Klima beeinflusst sowohl die ober- als auch unterirdischen Prozesse, welche den Kohlenstoffzyklus steuern und damit die Kohlenstoffsequestrierung in Grünlandböden. Dabei

wirken besonders Temperatur, Niederschlag und die Globalstrahlung auf die Boden- und Pflanzenwachstumsprozesse ein. In der Regel wirkt eine Zunahme dieser Klimaparameter geschwindigkeitserhöhend auf die Mineralisierung der organischen Bodensubstanz und führt somit zur erhöhten Kohlenstoffemission und Abnahme des Kohlenstoffgehaltes in den Böden. Bei ausreichendem Wasserangebot könnten aber ein erhöhter Biomasseaufwuchs und damit ein erhöhter Kohlenstoffinput diese Verluste kompensieren oder gar zu einer erhöhten Nettospeicherung führen. Bei einem Temperaturanstieg, der gleichzeitig zur Austrocknung des Bodens führt, wird der Mineralisierungsprozess gehemmt und damit die Kohlenstoffemission herabgesetzt. Gleichzeitig hat dies aber negative Folgen für den Biomasseaufwuchs. Die Folge sind sinkende Kohlenstoffinputraten. Ausschlaggebend für die Nettospeicherung oder -emission ist, welcher Prozess überwiegt und kann zeitlich variabel sein. Auch feuchte Winterperioden, die zu einer Wassersättigung des Bodens führen, tragen ähnlich wie bei den Moorböden zur Kohlenstoffsequestrierung bei.

### 3.2.4 Einfluss von erhöhtem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre

Aufgrund der Industrialisierung hat der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre stetig zugenommen. Eine große Anzahl von experimentellen Studien hat die direkten Auswirkungen von erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt auf das Wachstum von Grünlandarten untersucht. Dabei wurde eine Zunahme der Netto-primärproduktion (NPP) sowie eine bevorzugte Allokation des Kohlenstoffs in die Wurzeln und damit letztendlich in den Boden festgestellt (Jones und Donnelly, 2004). Des Weiteren konnte eine erhöhte Glomalin-Produktion nachgewiesen werden, die eine Schutzschicht an den Hyphen der Mykorrhiza-Pilze zur Nährstoff- und Wasserspeicherung ausbildet. Glomalin fördert die Aggregatbildung und trägt

damit zur guten Strukturierung des Bodens bei (Rillig et al., 1999). Bei erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalten in der Atmosphäre schließen sich zum Teil die Stomata der Pflanzen, was eine geringere Evaporation zur Folge hat und damit die Bodenfeuchtigkeit erhöht (Niklaus et al., 2001). Eine erhöhte Bodenfeuchtigkeit kann wiederum zu verstärktem Pflanzenwachstum und damit erhöhtem Kohlenstoffinput beitragen. Die Mineralisierungsgeschwindigkeit nimmt jedoch bei einer erhöhten Bodenfeuchtigkeit innerhalb der nutzbaren Feldkapazität zu, was dann wiederum zu einem schnelleren Umsatz der organischen Bodensubstanz führen kann (Franko et al., 1995).

### 3.2.5 Fazit

Böden unter Dauergrünlandbewirtschaftung weisen bei gleichen Standortverhältnissen gegenüber Ackerstandorten höhere Gehalte an organischem Kohlenstoff verbunden mit einer hohen Bodenfruchtbarkeit auf. Der Grund dafür ist die ganzjährige Pflanzenbedeckung durch Gräser und Kräuter mit ausgeprägtem Wurzelsystem insbesondere in der oberen Bodenschicht, was zu einem vergleichsweise höheren Input an Kohlenstoff in den Boden führt und diesen vor Bodenabtrag durch Wasser oder Wind schützt. Dazu kommen der Kohlenstoffinput infolge von Bröckelverlusten bei jährlich bis zu sechs Schnitten der Grünlandaufwüchse und der Kohlenstoffinput über Wirtschaftsdünger. Des Weiteren wird der Gehalt an organischer Substanz durch die Umsatzprozesse im Boden bestimmt, die unter feuchten Bedingungen infolge der hohen Wasserspeicherfähigkeit von Grünlandböden gehemmt werden und damit mehr Kohlenstoff im Boden verbleibt. Die erworbene Bodenfruchtbarkeit der Grünlandstandorte ist damit eng an das Landnutzungssystem gebunden und geht bei einem Landnutzungswechsel teilweise verloren.



(Foto: F. Mohr)

## Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit

Im Ackerbau – insbesondere in den intensiven Anbausystemen – kommt zu der unbeeinflussten natürlichen Bodenfruchtbarkeit (Kap. 2.2) die durch Bewirtschaftung entstandene kulturbedingte Bodenfruchtbarkeit hinzu. Diese ist das Ergebnis aller auf Steigerung der ursprünglichen Produktivität gerichteten Maßnahmen (Baeumer, 1991), womit die Gute fachliche Praxis gefordert ist. Dementsprechend wird im Folgenden auf Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit, wie Bodengefüge, Wasser- und Lufthaushalt, Wurzelwachstum, Nährstoff- und Humusversorgung, Bodenacidität und Kalkbedarf, Vielfalt und Leistung der Bodenorganismen, Schwermetalle sowie Bodenerosion und Bodenverdichtung eingegangen, wie sie in Abbildung 4.1 anschaulich dargestellt sind.



## 4.1 Bodengefüge

(Joachim Brunotte, Rainer Duttmann, Marion Senger)

### 4.1.1 Bodengefüge zwischen Gesetz und Anspruch

In jüngster Zeit ist der technische und organisatorische Fortschritt darauf ausgerichtet, unerwünschte Nebeneffekte, wie z. B. Bodenverdichtungen, Bodenerosion, Nährstoffeinträge in Grund- und Oberflächenwasser und den Verlust an Biodiversität nach Möglichkeit zu vermeiden. In diesem Kapitel werden zur Beschreibung/Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit die Produktionsfunktion (Wurzelwachstum, Ertrag Kulturpflanze), die Regelungsfunktion (Luftkapazität, Wasserleitfähigkeit) und die Lebensraumfunktion (u. a. Regenwurm *Lumbricus terrestris*) (s. Kap. 2.3) betrachtet. Dabei geht es vornehmlich um die mechanische Belastung des Bodens mit Landmaschinen und die Veränderung der Bodenstruktur mit seinen Funktionen nach der Befahrung. Befahrungsversuche und Staturerhebungen werden dazu herangezogen. Um der Verantwortung gegenüber dem Boden und den anderen Schutzgütern gerecht zu werden, wurde 1998 das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verabschiedet. Sein Ziel ist die nachhaltige Sicherung der **Bodenfruchtbarkeit** und der Leistungsfähigkeit der Böden als natürliche Ressource (BMU, 1998 zitiert in Brunotte et al., 2015, S. 23). Die Grundsätze hierzu sind mit der „Guten fachlichen Praxis“ beschrieben. Von zentraler Bedeutung für die Sicherung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit sind die physikalischen Bodeneigenschaften wie Bodenstruktur, Wasser-, Luft- und Wärmeleitfähigkeit. Der in § 17 BBodSchG angesprochene physikalische Bodenschutz zielt dementsprechend darauf ab, die „Bodenstruktur zu erhalten und Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchte und des von den zur landwirtschaftlichen

Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Boden-druckes, so weit wie möglich zu vermeiden“.

Bodenfunktionen sind etwa eingeschränkt (s. Kap. 2.3), wenn ein Boden infolge der Bewirtschaftung so dicht lagert, dass das Wurzelwachstum von Pflanzen beeinträchtigt ist, Gas- und Wasseraustausch eingeschränkt sind oder Niederschlagswasser nicht mehr infiltrieren kann und zu Bodenerosion führt. Auch können Bodenverdichtungen zur Beeinträchtigung der Lebensraumfunktion führen und somit die ökosystemare Dienstleistung einschränken (Schradler, 2001; Beylich et al., 2010). Verdichtungen durch die Schwerkraft des Bodens oder gezielte Rückverfestigung nach mechanischer Überlockerung (Pflug) sind unvermeidbar und letztere sogar gewünscht. Dadurch werden Tragfähigkeit und Kapillarität verbessert. Der Gesetzgeber zielt dagegen auf das Ausmaß/Intensität einer Verdichtung ab, die die Boden-funktionen spürbar und/oder dauerhaft beeinträchtigt und mit einer deutlichen Gefährdung anderer Schutzgüter und geschützter Gebiete (Vorderbrügge, 2004) verbunden ist. Von welchem Verdichtungsgrad an Boden-funktionen beeinträchtigt sind, ist gesetzlich allerdings nicht definiert (Becker und Tiedemann, 2012).

Unter dem Vorsorgegesichtspunkt § 17 hat die „Gute fachliche Praxis“ zum Ziel, ein Bodengefüge zu schaffen oder zu erhalten (Abb. 4.2), das die Boden-funktionen und damit die Bodenfruchtbarkeit sichert und Gefährdungen anderer Umweltgüter (z. B. Gewässereutrophierung) ausschließt. Für die Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben heißt das, dass die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens zu berücksichtigen ist und Fahrzeugparameter sowie



<b>Bodenoberfläche</b> Mulchauflage offene Bioporen
<b>Oberkrume</b> viele tiefreichende Bioporen gut aggregiert, locker
<b>Unterkrume</b> Aggregate +/- scharfkantig etwas kompakt, daher tragfähig ausreichende biolog. Perforierung unauffällige Wurzelverteilung
<b>Krumennaher Unterboden</b> etwas kompakt, tragfähig ausreichende biolog. Perforierung unauffällige Wurzelverteilung
<b>Unterboden</b> unverdichtet, viele Bioporen

Abb. 4.2: Bodenprofil – anzustrebendes Bodengefüge (Harrach, 2011; Foto: Th. Vorderbrügge)

Lasten an kritische Bodenzustände anzupassen sind. Entstandene schädliche Bodenverdichtungen sind durch Bodenlockerung so zu reparieren, dass die Tragfähigkeit verbessert wird und die Leitfähigkeitsfunktionen für Wasser und Luft sichergestellt werden – dies gelingt nur durch eine zusätzliche biologische Stabilisierung des Gefüges mithilfe von Pfahlwurzeln.

u. a. die Größe und Form der Bodenaggregate, die Struktur der Aggregatzwischenräume, der Anteil an Bioporen oder die Durchwurzelung. Beispiele für derartige visuelle Methoden zur Bewertung der Bodenstruktur geben die Arbeiten von Peerlkamp (1967), Müller et al. (2009, 2013) und Askari et al. (2013). Zudem sei hier auf die von Lebert et al. (2004), Cramer (2006) und Beylich et al. (2010) beschriebenen Methoden verwiesen.

### 4.1.2 Beeinträchtigung des Bodengefüges

Sowohl für die Vorsorge nach „Guter fachlicher Praxis“ als auch für die Gefahrenabwehr nach Eintritt von schädlichen Bodenveränderungen existieren keine rechtsverbindlichen „Grenzwerte“, wie z. B. bei Schadstoffen. Zur Beurteilung der Bodenstruktur und zur Bewertung etwaiger Beeinträchtigungen können allerdings Indikatoren herangezogen werden, die visuell gut erfassbar sind und Hinweise auf etwaige Beeinträchtigungen des Bodengefüges geben. Hierzu zählen

Eine Gefährdung der Bodenfunktionen ist wahrscheinlich, wenn gleichzeitig bei mehreren Parametern Richtwerte unterschritten sind (Tab. 4.1). Am Beispiel der Silomaisernnte werden diese Kriterien herangezogen, um Technikvarianten zu beurteilen. Die Parameter Luftkapazität (LK) und Wasserleitfähigkeit (kf) werden mithilfe von Stechzylindern durch aufwendige bodenphysikalische Labormessungen gewonnen (s. Kap. 5.2.8), und die Feldparameter (Lagerungsdichte, Regenwurmaktivität, Wurzelwachstum) werden mithilfe einer Feldgefügeansprache (s. Kap. 4.1.3) (Brunotte et al., 2012) als Plausibilitätskontrolle hinzugefügt.

Tab. 4.1: Kriterien zur Ermittlung einer Schadverdichtung (Lebert et al., 2004)

Kriterien	Schadensschwellen
Luftkapazität (LK)	< 5 Vol.-%
gestättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	< 10 cm/Tag
Feldgefügeansprache der • effektiven Lagerungsdichte • Packungsdichte • Spatendiagnose	Klassen 4 oder 5 (nach Bodenkundlicher Kartieranleitung, Ad-Hoc-AG Boden, 2005) Klassen 4 oder 5 (nach DIN 19682-10,1998) Klassen 4 oder 5 (nach Diez und Weigelt, 2000)

Da **Veränderungen an der Bodenstruktur** nur schwer ersichtlich sind, helfen auch **Methoden** anderer Disziplinen zur Sichtbarmachung: so z. B. die 3-D-Visualisierung eines Makroporensystems (Jégou et al., 2001). Mit Hilfe der Computertomographie kann die Morphologie einer Bodensäule z. B. bis in 35 cm Tiefe dargestellt werden (Abb. 4.3). Eine Druckbelastung von 250 kPa zeigt im rechten Bild die Verformung der Bodenstruktur – hier für die Tiefe des gepflügten Bodens. Die biogenen Vertikalporen bleiben nach schonender nichtwendender Bodenbearbeitung in ihrer Kontinuität erhalten und gewährleisten damit wichtige Bodenfunktionen – die Tragfähigkeit ist insgesamt höher. Die rechte Bodensäule ist 50 mm niedriger, da wir es mit einer bleibenden Bodensetzung zu tun haben. Durch eine neue **Methode** zur „hydrostatischen Messung der Bodensetzung“ kann zukünftig die Verformung des Bodens leichter beurteilt werden (Nolting et al., 2006). Die Verformung des Bodens unter Last wird an der Bodenoberfläche durch Ausbildung einer Fahrspur sichtbar. Die Setzungen im Boden können als Höhenunterschiede mit einer Auflösung von 0,1 mm gemessen werden. Damit wird die Spurtiefe hinsichtlich des Unterbodenschutzes interpretierbar.

#### 4.1.3 Feldgefügeansprache

Die Mechanisierung ist in der Landwirtschaft weit fortgeschritten. Der Landwirt verbringt zwar noch immer viele Stunden auf seinen Äckern, hat aber manchmal in der Schlepperkabine den direkten Kontakt zu seinem Boden verloren. Dabei muss ein gesunder Boden aber das Urinteresse eines jeden Landwirts sein. Ebenso fordern heute gesetzliche Regelungen, wie das Bundes-Bodenschutzgesetz, eine intensive Beschäftigung mit der Bodenstruktur.

Die bisher vorhandenen Methoden zur Bodenansprache erleichtern es dem Landwirt aber nicht gerade, eventuelle Gefügeschäden selbst anzusprechen. Die „Einfache Feldgefügeansprache“ (Brunotte et al., 2012) soll dies ändern.

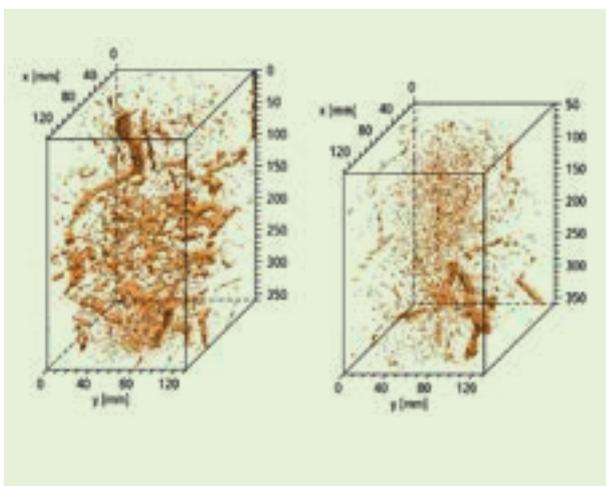


Abb. 4.3: 3-D-Visualisierung eines Makroporensystems nach Pflugfurche ohne Druckbelastung (links) mit 250 kPa Druckbelastung (rechts) (Jégou et al., 2001)

In der Vergangenheit wurden von Fachleuten verschiedene Methoden der Bodenansprache entwickelt. Beispiele sind die „Spatendiagnose“ (Diez und Weigelt, 2000), ein „Bestimmungsschlüssel für Bodengefügeschäden“ (Weyer und Boedinghaus, 2009) oder das „Visual Soil Assessment“ (Shepherd et al., 2008) aus Neuseeland.

Wissenschaftler und Berater aus den Disziplinen Bodenkunde, Pflanzenbau und Landtechnik haben jetzt eine Methode entwickelt, die vom Praktiker jederzeit selbst auf dem Acker durchgeführt werden kann. Nach einer fachmännischen Unterweisung kann er sein Bodengefüge selbst beurteilen und den Maschineneinsatz an die Verdichtungsempfindlichkeit der Standorte anpassen.

Prinzipiell werden dabei verschiedene Bausteine schon bekannter Methoden miteinander verknüpft. Die einfache Feldgefügeansprache ist dabei ein Kompromiss aus der Spatendiagnose und der Untersuchung in einer begehbaren Profilgrube.

#### Wie wird vorgegangen?

- Eine Profilgrube im Format 80 x 45 x 45 cm wird mit einem scharfen Spaten ausgehoben.
- Die Horizonte „Oberfläche, Krume, Krumenbasis und krummener Unterboden“ sind deutlich unterscheidbar.
- Nach dem Ausheben wird zunächst der Profilgrubenboden auf Regenwurmgänge, Wasser- und Luftdurchlässigkeit untersucht.
- Dann wird in der rechten Profilwand ein Taschenmesser (mit fixierter Klinge) eingestochen. Damit sind Aussagen zu unterschiedlichen Bodenwiderständen in den Horizonten möglich.
- In der linken Profilwand werden Bioporen und Wurzeln durch Präparation mit dem Messer sichtbar gemacht.
- Die sechs Beurteilungsparameter – (1) Struktur der Oberfläche, (2) Durchwurzelung des Bodens, (3) Makroporen, (4) Gefüge und Festigkeit, (5) organische Reststoffe, (6) Farbe und Geruch – sind in Farbbildern in „gewünschter“ und „unerwünschter Form“ auf der Vorderseite des Klemmbretts dargestellt (Abb. 4.4). Der Landwirt kann die Profilwand mithilfe von fünf Stufen (+/+/-/0/-/-) bewerten. Das Ergebnis dieser Gefügeansprache wird mittig auf einem Blatt Papier festgehalten. Es kann als Dokumentation in der Schlagkartei abgeheftet werden.

Beispiele auf der Rückseite des wasserfesten Klemmbrettes sollen dem Landwirt dabei helfen, seine Vorgehensweise zu überprüfen.

#### 4.1.4 Fazit

Der vorsorgende Bodenschutz muss standortangepasst auf dem Acker durchgeführt werden. Dazu ist es allerdings notwendig, dass der Bewirtschafter den aktuellen Bodenstatus selbst beurteilt. Soll die Bewirtschaftung rentabel und

### Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker (3. Auflage)

Analyse des Gefüge-Zustands und Planung der geeigneten Vorgehensweise

**6 PARAMETER**  
vorrangig an Profilwand  
zusätzlich am Auswurf durch Wurzel

PARAMETER	erwünscht	EIGENSCHAFTEN	unerwünscht
<b>1 Struktur der Oberfläche</b> Zustand: intakt	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>intakte stabile Aggregate</li> <li>organische Reststoffe: Länge, Durchmesser, Verteilung optimal für Regenwurmer</li> <li>Belagungsgrad (Fächer zur Bestimmung)</li> <li>Reststoffe in RW-Gänge hineingelegen</li> <li>RW-Lösung vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkrümelung</li> <li>Erosion (Wasser/Wind)</li> <li>Verkrustung</li> <li>grobkülig bei Saat</li> <li>Verkrustung</li> </ul>
<b>2 Durchwurzelung des Bodens</b> Zustand: gut	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>durchgängig über alle Horizonte</li> <li>Wurzelscheitel-Verteilung gleichmäßig</li> <li>Wurzeln in Schutzmulden und RW-Gängen vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gekürzte Wurzeln bei hohem mechanischen Widerstand (Wurzelspitzen auf Krümmelbasis oder auf Strohpellets)</li> <li>Wurzelfilz auf verdichteten Schichten oder auf Aggregat-Oberflächen (siehe auch Bild 4)</li> </ul>
<b>3 Makroporen/Bioporen</b> Zustand: vorhanden	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>RW-Lösung an der Oberfläche / im Profil</li> <li>Regenwurmgänge in der Profilwand und im Profilsboden vorhanden &gt; Verzahnung von Ober- und Unterboden</li> <li>RW-Gänge durchzogen mit Wurzeln</li> <li>Risse, Röhren, Hohlräume vorhanden und vertikal orientiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberfläche ohne Öffnung der Makroporen</li> <li>in Krume wenig vertikale RW-Gänge</li> <li>Makroporen enden von oben an der Krümmelbasis, keine Verbindung zum Unterboden</li> <li>große Hohlräume im Bearbeitungsbeereich nach Pflug</li> </ul>
<b>4 Gefüge und Verfestigung</b> Zustand: intakt	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gefüge: porös, locker, fein abgeriffelt</li> <li>bei Druck zwischen Fingern zerfallend</li> <li>perflöz bei Akwarprobe und jetkrümelig</li> <li>Messereinstich in die Profilwand ohne Widerstand möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gefüge fest zusammenhängend, dicht gelagert, stark verfestigte Aggregate nach Akwarprobe</li> <li>Wurzelfilz an Aggregatoberflächen (Fruchtensackchen)</li> <li>Messer schwer hineinzusetzen</li> </ul>
<b>5 Organische Reststoffe</b> Zustand: vorhanden	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>nach Saat gleichmäßig an der Oberfläche verteilt</li> <li>gleichmäßig in die Krume eingearbeitet</li> <li>Verfuchreste in der Krume gut verrottet</li> <li>gleichmäßige Wurzelentwicklung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nach Saat ungleichmäßige Strohverteilung</li> <li>Reststoffe konzentriert an der Oberfläche oder in Horizonten (Strohmatte)</li> <li>unverrotete Bestände von fröhren Jahren</li> <li>Wurzelsack auf Strohpellets</li> </ul>
<b>6 Farbe und Geruch</b> Zustand: intakt	++	<ul style="list-style-type: none"> <li>Farbe kann Hinweis für Horizontbeschreibung</li> <li>Luft- und Wasserstabilität sowie Humusgehalt sein</li> <li>gleichmäßige Farbe innerhalb der Horizonte</li> <li>Boden riecht angenehm erdig &gt; im Oberboden ist der Geruch ausgeprägter als im Unterboden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>blau und grau gefärbte Bereiche in den Horizonten als Zeichen für Redoxprozessen (durch starke Rückverfestigung, Sauerstoffmangel für vergrabene Reststoffe)</li> <li>übler, fauliger Geruch</li> </ul>

**Bewertung der Analyse**  
Zusammenfassende Beurteilung aus den 6 Parametern:  
 + Gefüge in Ordnung, Vorsorge erfüllt (max. 12 mal +)  
 0 Gefüge noch zufriedenstellend, Vorsorge intensiver  
 - Gefüge kritisch, Sanierung ggf. erforderlich (max. 12 mal -)

**VTI**  
Verein Thüringen für Technologie und Innovationen  
Thüringer Institut für Agrartechnologie

**GKB**  
Gesellschaft für Komplexenre Bodenbearbeitung e.V. (GKB) | Heubühde 6 | 15366 Nennhagen  
Tel. +49(0)3342-422-130 | Fax +49(0)3342-422-131 | info@gkb-er.de

Abb. 4.4: Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker – Klemmbrett (Brunotte et al., 2012)

bodenschonend sein, sind die Fahrzeugparameter an kritische Bodenzustände anzupassen. Das gelingt nur vor Ort durch die Gefügeansprache und nicht am Rechner im Büro.

Das Klemmbrett ist beim Thünen-Institut für Agrartechnologie, der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und bei

der Geschäftsstelle der GKB e. V. zum Preis von 20,- € (inkl. Versandkosten) erhältlich. Alternativ zur analogen Version ist auch eine nutzerfreundliche, mobile Applikation, abrufbar unter iTunes – id882487664, vom Landwirtschaftsverlag herausgegeben.

## 4.2 Wasser- und Lufthaushalt (Frank Ellmer)

### 4.2.1 Grundlagen

Das System Boden ist charakterisiert durch das Zusammenwirken von unveränderlichen und veränderlichen Bodeneigenschaften. Weitgehend unveränderliche Bodeneigenschaften sind die Textur, das Bodenprofil, das Relief und die Exposition an einem bestimmten Standort. Sehr gute ackerbauliche Bedingungen finden sich diesbezüglich auf Schwarzerden aus Löß, ungünstige hingegen auf schwach schluffigen Sanden. Dies wird am Beispiel von zwei sehr unterschiedlichen Böden deutlich, nämlich einer Fahlerde-Braunerde in Brandenburg und einer Löß-Schwarzerde in Sachsen-Anhalt (Tab. 4.2).

Mit der jeweils gegebenen Textur stehen die Bodenstruktur sowie bodenchemische und bodenbiologische Parameter in engem Zusammenhang. Hierfür lassen sich standorttypische mittlere Werte ermitteln, mit denen der ackerbauliche Status zu quantifizieren ist. Dazu zählen unter anderem die Trockenrohdichte und damit zusammenhängend das Porenvolumen und die Wasserspeicherkapazität (Tab. 4.3).

Die Bodenstruktur sowie bodenchemische und bodenbiologische Parameter sind in gewissen standortspezifischen Grenzen variabel. In Abhängigkeit von natürlichen Einflüssen, dem Anbau von Pflanzen und ackerbaulichen Eingriffen unterliegen sie fortlaufenden Veränderungen.

Tab. 4.2: Bodentextur einer Fahlerde-Braunerde (Standort Thyrow, Brandenburg; Frielinghaus et al., 2003) und einer Löß-Schwarzerde (Standort Bad Lauchstädt, Sachsen-Anhalt; Körschens et al., 2002) im Ap-Horizont

Körnungsarten	Größe (µm)	Anteile (%)	
		Fahlerde-Braunerde <sup>1)</sup>	Löß-Schwarzerde <sup>2)</sup>
Ton	< 2,0	3,4	21,0
Feinschluff	6,3 – 2,0	2,7	7,0
Mittelschluff	20 – 6,3	3,4	16,0
Grobschluff	63 – 20	5,2	44,8
Feinsand	200 – 63	35,8	8,6
Mittelsand	630 – 200	44,3	2,1
Grobsand	2000 – 630	5,2	0,5

1) Bodenart: Schwach schluffiger Sand / Su2; 2) Bodenart: Stark toniger Schluff / Ut4

Tab. 4.3: Mittlere Werte für bodenphysikalische Parameter einer Fahlerde-Braunerde (Standort Thyrow, Brandenburg; Frielinghaus et al., 2003) und einer Löß-Schwarzerde (Standort Bad Lauchstädt, Sachsen-Anhalt; Körschens et al., 2002) im Ap-Horizont

Parameter	Fahlerde-Braunerde	Löß-Schwarzerde
Reindichte (g cm <sup>-3</sup> )	2,62	2,56
Trockenrohdichte (g cm <sup>-3</sup> )	1,67	1,35
Porenvolumen (Vol.-%)	36,70	47,50
Nutzbare Feldkapazität (Vol.-%)	11,50	21,40
Gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm d <sup>-1</sup> )	244,00	34,00

Tab. 4.4: Einteilung und Funktionen der Porengrößen (ergänzt n. Becker et al., 1984)

Poren	Äquivalentdurchmesser (µm)	Wassersäule (cm)	pF-Wert	Zustand des Bodenwassers	Pflanzenverfügbarkeit	Durchlüftung
grobreite	>50	1 – 60	0 – 1,8	Bewegung von Sicker- und Haftwasser	leicht	gut
enge	50 – 10	60 – 300	1,8 – 2,5			
mittel	10 – 0,2	300 – 15000	1,8 – 4,2	Wasserspeicherung (pflanzenverfügbare Kapazität)	mittel – schwer	schwer
fein	< 0,2	> 15000	> 4,2	Bereich des „toten“, nicht pflanzenverfügbaren Wassers; „Permanenter Welkepunkt“	keine	keine

Tab. 4.5: Effektiver Wurzelraum (Wzreff), nutzbare Feldkapazität (nFK) und Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im durchwurzelten Bodenprofil (Wpfv) unter Zuckerrüben und Winterweizen bei verschiedenen Bodenarten (n. Ehlers, 1996)

Bodenarten	Wzreff (cm)	nFK (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Wpfv (mm)
Grobsand	50	0,06	30
Mittelsand	60	0,09	54
Feinsand	70	0,12	84
Lehmiger Sand	75	0,16	120
Schluffiger Sand	80	0,18	144
Schluff	100	0,25	250
Stark lehmiger Schluff	110	0,21	231
Sandiger Lehm	100	0,17	170
Schluffiger Lehm	110	0,19	209
Toniger Lehm	110	0,15	165
Lehmiger Ton	100	0,14	140
Schluffiger Ton	100	0,14	140

Die Werte gelten für mittlere Trockenrohdichten. Bei dicht lagernden Böden ist die nFK geringer und der effektive Wurzelraum nimmt ebenfalls ab. Bei Sommergetreide und auf Grünland ist der effektive Wurzelraum um 10 bis 20 cm flacher.

Der zentrale Parameter für die Bodenstruktur ist die Trockenrohdichte. Bei einer mittleren Reindichte des Bodens zwischen 2,5 und 2,6 g cm<sup>-3</sup> kann diese Maßzahl etwa zwischen 1,2 und 1,8 g cm<sup>-3</sup> variieren (Blume et al., 2010; Sponagel et al., 2005). Diese oberen und unteren Schwellenwerte sind nicht anzustreben und entsprechen nicht dem Bodenzustand, den Gute fachliche Praxis anstrebt.

Im mit Wasser oder Luft erfüllten Raum des Bodenvolumens, dem Porenvolumen, laufen alle Wasserbewegungs- und Belüftungsvorgänge ab. Diese sind unmittelbar von der Trockenrohdichte abhängig. Bei mittleren Dichten variieren die Porenvolumina bodenartabhängig etwa zwischen 36 und 46 % (Blume et al., 2010).

Die Wasserhaltefähigkeit steht in direkter Beziehung zur Porengrößenverteilung. Neben der Textur und dem Humusgehalt wird sie auch unmittelbar durch die Bodenstruktur beeinflusst. Diese ist unter dem Einfluss von ackerbaulichen Maßnahmen in bestimmten Grenzen variabel. Dabei ändern sich die Anteile der verschiedenen Porengrößen, die spezifische Funktionen bezüglich des Wasser- und Lufthaushaltes im Boden haben (Tab. 4.4).

Mit abnehmendem Porendurchmesser wird Wasser fester in den Poren gebunden. Die Saugspannung, mit der das Wasser in den Kapillaren gehalten wird, ist umso höher, je kleiner der Porendurchmesser ist. Der pF-Wert (log cm Wassersäule) ist das Maß für die Wasserbindung im Boden. Für einen spezifischen Boden steht somit jedem pF-Wert eine bestimmte Wassermenge gegenüber, die bei dieser Saugspannung gehalten werden kann. In groben Poren mit einem Äquivalentdurchmesser von >50 µm wird kein Bodenwasser entgegen der Schwerkraft gehalten. Im Bereich der Feldkapazität (Wasservolumen bei pF 1,8) sind sie entwässert und luftgefüllt. Der Parameter Luftkapazität gibt den Luftgehalt von Bodenproben bei Feldkapazität an. Dieser ist sowohl bodenartspezifisch als auch stark von der Bewirtschaftung geprägt und variiert in vergleichsweise weiten Grenzen zwischen 2 und >20%.



Abb. 4.5: Lehr und Forschungsstation Thyröw der Humboldt-Universität zu Berlin mit dem Statischen Nährstoffmangelversuch (Foto: Baumecker, 2007)

Aus pflanzenbaulicher Sicht ist vor allem die Menge an verfügbarem Wasser von Interesse, da diese für die Ertragsbildung von Nutzpflanzenbeständen vielfach der limitierende Faktor für die Bodenfruchtbarkeit ist.

Im Szenario der Einflussgrößen der Bodenfruchtbarkeit begrenzt stets der Faktor, der am weitesten vom optimalen Zustand entfernt ist, letztlich die Bodenfruchtbarkeit des Gesamtstandortes. In Anlehnung an die Minimumtonne von Justus von Liebig, mit der dieser die Bedeutung der Nährstoffe darstellte, kann auch die Bodenfruchtbarkeit in einem solchen Modell gezeigt werden. In Abbildung 4.1 (s. Kap. 4) ist beispielhaft die **Wasserversorgung** der begrenzende Faktor.

Die Menge an verfügbarem Wasser ergibt sich aus den Werten für die Feldkapazität (pF 1,8) und dem permanenten Welkepunkt (pF 4,2). Vom Wassergehalt bei Feldkapazität wird der Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt abgezogen. Unterstellt man dann eine bestimmte Durchwurzelungstiefe, kann der pflanzenverfügbare Wasservorrat im Bodenprofil überschlägig ermittelt werden. Die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser ergibt sich aus der Feldkapazität und der Tiefe des effektiven Wurzelraumes, Tabelle 4.5 enthält dafür Richtwerte.

Neben den naturgegebenen Voraussetzungen werden die Bodenstruktur und damit der physikalische Fruchtbarkeitszustand von Böden auch stark durch die jeweilige Bodennutzung beeinflusst. Dabei wirken agronomische Maßnahmen wie Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Düngung wechselseitig zusammen. Um die damit verbundenen komplexen Prozesse und Veränderungen in Böden erkennen zu können, werden langjährig durchgeführte Experimente benötigt. Dauerfeldversuche sind dafür eine gut geeignete Forschungsbasis.

#### 4.2.2 Fallbeispiel: Dauerfeldversuch

In den Böden von Dauerfeldversuchen haben sich nach zum Teil jahrzehntelanger differenzierter Bewirtschaftung an ein und demselben Standort unterschiedliche Bodenzustände eingestellt, die analytische Untersuchungen zu den Wechselbeziehungen im System Boden ermöglichen. Exemplarisch wird dafür der Statische Nährstoffmangelversuch in Thyröw (Kreis Teltow-Fläming, Brandenburg) dargestellt (Standortbeschreibung siehe Tab. 4.2 und 4.3). Er wurde im Jahr 1937 durch Kurt Opitz begründet und wird bis heute weitgehend unverändert fortgeführt (Abb. 4.5).

Der Versuch befindet sich auf einem für Brandenburg typischen schwach schluffigem Sandboden (vgl. Tab. 4.2). Nach 75 Versuchsjahren wurden darin bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen der Bodennutzung, der Bodenstruktur und dem Wasser- bzw. Lufthaushalt zu analysieren. Ausgangspunkt war der Gehalt an organischer Bodensubstanz, bei dem sich im Laufe der Zeit erhebliche Unterschiede eingestellt haben. Beim

organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) erreichen sie zwischen der dauernd ungedüngten Kontrolle und dem Prüfglied mit organischer und mineralischer Düngung den Faktor 2,6. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff ( $C_{hwl}$ ) als Parameter für die leicht umsetzbare organische Substanz im Boden liegt nach langjährig kombinierter organisch-mineralischer Düngung 1,6fach höher als in der Kontrolle und um 83% über dem im ausschließlich mineralisch gedüngten Prüfglied (Abb. 4.6).

Diese ausschließlich düngungsinduzierten Unterschiede im Humusstatus des Sandbodens wirken sich stark auf die bodenchemische Genese und damit auf die Ertragsbildung der Pflanzenbestände aus. Es können aber auch bemerkenswerte Effekte auf den physikalischen Bodenzustand festgestellt werden. So lag die Trockenrohdichte in der Kontrollvariante bei niedrigem Kohlenstoffgehalt um 11% höher als in dem Prüfglied mit organischer Düngung, wo sich ein höherer Kohlenstoffgehalt eingestellt hat (Abb. 4.7).

Zwischen dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und der Trockenrohdichte wurde in diesem Versuch eine signifikante negative Korrelation mit  $r = -0,86$  ermittelt. Dies belegt, dass die Versorgung der Böden mit ausreichenden Mengen an organischer Substanz auch zur Verbesserung der Bodenstruktur beiträgt. Dies ist insbesondere auf sandigen, zur Verdichtung neigenden Substraten von nicht zu unterschätzender Bedeutung für die langfristige Sicherung der Bodenfunktionen und der Bodenfruchtbarkeit.

Da zwischen der Trockenrohdichte und dem Porenvolumen von Böden direkte Beziehungen bestehen, ist davon auszugehen, dass sich die langjährig differenzierte Düngung auch auf den Wasser- und damit auf den Lufthaushalt des Bodens

auswirkt. Abbildung 4.8 ist zu entnehmen, dass fortgesetzte organische Düngung auf dem mittel schluffigen Sandboden zu einer signifikanten Zunahme des Gesamtporenvolumens um absolut 5,8% geführt hat. Dies kommt hauptsächlich durch einen höheren Anteil an Mittel- und Feinporen zustande, womit die Wasserspeicherfähigkeit spürbar verbessert worden ist. Die Beziehung zum Kohlenstoffgehalt ist auch hier signifikant ( $r = 0,86$ ).

Für die Ertragsfähigkeit solcher und ähnlicher Böden hat dies bedeutende Folgen, da insbesondere in Phasen von Wassermangel die Wasserversorgung der Pflanzenbestände länger aufrechterhalten werden kann. Mit einer zusätzlichen Wasserergänzung kann die Bodenfruchtbarkeit besser genutzt werden. Dadurch erfolgt gleichzeitig eine deutliche Verbesserung der Nährstoff- und insbesondere der Stickstoffeffizienz.

Neben der Wasserspeicherfähigkeit ist auch die Wasserleitfähigkeit des Bodens ein wichtiger physikalischer Parameter. Eine gute Leitfähigkeit ist Voraussetzung, um Wasser rasch in den Boden infiltrieren zu lassen, oberflächigen Abfluss und damit erosive Wirkungen zu verhindern und damit letztlich die Speicherfunktion für Wasser zu garantieren. Im vorliegenden Versuch hat die kombinierte organisch-mineralische Düngung die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zur Kontrolle signifikant verdoppelt (Abb. 4.9).

Wie bei den vorhergehenden physikalischen Parametern wurden auch hier signifikante Beziehungen zum organischen Kohlenstoffgehalt festgestellt ( $r = 0,80$ ). Damit ist belegt, dass ausgehend von unterschiedlicher organischer und mineralischer Düngung die organische Bodensubstanz ein zentrales Element für die Bodenfunktionen ist. Sie hat

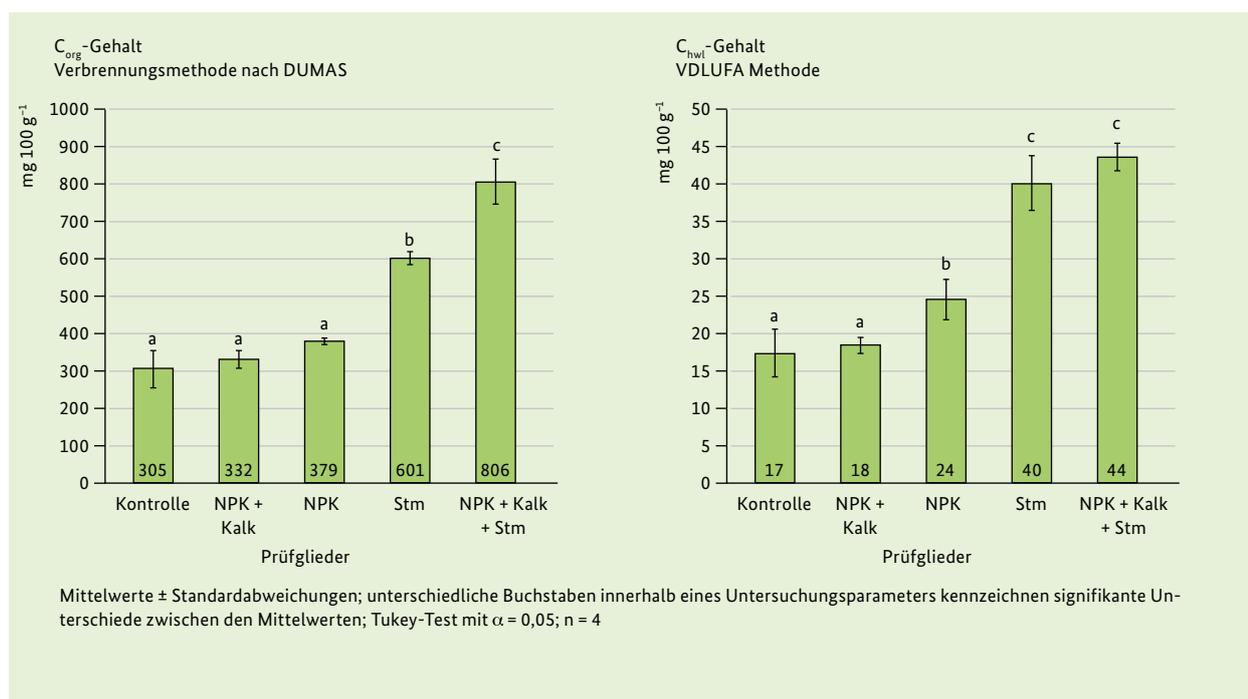


Abb. 4.6:  $C_{org}$ - und  $C_{hwl}$ -Gehalte im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow nach 75 Versuchsjahren (Gäbert, 2014). Stm = Stallmist

maßgeblichen Einfluss auf bodenphysikalische Zustandsgrößen und ist somit für den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens ebenso bedeutsam wie für den Nährstoffhaushalt und die bodenbiologische Aktivität.

Langjährige Dauerfeldversuche bieten für die Forschung gute Möglichkeiten, um Zusammenhänge im System Boden

zu analysieren und aufzuklären. Allerdings sind sie in ihrer praktischen Aussagefähigkeit hinsichtlich aktueller Fragestellungen auch limitiert. So kann Stallmist heute nur noch eingeschränkt als repräsentativ für organische Dünger angesehen werden. Die Fragen des Einsatzes weiterer organischer Düngestoffe wie Stroh, Gülle oder Gärprodukte aus Biogasanlagen können mit der historischen Versuchsanlage nicht beantwortet werden. Gleichmaßen bleiben die Wirkungen von Zwischenfrüchten in diversen Mischungen und deren Effekte auf die Bodenstruktur als zu beantwortende Frage bestehen. Der Dauerfeldversuch vermittelt aber einen zuverlässigen Blick auf die Wechselbeziehungen zwischen Humushaushalt, bodenchemischer und -physikalischer Genese. Seine Ergebnisse sind daher für weitergehende Schlussfolgerungen zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit grundlegend bedeutsam und entsprechend nutzbar.

#### 4.2.3 Fazit

Die bodenphysikalische Komponente der Bodenfruchtbarkeit manifestiert sich in der Bodenstruktur und dem Bodengefüge und steht damit in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wasser- und Lufthaushalt von Böden. In Abhängigkeit von der naturgegebenen Textur variieren die Porenverhältnisse in relativ weiten Bereichen. Insbesondere der Wasserhaushalt kann limitierend für die pflanzenbauliche Ertragsfähigkeit sein. Ackerbauliche Maßnahmen der Fruchtfolge, der Bodenbearbeitung und der organischen Düngung können die Wasser- und Luftverhältnisse in relativ engen Grenzen positiv beeinflussen. Dies trägt zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit bei.

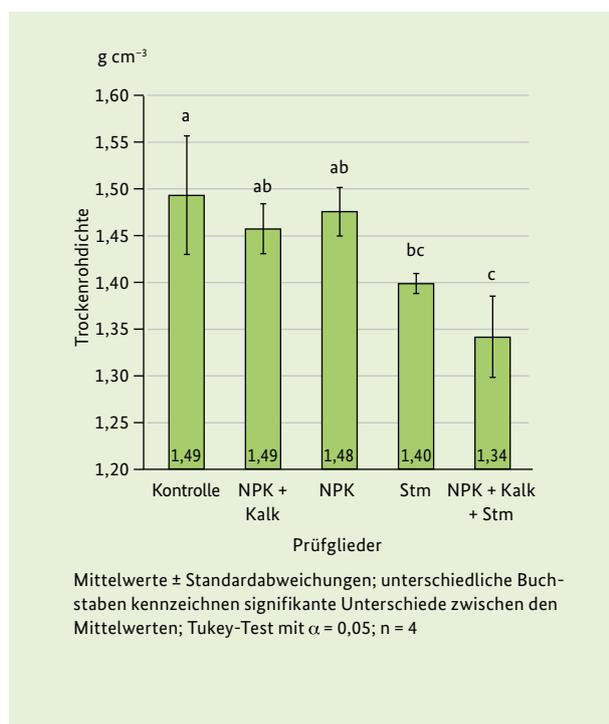


Abb. 4.7: Trockenrohddichten des Bodens im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow nach 75 Versuchsjahren (Gäbert, 2014)

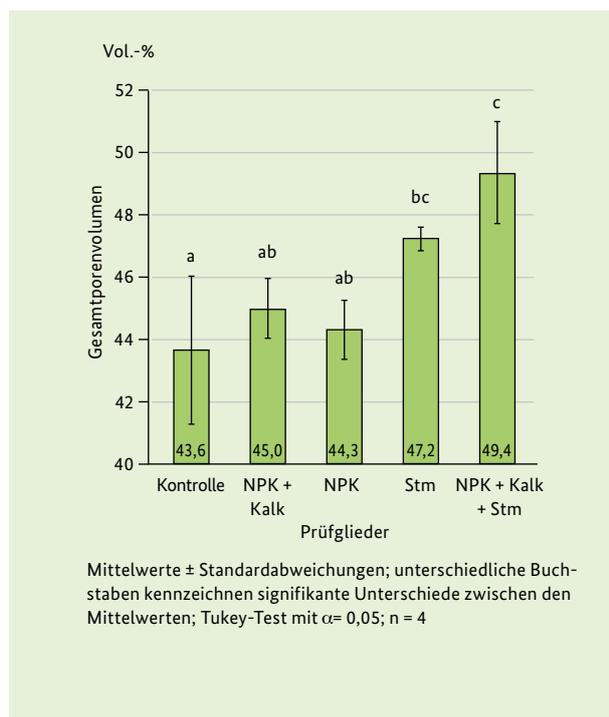


Abb. 4.8: Gesamtporenvolumen des Bodens im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow nach 75 Versuchsjahren (Gäbert, 2014)

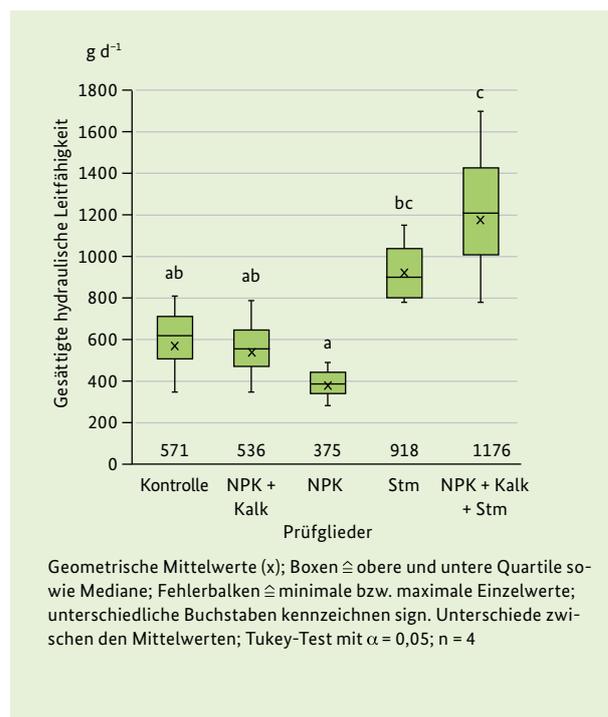


Abb. 4.9: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow nach 75 Versuchsjahren (Gäbert, 2014)

## 4.3 Wurzelwachstum

(Susanne Schroetter)

Wurzeln verkörpern die unterirdische, im Boden wachsende Komponente der Pflanzen. Sie dienen der Verankerung der Pflanze im Boden, der Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden sowie deren Transport zum Spross. Das Wurzel:Spross-Verhältnis von einjährigen Ackerbaukulturen liegt mit durchschnittlich 0,1 wesentlich niedriger als das von Grünland mit 3,7 (Jackson et al., 1996). In Abhängigkeit von Pflanzenart und Bewirtschaftung kann das Wurzelsystem mehr als die Hälfte der Gesamtbiomasse einer Pflanze ausmachen und, Haupt- und Nebenwurzeln zusammengekommen, eine größere Gesamtlänge als das oberirdisch wachsende Spross-System erreichen (Hopkins, 1995).

Grundlage für die Bewertung der Bodenfruchtbarkeit in Hinblick auf das Wurzelwachstum der Pflanzen ist die Begrenzung des tatsächlichen Wurzelraumes (Blume et al., 2011). Bestimmende und messbare Parameter sind die **Durchwurzelbarkeit** (physiologische Gründigkeit), die **Durchwurzelungsintensität** (Feinwurzeln, Grobwurzeln; seitliche Wurzelenausbreitung in der Fläche) und die **effektive Durchwurzelungstiefe** (tatsächlich durchwurzeltes Bodenvolumen) (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

### 4.3.1 Durchwurzelbarkeit

Unter **Durchwurzelbarkeit bzw. physiologischer Gründigkeit** wird die Tiefe verstanden, bis zu der die Pflanzenwurzeln unter den gegebenen Standortbedingungen tatsächlich in den Boden eindringen können (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Die Durchwurzelungstiefe bestimmt das Bodenvolumen, aus dem Pflanzen ihr Wasser beziehen können. Der durchwurzelbare Bodenraum wird bei Böden, die über Kompaktgesteinen liegen, im Allgemeinen durch die Tiefe des Solums<sup>6</sup> begrenzt, einzelne Wurzeln können aber auch über diesen Bereich hinaus in Spalten und Risse des festen Gesteins hineinwachsen. Bei Böden über Lockergesteinen ist diese Tiefenbegrenzung nicht in gleichem Maß gegeben (Schroeder, 1992). Verfestigte Bänke und Horizonte, Reduktionshorizonte oder Horizonte mit schroffem Wechsel der chemischen Eigenschaften können den durchwurzelbaren Bodenraum ebenfalls begrenzen (Ad-hoc-AG Boden, 2005), auch ein hoher Grundwasserstand stellt einen begrenzenden Faktor dar (Blume et al., 2011).

Ackerböden mit gut erschlossenem Untergrund weisen bei nachhaltiger Bewirtschaftung Wurzelraumtiefen von mehr als 80 cm auf. Die maximal mögliche Durchwurzelungstiefe liegt standortabhängig zwischen 15 cm auf Böden mit

stark verdichtetem oder vernässtem Unterboden bzw. mit flach anstehendem Felsgestein und ca. 250 cm auf tiefgründigen Schwarzerden aus Löß ohne Unterbodenverdichtungen (Kundler et al., 1989; Schroeder, 1992; Ad-hoc-AG Boden, 2005) (Tab. 4.6).

Der Wurzeltiefgang von Wild- und Kulturpflanzen ist artspezifisch genetisch festgelegt. Von der Form des Wurzelsystems (Pfahlwurzel, Büschelwurzel, Flachwurzler, Tiefwurzler) hängt die tatsächliche Durchwurzelung entscheidend ab (Kutschera, 1960; Schroeder, 1992). Typische Wurzeltiefenbereiche landwirtschaftlicher Kulturen, die auf tiefgründigen Löß-Schwarzerden und Braunerden erreicht werden, sind in Tabelle 4.7 zusammengestellt.

Kurzlebige Gemüsearten haben ein wesentlich schwächer ausgeprägtes Wurzelsystem, ihnen ist dadurch auch in tiefgründigen Böden nicht der gesamte Bodenwasservorrat zugänglich. Für Kopfsalat und Spinat werden Durchwurzelungstiefen von 20 bis 30 cm angegeben. Bohnen, Gurken, Tomaten und Zwiebeln können den Boden bis in Tiefen von 30 bis 60 cm erschließen (Mastel, 2002). Die Durchwurzelungstiefe kann von Jahr zu Jahr und von Ort zu Ort in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung (Jahresniederschlag, Grundwassereinfluss) variieren. Zudem wird die maximale Wurzeltiefe von den Pflanzen nur sukzessive im Verlauf ihrer Entwicklung erreicht.

Der Hauptanteil der Wurzeln – bis zu 90% der Wurzelrockenmasse – ist bei optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung im Oberboden (0 bis 30 cm Tiefe) zu finden. Die Wurzelmasse nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. Das belegen auch Untersuchungen von Rogasik et al. (1992) zur Verteilung der Wurzeln von Zwischenfrüchten im Profil eines Standortes mit leichtem Boden (Abb. 4.10).

Die Eingliederung von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolgen trägt auf sandigen Böden zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit bei:

- die Bodenstruktur wird durch die intensive Durchwurzelung verbessert
- Nährstoffverluste durch Auswaschung werden durch die temporäre Nährstoffkonservierung in der Pflanzensubstanz vermindert
- dem Boden wird leicht umsetzbare organische Substanz zugeführt und
- die darin gebundenen Nährstoffe stehen der Folgefrucht mittelfristig wieder zur Verfügung.

<sup>6</sup> Bodenkörper ohne Streuschicht und Ausgangsgestein

### 4.3.2 Durchwurzelungsintensität

Unter **Durchwurzelungsintensität** wird die Anzahl an Wurzeln, die in einem definierten Bodenvolumen vorhanden sind, verstanden (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Die Aufnahme von Bodenwasser und Nährstoffen durch die Pflanzenwurzel wird nicht nur durch den Wurzeltiefgang bestimmt, die Wasserversorgung ist von der Größe und Form des Wurzelsystems, seiner Ausbreitung in der Fläche und insbesondere der wasseraufnehmenden Wurzeloberfläche abhängig. Es besteht eine enge Beziehung zwischen der Durchwurzelungsintensität des Bodens und dem Wasserentzug (Geisler, 1988). Da das Wachstum der Pflanzenwurzel parallel zur Sprossentwicklung erfolgt, durchwurzeln einjährige Nutzpflanzen wie Mais aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer den Boden weniger intensiv als mehrjährig genutzte Kulturen wie beispielsweise Luzerne-Gras oder die zur Energiegewinnung angebaute Durchwachsene Silphie (Abb. 4.11).

Die Durchwurzelbarkeit eines Bodens hängt von Art und Größe der Hohlräume zwischen den Bodenaggregaten und Steinen ab und von den Eigenschaften der Bodenaggregate selbst. Je geringer die Aggregatporosität ist, desto weniger durchwurzelbar sind die Aggregate, trotz oft starken Wurzeldurchwuchses in den interaggregären Poren (Blume et al., 2011). Somit lässt sich die Durchwurzelbarkeit aus Porosität, Trockenrohdichte, Stabilität der Bodenaggregate und Steingehalt erschließen: Horizonte mit Porenvolumina < 30 bis 35 % gelten als extrem bis stark verdichtet, mit 35 bis 40 % als mittel bis mäßig verdichtet und mit > 40 % als nicht verdichtet (Blume et al., 2011). Bei der Standortbewertung wird die Durchwurzelungsintensität anhand der vorgefundenen Gesamtanzahl von Grob- und Feinwurzeln in sieben Stufen unterteilt (Tab. 4.8).

**Durchwurzelungstiefe** und **Durchwurzelungsintensität** lassen sich mit Feldmethoden ausreichend genau ermitteln (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2011). An einer

Tab. 4.6: Einstufung der Böden nach der Wurzelraumtiefe (Gründigkeit) (nach Kundler et al., 1989; Schroeder, 1992; Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2011)

Wurzeltiefgang [cm]	Gründigkeit	Eignung für den Ackerbau
< 15	sehr flachgründig	sehr schlecht
15 bis 30	flachgründig	schlecht
30 bis 70	mittelgründig	mäßig
70 bis 120	tiefgründig	gut
120 bis 200	sehr tiefgründig	sehr gut
≥ 200	äußerst tiefgründig	sehr gut

Tab. 4.7: Wurzeltiefenbereich landwirtschaftlicher Kulturen auf Löß-Schwarzerde und Braunerde (nach Klimanek, 1997)

Kulturart	Wurzeltiefe [cm]	
	Minimum	Maximum
Winterweizen	150	200
Winterroggen	150	170
Wintergerste	130	160
Sommergerste	120	150
Hafer	120	150
Winterraps	130	160
Mais	100	160
Kartoffel	80	150
Zuckerrüben	150	200
Lupine	120	170
Ackerbohne	80	120
Erbse	90	120
Sonnenblume	120	200
Ölrettich (Stoppelfrucht)	100	140
Weidelgras	100	150
Luzerne	160	250
Rotklee	130	170

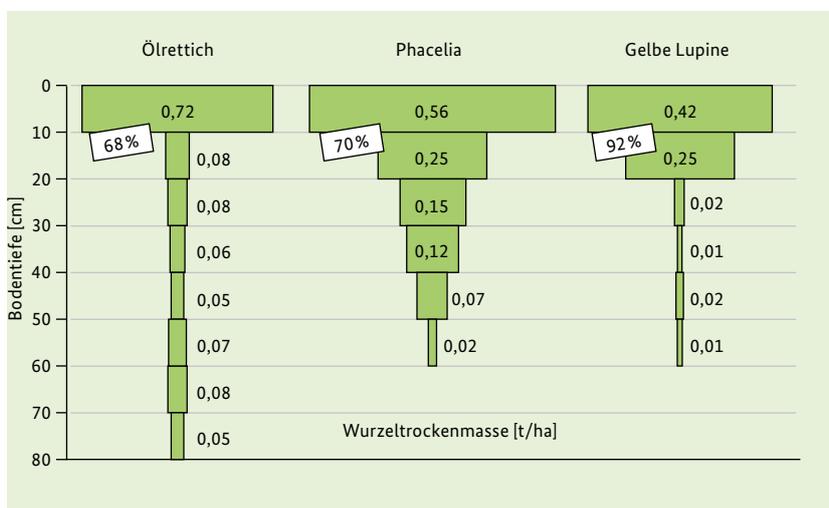


Abb. 4.10: Verteilung der Wurzel trockenmasse [t/ha] von Zwischenfrüchten im Bodenprofil eines lehmigen Sandbodens zum Ende der Vegetationsperiode, Müncheberg (nach Rogasik et al., 1992, verändert)



Abb. 4.11: Vergleich der Wurzelform von Durchwachsener Silphie (mehrjährig) und Mais (einjährig), Anzucht der Pflanzen in Sandkultur, Braunschweig, 2014/2015 (Fotos: S. Schroetter, JKI-PB)

Tab. 4.8: Einstufung der Durchwurzelungsintensität (nach Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Durchwurzelungsintensität	Anzahl der Wurzeln/dm <sup>2</sup>
keine Wurzeln	0
sehr schwach	1 bis 2
schwach	3 bis 5
mittel	6 bis 10
stark	11 bis 20
sehr stark	21 bis 50
extrem stark bis Wurzelfilz	> 50



Abb. 4.12: Bodenprofil unter einem mehrjährigen Silphie-Bestand, Braunschweig, 2013 (Foto: S. Schroetter, JKI-PB)

aufgerauten Profilwand kann der Wurzeltiefgang direkt gemessen werden. Sowohl die Durchwurzelungsintensität der einzelnen Bodenhorizonte (Tiefenverteilung) als auch die seitliche Ausbreitung der Wurzeln in der Fläche können visuell beurteilt und durch Auszählen der Grob- und Feinwurzeln erfasst werden (Abb. 4.12). Wurzeln mit einem Durchmesser von  $\geq 2$  mm werden als Grobwurzeln bezeichnet, alle Wurzeln mit einem Durchmesser  $< 2$  mm sind den Feinwurzeln zuzuordnen (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Das Entnehmen von Bohrkernen mit einer Rammkernsonde bietet die Möglichkeit, die Fläche an unterschiedlichen Stellen punktuell bis zu einer Tiefe von 200 cm zu beproben (Abb. 4.13).

Der Horizontaufbau des Bodens ist am Bohrkern direkt sichtbar. Wurzeltiefgang und Durchwurzelungsintensität lassen sich mit Hilfe der Bruchkernmethode (Böhm, 1979; Smit, 2000) horizontweise oder bei Bedarf kleinräumiger (in 15 cm-Teilstücken) direkt vor Ort bestimmen (Abb. 4.14). Eine sehr arbeitsaufwändige Methode zur Bestimmung der Durchwurzelungsintensität ist das Ausspülen der Wurzeln aus den Bohrkernteilstücken im Labor. Mit einem PC-Programm wird die Wurzellänge im Scan-Verfahren gemessen und die Wurzellängendichte (RLD= root length density: cm Wurzel/cm<sup>3</sup> Boden) als Maß für die Durchwurzelungsintensität errechnet, bezogen auf das Volumen des Bohrkernteilstücks. Anschließend wird die Wurzelrockenmasse ermittelt (Abb. 4.14).

Die beiden vorgenannten Methoden wurden von Schoo et al. (2013) bei Wurzeluntersuchungen an Mais und Durchwachsener Silphie verglichen. Die weniger arbeitsintensive Bruchkernmethode erwies sich als geeignet, um verlässliche Aussagen zur Wurzellängendichte (RLD) und damit zur Durchwurzelungsintensität einzelner Bodenschichten zu gewinnen (Abb. 4.15).

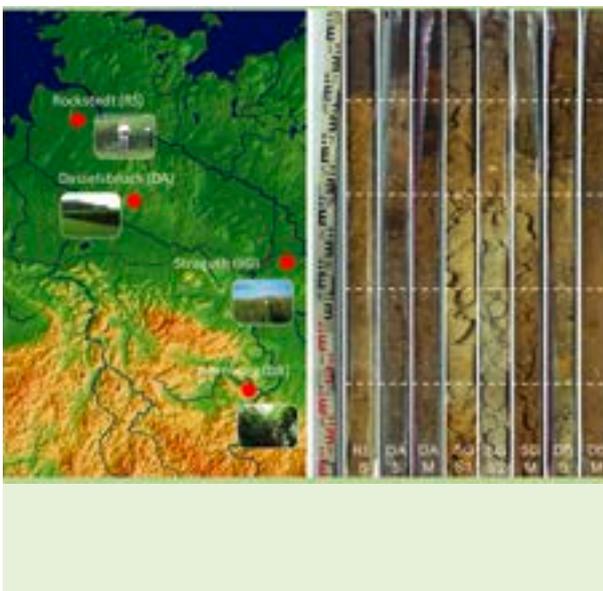


Abb. 4.13: Aufbau der Bodenhorizonte verschiedener Standorte, dargestellt an Rammkernsonden-Bohrkernen (Foto: B. Schoo, JKI-PB)



Abb. 4.14: Bestimmung der Durchwurzelungsintensität durch Auszählen sichtbarer Wurzeln an Bruchkernen und durch Auswaschen der Wurzeln aus Bohrkernteilstücken (Foto: S. Schroetter, JKI-PB)

Von Kundler et al. (1989) werden zudem die Verfolgung des Wurzelwachstums mit Hilfe in den Boden eingebrachter Wurzelbeobachtungsröhren und der Einsatz radiometrischer Messverfahren als mögliche destruktive Untersuchungsmethoden genannt, die aber eher im versuchstechnischen Bereich einsetzbar sind. Der Eindringwiderstand, gemessen durch Eintreiben einer Sonde (Penetrometer) in den Boden, wird als Maß für die Durchwurzelbarkeit diskutiert (Hartge und Horn, 2001; Blume et al., 2011). Der Eindringwiderstand eines Bodens ist jedoch eine sehr unspezifische Eigenschaft, die durch das Zusammentreffen verschiedener Umstände einer ständigen Veränderung unterliegen kann. Der Widerstand, den ein Boden dem Eindringen der Sonde entgegensetzt, ist im Wesentlichen vom Porenvolumen, dem Wassergehalt und der Konsistenz eines Bodens abhängig (Hartge und Horn, 2001).

### 4.3.3 Effektive Durchwurzelungstiefe

Die **effektive Durchwurzelungstiefe** ist definiert als rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockenrohdichte abhängigen Bodenzone, die als **effektiver Wurzelraum** ( $W_e$ ) bezeichnet wird (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2011). Im effektiven Wurzelraum kann die nutzbare Feldkapazität ( $nFK$  = pflanzennutzbare Bodenwasser) von den Pflanzenwurzeln einjähriger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen voll ausgeschöpft werden. Die effektive Durchwurzelungstiefe stellt als Grenzlinie den niedrigsten Wassergehalt eines Bodenprofils im Herbst nach der Vegetationsperiode dar und liegt zwischen dem Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt (PWP) und dem bei Feldkapazität (FK) (Abb. 4.16).

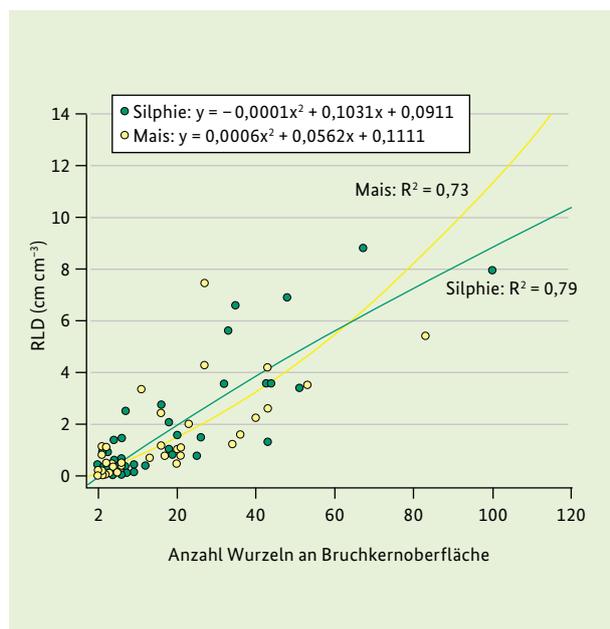


Abb. 4.15: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus Bruchkernmethode (Wurzelaanzahl) und Bestimmung der Wurzellängendichte (RLD) bei Silphie und Mais, n = 150 (Schoo et al., 2013)

Da der Hauptwurzelraum der meisten Wild- und Kulturpflanzen auf den Oberboden beschränkt ist, entscheidet in Trockenperioden die Kapillarität des Unterbodens und der entsprechende Grundwasserstand darüber, in welchem Umfang Wasser und gelöste Nährstoffe in den Hauptwurzelraum aufsteigen können (Schroeder, 1992; Blume et al., 2011). Für viele Böden Mitteleuropas lässt sich die effektive Durchwurzelungstiefe daher aus Bodenart und Trockenrohdichte des Unterbodens ableiten (Tab. 4.9).

Der effektive Wurzelraum kann nach längeren Trockenperioden durch Messung der Austrocknungstiefe bestimmt werden (Kundler et al., 1989; Schachtschabel et al., 1998), da sich der Wasserentzug proportional zur Anzahl der in den einzelnen Bodenschichten vorhandenen Wurzeln verhält (Abb. 4.17). Das gilt jedoch nur auf grundwasserunbeeinflussten Standorten. Bei Grundwasserböden endet die effektive Durchwurzelungstiefe an der Obergrenze des Gr-Horizontes (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

### 4.3.4 Faktoren, die das Wurzelwachstum beeinflussen

Neben der Bodenkonsistenz und den sie bestimmenden Faktoren können eine ganze Reihe von exogenen Faktoren die Durchwurzelbarkeit eines Standortes entscheidend beeinflussen. Durch Toneinwaschungen stark verdichtete Bt-Horizonte mit geringem Anteil an Grobporen, Ortstein, Raseneisenstein, ein hoher Salzgehalt oder extreme pH-Werte können bewirken, dass der Wurzelraum nur Teile des eigentlich durchwurzelbaren Bodenkörpers umfasst (Schroeder, 1992). Ungenügende Wasserdurchlässigkeit und Durchlüftung in verdichteten lehmigen und tonigen Unterböden hemmen die Durchwurzelung ebenso wie stark

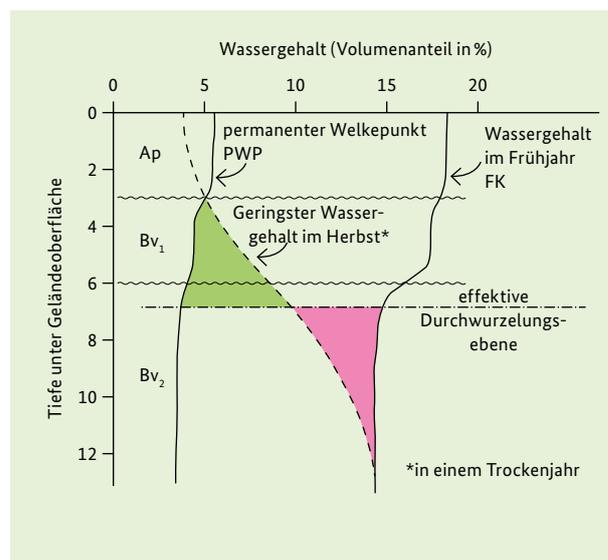


Abb. 4.16: Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe aus Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (Feldkapazität - FK, permanentem Welkepunkt - PWP und aktuellem Wassergehalt) dargestellt für den Herbst eines Trockenjahres auf einer Sand-Braunerde (nach Renger und Strebel, 1982; zitiert in Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2011)

Tab. 4.9: Effektive Durchwurzelungstiefe homogener Böden in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohdichte<sup>1)</sup> ( $\rho_t$ ) (nach Ad-hoc-AG Boden, 2005; zitiert in Blume et al., 2011)

Bodenarten-Hauptgruppe	Bodenart	effektive Durchwurzelungstiefe [dm] Trockenrohdichtestufen		
		$\rho_t$ 1 bis 2	$\rho_t$ 3	$\rho_t$ 4 bis 6
Sande	gS	7	5	5
	mS, fs, Ss	8	6	6
	Su, Sl2	9	7	6
	Sl3, St2	10	8	7
	Slu, Sl4, St3	13	9	8
Schluffe	Uu, Us	14	10	8
	Uls, Ul, Ut	15	11	9
Lehme	Ls, Lt, Lts	13	10	8
Tone	Tu3	14	11	9
	Tl, Tt, Tu2	13	10	8

1) Trockenrohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

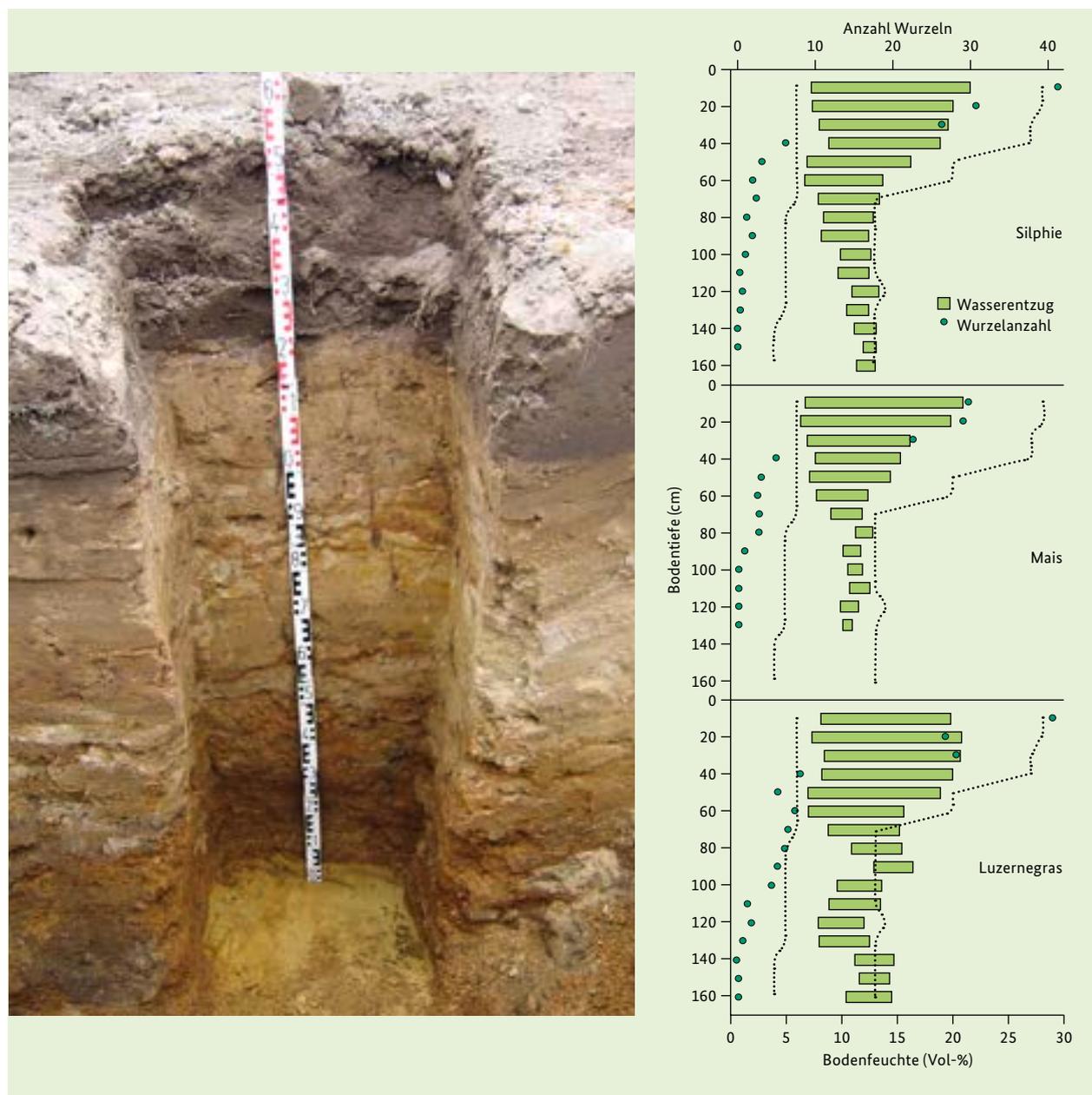


Abb. 4.17: Tiefenspezifische Bodenwasserentzüge (Vol.-%) und Wurzelzahlen (Bruchkernmethode, Zeitpunkt Maisblüte) von Energiepflanzenbeständen auf einer Bänderparabraunerde (Bodenprofil links) ohne Zusatzbewässerung (gepunktete Linien markieren den Bereich der nutzbaren Feldkapazität), Braunschweig 2013, Versuchsfeld Nord, JKI - Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (Schoo et al., unveröffentlicht) (Foto: S. Schroetter, JKI-PB)

verdichtete sandige Unterböden, die einen hohen mechanischen Eindringwiderstand für die Wurzeln aufweisen. Außerdem werden Nährstoffarmut, Luftmangel und hoch anstehendes Grund- oder Stauwasser als hindernde Faktoren angeführt (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2011). Seltener behindern zu hohe Konzentrationen toxischer Stoffe das ungestörte Wurzelwachstum (Kundler et al., 1989). Die Durchwurzelbarkeit eines Bodens ist aber nicht nur von seinen Eigenschaften und den klimatischen Gegebenheiten abhängig, sondern auch von der Nutzung und dem landwirtschaftlichen Management (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Schroetter et al., 2006). So stimuliert beispielsweise optimale Nährstoffversorgung durch ausgewogene organisch-mineralische Düngung bei Winterweizen eine intensivere Durchwurzelung des Oberbodens. Bei Untersuchungen zum Zeitpunkt der Blüte – bei Getreide das Stadium mit der größten Wurzelmasse – waren in der Schicht von 0 bis 30 cm mehr feine und stärker verzweigte Wurzeln vorhanden, ohne signifikante Veränderung der Wurzelrockenmasse insgesamt (Abb. 4.18) (Schroetter et al., 2006).

Pflanzen, die durch bedarfsangepasste mineralische und organische Düngung und Bewässerung durchgängig ausreichend mit Nährstoffen und Wasser versorgt sind, durchwurzeln primär die oberen Bodenschichten, sie müssen nicht zwingend tiefer wurzeln, um Reserven zu erschließen (Schroetter et al., 2006). Einen besonders starken Effekt auf die Durchwurzelbarkeit und somit auf das Wurzelwachstum haben die Bodenbearbeitungsverfahren, da sie physikalische Eigenschaften eines Bodens wie Lagerungsdichte, Porenvolumen, Wasser- und Luftführung verändern. Schroetter et al. (2006) wiesen in Langzeit-Feldexperimenten auf einem leichten Standort nach, dass durch konservierende, pfluglose Bodenbearbeitung, verglichen mit wendender

Bodenbearbeitung, insbesondere die intensivere Durchwurzelung des Oberbodens gefördert wird (Abb. 4.19).

Dieser Effekt zeigte sich sehr ausgeprägt bei den geprüften Wintergetreidearten, die eine stark verzweigte Büschelwurzel mit seitlicher Ausbreitung in der Fläche haben. Ackerbohnen, deren Wurzelsystem aus einer tiefgehenden Hauptwurzel mit Nebenwurzeln besteht, reagierten auf die pfluglose Bodenbearbeitung mit einer größeren Wurzelrockenmasse bei nahezu unveränderter Durchwurzelungsintensität.

#### 4.3.5 Fazit

Das Volumen des durchwurzelbaren Bodenraumes bestimmt zusammen mit den Eigenschaften der einzelnen Bodenschichten die Menge an Wasser und Nährstoffen, die von den Pflanzen aufgenommen werden kann. Die Durchwurzelungsintensität der einzelnen Bodenhorizonte ist ausschlaggebend für das Ausnutzungspotenzial des im Wurzelraum vorhandenen Wasser- und Nährstoffreservoirs. Die im Boden wachsenden Wurzeln beeinflussen im Gegenzug durch Wurzelatmung, Abgabe von Wurzelinhaltsstoffen und Wechselwirkungen mit den in der Rhizosphäre lebenden Mikroorganismen aktiv die Bodeneigenschaften. Wurzeln liefern einen nicht zu unterschätzenden Input an leicht umsetzbarer organischer Substanz und tragen dadurch zur Erhaltung der Fruchtbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden bei.

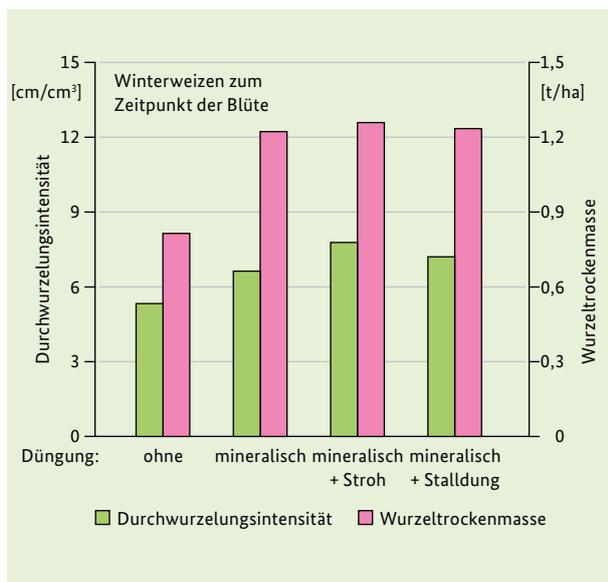


Abb. 4.18: Einfluss der Düngung auf Durchwurzelungsintensität (Wurzellängendichte) und Wurzelrockenmasse von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) im Oberboden (0 bis 30 cm) eines lehmigen Sandes, Braunschweig 2005 (Schroetter et al., 2006, verändert)

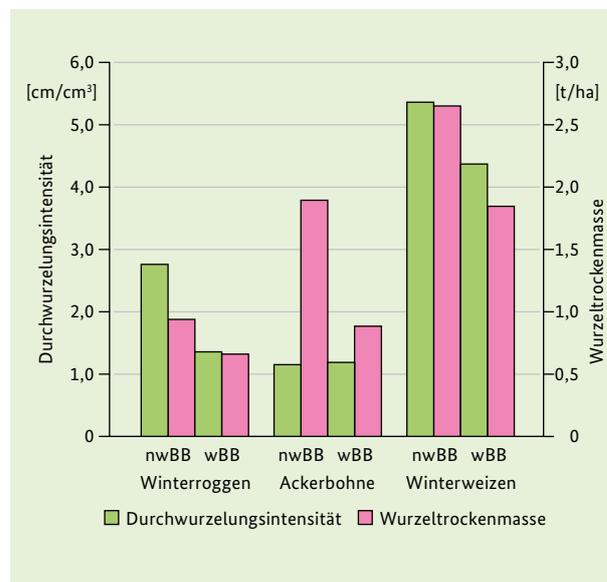


Abb. 4.19: Einfluss der Bodenbearbeitung (nwBB = pfluglos, wBB = wendend) auf die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen mit unterschiedlichen Wurzelformen zum Zeitpunkt der Blüte, Oberboden (0 bis 30 cm) eines lehmigen Sandes, Braunschweig 2005 (Schroetter et al., 2006, verändert)

## 4.4 Nährstoff- und Humusversorgung

(Hartmut Kolbe)

### 4.4.1 Nährstoffversorgung

#### 4.4.1.1 Grundlagen

Folgende Regeln und Gesetzmäßigkeiten sind für das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Nährstoffversorgung und Bodenfruchtbarkeit von großer Bedeutung und müssen daher beachtet werden:

- Das Gesetz vom Minimum (siehe Mitscherlich, 1909) besagt, dass der Nährstoff oder Wachstumsfaktor, der im Minimum vorhanden ist, die Ertragsbildung der Fruchtarten am meisten begrenzt (Abb. 4.20). Damit rechtzeitig Informationen über die Entwicklung und den Zustand der Nährstoffversorgung vorliegen, ist ein regelmäßiges Kontrollprogramm über alle wichtigen Nährstoffe durchzuführen.
- Die Nährstoffeffizienz und Nachhaltigkeit des landwirtschaftlichen Systems in Relation zur Beeinflussung anderer Umweltkompartimente sind abhängig vom Grad der Geschlossenheit des betrieblichen Nährstoffkreislaufs (Abb. 4.21). Als Kontrollinstrument zur Überprüfung des Nährstoffkreislaufs haben sich verschiedene Formen der Nährstoffbilanzierung bewährt (siehe Tab. 4.11). Das Prinzip der Bilanzierung beruht darauf, von allen in einen – je nach Bezugsebene – Betrieb oder Ackerschlag über Düngung und andere Maßnahmen zugeführten Nährstoffen



Durchführung des Trierer Bodenqualitätstestes  
(Foto: Ch. Emmerling)

die über die Ernten abgefahrenen Nährstoffe abziehen und zu saldieren.

- Das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs (nach Mitscherlich, 1909) besagt, dass infolge steigender Düngung der Ertragszuwachs immer geringer wird. Gleichzeitig steigen die nicht genutzten Nährstoffverluste in charakteristischer Weise überproportional an (Abb. 4.22).
- Im Bereich des Nährstoffmanagements zur Regulierung der Bodenfruchtbarkeit sind daher in Abhängigkeit von der Landnutzungsform mindestens drei Zustandsstufen an vorkommenden Indikatoren und Merkmalen zu unterscheiden:
  - 1: eine zu geringe Konzentration oder Menge (Mangel)
  - 2: eine ausreichende oder optimale Konzentration oder Menge und
  - 3: eine zu hohe Konzentration oder Menge (Luxuskonsum).

Die wesentlichen Elemente des Nährstoffmanagements zur Regulierung der Bodenfruchtbarkeit können zusammenfassend aus Tabelle 4.10 entnommen werden. Zunächst sind flächenbezogene Aufzeichnungen des Acker- und Grünlandes (Schlagkartei) und der Tierhaltung (Stallbuch) zur Dokumentation der Anbauabfolge des gesamten Betriebes ständig zu führen. Entsprechend jahrzehntelanger Erfahrungen aus experimentellen Ergebnissen über die Wachstumsfaktoren (Minimumtonne, siehe Abb. 4.20) gehört es zum Untersuchungsprogramm, die Merkmale

- Organische Substanz bzw. Humus
- Stickstoff
- Kalk
- Grundnährstoffe und
- Spurenelemente

entsprechend den Betriebsbedingungen zumindest durch eine regelmäßige Bodenuntersuchung, Bilanzierung und/oder Düngebedarfsermittlung im Auge zu behalten.

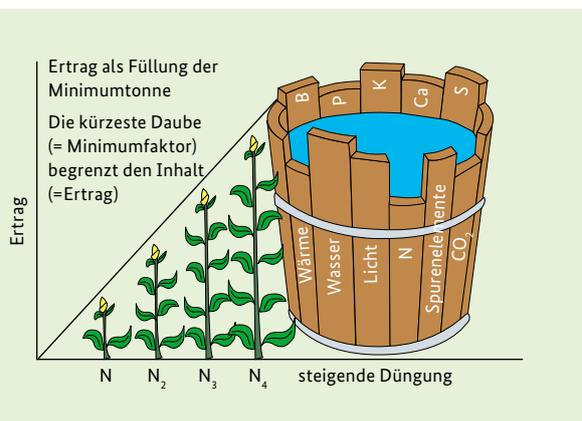


Abb. 4.20: Minimum-Tonne  
(nach J. von Liebig, nach Mitscherlich, 1909)

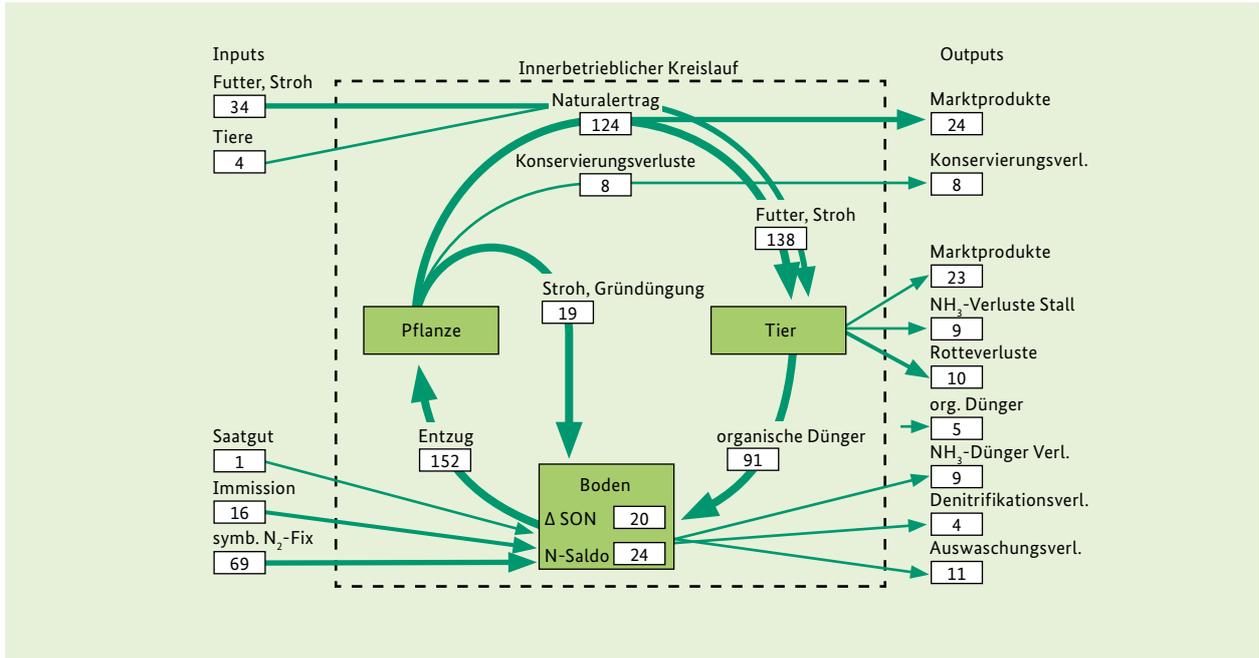


Abb. 4.21: Stickstoffkreislauf eines landwirtschaftlichen Betriebes (nach Hülsgen, 2015)

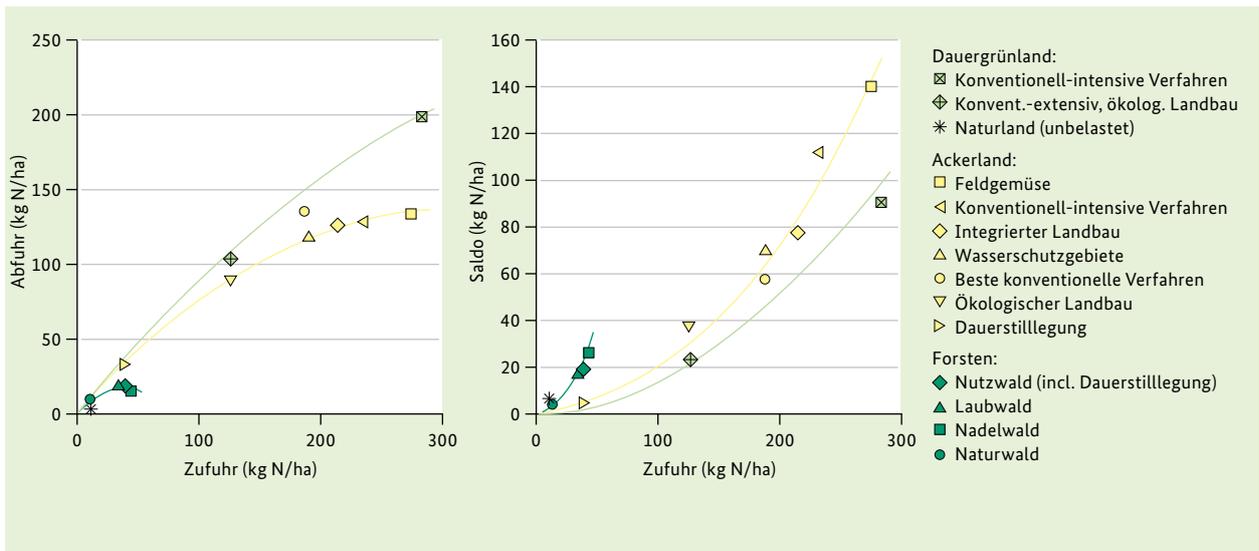


Abb. 4.22: Einfluss steigender N-Zufuhr auf die mit der Ertragsbildung abgefahrenen N-Mengen und die N-Salden bei Forst-, Grünland- und Ackerntzung (nach Kolbe, 2000, 2010a)

#### 4.4.1.2 Nährstoffbilanzierung

Durch die ständige Abfuhr an Nährstoffen über die Ernten muss in einem hoch produktiven System der Nährstoffkreislauf für die wichtigsten Nährstoffe im Auge behalten werden. Dies kann zunächst durch verschiedene Formen der Nährstoffbilanzierung geschehen (Tab. 4.11). Auf Basis des Betriebes bzw. der einzelnen Schläge können hierdurch die Quellen der Zufuhr und Abfuhr an Nährstoffen gegenübergestellt und der Einsatz durch Berechnung der Nährstoffeffizienz bewertet werden.

Ziel ist es, durch Regulierung der Nährstoffgehalte und Vorräte die Bodenfruchtbarkeit so einzustellen, dass durch jeden Nährstoff nach heutigem Maßstab ein optimales

Ertragsniveau der Fruchtarten gewährleistet werden kann. Hierzu hat sich ein fünfstufiger Bewertungsschlüssel bewährt, der seit vielen Jahren im Bereich der Grunddüngung und Kalkung und später auch auf die Ergebnisse der Humusbilanzierung angewendet wird (siehe Beispiel Grunddüngung, Abb. 4.23; sowie Humusbilanzen, Abb. 4.26). Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Anforderungen für eine optimale Bodenfruchtbarkeit bestehen derartige Klassifikationssysteme für Forsten, Grünland, Ackerland und Spezialkulturen. Aktuelle Hinweise zur Nährstoffversorgung, unter Berücksichtigung von Nährstoffüberschüssen durch Viehhaltung und Biogaserzeugung werden in einer separaten Schrift erscheinen.

Tab. 4.10: Methoden zur Untersuchung und Bilanzierung der Nährstoff- und Humusversorgung der Böden sowie zur Düngemittelbedarfsermittlung in der landwirtschaftlichen und gärtnerischen Praxis (Kolbe und Schuster, 2011, verändert)

Parameter	Methode	Handhabung
Datendokumentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Führung von Schlagkartei und Stallbuch (Achtung auf Vorhandensein von Schnittstellen zu anderen PC-Programmen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>zu jeder angebauten Fruchtart und Tierart, jährlich</li> <li>Bereitstellung von Informations- u. Dokumentations-Unterlagen zu Anbau, Düngung, Bodenuntersuchung etc.</li> </ul>
Boden, Standort	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bestimmung der Bodenart</li> <li>Texturanalyse (Sand, Schluff, Ton)</li> <li>Besonderheiten des Profils (Tiefgründigkeit, Grundwasserstand etc.)</li> <li>Klima- u. Wetter-Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>einmalige Erfassung</li> <li>Bereitstellung von Standortinformationen</li> </ul>
Humus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Humusbilanzierung u. Düngemittelbedarfsermittlung f. organische Substanz (Ackerland)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planung v. Fruchtfolge u. Dunganfall (Umstellung Ökolandbau)</li> <li>zu jeder deutlichen Änderung der Betriebsausgestaltung</li> <li>1 x je 1 – 2 Fruchtfolgerotationen</li> <li>Ziel: Versorgungsklassen*) C – D</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenuntersuchung der Ackerkrume auf: <math>C_{org}</math>, <math>N_T</math>, C/N-Verhältnis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 x Erhebungsuntersuchung, ggf. 1 x je Fruchtfolge</li> </ul>
Stickstoff (N)	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>N_{min}</math>-Untersuchung des Bodens: <math>NO_3</math>-N, <math>NH_4</math>-N (CaCl<sub>2</sub>-Extrakt, <math>N_{min}</math>-Methode), Tiefe: Bodenkrume + Untergrund (0 – 60 bzw. 90 cm Tiefe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>für jede Fruchtart jährlich vor dem Anbau</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Düngemittelbedarfsermittlung für N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 x vor Anbau jeder Fruchtart (unter Einbeziehung des Nährstoffbedarfs, <math>N_{min}</math>-Untersuchung, N-Nachlieferung u. weiterer Faktoren) bzw. entspr. d. Düngemittelverordnung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>N-Bilanzierung (Methoden Schlag-, Hoftor-, Stall-Bilanz, Nährstoffvergleich)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umstellungsplanung (Ökolandbau)</li> <li>1 x je Fruchtfolgerotation bzw. jährlich entspr. d. Düngemittelverordnung</li> </ul>
Schwefel (S)	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>S_{min}</math>-Untersuchung (CaCl<sub>2</sub>-Extrakt), Bodenkrume + Untergrund (0 – 60 bzw. 90 cm Tiefe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zu bedürftigen Fruchtarten</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>S-Bedarfsprognose: Schwefel-Schätzrahmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>im Bedarfsfall</li> </ul>
Kalk (Ca)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenuntersuchung der Ackerkrume: pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>-Methode)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle 3 – 5 Jahre (1 x je Fruchtfolgerotation)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Düngemittelbedarfsermittlung (Kalkung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle 3 – 5 Jahre (1 x je Fruchtfolgerotation)</li> <li>Ziel: Erreichung u. Sicherung d. Versorgungsklasse*) C</li> </ul>
Grundnährstoffe des Bodens: Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenuntersuchung der Ackerkrume auf pflanzenverfügbare Nährstoffe: P (DL-, CAL-Methode), K (DL-, CAL-Methode), Mg (CaCl<sub>2</sub>-Methode)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle 3 – 5 Jahre bzw. 1 x je Fruchtfolge</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Düngemittelbedarfsermittlung für P, K, Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle 3 – 5 Jahre (unter Einbeziehung der Ergebnisse d. Bodenuntersuchung)</li> <li>Ziel: Erreichung u. Sicherung d. Gehaltsklasse*) B (Ökolandbau) – C (konventioneller Landbau)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nährstoffbilanzierung für P, K, Mg (Methoden Schlag-, Hoftor-, Stall-Bilanz, Nährstoffvergleich)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 x je 1 – 2 Fruchtfolgerotationen bzw. entspr. d. Düngemittelverordnung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kationen-Austausch-Kapazität (KAK): <math>Na^+</math>, <math>K^+</math>, <math>Mg_2^+</math>, <math>Ca_2^+</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im Bedarfsfall (unter Anleitung)</li> </ul>
Spurenelemente (Mikronährstoffe) des Bodens	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenuntersuchung der Ackerkrume auf pflanzenverfügbare Nährstoffe: Bor (B), Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Zink (Zn), Eisen (Fe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 x Erhebungsuntersuchung</li> <li>bei Bedarf: 1 x je 2 Fruchtfolgerotationen</li> </ul>

Parameter	Methode	Handhabung
Pflanzenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung auf Haupt- und Spurenelemente</li> <li>• visuelle Diagnose von Ernährungsstörungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Bedarfsfall</li> <li>• Vergleich v. Laboranalysen mit Tabellenwerten der betreffenden Nährstoffgehalte zu bestimmten Vegetationsphasen d. Fruchtarten</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blattdüngung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ziel: entspr. Labor- od. visueller Diagnose Behebung des Nährstoffmangels in frühen Vegetationsphasen der Fruchtarten</li> </ul>

\*) VDLUFA-Versorgungsklassen: A = sehr niedrig; B = niedrig; C = mittel; D = hoch; E = sehr hoch

Tab. 4.11: Verfahren der Nährstoffbilanzierung (KTBL, 2015)

#### Hofter-, Betriebsbilanz (Brutto)

Nährstoffzufuhr in den Betrieb	-	Nährstoffabfuhr aus dem Betrieb	=	Nährstoffsaldo, Überhang bzw. Defizit
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Zukauf von Vieh</li> <li>+ Zukauf von Futtermitteln</li> <li>+ Zukauf von organischen und mineralischen Düngemitteln</li> <li>+ Zukauf von Wirtschaftsdüngern</li> <li>+ Zukauf von Saat- und Pflanzgut</li> <li>+ Legume N-Bindung</li> <li>+ Asymbiotische N-Bindung</li> <li>+ N-Deposition (Netto)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Nährstoffabfuhr aus dem Betrieb</li> <li>- Verkauf tierischer Produkte</li> <li>- Verkauf pflanzlicher Produkte</li> <li>- Verkauf Wirtschaftsdünger und sonstiger Produkte</li> <li>- Abgleich Bestand (<math>\pm</math> Vieh, Dünger, Futter, Marktprodukte)</li> </ul>		NH <sub>3</sub> -Verluste extra ausweisen

#### Flächenbilanz (Netto, entsprechend Düngeverordnung)

Nährstoffzufuhr auf die Gesamtfläche	-	Nährstoffabfuhr von der Gesamtfläche	=	Nährstoffsaldo, Überhang bzw. Defizit
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Zukauf organische und mineralische Düngemittel</li> <li>+ Berechnung Nährstoffanfall anhand der Stallplätze (Nährstoffausscheidungen)</li> <li>+ Legume N-Bindung</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marktfrüchte</li> <li>- Futter, Grünland</li> <li>- Abgabe Wirtschaftsdünger, Stroh</li> <li>- N-Verluste Wirtschaftsdünger</li> </ul>		

#### Schlagbilanz (Brutto)

Nährstoffzufuhr auf den Einzelschlag	-	Nährstoffabfuhr vom Einzelschlag	=	Nährstoffsaldo, Überhang bzw. Defizit
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Organische Düngung mit Wirtschaftsdüngern, Bodenverbesserungsmitteln etc.</li> <li>+ Mineralische Düngemittel</li> <li>+ Legume N-Bindung</li> <li>+ Asymbiotische N-Bindung</li> <li>+ Zukauf von Saat- und Pflanzgut</li> <li>+ Gesamt-N-Deposition</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marktfrüchte</li> <li>- Sonstige Ernteprodukte (Futter, Stroh)</li> </ul>		NH <sub>3</sub> -Verluste durch organische Düngung extra ausweisen

Gehaltsklasse	Höhe der Düngung	Zielstellung	
A Sehr niedrig	stark erhöhte Düngung gegenüber der Abfuhr	deutliche Erhöhung der verfügbaren Gehalte	
B Niedrig	erhöhte Düngung gegenüber der Abfuhr	Erhöhung der verfügbaren Gehalte	
C Mittel, optimal	abfuhrorientierte Erhaltungsdüngung	Aufrechterhaltung der verfügbaren Gehalte	
D Hoch	reduzierte Düngung gegenüber der Abfuhr	langsame Abnahme der verfügbaren Gehalte	
E Sehr hoch	keine Düngung	Abnahme der verfügbaren Gehalte	

Abb. 4.23: Allgemeines Schema des VDLUFA für die Ableitung von Düngungsempfehlungen zur Gewährleistung eines optimalen Ertragsniveaus der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Versorgung des Bodens mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen (nach Albert et al., 2007)

Tab. 4.12: Richtwerte für Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen bei unterschiedlichen Bodenarten (KTBL, 2015, verändert)

		Gehaltsklasse	Bodenart					
			S	SI-IS	SL-sL	L	LT-T	Mo
pH-Wert								
Humusgehalt [%]	<4,0	B	4,6–5,3	4,9–5,7	5,1–6,0	5,3–6,2	5,4–6,3	
		C	5,4–5,8	5,8–6,3	6,1–6,7	6,3–7,0	6,4–7,2	
	4,1–8,0	B	4,3–4,9	4,6–5,3	4,8–5,5	5,0–5,7	5,0–5,8	
		C	5,0–5,4	5,4–5,9	5,6–6,2	5,8–6,5	5,9–6,7	
	8,1–15,0	B	4,0–4,6	4,2–4,9	4,4–5,1	4,6–5,3	4,6–5,4	
		C	4,7–5,1	5,0–5,5	5,2–5,8	5,4–6,1	5,5–6,3	
	15,1–30	B	3,7–4,2	3,8–4,5	3,9–4,7	4,1–4,9	4,1–5,0	
		C	4,3–4,7	4,6–5,1	4,8–5,4	5,0–5,7	5,1–5,9	
>30	B						<4,2	
	C						4,3	
Phosphor			mg/100 g Boden					
		B	2,1–4,4	2,1–4,4	2,1–4,4	2,1–4,4	2,1–4,4	2,1–4,4
		C	4,5–9,0	4,5–9,0	4,5–9,0	4,5–9,0	4,5–9,0	4,5–9,0
Kalium			[mg/100 g Boden]					
		B	3,0–5,9	4,0–7,9	4,0–8,9	5,0–10,9	6,0–11,9	4,0–7,9
		C	6,0–10,9	8,0–11,9	9,0–14,9	11,0–16,9	12,0–21,9	8,0–12,9
Magnesium			[mg/100 g Boden]					
		B	2,1–3,5	2,6–4,5	3,1–5,5	4,1–7,5	5,1–9,5	2,1–3,5
		C	3,6–5,0	4,6–6,5	5,6–8,0	7,6–10,9	9,6–14,0	3,6–5,0
Bor			[mg/kg Boden]					
pH-Wert	≤ 5,5	C	0,10–0,15					
	> 5,5	C	0,15–0,25					
	≤ 6	C		0,12–0,18	0,15–0,25	0,20–0,35	0,20–0,35	
	> 6	C		0,20–0,30	0,25–0,40	0,35–0,60	0,35–0,60	
Kupfer			[mg/kg Boden]					
		C	1,0–2,0	1,0–2,0	1,2–2,5			
pH-Wert	< 7,0	C				2,0–4,0	2,0–4,0	
	≥ 7,0	C				1,2–2,5	1,2–2,5	
Mangan			[mg/kg Boden]					
pH-Wert	< 5,1	C	3–6	3–6				
	5,1–5,5	C	6–10	6–10				
	5,6–6,0	C	10–20	10–20				
	> 6,0	C	25–50	25–50				
	< 5,5	C			8–15			
	5,5–6,4	C			20–30			
	> 6,4	C			30–50			
		C				30–60	30–60	
Zink			[mg/kg Boden]					
		C	1,0–2,5	1,0–3,0	1,5–3,0	1,5–3,0	1,5–3,0	

#### 4.4.1.3 Grund- und Mikronährstoffe

Alle Organismen benötigen eine ganze Reihe an Nährstoffen, ohne die eine optimale Ausgestaltung des Lebens nicht möglich ist. Aus Sicht der Praxis sind hierzu insbesondere die Makroelemente N, S, P, K, Mg und Ca sowie die Mikro- und Spurenelemente B, Cu, Mn, Mo, Zn und Fe zu nennen. Andere Elemente brauchen nicht beachtet werden, da sie i.d.R. in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

In Tabelle 4.12 sind die für konventionelle und ökologische landwirtschaftliche Produktionsverfahren anzustrebenden optimalen Versorgungsbereiche der Klassen B und C für die wichtigsten Makro- und Mikronährstoffe zusammengefasst. Für die Nährstoffe Stickstoff und Schwefel bestehen eigene Bewertungsverfahren, die hier nicht weiter erläutert werden können (Tab. 4.10).

Als weitere Maßnahme sind entsprechend den bewerteten Ergebnissen dann bestimmte Handlungsanweisungen abzuleiten. Mit Hilfe von einfachen Bleistiftmethoden oder unter Einsatz von elektronischen Berechnungsprogrammen werden i.d.R. bereits in den Servicestellen der Laboreinrichtungen im Bedarfsfall, z. B. bei entsprechend unzureichender Bodenversorgung, Düngungsempfehlungen berechnet und der Betriebsleitung mitgeteilt.

#### 4.4.2 Humusversorgung

##### 4.4.2.1 Grundlagen

Als Humus wird im Allgemeinen die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Substanz im Boden bezeichnet. Humus ist als ein komplexes Gemisch von organischen Stoffen aus pflanzlicher, tierischer und mikrobieller Herkunft zu verstehen, das permanenten Ab-, Um- und Aufbauprozessen unterliegt.

Wie aus einer entsprechenden Auswertung von Dauerversuchen zu entnehmen ist, werden durch Anhebung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz von einem deutlichen Mangelzustand bis zur oberen Grenze gewöhnlicher ackerbaulicher Möglichkeiten sowohl physikalische, chemische als auch biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit beeinflusst (Tab. 4.13).

Die in Ackerböden vorzufindenden unterschiedlichen Humusgehalte resultieren aus Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren. Im Ergebnis der langjährigen Wirkung dieser Faktoren stellt sich ein standort- und bewirtschaftungstypischer Humusgehalt ein.

Tab. 4.13: Auswirkungen einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz vom Niveau der Unterversorgung (= 100%) auf einen guten bis sehr guten Versorgungszustand auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit von Ackerland (Zusammenstellung von Ergebnissen aus Dauerfeldversuchen, Kolbe, 2012)

Merkmal		Veränderung in %	
<b>physikalische Eigenschaften</b>			
Lagerungsdichte		-2	bis -13
Porenvolumen		+1	bis +3,5
Aggregatstabilität		+8	bis +34
Anteil Makroporen		+8	bis +11
Infiltrationsrate		+27	bis +80
Wasserkapazität		+3	bis +4
nutzbare Feldkapazität	S	+24	bis +28
	L	+13	bis +15
<b>chemische Eigenschaften</b>			
C <sub>org</sub> und N <sub>t</sub> Gehalte		+30	
potenzielle N-Mineralisierung		+26	bis +33
effektive Kationenaustauschkapazität	S	+20	
	L	+10	
<b>biologische Eigenschaften</b>			
mikrobielle Masse		+6	bis +50
Regenwurmdichte		+38	bis +40
Fruchtartenertrag	MW	+10 (kon)	bis +33 (öko)
	Max	+123 (kon)	bis +127 (öko)

S = Sand; L = Lehm; kon = konventioneller Landbau; öko = ökologischer Landbau; MW = Mittelwert; Max = maximale Werte

Die überwiegenden Anteile der landwirtschaftlichen Flächen mit Ackernutzung können zu den weitgehend grundwasserbeeinflussten Standorten gezählt werden. Der Humusgehalt und die Umsetzung der organischen Substanz auf diesen Standorten sind im Wesentlichen von Faktoren des Klimas, des Bodens und der Bewirtschaftung abhängig. Zusammenfassend kann die folgende Gewichtung der Einflussfaktoren auf den Humusgehalt angenommen werden (Kolbe, 2012: Auswertung von ca. 240 Dauerversuchen aus Mitteleuropa):

- Klima bzw. Witterung mit meistens über 50 %
- Eigenschaften des Bodens mit 20 – 30 %
- Maßnahmen der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, pH-Wert, Düngung, Bodenbearbeitung etc.) mit 5 – 30 % der Variationsbreite.

Aufgrund der Bindung von Humuspartikeln an die Tonfraktion des Bodens ist in vielen Untersuchungen ein Anstieg der Humusgehalte infolge steigender Ton- und Feinanteile des Bodens ermittelt worden. Darüber hinaus wird der Humusumsatz mit ansteigenden Temperaturen stark positiv beeinflusst und bei hoher Wasserversorgung des Bodens gewöhnlich verringert. Abbildung 4.24 zeigt eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen steigenden Feinanteilen (Ton + Feinschluff) des Bodens und den Niederschlägen auf die Humusgehalte. Durch diese komplexen Prozesse haben sich mit der Zeit ganz unterschiedlich hohe Gehalte an Humus auf den verschiedenen Standorten eingestellt.

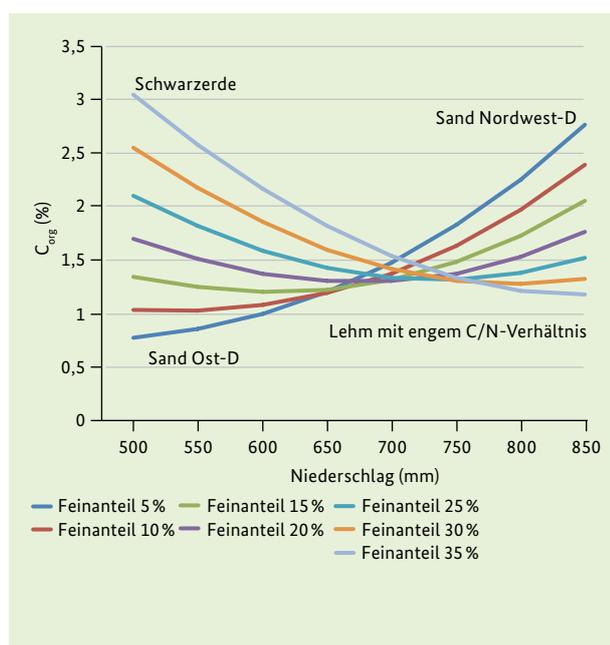


Abb. 4.24: Wechselwirkung zwischen Feinanteilen und Niederschlags-höhe auf die Humusgehalte des Bodens (Kolbe, LfULG: Ergebnisse regressionsanalytischer Auswertungen von Dauerversuchen)

#### 4.4.2.2 Möglichkeiten zur Einschätzung der Humusversorgung

Die **Bodenuntersuchung** auf den Gehalt an Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Stickstoff ( $N_t$ ) sowie das C/N-Verhältnis des Bodens vermittelt Informationen über die allgemeine Höhe der Humusgehalte und der -qualität eines Standortes.

Bestimmungsmethoden für Kohlenstoff:

- Elementaranalyse (trockene Veraschung, DIN ISO 10964)
- Bestimmung des Glühverlustes (DIN ISO 19684 Teil 3) für Böden mit über 80% Sand

Der Kohlenstoffanteil im Humus beträgt in weiten Grenzen im Durchschnitt 58%. Im Allgemeinen wird mit folgender Gleichung umgerechnet:

$C_{org}$ -Gehalt x 1,724 (Schwankungsbreite: 1,4 – 3,3) = Humusgehalt (gemessen in % der TM des Bodens).

Der Gesamt-Stickstoff ( $N_t$ ) wird mittels der Dumas-Methode bestimmt. Das  $C_{org}/N_t$ -Verhältnis ( $N_t = 1$ ) ist ein klassischer Indikator für die Qualität der organischen Materialien und für die Stickstoffverfügbarkeit. Je enger das C/N-Verhältnis ist, umso schneller erfolgt der mikrobielle Abbau der zugeführten organischen Primärschubstanz (OPS). Ab C/N-Verhältnissen von >20 ist mit dem Umsatz eine zunehmende Festlegung an N verbunden.

#### 4.4.2.3 Humusbilanzierung

Der Einfluss von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Humusversorgungszustand der Böden kann, im Gegensatz zur Nährstoffversorgung, meistens nicht direkt aus der Bodenuntersuchung unter Ableitung von Richtwerten für optimale Humusgehalte ermittelt werden. Zur Beurteilung von Bewirtschaftungsveränderungen sind in der Regel Methoden erforderlich, die im Vergleich zur Bodenuntersuchung durch eine deutlich höhere Sensibilität gekennzeichnet sind (Körschens, 2010). Daher haben Methoden der Humusbilanzierung verstärkte Aufmerksamkeit erlangt, bei denen die Ermittlung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz aus der Fraktion des Nährhumus im Mittelpunkt steht (Abb. 4.25).

Tab. 4.14: Bewertung der Humussalden (Ebertseder et al., 2014)

Versorgungs-kategorie	Bewertung	Konventioneller Landbau HÄQ <sup>1)</sup> [kg/ha]	Ökologischer Landbau HÄQ <sup>1)</sup> [kg/ha]
A	Sehr niedrig	≤-200	≤-200
B	Niedrig	-200 bis -76	-200 bis -1
C	Optimal	-75 bis +100	0 bis +300
D	Hoch	101 bis +300	+301 bis +500
E	Sehr hoch	≥+300	≥+500

1 Humusäquivalent

Humuszufuhr	-	Humusabbau	=	Humussaldo
Reproduktionsleistung organischer Materialien (OPS) (Ernte- und Wurzelrückstände, organische Dünger)		Wirkung von Bodenart, Klima und Anbauverfahren		Veränderung der Humusvorräte des Bodens

Abb. 4.25: Das Prinzip der Humusbilanzierung (Kolbe, 2007)

Zu den einfachen, beschreibenden Verfahren gehört z. B. die VDLUFA-Methode oder die STAND-Methode zur Humusbilanzierung (Ebertseder et al., 2014; Kolbe, 2010b), deren Berechnungsgrundlagen aus mathematisch-statistischen Auswertungsarbeiten sowie von empirisch geprüften Erfahrungswerten aus einer Vielzahl von Dauerversuchen stammen. Unter Verwendung von Schlagkarteiaufzeichnungen können zu erwartende Veränderungen der Humusversorgung des Bodens direkt aus der Humusreproduktion mittels organischer Substanz und der aktuellen Bewirtschaftung der Ackerflächen abgeleitet werden. Mit diesen einfachen Methoden lässt sich so eine Humusbilanz nach folgender Gleichung erstellen (kg HÄQ/ha u. Jahr):

- + Humifizierungsleistung humusmehrender Fruchtarten
- Humifizierungsleistung humuszehrender Fruchtarten

---

- + Humifizierungsleistung organischen Materials

---

- = Saldo

---

Mit zunehmender Nutzung des Personal-Computers finden heute auch sog. Prozessmodelle Eingang in Praxis und Beratung. Diese Methoden bilden die fachlichen Grundlagen in Form ihrer komplexen naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten im Zeitverlauf ab. Als Beispiel kann das Modell CCB (CANDY Carbon Balance) genannt werden (Franko et al., 2011), das aufgrund einfach zugänglicher Eingangsdaten zur Berechnung der C- und N-Dynamik des Bodens in Jahrescheiben genutzt werden kann.

Die erlangten Ergebnisse der Humusbilanzierung können in Abhängigkeit vom Anbausystem mit Hilfe einer fünf-stufigen Skala einer Bewertung unterzogen werden (Tab. 4.14). Es wird die Versorgungsklasse C angestrebt, bei der ein optimales Ertragsniveau der Fruchtarten auf Dauer gesichert werden kann (Tab. 4.10).

In Abbildung 4.26 wurden Ergebnisse der durchschnittlichen Fruchtartenerträge aus vielen Dauerversuchen den Ergebnissen der Humusbilanzierung gegenübergestellt und der Bereich der Versorgungsklasse C eingezeichnet (grün).



Identifizierung von Bodentieren (Foto: St. Schrader)

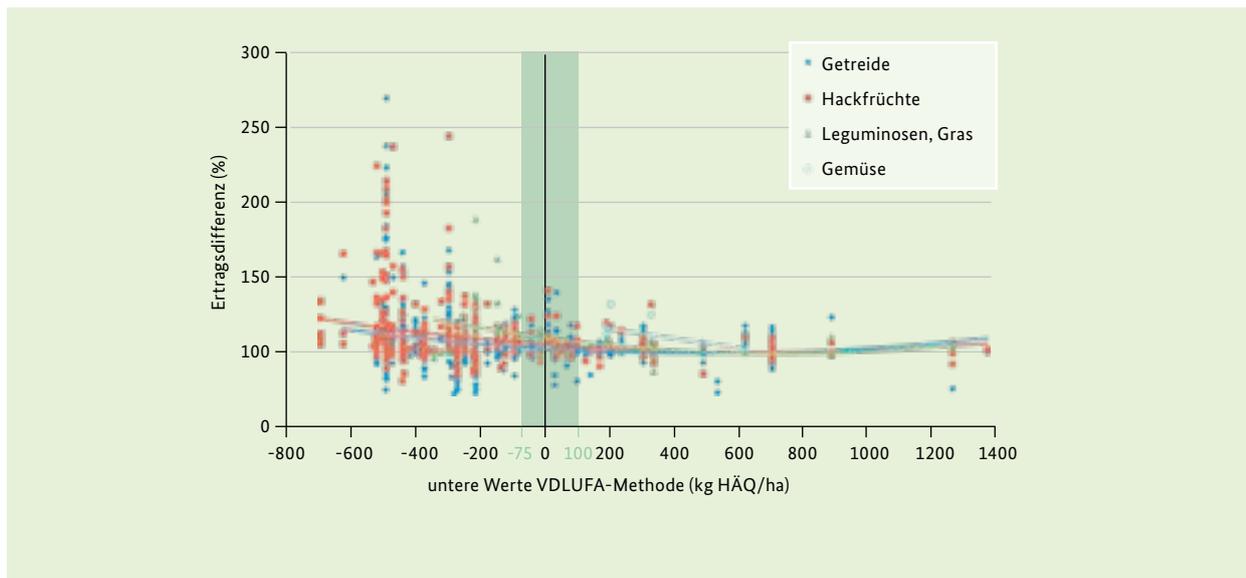


Abb. 4.26: Einfluss des Versorgungsniveaus mit organischer Substanz und zusätzlicher organischer Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtartengruppen (Auswertung von 1000 Ertragsdifferenzen aus 39 Dauerversuchen, Versorgungsgruppe C Grün ausgewiesen, Kolbe, 2012, verändert)

Bei hohen Fehlbeträgen an organischer Substanz (unter -200 kg HÄQ/ha = Versorgungsgruppe A) kann es durch eine Verbesserung des Versorgungsniveaus mit organischer Substanz (organische Düngung, Fruchtfolge-Zusammensetzung) zu einer deutlichen Anhebung der Erträge kommen, deren Ausmaß auch von der angebauten Fruchtart abhängig ist.

Bei Vorlage von hohen positiven Salden von über 300 HÄQ/ha (= Klasse E) werden demgegenüber keine Ertragseffekte mehr festgestellt, die über der durchschnittlichen Fehler-schwankung liegen ( $\pm 15 - 20\%$  Ertragsdifferenz). Bei Einhaltung der anzustrebenden Versorgungsgruppe C kann ein optimales Ertragsniveau der angebauten Fruchtarten gewährleistet werden (Abb. 4.26).

#### 4.4.3 Fazit

Zur Nährstoffversorgung gehören die Hauptnährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie Mikronährstoffe und der angepasste pH-Wert. Der Humusgehalt ist standorttypisch zu erhalten bzw. zu erreichen. Maßnahmen zum Erhalt der Humusgehalte sind der aid-Broschüre „Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“, Nr. 3614 (Brunotte et al., 2015) zu entnehmen. Generelle Empfehlungen hierzu gibt es bisher nicht.

## 4.5 Bodenazidität und Kalkbedarf

(Karl Severin)

Der pH-Wert eines Bodens ist ein Maß für dessen Azidität. Die pH-Werte der natürlichen Böden der Erde liegen zwischen pH 3 und 10. In Deutschland reicht die pH-Spannbreite der landwirtschaftlichen Böden – von Ausnahmen abgesehen – von pH 3 (u. a. Hochmoore, saure Braunerden) bis pH 8 (u. a. Rendzinen). pH-Werte von weniger als 3 treten auf sulfatsauren Böden auf und sind die Ausnahme. In humiden Klimagebieten sind alkalische Böden die Ausnahme, da nach Auflösung und Auswaschung von gesteinsbürtigen Carbonaten eine Versauerung einsetzt.

Der pH-Wert charakterisiert die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines Bodens und spiegelt dessen Entstehung wider. Er liefert Aussagen über die Aggregatstabilität und Porosität von Mineralböden, die

Verfügbarkeit von Nährstoffen und anorganischen Schadstoffen (u. a. Schwermetalle), den Lebensraum von Bodenorganismen, den Humusgehalt und die Eignung als Standort von Nutzpflanzen.

Der pH-Wert ist ein Maß für die qualitative nicht aber für die quantitative Bodenacidität. Die Bodenacidität entspricht der Menge an Basen Ca, Mg, K, Na, die zur Anhebung vom Ausgangs-pH-Wert auf pH 7 erforderlich ist. Sie entspricht dem Kalkbedarf landwirtschaftlich genutzter Böden oder der Basenneutralisierungskapazität.

Unter den humiden mitteleuropäischen Klimabedingungen ist Calcium das am stärksten vertretene austauschbar gebundene basische Element an der Austauschoberfläche



Kartierung von Regenwurm-Losungshaufen  
(Foto: Q. Schorpp)

der Böden mit über 80% der Austauschkapazität gefolgt von Magnesium (5 – 15%), Kalium (2 – 5%) und Natrium (< 2%). Mit zunehmender Bodenacidität nehmen der Gehalt an basischen Elementen ab und der Gehalt an Aluminiumionen  $Al^{3+}$  zu. Mit zunehmender Versauerung nimmt die Versorgung mit den Nährstoffen Ca, Mg, K somit ab. Unterhalb eines pH-Wertes von 4,5 steigt der Anteil an  $Al^{3+}$  sehr stark an. Dieses führt zu hohen Al-Konzentrationen in der Bodenlösung, was bei empfindlichen Pflanzenarten zu einer Al-Toxizität mit gehemmtem Wurzelwachstum führt.

Basenverluste oder für landwirtschaftliche Böden gleichbedeutende Kalkverluste werden verursacht durch: Niederschläge (mit Niederschlägen zugeführte natürliche Kohlensäure, Schwefel- und Salpetersäure aus anthropogenen Emissionen, Ammoniak aus landwirtschaftlichen Emissionen), Bildung von Kohlensäure aus der Atmung von Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln, Basen-Entzug durch Kulturpflanzen, Abgabe von organischen Säuren durch Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen, Abgabe von Protonen/Wasserstoffionen durch Pflanzenwurzeln, Oxidation von Ammonium ( $NH_4^+$ ) zu Nitrat ( $NO_3^-$ ), und in Ausnahmefällen die Freisetzung von Protonen aus der Oxidation von löslichen  $Fe^{2+}$ - und  $Mn^{2+}$ -Ionen und Fe-Sulfiden.

Es besteht eine indirekte Beziehung zwischen pH-Wert einerseits und dem Wachstum und den Erträgen von Kulturpflanzen andererseits.

Der optimale pH-Wert für ein optimales Pflanzenwachstum und optimale Erträge ist keineswegs pH 7. Zu den säureliebenden Kulturpflanzen gehören z. B. Roggen, Kartoffeln, Hafer, Rotklee und Weißklee. Sie sind z. B. in der Lage, Phosphat im sauren Bereich zu mobilisieren und sind tolerant gegen toxische Stoffe im sauren Bereich (z. B. Aluminium). Zu den kalkliebenden bzw. säureempfindlichen Kulturpflanzen zählen z. B. Gerste, Weizen und Zuckerrüben. Sie reagieren empfindlich auf die Immobilisierung von Phosphat im



Messung mikrobiologischer Parameter  
(Foto: Ch. Emmerling)

sauren Bereich, sind empfindlich gegen toxische Stoffe im stark sauren Bereich und reagieren empfindlich auf eine schlechte Bodenstruktur auf mittleren und schweren Böden.

Jahreszeitliche pH-Wertschwankungen treten durch unterschiedliche biotische Aktivitäten im Frühjahr und Herbst sowie nach durchgeführten Düngungsmaßnahmen auf.

Der pH-Wert von landwirtschaftlichen Böden wird als pH-Wert einer Bodensuspension in einer 0,01 molaren Calciumchlorid-Lösung (pH- $CaCl_2$ ) gemessen. Der optimale pH-Wert eines Bodens wird maßgeblich bestimmt durch seine Bodenart und seinen Humusgehalt. Aus diesen drei Größen wird der Kalkbedarf zur Erreichung des einen Standort charakterisierenden optimalen pH-Wertes ermittelt. Grundsätzlich gilt, dass der optimale pH-Wert umso höher ist, je höher sein Ton/Schluff-Gehalt und umso niedriger sein Humusgehalt ist. Analog zur Nährstoffversorgung mit Phosphor, Kalium und Magnesium werden die pH-Werte landwirtschaftlicher Böden Klassen A bis E zugeordnet (Tab. 4.15). Diese Klassen charakterisieren die Kalkversorgung des Bodens. Bei der Wahl der pH-Bereiche für die Klassen wurden Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit wie Bodenstruktur mit stabilem Krümelgefüge, Nährstoffverfügbarkeit, Bedingungen für das Bodenleben, Schwermetallverfügbarkeit und Al-Toxizität einbezogen. Außerdem sind Erfahrungen aus Wachstumsbeobachtungen und Bodengefügeansprachen eingeflossen. Die Klasse C ist anzustreben. In Klasse A ist die Nährstoffverfügbarkeit eingeschränkt, auf mittleren und schweren Böden ist die Bodenstruktur verschlechtert, die Schwermetallaufnahme ist erhöht und es können Aluminiumtoxizitäten auftreten. Die Folge sind Ertragsverluste bis zu vollständigen Ernteaussfällen. In Klasse E ist die Nährstoffverfügbarkeit bestimmter Nährstoffe eingeschränkt. Die Manganverfügbarkeit ist – insbesondere auf sandigen Böden – stark vermindert. Ertrags- und Qualitätsbeeinträchtigungen bis hin zu vollständigen Ertragsausfällen sind die Folge.

Tab. 4.15: Definition der pH-Klassen für die Kalkversorgung des Bodens sowie des Kalk-Düngungsbedarfs mit dem Ziel der Erreichung und Erhaltung der anzustrebenden, optimalen Bodenreaktion auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) (VDLUFA, 2000)

pH-Klasse / Kalkversorgung	Beschreibung von Zustand und Maßnahme	Kalkdüngungsbedarf
<b>A / sehr niedrig</b>	<b>Zustand:</b> Erhebliche Beeinträchtigung von Bodenstruktur und Nährstoffverfügbarkeit, sehr hoher Kalkbedarf, signifikante Ertragsverluste bei fast allen Kulturen bis hin zum gänzlichen Ertragsausfall, stark erhöhte Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen im Boden <b>Maßnahme:</b> Kalkung hat weitgehend unabhängig von der anzubauenden Kultur Vorrang vor anderen Düngungsmaßnahmen	Gesundungskalkung
<b>B / niedrig</b>	<b>Zustand:</b> Noch keine optimalen Bedingungen für Bodenstruktur und Nährstoffverfügbarkeit, hoher Kalkbedarf, meist noch signifikante Ertragsverluste bei kalkanspruchsvollen Kulturen, erhöhte Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen im Boden <b>Maßnahme:</b> Kalkung erfolgt innerhalb der Fruchtfolge bevorzugt zu kalkanspruchsvollen Kulturen	Aufkalkung
<b>C / anzustreben, optimal</b>	<b>Zustand:</b> Optimale Bedingungen für Bodenstruktur und Nährstoffverfügbarkeit sind gegeben, geringer Kalkbedarf, kaum bzw. keine Mehrerträge durch Kalkdüngung <b>Maßnahme:</b> Kalkung innerhalb der Fruchtfolge zu kalkanspruchsvollen Kulturen	Erhaltungskalkung
<b>D / hoch</b>	<b>Zustand:</b> Die Bodenreaktion ist höher als anzustreben, kein Kalkbedarf <b>Maßnahme:</b> Unterlassung einer Kalkung	keine Kalkung
<b>E / sehr hoch</b>	<b>Zustand:</b> Die Bodenreaktion ist wesentlich höher als anzustreben und kann die Nährstoffverfügbarkeit sowie den Pflanzenertrag und die Qualität negativ beeinflussen <b>Maßnahme:</b> Unterlassung jeglicher Kalkung, Einsatz von Düngemitteln, die infolge physiologischer bzw. chemischer Reaktion im Boden versauernd wirken	keine Kalkung und keine Anwendung physiologisch bzw. chemisch alkalisch wirkender Düngemittel

Tab. 4.16: Rahmenschema für Ackerland zur Einstufung der pH-Werte des Bodens (CaCl<sub>2</sub>-Methode) in pH-Klasse C (anzustrebender/optimaler pH-Bereich) sowie Erhaltungskalkung (dt CaO/ha) (VDLUFA, 2000)4)

Bodenartengruppe/ vorwiegende Bodenart		Humusgehalt des Bodens (%)				
		≤ 4	4,1 bis 8,0	8,1 bis 15,0	15,1 bis 30	> 30
pH-Werte der Klasse C und Erhaltungskalkung						
<b>1 / Sand</b>	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,4 bis 5,8 6	5,0 bis 5,4 5	4,7 bis 5,1 4	4,3 bis 4,7 3	
<b>2 / schwach lehmiger Sand</b>	pH-Klasse C dt CaO/ha	5,8 bis 6,3 10	5,4 bis 5,9 9	5,0 bis 5,5 8	4,6 bis 5,1 4	
<b>3 / stark lehmiger Sand</b>	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,1 bis 6,7 14	5,6 bis 6,2 12	5,2 bis 5,8 10	4,8 bis 5,4 5	
<b>4 / sandiger/ schluffiger Lehm</b>	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,3 bis 7,0 <sup>1)</sup> 17	5,8 bis 6,5 15	5,4 bis 6,1 13	5,0 bis 5,7 6	
<b>5 / toniger Lehm bis Ton</b>	pH-Klasse C dt CaO/ha	6,4 bis 7,2 <sup>1)</sup> 20	5,9 bis 6,7 18	5,5 bis 6,3 16	5,1 bis 5,9 7	
<b>6 / Hochmoor und saurer Niedermoore<sup>2)</sup></b>	pH-Klasse C dt CaO/ha					4,3 <sup>3)</sup>

1) auf karbonathaltigen Böden (freier Kalk): keine Erhaltungskalkung

2) auf einem Großteil der Niedermoore sind die pH-Werte geogen bedingt &gt; 6,5

3) keine Erhaltungskalkung

4) kalkanspruchsvolle Kulturen; Kalkbedarf für eine i.d.R. dreijährige Fruchtfolge

Der bodenspezifische Kalkbedarf (VDLUFA, 2000) wurde von pH- und Ertragswirkungen aus Ergebnissen zahlreicher Feldversuche zur Kalkdüngung, die auf Standorten unterschiedlicher Bodenart und unterschiedlichen Humusgehaltes durchgeführt wurden, abgeleitet. Die oben genannten Aspekte der Bodenfruchtbarkeit wurden berücksichtigt.

Die so abgeleiteten Mengen für die Erhaltungskalkung sind in Tabelle 4.16 aufgeführt. Die Erhaltungskalkung fällt umso höher aus, je höher der anzustrebende pH-Wert (Klasse C)

und dementsprechend je höher der Tongehalt und je niedriger der Humusgehalt des Bodens ist.

Der pH-Wert sollte regelmäßig alle drei bis vier Jahre im Rahmen der „Bodengrunduntersuchung“ überprüft werden. Für Probenahme und Analyse sind VDLUFA-Methoden anzuwenden. Zur Umgehung der jahreszeitlichen pH-Wertschwankungen und des dadurch bedingten Untersuchungsfehlers sollte die Bodenprobenahme zur gleichen Jahreszeit entnommen werden.

## 4.6 Bodenbiologische Aktivität

(Christoph Emmerling, Stefan Schrader)

Die Vielfalt der Arten und ihrer funktioneller Gruppen sowie ihre meist lebenslange Exposition im Boden bei geringer Mobilität qualifizieren Bodenorganismen allgemein als besonders geeignete Bioindikatoren für Umweltveränderungen. Dieses gilt gerade auch für die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. Bodenbiologische Parameter können der Beschreibung der aktuellen Bodenfruchtbarkeit dienen, zur Überwachung von Veränderungen in einem Langzeit-Monitoring beitragen sowie zur Ableitung von Prognosen für zukünftige Entwicklungen der Bodenfruchtbarkeit herangezogen werden.

Mikrobielle Biomasse, mikrobielle Aktivität (z. B. Basalatmung) und Enzymaktivitäten sind sensible und aussagekräftige Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit, um Veränderungen der Bewirtschaftung und Bodenbearbeitung, sowie von Schadstoffeinflüssen anzuzeigen. Bodenmikroorganismen reagieren allgemein sehr dynamisch und kurzfristig auf Veränderungen im Boden. Die mikrobielle Biomasse zum Beispiel zeigt sehr sensitiv Veränderungen in der Bodenbewirtschaftung an, lange bevor Veränderungen im Kohlenstoff- oder Stickstoffgehalt der Böden messbar sind (Powlson et al., 1987). Zwar sind starke Veränderungen in der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft ohne Veränderung ihrer Biomasse beobachtet worden, allerdings ist bis heute nicht abschließend die Bedeutung der Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft im Hinblick auf ihre Funktionsfähigkeit geklärt. Eine um 99% reduzierte mikrobielle Biomasse zeigte z. B. eine Strohabbaurrate vergleichbar der ursprünglichen mikrobiellen Biomasse (Chander et al., 2002).

Unter den Bodentieren dienen insbesondere Einteilungen in verschiedene funktionelle Gruppen als verlässliche Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit. Der hohe Spezialisierungsgrad freilebender Boden-Nematoden ermöglicht eine Klassifizierung in sechs Ernährungstypen, die durch ihre Wechselwirkungen bereits komplette Nahrungsnetze abbilden. Ein bewährter Indikator ist der sogenannte „nematode channel ratio“ (NCR) (Yeates, 2003), der auf dem Verhältnis von bakterienfressenden und pilzfressenden Nematoden

beruht und einen Wertebereich zwischen 0 und 1 abdeckt. Verschiebt sich der NCR in Richtung 0, weist dies auf einen schnelleren bakteriengesteuerten Umsatz organischer Substanz hin. NCR-Werte nahe 1 zeigen einen langsameren pilzgesteuerten Umsatz an.

Regenwürmer lassen sich anhand ihrer Pigmentierung in die drei funktionellen Gruppen der Tiefgräber (anektische Arten wie z. B. *Lumbricus terrestris*: vorderes Drittel bis zum Gürtel pigmentiert), der Mineralbodenformen (endogäische Arten wie z. B. *Aporrectodea caliginosa*: unpigmentiert) und der Flachgräber bzw. Streubewohner (epigäische Arten wie z. B. *Lumbricus rubellus*: voll pigmentiert) einteilen. Ein hoher Anteil an Tiefgräbern weist auf eine große Anzahl zumeist vertikal verlaufender kontinuierlicher Makroporen hin, die Transportprozesse im Boden begünstigen. Die endogäischen Mineralbodenformen deuten auf eine Steigerung der Neubildung stabiler Bodenaggregate als Ton-Humus-Komplexe im Bodenprofil hin. Flachgräber bzw. Streubewohner fehlen in Ackerflächen mit intensiver Bewirtschaftung. Ihr Auftreten belegt erfolgreiches bodenschonendes Management mit einem Verbleib der Ernterückstände an der Bodenoberfläche.

Ein leicht zu erfassender Indikator ist die Anzahl der Aktivitätsmuster von Regenwürmern an der Bodenoberfläche (s. u.) wie z. B. deren Losungshaufen. Diese zählen zu den Hotspots im Boden, denn der hohe Gehalt leicht verfügbarer organischer Substanz fördert mikrobielle Gemeinschaften, lockt Vertreter der Boden-Mikrofauna und Boden-Mesofauna an (s. Beispiele Tab. 2.3) und dient jungen Regenwürmern als Kinderstube (Schrader und Seibel, 2001). Somit zeigt eine höhere Dichte an Losungshaufen insgesamt eine höhere bodenbiologische Aktivität an, die Rückschlüsse auf eine sich positiv entwickelnde Bodenfruchtbarkeit erlaubt.

Die meisten heute gängigen Messmethoden zur Erfassung und Bewertung bodenbiologischer Aktivität sind für die wichtigsten Organismen-Gruppen in deutschen und internationalen Normen standardisiert (DIN und ISO; für einige Bodentiergruppen siehe z. B. Römbke et al., 2006). Diese

Normen werden in einem fünfjährigen Rhythmus innerhalb der einzelnen Fachgremien nach neuesten Kenntnissen revidiert und aktualisiert. Die Umsetzung der meisten Normen setzt Expertenwissen voraus und sollte als Auftragsarbeit von Landwirtschaftskammern, zertifizierten Laboren oder Gutachterbüros durchgeführt werden. Mit etwas Erfahrung lässt sich in der Praxis mit folgenden vergleichsweise einfachen Methoden eine erste grobe Abschätzung insbesondere zur Aktivität der Regenwürmer durchführen: Spaten-Diagnose (z. B. Schneider, 2010), einfache Feldgefügeansprache (Brunotte und Senger, 2012), Klassifizierung der bodenbiologischen Aktivität nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA 5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) oder dem Trierer Bodenqualitätstest, der eine einfache Beurteilung des Bodenzustandes durch den Landwirt ermöglicht und dabei die Regenwurmmaktivität einschließt (Ruf und Emmerling, 2015).

Die Erfassung von Aktivitätsmustern der Regenwürmer direkt an der Bodenoberfläche, ohne den Boden aufgraben zu müssen, schlägt Fründ (2010) vor. Zu den Hauptaktivitätszeiten im Frühjahr und Herbst lassen sich Losungshaufen, akkumulierte Streuhaufen und offene Gangporen leicht an der Bodenoberfläche identifizieren. Mit Hilfe eines quadratischen Zählrahmens oder entlang eines Transektes definierter Breite kann ein Flächenbezug zur Häufigkeit dieser Aktivitätsspuren hergestellt und das Ergebnis vergleichend zwischen verschiedenen Standorten bewertet werden.

Eine umfassende und aktuelle Zusammenstellung an Methoden und Konzepten zur Nutzung bodenbiologischer Indikatoren für die Beurteilung der Bodenqualität auch in Bezug auf die Bodenfruchtbarkeit findet sich in Römbke et al. (2012). Außerdem werden hier unter Einbeziehung der biologischen Vielfalt im Boden Referenzwerte für verschiedene Böden und Landnutzungsformen vorgeschlagen.

## 4.7 Schwermetalle

(Sylvia Kratz)

### 4.7.1 Definition und Bedeutung von Schwermetallen für die Bodenfruchtbarkeit

Schwermetalle stellen einen Teil der Schadstoffproblematik dar. Neben organischen Schadstoffen sind sie jedoch eine wichtige Gruppe, die hier exemplarisch behandelt wird. Schwermetalle sind Metalle mit einer Dichte  $> 5 \text{ g cm}^{-3}$  (Hintermaier-Erhard und Zech, 1997; Hirner et al., 2000). Im weiteren Sinne gehören dazu auch die Metalloide (=Halbmetalle oder Elemente mit nur teilweise metallischem Charakter) mit einer Dichte  $> 5 \text{ g cm}^{-3}$ , namentlich Germanium (Ge), Arsen (As), Antimon (Sb), Tellur (Te) und Polonium (Po). Mehr als die Hälfte aller bekannten Elemente des Periodensystems sind Schwermetalle, insgesamt 77 (+5 Metalloide). In Biosystemen sind Komplexverbindungen mit organischen Molekülen als Bindungspartnern die dominierende Speicherform. Manche Schwermetalle kommen in mehreren unter Umweltbedingungen stabilen Oxidationsstufen vor (Hirner et al., 2000). Einige Schwermetalle sind essenzielle Spurenelemente, d. h. sie werden für lebensnotwendige Stoffwechselforgänge von Pflanzen, Tieren und/oder Menschen zwingend benötigt. Zu den für Pflanzen essenziellen Schwermetallen gehören Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Zink (Zn) und Nickel (Ni), für Tiere und Menschen sind vor allem Cobalt (Co), Chrom (Cr), Cu, Fe, Mn und Zn zu nennen (Alloway, 1999; Schilling, 2004). In zu hoher Konzentration sind allerdings alle Metalle giftig, und zwar sowohl für Pflanzen, Tiere und Menschen, als auch für das Bodenleben. Daraus ergibt sich ihre wesentliche Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit.

### 4.7.2 Toxikologische Relevanz

#### 4.7.2.1 Pflanzentoxizität

Schwermetalle können Pflanzenwachstum und -entwicklung beeinträchtigen. Zu unterscheiden ist zwischen nicht-essenziellen und essenziellen Elementen (Abb. 4.27). Bei nicht-essenziellen Schwermetallen wird die toxische Wirkung mit zunehmender Konzentration des Elements stärker, bei essenziellen Schwermetallen beeinträchtigt eine zu geringe Konzentration Wachstum und Entwicklung ebenso



Bodenbeprobung für Collembolen  
(Foto: Q. Schorpp)

wie eine zu hohe, beides kann im Extremfall zum Absterben der Pflanze führen (Kabata-Pendias, 2001). Ob eine toxische Wirkung überhaupt eintritt, hängt davon ab, ob und in welchem Ausmaß das Schwermetall von der Pflanze aufgenommen wird. In den weitaus meisten Fällen liegt der pflanzenverfügbare Anteil eines Schwermetalls unter 1% des Gesamtgehaltes. Pflanzenverfügbarkeit bzw. Mobilität eines Schwermetalls im Boden sind in erster Linie eine Funktion des Boden-pH (Kabata-Pendias, 2001). Die Mobilität ist aber auch elementspezifisch verschieden (Abb. 4.28). So ist sie besonders hoch bei Cadmium (Cd), Zn und Thallium (Tl), besonders niedrig bei Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) (Hintermaier-Erhard und Zech, 1997). Einen Sonderfall stellt Uran (U) dar, dessen Mobilität in neutralen bis schwach sauren Böden gering ist, jedoch aufgrund seiner Fähigkeit, je nach Oxidationsstufe und Bodenzusammensetzung unterschiedliche Komplexe zu bilden, sowohl im stark sauren als auch im basischen Milieu zunimmt (Echevarria et al., 2001; Abdel-Sabour, 2014).

So genannte Transferfaktoren geben den Quotienten aus der Schwermetallkonzentration in der Pflanze und der Schwermetallkonzentration im Boden an. Sie variieren mit der Konzentration des jeweiligen Elements im Boden (Sauerbeck, 1985) und können daher nur der Beschreibung von Tendenzen dienen.

**4.7.2.2 Toxizität für Tiere und Menschen**

Bei Tieren und Menschen unterscheidet man zwischen akuter und chronischer Schwermetalltoxizität. Unter akuter Toxizität versteht man eine Schädwirkung, welche durch die ein- oder mehrmalige Aufnahme einer hohen Dosis innerhalb kurzer Zeit (24 h) ausgelöst wird. Chronische Toxizität

dagegen ist eine schädliche Wirkung, welche bei wiederholter Aufnahme kleiner (nicht akut toxischer) Dosen über längere Zeit (Monate, Jahre) durch Anreicherung eines Stoffes im Organismus oder durch Summierung irreversibler toxischer Effekte im Zielorgan hervorgerufen wird (Merian, 1984; Geldmacher-v. Mallinckrodt und Schaller, 2004).

Schwermetalle in Böden sind vor allem im Hinblick auf chronische Schäden relevant, die durch langfristige Aufnahme geringer Dosen von Schwermetallen mit der pflanzlichen Nahrung entstehen können. Bei Mensch und Tier sind dies insbesondere (nach Merian, 1984; Merck Index, 2001; Geldmacher-v. Mallinckrodt und Schaller, 2004) Funktionsstörungen des Magen-Darm-Traktes, der Leber oder der Niere, Störungen des blutbildenden Systems, Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems und der Atemwege (bei inhalativer Aufnahme), Schäden des zentralen und peripheren Nervensystems. Des Weiteren wirken Schwermetalle erbgutverändernd, fruchtschädigend und krebsauslösend.

**4.7.2.3 Toxizität für das Bodenleben**

Schwermetalle wie beispielsweise Arsenat können in Zellen von Bodenorganismen eindringen und dort essenzielle Nährstoffe wie Phosphat von ihren natürlichen Bindungsstellen verdrängen. Wechselwirkungen von Schwermetallen mit der DNA oder mit Proteinen stören die Zellteilung und die Proteinsynthese von Bodenmikroorganismen, auch die Funktionsfähigkeit von Proteinen kann beeinträchtigt werden. Als Folge kommt es zu gestörtem Wachstum, veränderten morphologischen Strukturen und Hemmung biologischer Prozesse bei Bodenorganismen. Die Anreicherung von Schwermetallen in Regenwürmern und anderen Bodenorganismen führt in der Nahrungskette zur Bioakkumulation.

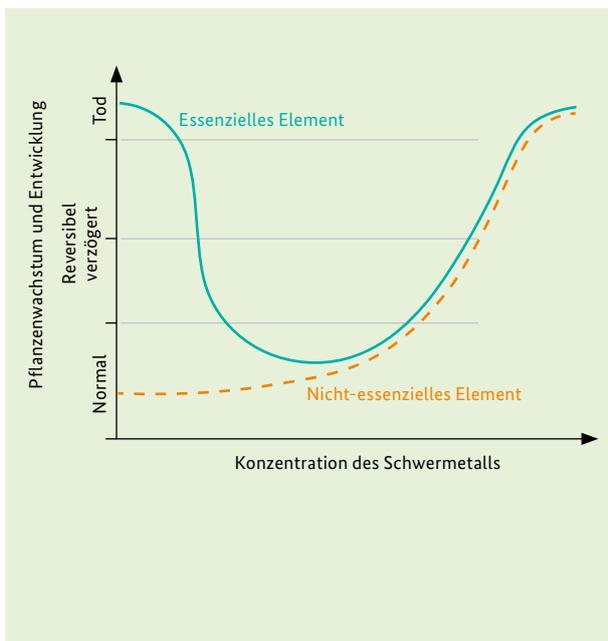


Abb. 4.27: Dosis-Wirkungsbeziehung für essenzielle und nicht-essenzielle Schwermetalle (aus: Kabata-Pendias, 2001)

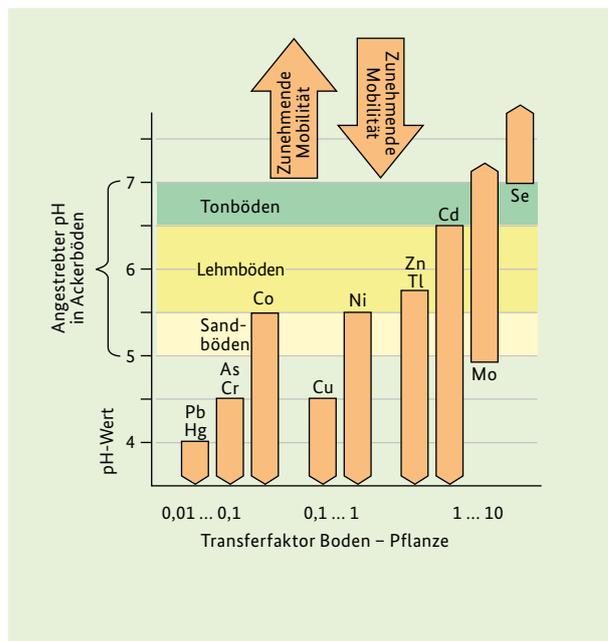


Abb. 4.28: Transferfaktoren verschiedener Schwermetalle in Abhängigkeit vom Boden-pH (aus: Hintermaier-Erhard und Zech, 1997)

Da die Toxizität von Schwermetallen je nach Lebewesen unterschiedlich ausgeprägt ist, werden verschiedene Arten entweder nur in ihrer Häufigkeit reduziert oder aber vollständig ausgelöscht, was zu einer Veränderung des Artenspektrums im Boden führen kann (Blume et al., 2010).

#### 4.7.3 Eintragspfade von Schwermetallen in den Boden

Wie Schwermetallbilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland zeigen, sind die Schadstoffeinträge in landwirtschaftliche Böden vor allem zwei Ursachen zuzuordnen: zum einen der atmosphärischen Deposition, und zum anderen der Düngung, wobei nicht nur mineralische, sondern auch Wirtschaftsdünger, Klärschlamm und Bioabfallkomposte eine ganz wesentliche Rolle spielen (Wilcke und Döhler, 1995; Lazar und Knappe, 2006).

##### 4.7.3.1 Atmosphärische Deposition

Schwermetalle gelangen vor allem durch Verbrennungs- und Produktionsprozesse aus verschiedenen anthropogenen Quellen wie bspw. Kraftwerken (Arsen (As), Cd, Pb, U) und Industrieemissionen (Zementwerke, Metallhütten, Lederindustrie, Farben und Lacke; v. a. Cd, Cu, Hg, Pb, Tl, Zn, daneben auch As, Cr und Ni), Kfz-Verkehr (v. a. Zn und Pb, [Cd]), sowie in geringerem Umfang auch durch Hausbrand in die Atmosphäre. Je nach Partikelgröße und Prozesstemperatur können sie partikelgebunden, dampf-, oder gasförmig transportiert werden, ihre Deposition kann trocken oder nass erfolgen und weist eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf, wobei sich insbesondere ländliche und Waldstandorte von Industrie- und Ballungsgebieten unterscheiden (Blume et al., 2010, Lazar und Knappe, 2006, Abb. 4.29).

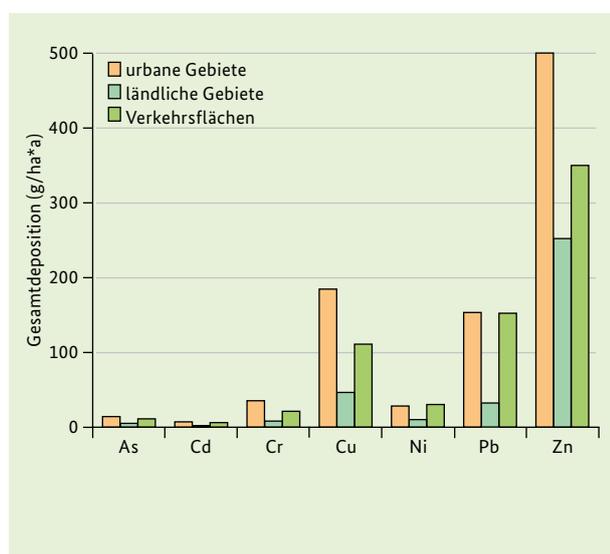


Abb. 4.29: Mittlere jährliche Schwermetallgesamtdeposition auf Böden in Deutschland in g/(ha\*a), nach Schätzdaten von Lazar und Knappe, 2006

##### 4.7.3.2 Quellen von Schwermetallen in Phosphor (P)-Düngern

Vor allem phosphorhaltige Mineraldünger bringen aufgrund ihrer Herstellung aus Rohphosphaten, welche geogen bedingt (d. h. infolge ihrer geologischen Entstehungsgeschichte) bereits hohe Schwermetallgehalte aufweisen, oft hohe Schwermetallfrachten in den Boden ein. Häufigstes gesteinsbildendes Mineral bei Rohphosphaten sind diverse Varietäten des Apatits. 87% der zur P-Düngerproduktion eingesetzten Rohphosphate sind sedimentärer Natur (van Kauwenbergh, 1997). Tabelle 4.17 zeigt Schwermetallgehalte der weltweit am stärksten vertretenen Herkünfte. Erkennbar ist eine deutlich stärkere Anreicherung der Schwermetalle in sedimentären gegenüber magmatischen Rohphosphaten. Auffällig ist außerdem, dass Cd und U in allen Herkünften sedimentärer Natur eine durchgängig hohe Anreicherung zeigen, während hinsichtlich der anderen aufgeführten Elemente jeweils auch Herkünfte mit vergleichsweise niedrigen Gehalten zur Verfügung stehen. Hoch angereichert ist auch Zn, dieses ist aber ein essenzielles Element und von deutlich geringerer Toxizität als Cd und U und gibt daher ungleich weniger Anlass zur Besorgnis.

Beim Produktionsprozess von P-Mineraldüngern aus Rohphosphaten werden die im Rohstoff vorhandenen Schwermetalle zu mindestens 60 – 70% in das Produkt transferiert (Mortvedt und Beaton, 1995).

Schwermetalle wie Cu, Zn oder As werden insbesondere auch über Wirtschaftsdünger in die landwirtschaftliche Nutzfläche eingebracht, wobei die wesentliche Eintragsquelle hier Futtermittelzusätze sind, die zur Leistungssteigerung in der Tierfütterung eingesetzt werden. Daneben können über das Trinkwasser der Tiere, Trägersubstanzen für Tiermedikamente, Stroheinstreu sowie Abrieb von metallischen Stallrichtungen weitere Schwermetalle (z. B. Pb und Ni) in die Wirtschaftsdünger gelangen (Schultheiß et al., 2003; Schultheiß, persönliche Mitteilung, 2003).

Lokal können auch Klärschlamm und Bioabfallkompost einen bedeutenden Beitrag zum Schwermetalleintrag leisten. In häusliche und industrielle Abwässer gelangen die Metalle z. B. durch Korrosion von Wasserleitungen (Cu, Zn) oder über Medikamente und Hygieneprodukte (Ag, As, Cu, Hg, Zn) (Alloway, 1999; Thomé-Kozmiensky, 2001). Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen P-Gehalte werden Komposte weniger als P-Quelle, sondern vielmehr als Quelle organischer Substanz sowie als Stickstoff (N)-Lieferant auf landwirtschaftlichen Flächen verwertet. Bezogen auf ihren P-Gehalt weisen sie im Vergleich zu anderen organischen P-Quellen oft überdurchschnittlich hohe Schwermetallgehalte auf. Als Ursachen hierfür sind vor allem geogen bedingt erhöhte Schwermetallgehalte in Böden und regional variierende industrielle und bergbaubedingte Einträge sowie Fehlwürfe in den Biotonnen zu nennen (Kördel et al., 2007).

Tab. 4.17: Schwermetallgehalte von Rohphosphaten unterschiedlicher Herkunft in mg/kg (nach Mortvedt und Beaton, 1995; Van Kauwenbergh, 1997; Raven und Loeppert, 1997; Kharikov und Smetana, 2000; Gupta und Singh, 2003), Tab. entnommen aus: Kratz und Schnug (2005)

mg/kg	Rohphosphate									
	sedimentär								magmatisch	
	USA		Marokko		China		Mittlerer Osten		Russland (Kola)	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
As	7	24	9,2	13	9	26	2,1	35	1	10
Cd	6,1	92	15	38	<2	2,5	1,5	35	0,1	1,3
Cr	60	637	75	279	18	33	25	230	13	
Cu	9,6	23	1	22		k.A.	5	31	15	30
Hg	0,05	0,29	0,04	0,86	0,005	0,21	0,002	0,02	0,004	0,01
Ni	17	37		26		k.A.	20	80	2	15
Pb	4,6	17	7	14	1,5	6	1	33	1,8	33
V	23	769	87	200	8	80	59	303	100	
Zn	204	382		261		k.A.	29	630	19	23
U	65	180	75	155	23	31	40	170	10	28

#### 4.7.3.3 Schwermetallzufuhr mit der P-Düngung

Der Einsatz von Phosphordüngern zu einer Acker- oder Grünlandkultur erfolgt in Anpassung an den P-Bedarf der jeweiligen Kultur. Je kg zugeführtem P wird jeweils auch eine bestimmte Fracht an Schwermetallen unvermeidbar mit in den Boden eingebracht. In Tabelle 4.18 ist der Schwermetallgehalt von P-Düngern daher auf deren P- bzw. Phosphat ( $P_2O_5$ )-Gehalt bezogen. Anzumerken ist, dass hier zwecks Darstellung von generellen Trends lediglich mittlere Gehalte gezeigt sind und nicht die bisweilen enormen Spannweiten, die bedingt durch Herkunft des Rohstoffes, Typ des Abwassers (z. B. kommunal oder industriell) bzw. Zusammensetzung des Futters auftreten können. Die Daten verdeutlichen, dass die Schwermetallzufuhr je nach Wahl des Düngemittels sehr unterschiedlich sein kann. Mineraldünger bringen in der Regel eine besonders hohe Menge an Cd und U mit ein. Klärschlämme weisen relativ hohe Gehalte an allen betrachteten Schwermetallen auf. Tierische Wirtschaftsdünger bringen besonders viel Zn und Cu in den Boden ein (Schweinegülle auch As), wobei diese beiden Metalle allerdings als essenzielle Spurenelemente anders zu bewerten sind als hoch toxische Elemente wie Cd oder U (siehe dazu VDLUFA, 2002). Aber auch Ni- und Pb-Gehalte sind, bezogen auf den  $P_2O_5$ -Gehalt, bei Wirtschaftsdüngern vergleichsweise hoch.

#### 4.7.4 Risikoabschätzung auf Basis von Hintergrund- und Vorsorgewerten für Schwermetalle in Böden

Für die Gesundheit von Mensch und Tier stellen Schwermetalle in Böden vor allem dann ein Risiko dar, wenn sie von Pflanzen aufgenommen werden und so in die Nahrung gelangen. Die LABO-Arbeitsgruppe „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ (Delschen und Rück, 1997; Delschen et al., 1998)

hat vor diesem Hintergrund die Elemente As, Pb, Cd, Hg und Tl als „vorrangig relevant“ für die Nahrungspflanzenqualität identifiziert. Hinsichtlich der Qualität von Futterpflanzen (Eintrag von Schwermetallen in die menschliche Nahrungskette über tierische Nahrungsmittel) wurden von den Autoren weiterhin Cu und Ni hervorgehoben. Ertragsrelevante und damit für die Sicherung menschlicher Nahrung bedeutende phytotoxische Wirkungen schließlich seien bei As, Cu, Ni und Zn zu befürchten.

Eine ganz ähnliche Auflistung findet sich bei Alloway (1999), der As, Cd, Hg, Pb, Tl und U als diejenigen Schwermetalle nennt, die hinsichtlich der menschlichen Gesundheit, Landwirtschaft und Ökotoxikologie am meisten Anlass zur Besorgnis gäben. Mit Bezug auf die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit werden hier außerdem Zn und Cu genannt, da diese toxisch für einige Bodenmikroorganismen, z. B. Rhizobia (symbiontische N-Fixierer), seien. In einer US-amerikanischen Studie zur Bewertung des Gesundheitsrisikos ausgewählter Metalle in Mineraldüngern nach der Applikation wurden die Elemente As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Selen (Se), V, Zn und Radium (Ra)-226 als „potenziell Besorgnis erregende Metalle“ bezeichnet, wobei als Auswahlkriterien hier die relative Toxizität (Reference Dose RfD nach USEPA, d. h. ein Schwellenwert, oberhalb dessen toxische Wirkungen eintreten können), die relative Produktkonzentration und der Bewertungsvorrang genannt wurden (The Weinberg Group Inc., 2000).

Zwischen der Einstufung als „potenziell Besorgnis erregendes Element“ und der Feststellung eines tatsächlich bestehenden Risikos ist allerdings klar zu unterscheiden. Für eine Risikoabschätzung arbeitet man im Allgemeinen mit Toxizitätsschwellenwerten, d. h. Schwellenkonzentrationen, unterhalb derer nach heutigem Stand des Wissens schädliche Wirkungen auf den Zielorganismus ausgeschlossen werden

Tab. 4.18: Zufuhr von Schwermetallen mit der P-Düngung bei verschiedenen P-Düngemitteln

	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Schwermetallgehalte in mg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	U	Zn
Superphosphat	18	47	0,89	500	511	0,22	216	17	3,3	778	2606
Triplephosphat	46	18	53	372	47	0,20	58	8,5	0,85	272	848
Weicherdiges Rohphosphat	28,5	29	44	396	53	k.A.	77	24	3,9	312	839
mineralische NP	34	26	45	400	122	k.A.	64	3,5	0,85	182	700
Klärschlamm (kalkstabilisiert)	3,3	85	33	1367	4545	21	594	1121	4,8	k.A.	14273
Schweinegülle	5,6	21	5,2	120	4018	0,54	175	80	0,89	63	15429
Rindergülle	1,9	84	15	253	2826	2,1	68	158	1,6	14	11842
Broilerfestmist	3,8	100	7,6	847	1666	1,8	332	74	1,6	12	9605
Hühner trockenkot	3,8	k.A.	8,9	150	1587	1,1	68	68	k.A.	k.A.	10211

Angaben zu Schwermetallgehalten für Mineraldünger aus eigenen Analysen der JKI-Düngemittelsammlung, ergänzt nach Boysen (1992), für Wirtschaftsdünger nach FAL/JKI-Datenbankauswertung, siehe Kördel et al. (2006) in UBA-Texte 30/07; P-Gehalte in Mineraldüngern nach Schilling (2000); k.A. = keine Angabe

können. In der Ökotoxikologie heißen diese PNEC, oder „predicted no effect concentration“. PNECs werden aus quantitativen ökotoxikologischen Wirkungsdaten über Schwermetalle abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden PNECs mit der aktuell messbaren bzw. für die Zukunft prognostizierten Umweltkonzentration (PEC oder „predicted environmental concentration“) verglichen, um das tatsächliche Risiko abzuschätzen. Per Definition ist ein ökotoxikologisches Risiko dann vorhanden, wenn  $PEC > PNEC$ . Für die Zukunft werden Umweltkonzentrationen über ein Akkumulationsmodell berechnet, welches im Wege einer Flächenbilanz Düngungsstrategie, atmosphärische Deposition, Auswaschung und Pflanzenentzug berücksichtigt (Schütze et al., 2003).

Als aktuelle PEC können die Hintergrundgehalte für Böden<sup>7</sup> nach LABO (1998, 2003) gelten, als PNEC die Vorsorgewerte<sup>8</sup> der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) (siehe Tab. 4.19).

Kratz et al. (2011) haben die Gesamteinträge von As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn und U allein mit der Mineraldüngung in landwirtschaftliche Böden Deutschlands für den Zeitraum von 1950/51 bis 2009/2010 berechnet und den natürlichen Hintergrundwerten gegenübergestellt. Im Mittel wurden pro Jahr allein aus P-haltigen Mineraldüngern ca. 40 t As, 22 t Cd,

95 t Cu, 54 t Ni, 11 t Pb, 431 t Zn und 114 t U auf deutschen Äckern verteilt. Der Beitrag düngerbürtiger Metalle zu den natürlichen Hintergrundgehalten der Böden variierte stark. Für As, Cu, Ni, Pb und Zn lag er unter 2%, während er für Cd zwischen 3,5 und 12%, für Uran sogar zwischen 4 und 14% rangierte. Für diese beiden Elemente ergab sich also das mit Abstand größte Risiko einer durch menschliche Aktivität vergrößerten Umwelt- und Gesundheitsbelastung. Im Fall von Cd erfolgt der Eintrag in die Nahrungskette überwiegend über die Pflanzenaufnahme aus dem Boden, dagegen spielt bei U vor allem der Weg über das Trinkwasser eine bedeutende Rolle (vgl. Kratz et al., 2011; Utermann et al., 2009).

#### 4.7.5 Handlungsoptionen zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen

Zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen in Böden lassen sich in Anlehnung an Bachmann et al. (1995) drei grundsätzliche Handlungsoptionen formulieren:

1. Vermeidung von Stoffeinträgen („Null-Option“)
2. Erhaltung des Status quo
  - a) systemorientiert („Eintrag gleich Austrag“): Begrenzung der Schadstoffeinträge auf ein Gleichgewicht mit tolerierbaren Austrägen
  - b) produktorientiert („Gleiches zu Gleichem“): Begrenzung der Schadstoffeinträge auf ein Gehaltsniveau, das dem des Aufbringungsstandortes entspricht
3. Aufstellung von Konventionen über vorläufig tolerierbare Anreicherungen und Schadstoffeinträge unter definierten Randbedingungen

<sup>7</sup> Unter dem Hintergrundwert wird die Summe aus naturbedingtem, geogenem Grundgehalt und der ubiquitären (d.h. weltweiten) Stoffverteilung als Folge diffuser anthropogener Einträge in die Böden verstanden (LABO, 1998, 2003).

<sup>8</sup> Die BBodSchV vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), definiert sog. Vorsorgewerte, bei deren Überschreiten schädliche Bodenveränderungen, d. h. eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen, zu befürchten sind, für die Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn. Die Höhe dieser Werte ist nach Bodenarten differenziert.

Tab. 4.19: Mittlere Hintergrundwerte für Schwermetalle in landwirtschaftlich genutzten Oberböden für ausgewählte Bodenarten nach LABO (2003) und Utermann et al. (2008) im Vergleich zu den Vorsorgewerten der BBodSchV nach § 8 II 1 BBodSchG (letztere nicht definiert für As, Tl und U)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	U	Zn
	mg/kg TM									
<b>Sand(gesteine)</b>	2,7	0,16	10	8,5	0,02	3,4	15	0,14	0,8	23
<b>Löss(derivate)</b>	9,2	0,36	19	15	0,09	20	31	0,22	2	54
<b>Tongesteine<sup>1</sup></b>	8,8	0,3	37	23	0,09	37	39	0,31	2,5	99
<b>Vorsorgewerte</b>										
<b>Bodenart Sand</b>		0,4	30	20	0,1	15	40			60
<b>Bodenart Lehm/ Schluff</b>		1,0	60	40	0,5	50	70			150
<b>Bodenart Ton</b>		1,5	100	60	1	70	100			200

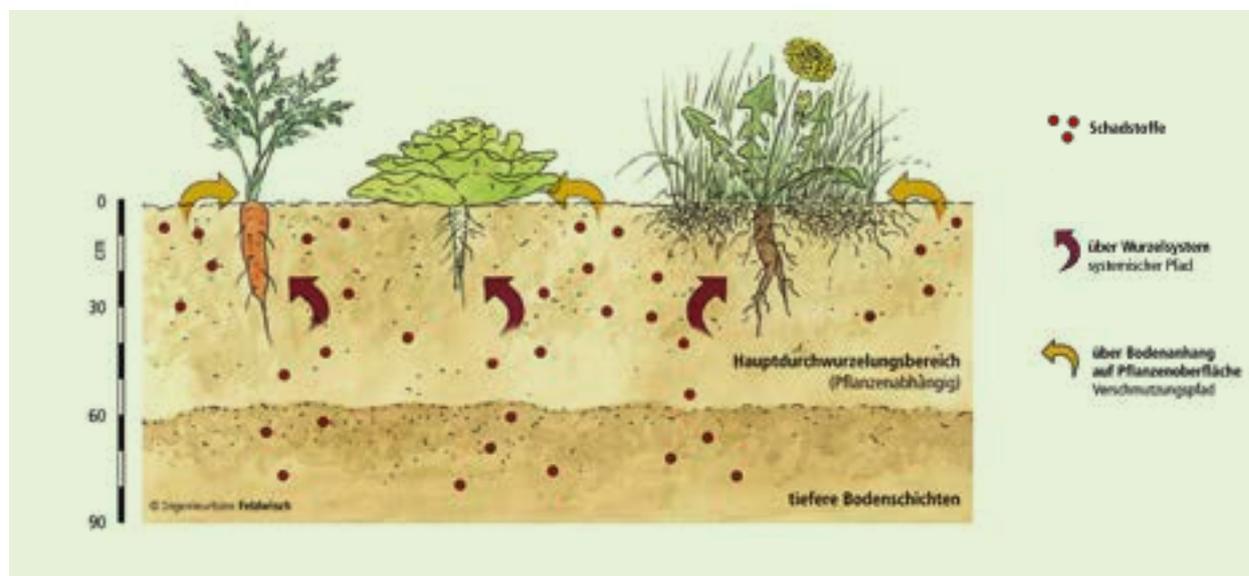
1) bzw. periglaziäre Deckschichten über Tongesteinen

Im Zuge der Risikobewertung haben sich die deutschen Agrar- und Umweltminister auf politischer Ebene bereits am 13. Juni 2001 in Potsdam klar für eine der Handlungsoptionen entschieden, indem sie auf ihrer gemeinsamen Konferenz den Beschluss fassten, dass

*„wegen der besonderen Bedeutung der landwirtschaftlichen Böden für die Produktion gesunder Nahrungsmittel aus Vorsorgegründen sicher zu stellen (ist), dass es durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere durch Aufbringung von Klärschlamm, Gülle und anderen Wirtschaftsdüngern, mineralischem Dünger und Kompost) zu keiner Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommt.“*

Dennoch definiert aber die BBodSchV sog. zulässige zusätzliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade. Deutschland geht also den Weg der Aufstellung von Konventionen über vorläufig tolerierbare Einträge (Option 3).

Mit Hilfe offizieller statistischer Daten zu Düngemittel-einsatz, Fruchtartenverteilung und Erträgen lassen sich Schwermetalleinträge durch die Düngung für verschiedene Düngungsstrategien und Anbauszenarien abschätzen und den Pflanzenentzügen gegenüberstellen. Für Deutschland kommen Lazar und Knappe (2006) dabei auf die in Tabelle 4.20 gezeigten Größenordnungen. Demnach liegen die düngerelevanten Einträge zwar deutlich unter den als umweltrelevant anzusehenden zulässigen Zusatzfrachten (die allerdings die Summe der Frachten aus allen Eintragungspfaden begrenzen sollen), überschreiten jedoch die zu erwartenden Pflanzenentzüge, dargestellt am Beispiel der weit verbreiteten Anbaufrüchte Winterweizen und Zuckerrübe, um ein Vielfaches.



Schadstoffübergang Boden – Pflanze

#### 4.7.6 Fazit

Schwermetalle können für Bodenorganismen, Pflanzen sowie Tiere und Menschen toxisch sein. In landwirtschaftliche Böden gelangen sie hauptsächlich über atmosphärische Deposition sowie über Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung), deren relative Bedeutung je nach lokalen bzw. regionalen Standortbedingungen und der Bewirtschaftungsweise unterschiedlich ist. Düngebasierete Einträge liegen nach neueren Schätzungen deutlich über zu erwartenden Pflanzenentzügen. Die Vorsorgewerte der BundesBodenschutzverordnung, die in erster Näherung als Bewertungsmaßstab für das aktuelle Risiko schädlicher Bodenveränderungen bzw. der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen dienen können, werden allein durch die Düngung weit unterschritten. Betrachtet man jedoch auch die atmosphärischen Depositionen, so liegen die eingetragenen Gesamtfrachten unter ungünstigen Bedingungen vor allem im Fall von Cd, aber auch bei Cu und Pb, bereits in ähnlicher Größenordnung wie die zulässigen Zusatzfrachten nach BBodSchV. Für As, Tl und U sind bisher weder Vorsorgewerte noch Zusatzfrachten definiert, so dass diesbezüglich keine Risikoabschätzung vorgenommen werden kann.

Von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Report, 1987) wurde bereits 1987 der Begriff der „nachhaltigen Entwicklung“ geprägt: „Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ Zu deutsch: Nachhaltig ist eine Entwicklung, „die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne

die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (übersetzt nach <http://www.nachhaltigkeit.aachener-stiftung.de>).

In diesem Sinne ist zur Umsetzung einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Praxis eine konsequente Anwendung des Vorsorgeprinzips zu fordern. Dazu könnte beispielsweise eine schwermetallfrachtenbezogene Regelung im Düngerecht beitragen. Unterstützt werden kann dies auch mit einer transparenten Deklaration aller im Düngemittel enthaltenen Schwermetalle, indem gezielt schadstoffarme Düngemittel ausgewählt werden können.

Parallel dazu wäre die Erweiterung der bereits heute von jedem Landwirt zu erstellenden betrieblichen Nährstoff- um Schadstoffbilanzen zu erwägen. Auf diese Art wäre es dem Landwirt selbst möglich, sein Düngemanagement künftig sowohl qualitativ (Wahl des Düngemittels) als auch quantitativ (Aufbringungsmengen) an die Handlungsoption „Erhaltung des Status quo“ anzupassen. Gelingen kann dies nur mit einer transparenten Deklaration aller im Düngemittel enthaltenen Schwermetalle sowie der Aufreinigung hoch belasteter Rohstoffe vor bzw. im Zuge der Verwendung zur Düngemittelproduktion. Die technischen Möglichkeiten dazu sind längst vorhanden (z. B. für Uran: Kratz und Schnug, 2006, mit weiteren Nachweisen), werden jedoch in Ermangelung ihrer Wirtschaftlichkeit bisher kaum umgesetzt. Hier bedarf es somit einer deutlichen Wende im umweltpolitischen Bewusstsein von Bevölkerung und Entscheidungsträgern gleichermaßen.

Tab. 4.20: Mittlere jährliche Schwermetallfrachten unter Ackerbau und Grünlandwirtschaft durch die Düngung für mineraldünger- bzw. wirtschaftsdüngerbasierte Düngestrategien bei konventioneller Bewirtschaftung (nach Lazar und Knappe, 2006) im Vergleich zu typischen Pflanzenentzügen (Erträge nach LWK Niedersachsen, 2014: Winterweizen Korn 70 dt/ha, Stroh 56 dt/ha, Zuckerrübe ohne Blatt 500 dt FM/ha, bzw. bei TM von 25 % 125 dt TM/ha; Schwermetallgehalte nach Schnug et al., 2006, bzw. Hg nach Lazar und Knappe, 2006) sowie zu den in Anhang 2 der BBodSchV geregelten zulässigen Zusatzfrachten (nicht definiert für As, Cr, Tl und U)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	U	Zn
	g/ha									
<b>Mineraldüngerbasierte Strategie</b>										
Acker	1,28	2,23	27	25	0,03	7,7	6,3	0,12	10,4	122
Grünland	1,16	2,29	27	24	0,03	5,4	8,7	0,13	10,4	117
<b>Wirtschaftsdüngerbasierte Strategie (Ausgleich von Mängeln mit Mineraldünger)</b>										
Acker	2,82	0,82	23	131	0,06	12,8	7,7	0,14	6,9	539
Grünland	3,85	0,77	24	122	0,09	11,4	9,7	0,19	6,6	499
<b>Pflanzenentzug</b>										
Winterweizen (Korn + Stroh)	0,44	0,49	9,0	46	0,20	4,6	1,6	0,19	0,32	166
Zuckerrübe (ohne Blatt)	0,44	1,0	5,9	49	0,13	10	2,5	0,19	0,31	150
<b>Zulässige Zusatzfrachten nach BBodSchV</b>										
		6		360	1,5	100	400			1200

## 4.8 Veränderungen der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenerosion

(Rainer Duttmann, Michael Kuhwald, Joachim Brunotte)

### 4.8.1 Ausmaß und Formen der Bodenerosion

Bodenerosion gilt als eine der Hauptgefahren für den Erhalt der Bodenfunktionen und somit für die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit (Brunotte et al., 2015). Unter Bodenerosion wird der durch den Menschen ermöglichte und über das natürliche Maß hinausgehende Abtrag von Feinboden und Lockermaterial verstanden. Hierzu zählen neben dem Bodenabtrag durch Wasser, Wind oder Schwerkraft (DVWK, 1996) auch die durch Bodenbearbeitung direkt hervorgerufenen Bodenumlagerungen und der Bodenverlust bei Ernteprozessen.

Während der Bodenabtrag unter einer geschlossenen Vegetationsdecke (s. Kap. 3.2) kaum wahrnehmbar ist, führt das Fehlen einer ganzjährigen Pflanzendecke zu Bodenverlusten, die die natürliche Bodenneubildung überschreiten. Aufgrund der geringen Bodenneubildungsrate ist schon ein Bodenverlust von mehr als  $1 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  nicht auszugleichen und deshalb irreversibel (Van-Camp et al., 2004). Einer auf europäische Verhältnisse bezogenen mittleren Bodenneubildungsrate von  $0,3 - 1,4 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  (Verheijen et al., 2009) können auf Ackerflächen Bodenabträge gegenüber stehen, die ein Vielfaches dieses Wertes erreichen. Mit dem Bodenabtrag ist gleichzeitig der Verlust des für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit

wichtigen humusreichen Feinbodens verbunden. Dieser kann durch die Neubildung mineralischen Bodensubstrates nicht ersetzt werden.

Die in Deutschland beobachtbaren Bodenabträge variieren räumlich und saisonal in weiten Grenzen. Schätzungen für die ackerbaulich genutzte Fläche in Deutschland gehen von einem langjährigen mittleren Bodenabtrag von  $4,3 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  aus (Auerswald, 2006), wobei regional Bodenabtragsraten von mehr als  $30 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  gemessen werden können. Langzeitmessungen aus allen Bodendauerbeobachtungsflächen Deutschlands weisen mittlere Bodenverlustraten zwischen  $1,4$  und  $3,2 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  (UBA, o.J.) aus. In dieser Größenordnung liegt auch der für alle Dauerbeobachtungsflächen Niedersachsens festgestellte mittlere jährliche Bodenabtrag von  $1,7 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ , mit regionalen Unterschieden von  $1,4 - 2 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  auf süd- und westniedersächsischen Lößböden und mittleren Bodenabträgen von  $2,8 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  auf Sandlöß im nordöstlichen Niedersachsen (Mosimann et al., 2012).

Die bei extremen Einzelereignissen auftretenden Bodenabträge durch Wasser gehen weit über diese Werte hinaus. So sind Niederschlagsereignisse, die Bodenverluste zwischen  $20$  und  $40 \text{ t ha}^{-1}$  hervorrufen, keine Seltenheit, sondern kommen in Europa mit einer Wiederkehr von  $2 - 3$  Jahren vor (EC, 2012; s. Abb. 4.30).



Aufwendige Beseitigung von Erosionsschäden (Foto: J. Brunotte)

Auch durch Winderosion können beträchtliche Bodenausträge erfolgen. Winderosion tritt in Deutschland schwerpunktmäßig in den nördlichen Bundesländern auf, wo sie infolge häufiger und stärkerer Winde und der dort vorherrschenden sandigen und lehmig-sandigen Böden eine der Hauptursachen für die Gefährdung der Fruchtbarkeit von Ackerböden darstellt. Abgesehen von den eher seltenen Extremereignissen, die auch von einer größeren Öffentlichkeit wahrgenommen werden, wird die bodenschädigende Wirkung der Winderosion zumeist unterschätzt. So können bis zu  $40 \text{ t ha}^{-1}$  an Feinboden durch Winderosion ausgetragen oder umgelagert werden, ohne dass deutliche Spuren von Erosion sichtbar sind (Chepil, 1960; Funk, 2011). Bei Starkwindereignissen kann sich der Bodenverlust auf  $100 \text{ t ha}^{-1}$  summieren.

Außer den mineralischen Feinbodenbestandteilen (Sand und Schluff) werden durch Winderosion erhebliche Mengen an humoser Bodensubstanz und daran anhaftenden Nährstoffen verweht. Unter Windeinfluss mobilisierte Stäube können dabei Nährstoffgehalte aufweisen, die gegenüber dem unverwehten Ausgangsboden um ein Mehrfaches erhöht sind (Buschiazzo et al., 2007). Untersuchungen von Buschiazzo und Funk (2015) zeigen zudem, dass in einem Zeitraum von 20 Jahren Humusverluste von  $25 \text{ t ha}^{-1}$  auftreten können, was einer Abnahme des Anteils an organischer Substanz von 2,5 auf 1,8 Gew.-% entspricht.

Der Verlust an mineralischen Feinpartikeln und organischer Substanz führt nicht nur zu einer Verringerung der Bodenfruchtbarkeit. Fortgesetzte Auswehung geht gleichzeitig mit einer Abnahme der Aggregatstabilität einher, was die Erosionsanfälligkeit des Bodens weiter erhöht (Zobeck et al., 2013).

Neben der Wasser- und Winderosion können zudem durch Bearbeitungserosion erhebliche Mengen an Boden umgelagert werden. Besonders an konvexen Hängen, Hangschultern und -rücken sowie auf Feldern mit wechselnden

Oberflächenformen kann durch diese Art der Erosion eine Umverteilung von Bodenmassen stattfinden, deren Größenordnung diejenige der Wassererosion übersteigt. In Abhängigkeit von der Geländetopographie, den angebauten Feldfrüchten, der Art der Bodenbearbeitung und der Bearbeitungintensität sind durch Bearbeitungserosion in Mittel- und Westeuropa Erosionsraten von mehr als  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  möglich (van Oost und Govers, 2006).

Mit Ausnahme regional bedeutsamer Staubemissionen sind die Wirkungen der Bearbeitungserosion auf das Feldinnere beschränkt. Sie sind insbesondere in kuppigen Feldern mit einer zunehmenden Standortheterogenität verbunden (Kosmas et al., 2001). Im Unterschied zur Wassererosion treten die größten Verlustraten an konvex gewölbten Geländepositionen und nahe der hangseitigen Feldgrenzen auf, während die höchsten Akkumulationsraten in konkaven Oberflächenformen (Hangmulden und -senken) vorkommen, also genau dort, wo die Wassererosion am intensivsten wirkt (van Oost et al., 2006; Verheijen et al., 2009; Wysocka-Czubaszek und Czubaszek, 2014).

Von der Bearbeitungserosion sind die erntebedingten Bodenverluste („Ernteeosion“) zu unterscheiden. Ernteeosion betrifft vor allem den Anbau von Wurzel- und Knollenfrüchten, wie Futter- und Zuckerrüben, Karotten und Kartoffeln. Durch Anhaftungen von Feinboden am Erntegut sowie durch maschinelle Prozesse beim Bergen und Bunkern können erhebliche Mengen an Boden aus dem Feld ausgetragen werden. In Abhängigkeit von der Feldfrucht, den aktuellen Boden(feuchte)verhältnissen, der eingesetzten Erntetechnik, der Pflanzendichte und dem Ertrag variieren die Bodenausträge stark. Ruyschaert et al. (2004, 2006) gehen für Mitteleuropa von durchschnittlichen Bodenverlusten zwischen  $2 \text{ t ha}^{-1}$  bei der Kartoffelernte und ca.  $10 \text{ t ha}^{-1}$  bei der Zuckerrübenernte aus, wobei die erntebedingten Bodenverluste in den deutschen Zuckerrübenanbaugebieten zwischen



Abb. 4.30: Profilkappung und Krümmungsverlust (oberer Feldbereich) durch linienhaft-flächenhaften Bodenabtrag bei einem extremen Starkregen (Foto: R. Duttmann)

5–8 t ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> anzusetzen sind (Auerswald, 2006). Aufgrund von Fortschritten in der Ernte-, Reinigungs- und Verladetechnik konnten die transportbedingten Bodenverluste bei der Zuckerrübenenernte in den letzten Jahrzehnten erheblich reduziert werden. Untersuchungen von Schulze Lammers und Strätz (2003) zeigen eine Abnahme des Bodenaustrages von durchschnittlich 6,6 t ha<sup>-1</sup> im Jahr 1990 auf 3,3 t ha<sup>-1</sup> im Jahr 2000 durch Reinigung und Abfuhr der Zuckerrüben, wobei die flächeninterne Bodenumlagerung zwischen der beernteten Fläche und den Mieten bzw. den Überladestandorten nicht berücksichtigt ist.

### 4.8.2 Wirkungen der Bodenerosion

Erhöhte Bodenverluste führen bei nicht standortangepasster Bewirtschaftung langfristig zur Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und zur Abnahme der Bodenfruchtbarkeit. Mit Ausnahme der nach Starkregen- oder Starkwindereignissen kurzzeitig deutlich sichtbaren Erosionsspuren, ist Bodenerosion zumeist ein schleichender Prozess. Seine mittelbaren Wirkungen werden oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten offenbar. Hierzu zählt eine verminderte Standortqualität durch den fortgesetzten Verlust an humusreicher Bodensubstanz und die damit verbundene Verkürzung des Wurzelraumes (Abb. 4.31). Bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren kommt ein mittlerer jährlicher Bodenabtrag von 5 t ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> einem Krümenverlust von etwa 3 cm gleich. Die Verkürzung des humosen Wurzelraumes äußert sich in einem verminderten Speichervermögen für Wasser und Nährstoffe und letztlich in einer Abnahme der natürlichen Bodenfruchtbarkeit. So zeigen Untersuchungen von Wessolek et

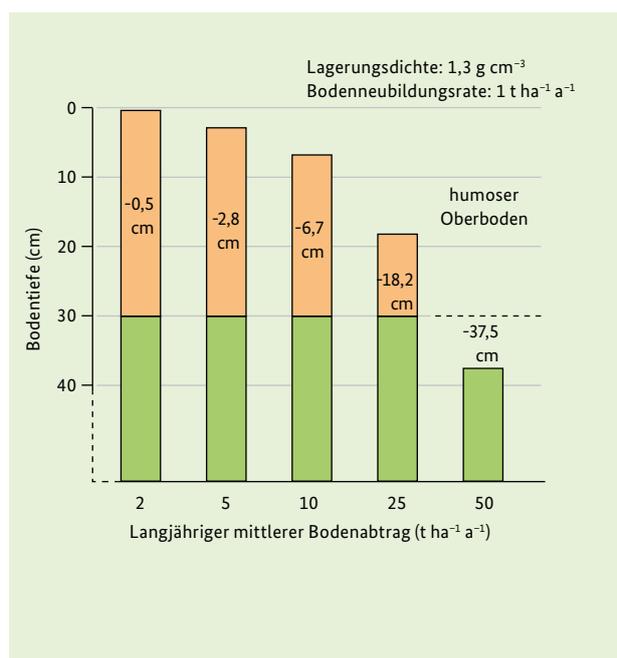


Abb. 4.31: Profilverkürzung bei mittlerem langjährigem Bodenabtrag mit unterschiedlicher Intensität, bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren

al. (1992) auf Lößlehm-Parabraunerden im südlichen Niedersachsen, dass die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum eng mit dem Pflanzenertrag korreliert ist. Danach führen bereits geringe Unterschiede in der Wurzelraummächtigkeit zu deutlichen Ertragsänderungen (Abb. 4.32).

Fortgesetzte Bodenabtrags- und Ablagerungsprozesse sind zudem mit einer wachsenden Standortheterogenität verbunden, und zwar durch Umverteilung fruchtbarer Oberbodenmaterials im Feldinneren selbst („on-site“), von den Erosionspunkten an Orte verstärkter Ablagerung. Bodenerosion kann zudem vielfältige Schäden außerhalb der Ursprungsfläche („off-site“) bewirken. Zu den schwerwiegenden feldexternen Wirkungen der Bodenerosion zählt insbesondere die stoffliche Belastung von Oberflächengewässern durch den Eintrag von Sedimenten und Nährstoffen. Eine Übersicht über einzelne feldinterne und feldexterne Wirkungen der Bodenerosion gibt Tabelle 4.21.

### 4.8.3 Bodenerosion durch Wasser

Wassererosion ist die am weitesten verbreitete Form des Bodenabtrages in Deutschland. Sie tritt vor allem auf Ackerflächen auf und wird zumeist durch Regenniederschläge verursacht, die auf eine nicht oder nur gering mit Pflanzen oder Pflanzenresten bedeckte Oberfläche auftreffen und abflusswirksam werden. Zudem können Schmelzwasserabfluss und Fremdwasserzufluss zu erheblichen Bodenverlusten führen. Eine schematische Übersicht zum Wassererosionsprozess und seinen Einflussgrößen gibt Abbildung 4.33.

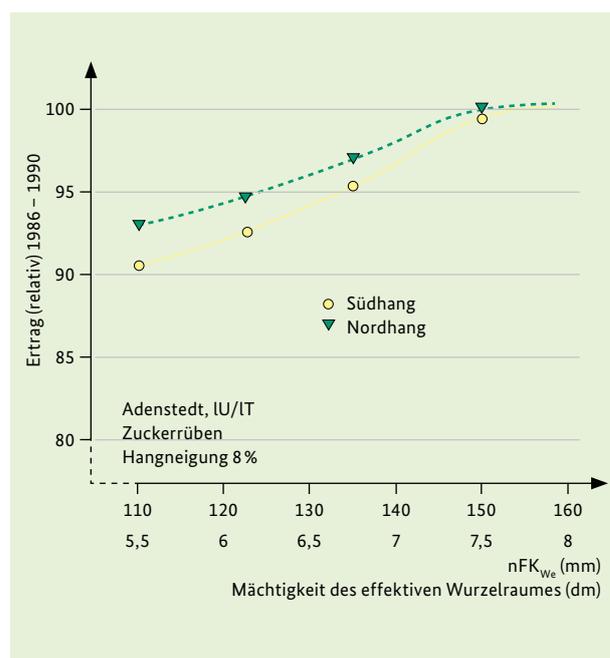


Abb. 4.32: Relativerträge von Zuckerrüben auf Lößlehm-Standorten im südlichen Niedersachsen als Funktion der Wurzelraummächtigkeit (n. Wessolek et al., 1992)

Der auf den ungeschützten Boden auftreffende Regen führt bei entsprechender Intensität durch Schlagwirkung zur **Loslösung** von Bodenteilchen aus dem Aggregatverband („Splash-Effekt“) oder trägt durch Befeuchtungs- und Benetzungseffekte zur Destabilisierung und zum **Zerfall** von Bodenaggregaten bei. Beide Prozesse sind maßgeblich für die Verschlämmung des Bodens (Abb. 4.34) und die damit verbundene Abnahme der Infiltrationskapazität sowie für die Bereitstellung leicht transportierbarer Bodensubstanz (Abb. 4.33) verantwortlich.

Wirksamer Oberflächenschutz setzt deshalb bereits an der Initialphase der Bodenerosion an. Die Schlagwirkungen des Regens können durch Erhöhung der Bodenbedeckung effektiv bekämpft werden. Hierdurch wird nicht nur die Aufprallwirkungen der Regentropfen vermindert, sondern auch einer möglichen Krustenbildung auf dem verschlämmten Boden vorgebeugt. Die höhere Oberflächenrauigkeit durch Pflanzen, Pflanzenreste und grobe Aggregate verzögert zudem das Einsetzen von Oberflächenabfluss und verringert dessen **Scher- und Transportwirkungen**. Auf diese Weise kann flächenhafter Erosion ebenso begegnet werden wie der linienhaften Erosion, die durch Abflussbündelung von

Tab. 4.21: Flächeninterne und -externe Wirkungen der Bodenerosion durch Wasser und Wind sowie durch Bearbeitungs- und Ernteerosion

Mögliche Effekte	Wasserosion	Winderosion	Ernteerosion <sup>1)</sup>	Bearbeitungserosion
<b>Kurzfristig</b> flächenintern („on-site“):	Verlust an humus- und nährstoffreichem Feinboden			Umverteilung von humus- und nährstoffreichem Feinboden im Feldinnern
	Zerstörung von Bodenaggregaten			Zerstörung von Bodenaggregaten <sup>2)</sup>
	Verlust von Aussaat und Pflanzen		–	–
	Schäden an der Pflanzensubstanz		–	–
	Erschwerte Bearbeitung bei tiefen Erosionsspuren	–	Unebenheiten im Vorgewende	–
	Anreicherung von humus- und nährstoffreichem Feinboden an Akkumulationsorten im Feldinneren und am Feldrand		–	Anreicherung von humus- und nährstoffreichem Feinboden in Geländedepressionen und am unteren Feldrand
flächenextern („off-site“):	Eintrag von Sediment und Nährstoffen in Oberflächengewässer		–	–
	Sedimentablagerung in Gräben		–	–
	Verschmutzung von Straßen		–	–
<b>Längerfristig</b> flächenintern („on-site“):	Beeinträchtigung der Bodenfunktionen, insbesondere der Retentions-, Regulations- und Produktionsfunktionen			
	Verringerung der Standortqualität und der natürlichen Bodenfruchtbarkeit durch Abnahme der Wurzelraummächtigkeit an den Abtragsorten			
	Erschwerte Bewirtschaftung durch zunehmende Standortheterogenität		–	Erschwerte Bewirtschaftung durch zunehmende Standortheterogenität
	Erschwerte Bearbeitung von Unebenheiten durch Erosionsrinnen und -gräben	–	Erschwerte Bearbeitung durch Zunahme von Unebenheiten im Vorgewende	
Ertragsverluste				
flächenextern („off-site“):	Gewässereutrophierung		–	–
	Verschlämmung/Versandung von Gewässern		–	–

1) bei Wurzel- und Knollenfrüchten

2) Aggregatzerstörung abhängig von der Bearbeitungsform und -intensität

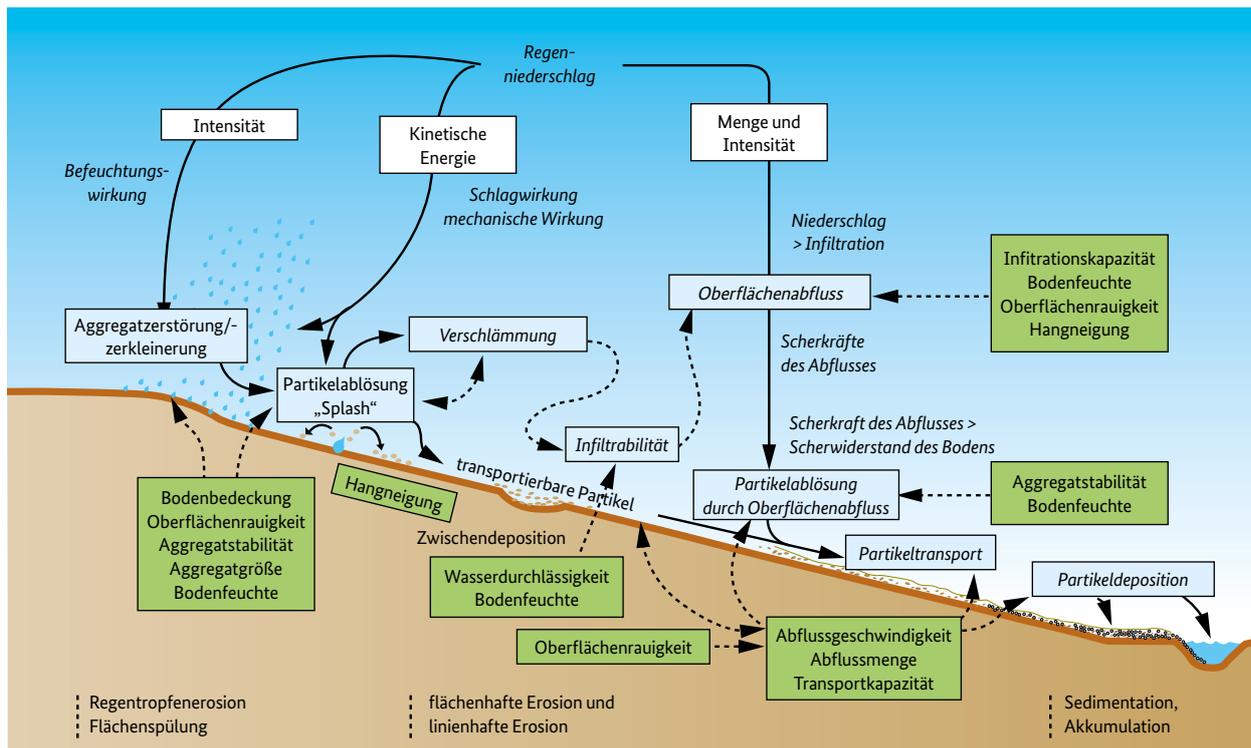


Abb. 4.33: Der Prozess der Wassererosion in der Übersicht (n. Duttman, 2001)

Oberflächenwasser erfolgt und zur Bildung von Erosionsrillen (Tiefe 2-10 cm), -rinnen (Tiefe 10-40 cm) oder -gräben (Tiefe > 40 cm) führt (s. DVWK, 1996; s. Abb. 4.35 und 4.36). Hiervon sind vor allem in Gefällerrichtung verlaufende Fahr- und Bearbeitungsspuren, die Saatzzwischenreihen und verdichtete Vorgewende betroffen.

Der in Fahrgassen beobachtbare Bodenabtrag kann dabei Größenordnungen von mehr als 50% des in einem Feld durch Erosion umgelagerten Bodenvolumens erreichen (Sanders, 2007). Für sandig-lehmige Jungmoränenböden in Schleswig-Holstein konnten Fleige et al. (1999) nachweisen, dass der Bodenabtrag in Fahrgassen allein in einer Vegetationsperiode Größenordnungen von 5,4 bis 16,1 t ha<sup>-1</sup> annehmen kann.

Die Bearbeitung einer Fläche quer zum Gefälle und Intervall-Begrünung in Fahrgassen (Abb. 4.37) können den Bodenabtrag in Fahrgassen deutlich reduzieren. Untersuchungen auf Lößböden im südlichen Niedersachsen ergaben, dass in Fahrgassen mit Intervallbegrünung gegenüber nicht begrüneten Fahrgassen eine Abtragsminderung um bis zu 80% möglich ist (Mosimann et al., 2008).

Die Wirkung dieser Maßnahmen ist allerdings von den jeweiligen Standortverhältnissen abhängig und sollte vor allem bei stärkeren Hangneigungen nur im Verbund mit anderen Schutzmaßnahmen erfolgen. Hierzu zählen die Anpassung der Arbeitsverfahren, die Verbesserung der Bodenstruktur und Fruchtfolgegestaltung (Duttman und



Abb. 4.34: Flächenhafte Verspülungen von Feinboden und Verschlammung der Bodenoberfläche (Foto: R. Duttman)



Abb. 4.35: Parallele Erosionsrillen und -rinnen in hangwärts verlaufenden Bearbeitungsspuren (Foto: R. Duttman)



Abb. 4.36: Konzentrierter Abfluss und linienhafter Bodenaustrag in Hangsenken (Foto: R. Duttman)

Tab. 4.22: Häufige Ausgangsbedingungen für das Auftreten von Wassererosion (n. aid, 2015, S. 92, ergänzt)

Häufige Ausgangsbedingungen für das Auftreten von Wassererosion	
<b>Niederschlag</b>	> 5 mm pro Stunde
<b>Bodenart</b>	Schluff, sandiger Schluff, toniger Schluff, Feinsand, sandiger Lehm, schluffige und lehmige Sande
<b>Hangneigung</b>	> 4 % (in Einzelfällen bereits bei geringerer Hangneigung)
<b>Hanglänge</b>	> 50 m (in Einzelfällen bereits bei geringerer Hanglänge)
<b>Bodenoberfläche</b>	fehlende oder geringe Bodenbedeckung, glatte, verschlammte oder verkrustete Bodenoberfläche, sehr feinkrümeliges Saatbett

Brunotte, 2002; s. Kap. 5.2.7). Diese Maßnahmen zielen auf die Erhöhung der Bodenrauhigkeit, den Erhalt eines stabilen Bodengefüges und der Infiltrationskapazität ab. Sie tragen so zur Verringerung von Oberflächenabfluss und seiner Scher- und Transportkräfte bei. Mit der Verringerung des Bodenaustrages an den Quellorten der Bodenerosion nehmen folglich auch die durch **Akkumulation** größerer Sedimentmengen feldintern verursachten Schäden (Abb. 4.38) und unerwünschte off-site-Wirkungen, wie Sediment- und Stoffeinträge in Gräben und Gewässer, ab. Hinweise auf Bedingungen, unter denen Wassererosion häufig eintritt, gibt Tabelle 4.22.

#### 4.8.3.1 Faktoren der Wassererosionsgefährdung

Die Anfälligkeit eines Standortes gegenüber Wassererosion wird von den natürlichen Standortbedingungen wie der Niederschlagsmenge und -intensität, der Bodenerodierbarkeit und den Eigenschaften der Geländeoberfläche bestimmt. Das Auftreten und Ausmaß der Bodenerosion ist dagegen wesentlich von der Art der Bodenbearbeitung und der Bewirtschaftung abhängig. Die Vermeidung von Bodenerosion und somit eine nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit lässt sich deshalb nur durch eine standortangepasste Bewirtschaftung im Sinne der „Guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft“ (BBodSchG § 17) erreichen. Die tatsächliche Erosionsgefährdung eines Standortes resultiert aus dem Zusammenwirken natürlicher und

bewirtschaftungsbedingter Standortfaktoren (Tab. 4.23), hierzu zählen:

- Niederschlagsmenge und -intensität
- Geländeoberfläche
- Bodenerodierbarkeit
- Bodenbedeckung
- Infiltrations- und Wasserrückhaltevermögen.

**Niederschlagsmenge und -intensität** sind besonders erosionsfördernd, zumal ergiebige Gewitterniederschläge oder langanhaltender Regen. Als erosionsauslösend gelten Mindestintensitäten von mehr als 5 mm h<sup>-1</sup> oder Einzelniederschläge mit einer Ergiebigkeit von mehr als 7,5 mm (BMVEL, 2001; Frielinghaus und Deumlich, 2004). In Deutschland treten Niederschläge mit der höchsten Erosivität zwischen Mai und September auf. Hohe Bodenabträge können auch in den Wintermonaten auftreten, wenn ergiebige Regenniederschläge auf nur unzureichend bedeckte und wassergesättigte Böden fallen (Abb. 4.39).

Die **Geländeoberfläche** ist ebenso von besonderer Bedeutung für den Bodenabtrag durch Wasser. Die Erosionsgefährdung steigt mit zunehmender Hangneigung und Hanglänge. In Hangrichtung verlaufende Senken und andere linienhafte Leitbahnen („Thalwege“) verstärken die Wassererosion durch Bündelung des Oberflächenabflusses. Gleiches trifft auch auf Fremdwasserzuflüsse zu, die zum Entstehen von Rinnen- und Grabenerosion beitragen können.



Abb. 4.37: Intervall-Begrünung von Fahrgassen in Winterweizen (Foto: R. Duttmann)



Abb. 4.38: Großflächige Akkumulation von Feinboden in einem flach auslaufendem Hangfußbereich mit Schäden am aufwachsenden Zuckerrübenbestand (Foto: R. Duttmann)

Die **Bodenerodierbarkeit** hängt wesentlich von der Korngrößenzusammensetzung und dem Humusgehalt ab. Sie nehmen Einfluss auf die Aggregatstabilität und die Scherfestigkeit des Bodens und bestimmen die Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit. Besonders anfällig gegenüber Wassererosion sind schwach bindige schluff- und feinsandreiche Böden und zu fein bearbeitete Bodenoberflächen. Zunehmende Tongehalte erhöhen die Kohäsion und die Stabilität des Bodens gegenüber dem Aufprall der Regentropfen und dem Oberflächenabfluss. Der Erosionswiderstand des Bodens kann durch strukturfördernde Maßnahmen wie Kalkung, Zwischenfruchtanbau und organische Düngung erhöht werden.

Der Grad der **Bodenbedeckung** gilt als die Steuergröße im Bodenerosionsprozess schlechthin (Blume et al., 2011). Er lässt sich durch die Bewirtschaftung direkt beeinflussen (s. Kap. 5.2.7) und ist deshalb zentraler Ansatzpunkt für Bodenschutzmaßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb (Brunotte et al., 1999). Die Bodenerosionsgefährdung nimmt mit zunehmender Bodenbedeckung durch Pflanzenreste oder Pflanzen ab. So tritt eine Schutzwirkung gegenüber dem Bodenabtrag bereits bei einer gleichmäßigen Bodenbedeckung von 30% – 40% ein. Die Erhöhung des Bodenbedeckungsgrades kann durch eine sinnvolle Fruchtfolgegestaltung ebenso erzielt werden wie durch das Belassen von Pflanzenresten auf der Oberfläche. Gleiches gilt für den Anbau von Zwischenfrüchten oder den Einsatz von Untersaaten (Brunotte, 2007). Diese Maßnahmen können die Zeitfenster mit erhöhter Erosionsanfälligkeit erheblich verkürzen. Beim Anbau von spätdeckenden und weitreihigen Feldfrüchten wie Zuckerrüben,

Kartoffeln und Mais auf erosionsanfälligen Standorten ermöglichen eine Mulchsaat ohne Saatbettbereitung oder eine Direktsaat in eine abgestorbene Zwischenfrucht optimalen Bodenschutz (s. Duttmann et al., 2011; Duttmann und Brunotte, 2002). Inwieweit der Landwirt mit seinen Maßnahmen einen standortangepassten Bedeckungsgrad erzielt hat, kann er mit dem „Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände“ überprüfen (Brunotte und Ortmeier, 2007).

Das **Infiltrations- und Wasserrückhaltevermögen**, die „Regenverdaulichkeit“ des Bodens, hängt maßgeblich von der Oberflächenrauigkeit und der Ausbildung eines in den Unterboden reichenden durchgängigen Systems an schnell dränenden Poren (z. B. Regenwurmgänge und alte Wurzelbahnen) und einem kontinuierlichen Mittelporensystem ab. Eine raue Oberfläche erhöht den Wasserrückhalt auf der Fläche und verringert die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses. Die Oberflächenrauigkeit kann durch Pflanzenreste und Erntereststoffe wirksam erhöht werden. Diese mindern gleichzeitig die Aufprallwirkung der Regentropfen. Nicht standortangepasste Bodenbearbeitung kann zu Bodenstrukturen und Bodenverdichtungen führen, wodurch die Infiltrationskapazität, die Wasserleitfähigkeit und das Wasserspeichervermögen des Bodens herabgesetzt wird. Vor allem Fahrspuren in Gefällerrichtung und verdichtete Vorgehende auf geneigten Oberflächen zeichnen sich durch eine hohe bearbeitungsbedingte Erosionsgefährdung aus. Die Bearbeitung einer Fläche quer zum Gefälle verringert den Bodenabtrag in Fahrspuren deutlich.

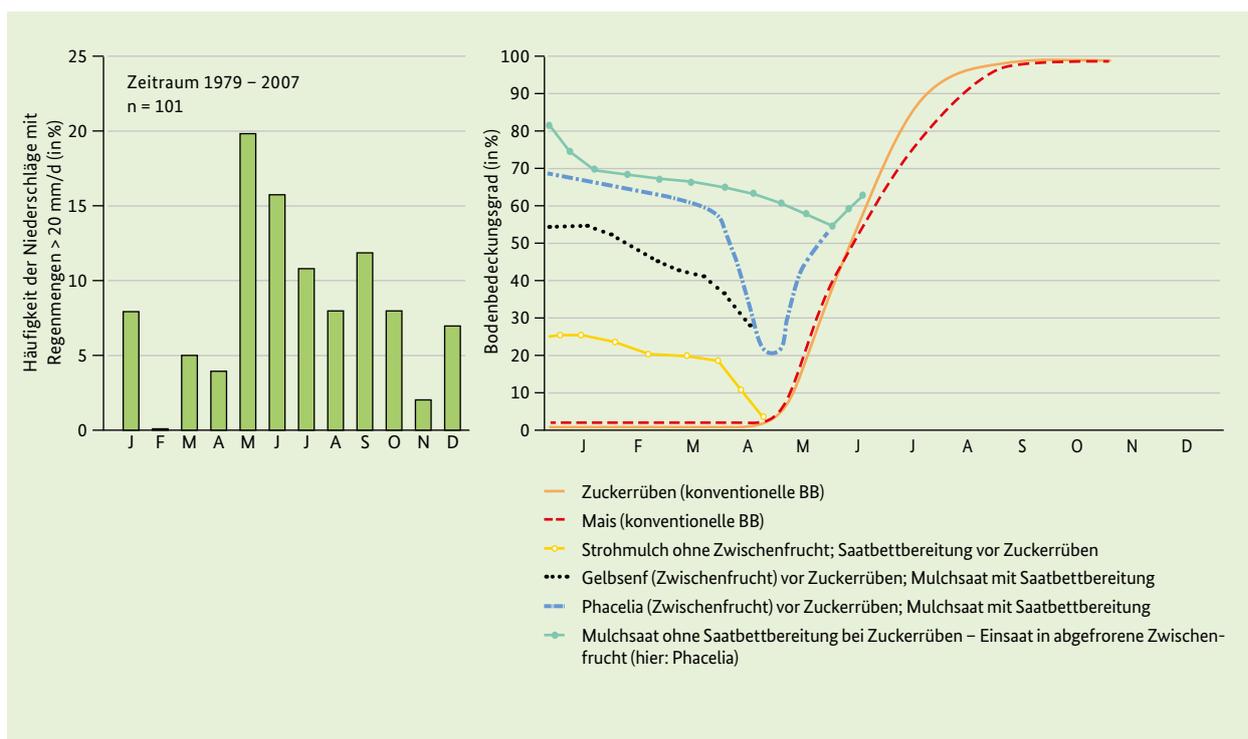


Abb. 4.39: Jahresgang von Starkniederschlägen und Bodenbedeckung bei konventionellem und konservierendem Anbau von Zuckerrüben und Mais in Südniedersachsen (Duttmann und Brunotte, 2002, S. 27, verändert)

Tab. 4.23: Faktoren der Wasser- und Winderosion (nach NLÖ, 2003, S. 13 und BMVEL, 2001, S. 46 und 48)

Wassererosion		Winderosion			
<b>Standortfaktoren</b> längerfristig wirkend, durch Bewirtschaftung kurz-/oder mittelfristig nicht veränderbar				potenzielle (standörtliche) Bodenerosionsgefährdung	Tatsächliche Bodenerosionsgefährdung
Niederschlagsintensität		Windgeschwindigkeit			
Hangneigung und Hangform		Windoffenheit der Landschaft			
Bodeneigenschaften (insbesondere Bodenart)		Bodeneigenschaften (insbesondere Bodenart)			
historisch gewachsene Landnutzungsstrukturen (Ackerland, Grünland, Wald, landschaftstypische Strukturelemente)		historisch gewachsene Landnutzungsstrukturen (Ackerland, Grünland, Wald, landschaftstypische Strukturelemente)			
<b>Nutzungsfaktoren</b> kurzfristiger wirkend, durch Bewirtschaftung kurz-/oder mittelfristig veränderbar				bewirtschaftungsbedingte Bo- denrosionsgefährdung	
Bodenbedeckung		Bodenbedeckung			
Hanglänge		Feldlänge, Feldteilung			
Oberflächenrauigkeit		Oberflächenrauigkeit			
Bodenstruktur und -gefüge		Bodenstruktur und -gefüge			
Bodenverdichtung		Bearbeitungsrichtung			
Bearbeitungsrichtung					

#### 4.8.3.2 Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung durch Wasser

Zur flächenhaften Abschätzung von Bodenabträgen existiert eine Vielzahl an Bodenerosionsmodellen (s. Duttmann et al., 2011). Ein in der Praxis gängiges Schätzmodell ist die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) (Schwertmann et al., 1987). Sie bildet die Grundlage für die DIN 19708 (NAW, 2005) „Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG“. Mit ihr lässt sich der langjährig zu erwartende mittlere Bodenabtrag durch Regen auf ackerbaulich genutzten Flächen in  $t\ ha^{-1}a^{-1}$  abschätzen und sowohl die potenzielle als auch die bewirtschaftungsbedingte Erosionsgefährdung einer Ackerfläche berechnen. Als Standardmethode kommt die DIN 19708 bei der Bestimmung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser im Rahmen des Agrarzahlen-Verpflichtungengesetzes zur Anwendung (s. dazu: AgrarZahlVerpflV, Anlage 2 zu § 6 „Mindestpraktiken der Bodenbearbeitung zur Begrenzung von Erosion“). Neben den Faktoren, die die potenzielle Erosionsgefährdung einer Fläche bestimmen (Regenerosivität, Bodenerodierbarkeit und Hangneigung), berücksichtigt sie auch die Faktoren, die für die tatsächliche Erosionsgefährdung maßgeblich sind und durch entsprechende Bewirtschaftung beeinflusst werden können (Hanglänge, Bodenbedeckung und -bearbeitung und Erosionsschutzmaßnahmen).

Auf einzelnen Elementen der ABAG bauen das „Verfahren zur Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit“ von Mosimann und Rüttimann (1995) und die Anleitung „Bodenerosion selber abschätzen“ auf. Beide Methoden richten sich insbesondere an die Praktiker im

Landwirtschaftsbetrieb und in der Beratung (Mosimann und Sanders, 2004).

#### 4.8.4 Bodenerosion durch Wind

Wie die Wassererosion ist auch die Winderosion mit einem Verlust an humus- und nährstoffreichem Oberboden verbunden. Wenngleich ihr Verbreitungsschwerpunkt auf den sandreichen Böden Norddeutschlands liegt, können Staubausschwehungen aus lehmigen und schluffigen Böden bei längeren Trockenperioden auch in anderen Regionen Deutschlands auftreten. Erosionsauslösend sind dabei Winde, die eine für die Ablösung und den Transport von Bodenpartikeln erforderliche kritische Windgeschwindigkeit erreichen und auf eine gering bedeckte, trockene Bodenoberfläche auftreffen (Tab. 4.24). Diese Bedingungen treten in Norddeutschland bevorzugt in den Frühjahrsmonaten von März bis Mitte Juni auf, wobei vor allem frisch bearbeitete und mit spätdeckenden Früchten wie Mais, Rüben und Kartoffeln bestellte Schläge ein hohes Winderosionsrisiko besitzen.

Die Auswehung mineralischer und organischer Feinsubstanz führt nicht nur zur Anreicherung der gröberen Kornfraktionen (Abb. 4.40) und somit letztlich zur Abnahme der Bodenfruchtbarkeit. Sie schwächt gleichzeitig die Stabilität des Bodengefüges. Zudem lässt das räumliche Nebeneinander von Auswehungs- und Akkumulationsbereichen Teilflächen mit unterschiedlichen Standorteigenschaften entstehen, was die Bewirtschaftung der von Winderosion betroffenen Schläge erschweren kann (Abb. 4.41).

Entsprechend ihrer Korngröße und ihres Gewichtes werden die unter Windeinfluss erodierten Bodenpartikel unterschiedlich weit transportiert. Im Vergleich zu Grobsanden, die rollend über Distanzen von wenigen Metern bewegt werden (Reptation), können Mittel- und Feinsande durch springenden Transport (Saltation) mehrere hundert Meter weit verlagert werden (Abb. 4.42). Feinste Bodenbestandteile wie Humusteilchen, Schluff- oder Tonpartikel dagegen können nach ihrer Ablösung vom Aggregatverband als Schwebstoffe, d. h. durch Suspensionstransport, über Distanzen von wenigen Kilometern bis zu hunderten von Kilometern verfrachtet werden (Funk, 2011; Shao, 2000).

Bodenverluste durch Staubauswehung können auch in Deutschland beträchtliche Größenordnungen erreichen und den Hauptanteil am Gesamtbodenverlust eines Schlages ausmachen. So zeigen Felduntersuchungen aus der nordwestdeutschen Geest, dass allein bei einem Winderosionsereignis mehr als 7 t Staub (Schluff, Ton, Humus) pro Hektar ausgebracht werden können, während der Nettoverlust der durch

Reptation und Saltation umgelagerten Sande infolge kurzer Transportreichweiten von untergeordneter Bedeutung sein kann (Goossens und Gross, 2002; Bach, 2008).

Die Deposition der durch Suspension transportierten Partikel erfolgt zumeist in diffuser Form. Mit der Ablagerung dieser Feinpartikel können unerwünschte Nährstoffeinträge in entfernter gelegene Flächen ebenso verbunden sein wie die Verbreitung von Pathogenen (z. B. Bakterien, Pilzsporen, Nematoden) (Goossens et al., 2001; McTainsh und Strong, 2007). Eine Übersicht über die flächeninternen und -externen Wirkungen der Winderosion gibt Tabelle 4.21.

#### 4.8.4.1 Faktoren der Winderosionsgefährdung

Die tatsächliche Winderosionsgefährdung resultiert aus dem Zusammenwirken von natürlichen Standortfaktoren und den Faktoren der aktuellen Bewirtschaftung (Colazo und Buschiazio, 2015; s. Tab. 4.23). Die wichtigsten Faktoren sind:

Tab. 4.24: Häufige Ausgangsbedingungen für das Auftreten von Winderosion (n. aid, 2015, S. 79; Duttmann et. al., 2011, S. 14)

Häufige Ausgangsbedingungen für das Auftreten von Winderosion	
Windgeschwindigkeit	> 6 m/s <sup>-1</sup> – 8 m/s <sup>-1</sup> (in 10 m Höhe gemessen), bzw. 4,5 m/s <sup>-1</sup> – 5 m/s <sup>-1</sup> an der Bodenoberfläche
Bodenart	Fein- und Mittelsand, schwach schluffiger und schwach lehmiger Sand mit geringem Gehalt an organischer Substanz, entwässerte Anmoor- und Niedermoorböden
Bodenfeuchte	trockener Oberboden
Bodenbedeckung	fehlende oder geringe Bodenbedeckung, glatte Bodenoberfläche, sehr feinkrümeliges Saatbett
Windoffenheit, Feldlänge	fehlender Windschutz, große Feldlänge in Hauptwindrichtung, geringe Oberflächenrauigkeit



Abb. 4.40. Anreicherung von Steinen und Grobsand in einem Auswehungsbereich auf einem frisch bestellten Schlag. Die hellere Bodenfarbe im Bildvordergrund ist auf Humusauswehung zurückzuführen (Foto: R. Duttmann)

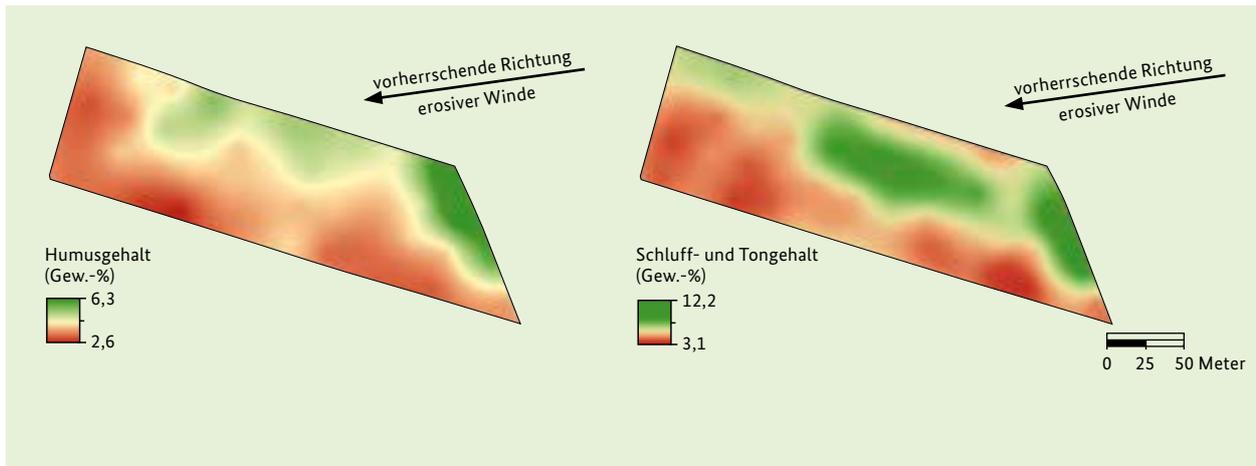


Abb. 4.41: Räumliche Verteilung von organischer Substanz, Schluff und Ton im Oberboden eines windexponierten Ackerschlages in der Schleswiger Geest (hier: Bodendauerbeobachtungsfläche BDF 4 „Goldelund“ des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein). Mit zunehmender Windwirklänge zeigen sich abnehmende Anteile an organischer und mineralischer Bodenfeinsubstanz (n. Duttmann und Bach, 2006, S. 316, verändert).



Abb. 4.42: Oberflächennaher Sandtransport durch Saltation und Sanddeposition (helle Bodenoberfläche) im Zusammenspiel (Foto: R. Duttmann)

- Klimatische Erosivität
- Erodierbarkeit des Bodens
- Rauzigkeit der Bodenoberfläche
- Windoffenheit und Feldlänge
- Bodenbedeckung

Die **klimatische Erosivität** resultiert aus der Häufigkeit des Auftretens potenziell erosionsauslösender Windgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Bodentrockenheit. Letztere ist von der Niederschlagsmenge, der relativen Luftfeuchte und der Verdunstung abhängig. Auf unbedeckten, trockenen Böden aus Mittel- oder Feinsanden setzt die Partikelbewegung bei Erreichen einer kritischen Windgeschwindigkeit von 4,5 bis 5 m s<sup>-1</sup> in unmittelbarer Bodennähe ein. Deutlich geringer ist die Schwellenwindgeschwindigkeit für die organischen Bestandteile stark entwässerter und degradierter Moorböden. Hier kann die Auswehung bereits bei bodennahen Windgeschwindigkeiten von 2 bis 4 m s<sup>-1</sup> beginnen.

Die **Erodierbarkeit des Bodens** hängt primär von der Bodenart und dem Humusgehalt ab. Beide nehmen Einfluss auf die Gefügestabilität, die Scherfestigkeit und die Wasserbindung und bestimmen so die Erosionsanfälligkeit des Bodens. Fein- und Mittelsande verwehen am leichtesten, steigende Schluff-, Ton- und Humusgehalte erhöhen den Erosionswiderstand von Mineralböden. Infolge ihres geringen Eigengewichts sind trockene Anmoor- und Moorböden unter ackerbaulicher Nutzung hochgradig erodierbar. Auch eine zu feine Bodenbearbeitung fördert die Anfälligkeit des Bodens gegenüber Winderosion.

Die **Rauzigkeit der Bodenoberfläche** wirkt der Auswehung entgegen. Sie verringert die Windgeschwindigkeit in Bodennähe, wodurch die ablösenden Kräfte und die Transportkraft der oberflächennahen Luftströmung herabgesetzt werden. Die Schaffung eines entsprechenden Mikroreliefs durch Pflugfurchen, Stoppel- und Saatreihen oder das Anlegen von Dämmen, wie beim Anbau von Kartoffeln oder Spargel,

brems insbesondere auf Sandböden den Partikeltransport durch Reptation und Saltation. Eine Erosionsminderung durch diese Oberflächenstrukturen lässt sich allerdings nur erreichen, wenn die Bodenbearbeitung quer zur vorherrschenden Richtung erosionswirksamer Winde erfolgt. Glatte Oberflächen, wie zum Beispiel durch Walzen, sind in jedem Falle zu vermeiden.

Die **Windoffenheit** der Landschaft und die **Feldlänge** sind von besonderer Bedeutung. Das Fehlen landschaftsstrukturierender Landschaftselemente wie Hecken, Knicks, Gebüschreihen oder Feldgehölz begünstigt die Auswehung. Eine wichtige Steuergröße für die Intensität der Bodenverwehung und die Transportkapazität des Windes ist die Feldlänge, d. h. die Windwirklänge über der ungeschützten Bodenoberfläche. Zur Verringerung des Winderosionsrisikos sollten Felder nach Möglichkeit so angelegt werden, dass ihre Bearbeitung quer zur Hauptrichtung der erosionswirksamen Winde erfolgen kann.

Die **Bodenbedeckung** durch Pflanzen und/oder Pflanzenreste ist für das Ausmaß der tatsächlichen Winderosionsgefährdung entscheidend. Je nach Fruchtart und Fruchtfolge ergibt sich ein mehr oder weniger langer Zeitraum mit geringer oder fehlender Bodenbedeckung. Bodenverwehungen lassen sich bereits bei Bedeckungsgraden von 25 bis 30 % erheblich reduzieren. Ein Bodenbedeckungsgrad von 50 % (Brunotte und Ortmeier, 2007) mindert den Bodenabtrag sogar um bis zu 95 %. Wirksamer Bodenschutz lässt sich durch Schaffung einer möglichst ganzjährigen Bodenbedeckung aus Pflanzen, Erntereststoffen oder Zwischenfrüchten erreichen (s. Kap. 5.2.7). Dieses gilt besonders für Ackerkulturen, denen eine vom Herbst bis ins nächste Frühjahr andauernde Brachezeit vorhergeht.

#### 4.8.4.2 Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung durch Wind

Zur Abschätzung des Bodenaustrages durch Wind können neben einfacheren empirisch-statistischen Modellen, wie der Wind Erosion Equation (WEQ) (Woodruff und Sid-doway, 1965) oder ihrer Weiterentwicklung, der Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) (Fryrear, 1998; Fryrear et al., 2000) komplexere Modelle mit physikalischer Prozessbeschreibung eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind das Wind Erosion Prediction System (WEPS) (Hagen, 1991) oder das für mitteleuropäische Verhältnisse entwickelte Modell WEELS (Böhner et al., 2003). Diese Modelle dienen der Berechnung von Austragsmengen und Transportbilanzen von Winderosionsereignissen.

Für praktische Fragestellungen werden allerdings häufig einfacher zu handhabende Schätzverfahren verwendet. Eine in Deutschland gängige Methode ist das Verfahren nach DIN 19706 „Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind“ (NAW, 2004). Sie kommt als Standardmethode zur Bestimmung der potenziellen Winderosionsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Flächen gemäß AgrarZahlVerpflG

(Anlage 3) zur Anwendung. Die Methode liefert qualitative Angaben zur potenziellen Winderosionsgefährdung einer Fläche in Form ordinal skalierten Gefährdungsstufen. Hierbei werden neben einfachen bodenkundlichen Kenngrößen (Bodenart und Humusgehalt) und klimatologischen Messdaten wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung auch die Windschutzwirkungen entsprechender Landschaftselemente (Hecken, Baumreihen usw.) berücksichtigt. Eine Bestimmung von Auswehungsraten ist mit dieser Methode nicht möglich. Hierzu sind komplexere Modelle erforderlich. Eine praktikable Möglichkeit zur Abschätzung des bei Einzelergebnissen tatsächlich ausgetragenen, umgelagerten oder deponierten Bodenvolumens bietet die Erosionskartierung.

#### 4.8.5 Bewertung der Bodenfruchtbarkeitsgefährdung durch Bodenerosion

Gesetzliche Grenzwerte für den Bodenabtrag in  $t\ ha^{-1}$  existieren zurzeit nicht. Einen Orientierungsrahmen für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit bilden aber das von Schwertmann et al. (1987) vorgestellte „Toleranzgrenzkonzzept“ und das von Mosimann (1995) beschriebene „Konzept der Gefährdungsstufen der Bodenfruchtbarkeit“, das auch die Dringlichkeit von Schutzmaßnahmen mit einbezieht (s. Mosimann, 1998). Beide Verfahren berücksichtigen den feldinternen Bodenabtrag und gehen von einer geringen Bodenneubildungsrate aus.

Das „Toleranzgrenzkonzzept“ von Schwertmann et al. (1987) legt Grenzwerte für den tolerierbaren Bodenabtrag in  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  fest, bei deren Unterschreitung das natürliche Ertragspotenzial des Bodens in einem Zeitraum von 300 bis 500 Jahren nicht entscheidend vermindert wird. Der tolerierbare Abtrag wird dabei in Abhängigkeit von der Bodengründigkeit oder von der Acker- bzw. der Grünlandzahl definiert (Toleranzgrenze ( $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ) = Acker- oder Grünlandzahl  $\div$  8). Danach liegen die Grenzwerte des „tolerierbaren Bodenabtrages“ zwischen  $1\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  bei flachgründigen Böden und  $10\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  bei Böden mit einer Gründigkeit von mehr als 100 cm (Tab. 4.25). Aus den Toleranzgrenzen lässt sich ableiten, ob und in welchem Umfang Schutzmaßnahmen zu treffen sind.

Das von Mosimann (1995) vorgeschlagene Konzept der „Bewertungsstufen der Bodenfruchtbarkeit“ definiert vier Stufen der erosionsbedingten Bodenfruchtbarkeitsgefährdung. Die Gefährdungsstufe wird ebenfalls aus dem für Einzelschläge geschätzten Bodenabtrag (in  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ) und der pflanzennutzbaren Gründigkeit des Bodens bestimmt. Die Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit ist dabei umso höher, je rascher eine für Ackerbau als erforderlich angenommene minimale Gründigkeit von 50 cm unterschritten wird (Mosimann und Sanders, 2004). Die Grenze zwischen der Gefährdungsstufe 0 (Bodenfruchtbarkeit nicht gefährdet) und Stufe 1 (Bodenfruchtbarkeit kurzfristig nicht gefährdet) wird auf flachgründigen Böden bereits bei einem mittleren jährlichen Bodenabtrag von  $1\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  erreicht. Dagegen ist der maximal akzeptierbare Bodenabtrag bei mächtigeren

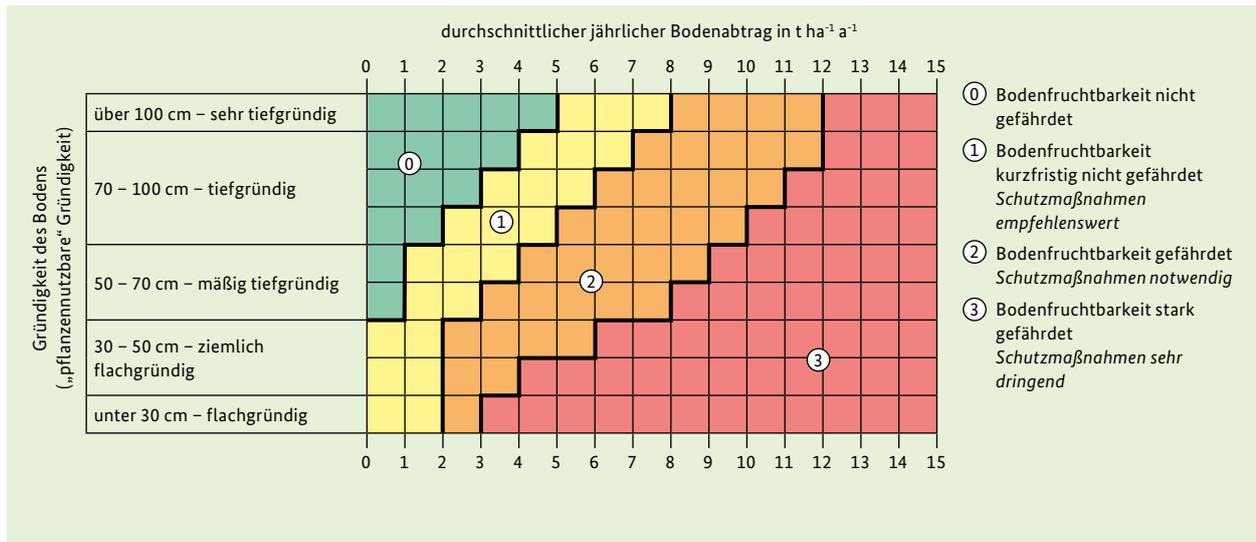


Abb. 4.43: Gefährdungsstufen der Bodenfruchtbarkeit in Abhängigkeit vom durchschnittlichen jährlichen Bodenabtrag und der Gründigkeit des Bodens (Mosimann, 1998, S. 175)

Tab. 4.25: Toleranzgrenzen für Bodenabträge (nach Schwertmann et al., 1987, S. 13)

Toleranzgrenze ( $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ )	Gründigkeit	Bodenmächtigkeit (cm)
1	flach	< 30
3	mittel	30 – 60
7	tief	60 – 100
10	sehr tief	> 100
E	Sehr hoch	$\geq +500$

Böden (Gründigkeit > 100 cm) auf  $5\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  festgesetzt (Abb. 4.43). Die Stufe höchster Gefährdung (Stufe 3) kennzeichnet den Bereich der kurzfristig notwendigen, d. h. sehr dringlichen Schutzmaßnahmen. Diese sind auf Standorten mit mittlerer Gründigkeit erforderlich, wenn der Boden innerhalb von 100 Jahren 15 % seiner Gründigkeit durch Bodenabtrag einbüßt. Für flachgründigere Böden gelten strengere Werte (vgl. Mosimann, 1998). Die o. g. Grenzwerte stellen Mindeststandards dar, die den Erhalt der natürlichen Bodenfruchtbarkeit langfristig sichern sollen.

#### 4.8.6 Fazit

Bodenerosion ist in zahlreichen Ackerbauregionen eine der Hauptgefahren für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Sie ist mit einem unwiederbringlichen Verlust an humusreichem Feinboden verbunden. Die Ressource „Boden“ ist andererseits nicht erneuerbar. Fortgesetzte Bodenerosion führt selbst bei geringsten Abtragsraten zu einer sukzessiven Abnahme der Oberbodenmächtigkeit und zum schleichenden Verlust der Bodenfunktionen. Dem Auftreten von Bodenerosion kann durch konsequente Anwendung der Grundsätze der „Guten fachlichen Praxis“ wirkungsvoll begegnet werden (s. Kap 5.2.7).

## 5

(Foto: Landpixel)

# Bodenbewirtschaftung und Bodenfruchtbarkeit

Da Maßnahmen zur Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit immer langfristig angelegt sind, tritt ihr Erfolg schrittweise ein. Eine Auflockerung der Fruchtfolge ist mindestens zehn Jahre lang zu betrachten, um zu sehen, ob sie ökologisch, ökonomisch und sozial tragbar ist. Sind beim Anbau von Zwischenfrüchten die Kosten sofort quantifizierbar, ist der kurzfristige Nutzen (=geringeres Umbruchrisiko und Neueinsaat), der mittelfristige Nutzen (=Gründungseffekt mit Ertragssteigerung und Förderung des Bodenlebens) und der langfristige Nutzen (= Erhalt der Bodenfruchtbarkeit über Jahrhunderte) schwer zu bemessen und erfordert viel Geduld. Leichter ist die Nährstoffeffizienz zu beurteilen, da die Stoffkreisläufe schnell messbar sind. Mit Maßnahmen zur Bodenbearbeitung und Befahrung kann der Landwirt relativ schnell reagieren und Einfluss nehmen, Fruchtfolge und Förderung des Humusgehaltes benötigen längere Reaktionszeiten. Wichtig ist, dass immer das ganze Managementsystem aus Boden/Pflanze/Maschine berücksichtigt wird. Nur so können auch im Sinne der Nachhaltigkeit die unerwünschten Nebeneffekte stofflicher (Schwermetalle, Nährstoffe, Pflanzenschutzmittel) und nicht stofflicher (Bodenerosion, Bodenverdichtungen) Art vermindert werden.

## 5.1 Fruchtfolge und Bodenfruchtbarkeit

### 5.1.1 Bedeutung von Vor- und Zwischenfrucht (Heinz-Josef Koch, Bernhard C. Schäfer)

#### 5.1.1.1 Grundlagen

Unter Fruchtfolge versteht man das zeitlich geordnete Nacheinander von in der Regel ein- oder zweijährigen Fruchtarten auf demselben Feld im wiederkehrenden Rhythmus. Fruchtfolgen sind ein wichtiger Bestandteil des Ackerbaus sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und zu verbessern. Sie setzen sich aus Vorfrucht-Nachfrucht-Kombinationen zusammen und umfassen heute oftmals nur drei bis fünf Felder (Früchte), bei denen einzelne Früchte auch mehrfach enthalten sein können (z. B. Winterraps-Winterweizen-Zuckerrübe-Winterweizen-Wintergerste). Fruchtfolge- bzw. Vorfruchteffekte lassen sich unterscheiden in direkte Wirkungen einer Vorfrucht auf die unmittelbare Folgefrucht (Nachfrucht) und längerfristige Wirkungen auf die zweite, dritte etc. Folgefrucht. Wesentliche Vorfruchteffekte auf den Ertrag der Folgefrucht resultieren aus deren Einfluss auf Unkräuter und vor allem auf Krankheiten und Schädlinge (Unterdrückung oder Förderung). Des Weiteren bestehen Vorfruchteffekte aus der Bereitstellung von Nährstoffen (Höhe und Zeitpunkt von Mineralisation und Festlegung, Vermeidung von Bodenerosion, Auswaschung und Entgasung) sowie aus der Wirkung auf die Bodenstruktur (z. B. durch die Stabilisierung von Krümelstrukturen, s. Tab. 5.1), die die Verfügbarkeit von Wasser, Sauerstoff, Wärme und Nährstoffen beeinflusst.

Diese Einflüsse hängen ihrerseits wiederum von der Vegetationslänge der Vorfrucht (Aussaat-, Erntetermin), der Dauer und Intensität der Beschattung der Bodenoberfläche und der Möglichkeit eines Zwischenfruchtanbaus zwischen Vor- und Folgefrucht, der Durchwurzelung (Tiefe, Intensität) und den Ernteresten (Menge, Zusammensetzung) ab. Untrennbar mit

Tab. 5.1: Anteile wasserbeständiger Krümel nach Anbau verschiedener Kulturpflanzen (nach Sekera, 1956 und Kahnt, 1986)

Kulturpflanzen	Wasserbeständige Krümel
nach Hackfrüchten	10–15 %
nach Getreide	15–20 %
nach Weißklee	30–35 %
nach Raps	30–50 %
nach Gräsern	50–60 %
nach Klee gras	> 70 %

Quelle: Kivelitz und Lütke Entrup (2005)

den Eigenschaften der als Vorfrucht angebauten Fruchtart selbst bestimmen auch die zur Vorfrucht durchgeführten Anbaumaßnahmen deren Wirkung auf die Folgefrucht. Beispielsweise sei hier auf die Befahrungen mit landwirtschaftlichen Maschinen insbesondere bei der Ernte hingewiesen, die sich hinsichtlich Zeitpunkt (Bodenfeuchte), Anzahl der Überfahrten, betroffenem Flächenanteil sowie Radlasten und Kontaktflächendrücken in ihrer Nachwirkung deutlich unterscheiden können. Auch die Intensität des erforderlichen „Nacherntemanagements“ ist zur Schaffung günstiger Bedingungen für die Etablierung der Folgefrucht von entscheidender Bedeutung (Strohzerkleinerung und -einarbeitung). All diese Faktoren lassen sich im konkreten Fall nur schwer fassen, beeinflussen sich teilweise gegenseitig und sind am aussagekräftigsten durch die vergleichende Betrachtung des Ertrages zu beschreiben. Damit wird der Ertrag zum wichtigen Indikator der Bodenfruchtbarkeit, der sowohl natürliche als auch anthropogene (bewirtschaftungsbedingte) Aspekte integriert.

An ausgewählten Beispielen sollen nachfolgend Vorfruchteffekte auf den Ertrag von Winterweizen und Zuckerrüben sowie Zwischenfruchteffekte dargestellt werden. Die beschriebenen Wirkungen wurden in Feldversuchen und Erhebungen aus Praxisbetrieben gewonnen. Sie beziehen sich auf die Bedingungen des konventionellen Anbaus, unter denen nachteilige Vorfruchteffekte zumindest teilweise durch Maßnahmen des Pflanzenschutzes und der Düngung kompensiert werden können.

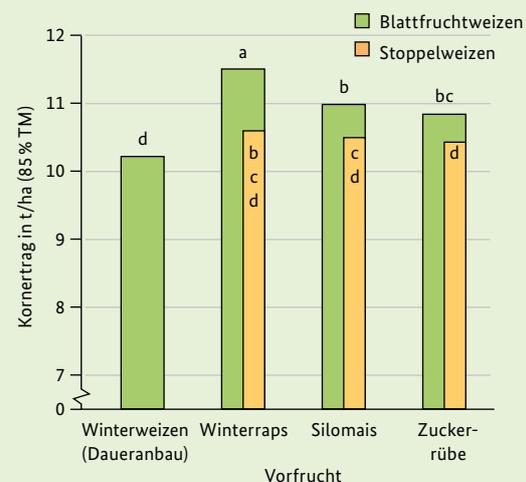


Abb. 5.1: Einfluss verschiedener Vorfrüchte auf den Kornertrag von Winterweizen im Systemversuch Fruchtfolge Harste. Die gelben Säulen zeigen den Ertrag des Stoppelweizens der jeweiligen Fruchtfolge. Mittel 2008–2014, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Koch und Jacobs, 2014)

### 5.1.1.2 Vorfruchteffekte auf Winterweizen

Beim Anbau von Winterweizen können Fruchtfolge- und Vorfruchteffekte einen relevanten Einfluss auf das Auftreten von Wurzel- und Halmbasierkrankungen, Blattfleckenkrankheiten (*Septoria tritici* und DTR) und Ährenfusariosen haben, die durch Pflanzenschutzmaßnahmen nicht vollständig zu kontrollieren sind. Deshalb gehen diese neben den Aspekten Stickstoffversorgung, Saatzeit und Bodenstruktur vorrangig in die Ertragswirkung ein und lassen sich unter dem Dach der Bodenfruchtbarkeit subsumieren.

Eine Auswertung aktueller Daten der „Besonderen Ernteermittlung“ für das Bundesland Hessen ergab, dass die Vorfrüchte Raps und Zuckerrübe gegenüber der Referenzvorfrucht Winterweizen zu einem 2,5 – 9% höheren Kornertrag führten, während die Vorfrucht Mais gleichauf mit der Weizenvorfrucht lag (Schneider, 2014). Die günstige Vorfruchtwirkung des Rapses auf Winterweizen bestätigte auch der „Systemversuch Fruchtfolge Harste“ (bei Göttingen), der auf einem tiefgründigen Lößstandort in Südniedersachsen angelegt wurde (Strohverbleib, pfluglose Bodenbearbeitung): hier betrug der im Mittel von sieben Jahren gemessene Mehrertrag eines Raps- gegenüber einem Stoppelweizen 9% und 12% gegenüber Weizendaueranbau (Abb. 5.1). Die Vorfrucht Zuckerrübe führte hier im Gegensatz zu den hessischen Daten zu einem Minderertrag gegenüber der Rapsvorfrucht von ca. 6% und unterschied sich damit nicht von der Vorfrucht Silomais (Koch und Jacobs, 2014). Der Ertragsvorteil des Rübenweizens (sowie des Maisweizens) gegenüber dem Stoppelweizen betrug nur noch 3%, Unterschiede zwischen den drei Stoppelweizenvarianten nach den unterschiedlichen Blattfrüchten (Winterraps, Silomais, Zuckerrübe) traten nicht auf, so dass Ertragseffekte sich in diesem Versuch nur in der unmittelbaren Folgefrucht auswirkten.

Ursache für die Unterschiede zwischen den beiden Auswertungen könnten vor allem Unterschiede in den Umweltbedingungen sein: während die südniedersächsischen Versuchsergebnisse an einem Standort, d. h. unter gleichen Boden- und Witterungsbedingungen erfasst wurden, gingen in die hessischen Daten solche aus sehr unterschiedlichen Regionen mit unterschiedlichen Boden- und Witterungsverhältnissen ein. Die Zuckerrübe wird vor allem auf fruchtbaren Lößböden angebaut, was zu einem relativ höheren Ertrag des Rüben- im Vergleich zum Rapsweizen beigetragen haben dürfte; im Gegensatz dazu wuchs letzterer vermutlich ebenso wie Mais zu einem größeren Anteil in Höhenlagen auf schweren und/oder flachgründigen Böden.

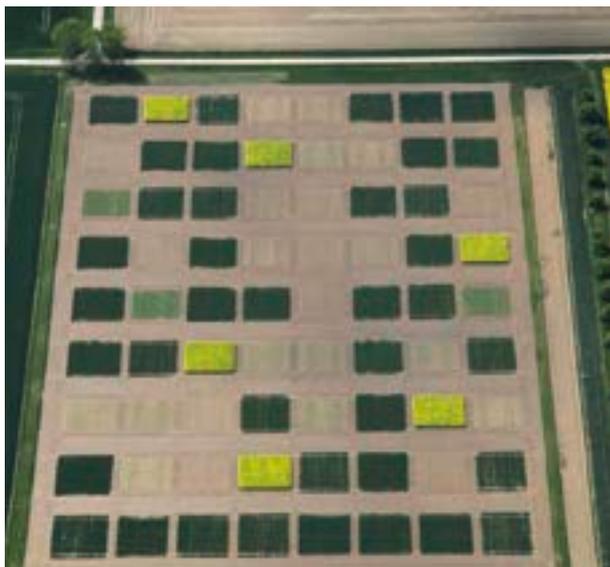
Besonders günstige Wirkungen gehen auch von Körnerleguminosen als Vorfrucht von Weizen aus. In einer Befragung von 75 konventionellen Betrieben gaben zwischen 90 und 100% an, diese Kulturen auch zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit anzubauen und gaben diesem Aspekt dabei ein großes Gewicht (Alpmann et al., 2013). Neben der Unterbrechung der Entwicklungszyklen der wichtigsten Getreidekrankheiten wirken sich insbesondere stickstoffreiche Erntesterne in Form von Stängel- und Wurzelmaterial

positiv aus. Die hinterlassenen N-Mengen variieren in Abhängigkeit von der angebauten Kultur, der Sorte und dem Jahr. Jost (2003) konnte für Ackerbohnen und Weiße Lupine im dreijährigen Mittel einen N-Saldo von ca. 90 kg N/ha, für Erbsen von 56 kg N/ha nachweisen. Die von der Folgefrucht nutzbaren Stickstoffmengen sind wiederum abhängig vom Standort und den jahresspezifischen Mineralisationsbedingungen. Bei Lupinen kann zudem durch den mittels Proteoidwurzeln aufgeschlossenen Phosphor ein weiterer Vorteil entstehen. Anders als bei Zuckerrüben und Kartoffeln erfolgt bei der Ernte wie bei den anderen Mähdruschfrüchten keine Bodenbewegung, so dass die während des Wachstums ausgebildete günstige Gare nach der Ernte weitgehend erhalten bleibt, da für die Aussaat der Folgekultur – wenn überhaupt – nur eine geringe Bodenbearbeitung erforderlich ist. Die vergleichsweise frühe Ernte der Körnerleguminosen mindert zudem das Risiko der Befahrung mit schweren Lasten unter widrigen Bedingungen. Albrecht (2002) konnte zeigen, dass Weizen nach Körnerleguminosen Mehrerträge von 0,67 – 1,43 t/ha im Vergleich zum Anbau nach Getreide erbrachte. Aktuelle Praxiserhebungen von Kramps-Alpmann et al. (2015) zeigen im Mittel von drei Jahren in unterschiedlichen Fruchtfolgekonstellationen Mehrerträge von 0,6–0,9 t Getreideeinheiten/ha nach Körnerleguminosen gegenüber verschiedenen Vergleichsfrüchten.

### 5.1.1.3 Vorfruchteffekte auf Zuckerrüben

Insbesondere aus phytosanitären Gründen (Nematoden, Wurzelbrand- und Rübenfäuleerreger) müssen beim Anbau von Zuckerrüben zumindest zwei-, besser sogar drei- und vierjährige Anbaupausen eingehalten werden. So sank der Ertrag bei drei- bzw. zwei- gegenüber vierjähriger Anbaupause um ca. 6 bzw. 8% im Zuckerrübenfruchtfolgeversuch Etdorf (bei Halle) auf einer Schwarzerde (Deumelandt et al., 2010). Der Ertrag war dabei streng negativ mit dem Zysten-nematodenbesatz und dieser mit der Länge der Anbaupause korreliert. Bei Anbau einer heute verfügbaren Zuckerrübensorte mit ausgeprägten Toleranzeigenschaften wäre der Minderertrag durch den Nematodenbesatz vermutlich deutlich geringer ausgefallen.

Vorfrucht der Zuckerrübe war im Zuckerrübenfruchtfolgeversuch Etdorf stets Winterweizen, der auch bundesweit vor Wintergerste die häufigste Vorfrucht von Zuckerrübe ist (Buhre et al., 2011). Im bereits zuvor genannten „Systemversuch Fruchtfolge Harste“ (zweijährige Anbaupause) war der Zuckerertrag nach Winterweizen und Silomais gleich, nach Erbsenvorfrucht jedoch um ca. 4% höher, obwohl die N-Düngung vermindert war. An einem niederbayerischen Standort (Gäuboden bei Straubing) mit erhöhtem Risiko von Rhizoctoniabefall (Erreger der späten Rübenfäule) war demgegenüber der Ertrag von Zuckerrüben nach Anbau der Rhizoctonia-Wirtspflanze Silomais um ca. 6% niedriger als nach Winterweizenvorfrucht. Der Anbau einer resistenten bzw. toleranten Zuckerrübensorte kann unter solchen Bedingungen wesentlich zu einer Verminderung der negativen Ertragswirkung von Rhizoctonia beitragen (Buhre et al., 2009). Eine



Der Systemversuch Fruchtfolge Harste liefert wertvolle Ergebnisse zu Vorfruchteffekten (Foto: H.-J. Koch)



Auch auf hoch produktiven Standorten sind vielfältige Fruchtfolgen gefragt (Foto: H.-J. Koch)

andere Versuchsserie zeigte, dass Wintereraps im Vergleich zu Weizen nicht ertragssteigernd auf die nachfolgende Zuckerrübe wirkte (Achtung: eine Vermehrung von Zystenematoden wurde durch konsequente Ausfallrapsbekämpfung ausgeschlossen), jedoch eine Düngereinsparung von 20-40 kg N ha<sup>-1</sup> ermöglicht. Demzufolge wird die insgesamt günstige Vorfruchtwirkung des Rapses durch nachfolgenden Winterweizen besser genutzt als durch die Zuckerrübe.

#### 5.1.1.4 Vorfruchteffekte von Zwischenfrüchten

Zwischenfrüchte werden in Deutschland überwiegend vor Sommerungen wie Mais, Zuckerrübe oder Kartoffel angebaut. Ihr Anbau kann sich kurzfristig insbesondere auf die Nährstoff- und Wasserversorgung der Folgefrucht auswirken und zur Vermehrung bzw. Verminderung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen führen. Daneben tragen sie zu einer Verlängerung der Zeit der Bodenbedeckung bei, was sich günstig auf die Reduktion von Bodenabtrag und die Bodengare auswirken kann. Bei früher Aussaat können z. B. zwischen Wintergerste und Zuckerrüben durch eine Zwischenfrucht zusätzliche sieben bis acht Monate mit Bodenbedeckung erreicht werden. Vor Sommerungen werden häufig abfrierende, im Falle von Zuckerrüben meist mit spezifischen Resistenzen ausgestattete Senf- und/oder Ölrettichsorten zur Nematodenreduktion und allgemein zur Verminderung der Nitratauswaschung angebaut, vor Mais auch winterharte, langsam wachsende Gräser. Diese können aber auch als Untersaaten im Mais etabliert werden und zur Bodenbedeckung nach Mais beitragen, insbesondere wenn dem Mais eine Sommerung folgt. In erosionsgefährdeten Lagen des Ackerbaus kann Zwischenfruchtanbau in Verbindung mit Mulchsaat außerdem zum Erosionsschutz beitragen. Längerfristig werden auch positive Effekte auf den Humusgehalt des Bodens erwartet.

Zwischenfrüchte können zu Ertragssteigerungen in der nächsten, aber zusätzlich auch der übernächsten Kultur führen, wie Renius et al. (1992) zeigen konnten. In ihren Versuchen wurden nach den Zwischenfrüchten Senf bzw. Phacelia bei Zuckerrüben (Folgefrucht) bis zu 10% höhere Zuckererträge und bis zu 6% höhere Erträge beim folgenden Weizen erzielt. Andere Versuche bestätigen diese ertragssteigernde Wirkung nur teilweise (Hauer et al., 2015) oder lassen erst langfristig einen ertragssteigernden Effekt des Zwischenfruchtanbaus erkennen (Constantin et al., 2010).

Voraussetzung für das Gelingen einer Zwischenfrucht ist eine ihren Ansprüchen entsprechende ausreichend lange Vegetationszeit vor der Etablierung der Folgekultur. Insbesondere, wenn weitergehende Ziele (z. B. Nematodenbekämpfung) erreicht werden sollen, muss eine gute Entwicklung mit großer Biomassebildung gewährleistet sein. Nach Wintergerste ist dieser Zeitraum mit hoher Sicherheit gegeben, nach Weizen ist die Auswahl der möglichen Kulturen je nach Region meist eingeschränkt. Im Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit sollte die Zielrichtung des Zwischenfruchtanbaus geklärt sein. Wenn es um die Konservierung von Nährstoffen und die Bildung hoher Mengen an organischer Substanz zur Steigerung der C-Gehalte im Boden geht, sind frühe Aussaattermine ab Ende Juli unerlässlich. Unter diesen Voraussetzungen sind oberirdische Aufwüchse von 5 t TM/ha und mehr möglich, in denen bis zu 180 kg N/ha gebunden werden. Zusätzlich werden Wurzelmassen von bis zu 2,5 t/ha gebildet (Laser, 2015). Für die Ertragswirkung auf die Folgefrüchte ist die gesamte Biomasse relevant. Allein die Wurzeln und Stoppeln der Zwischenfrucht können dabei zwischen 40 bis 80% des Ertragszuwachses der folgenden Hauptkultur bewirken (Renius et al., 1992). Allerdings sind bei früher Saat meist zusätzliche Arbeitsgänge zur Verhinderung einer Samenbildung oder der Zerkleinerung des Aufwuchses notwendig. Steht dagegen die Vermeidung von Erosion im Vordergrund, ist

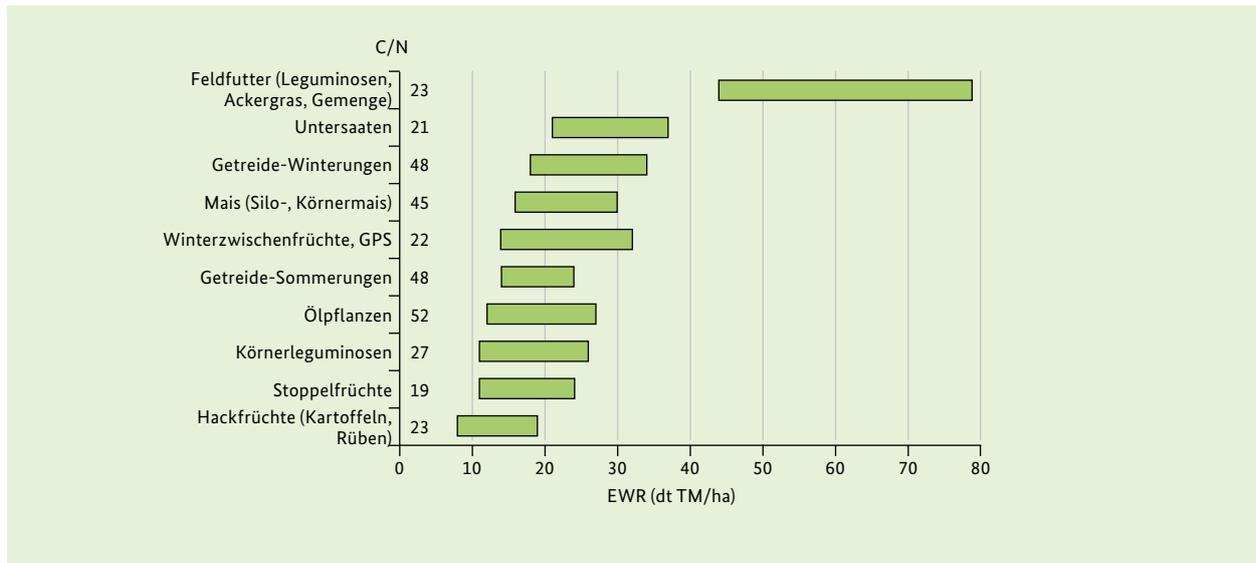


Abb. 5.2: Einfluss der Fruchtarten auf die Menge und Qualität (C/N-Verhältnis) der Ernte-, Stoppel- und Wurzelrückstände (EWR) (Zusammenstellung von Kolbe, LfULG)

das Zeitfenster für die Aussaat der Zwischenfrucht größer und strukturreiches Material sollte nach dem Absterben der Pflanzen einen ausreichenden Schutz vor Bodenabtrag gewährleisten. Hierfür eignen sich z. B. Senf oder Phacelia. Im Zwischenfruchtanbau unter den Rahmenbedingungen des „Greening“ sind zukünftig Artenmischungen gefordert und mineralische Düngung sowie Pflanzenschutzmitteleinsatz sind nicht mehr erlaubt. Diese Veränderungen könnten sich einerseits positiv auf beabsichtigte Vorfruchtwirkungen des Zwischenfruchtanbaus (Artenmischungen), andererseits aber auch über eine schwächere Biomasseentwicklung (keine mineralische Düngung) negativ auswirken.

Diese Beispiele zeigen, dass Fruchtfolge- und Vorfruchteffekte erheblich von den Umweltbedingungen, d. h. den Boden- und Witterungsbedingungen sowie dem spezifischen Vorhandensein von Krankheiten, Schaderregern und Unkräutern und darüber hinaus einzelnen Managementmaßnahmen geprägt sind. Damit können sie einer deutlichen regionalen oder sogar lokalen Variation unterliegen. Diese Interaktionen und komplexen Wirkungen erschweren es, spezifische und allgemeingültige Aussagen zu Wirkungen von Fruchtfolge und Vor- und Zwischenfrüchten auf die Bodenfruchtbarkeit im Sinne der Ertragsfähigkeit eines Standortes zu treffen. Generell wirken sich aber lange Zeiten der Bodenbedeckung, eine intensive Durchwurzelung der angebauten Kulturen und das Belassen der Ernterückstände auf den Flächen positiv auf die Bodenfruchtbarkeit aus.

## 5.1.2 Fruchtfolge aus Sicht der Humusversorgung sowie des ökologischen Landbaus (Hartmut Kolbe)

### 5.1.2.1 Einfluss der Fruchtarten auf Ernte- und Wurzelrückstände sowie den Humusumsatz

Durch den periodischen Anbau der Fruchtarten und Zwischenfrüchte werden Ernte- und Wurzelreste (EWR) gebildet, die nach der Ernte auf den Feldern verbleiben. Ackerfutter, Untersaaten und die Wintergetreidearten weisen je nach Ertragsniveau verhältnismäßig hohe EWR-Mengen auf. Körnerleguminosen, Stoppelfrüchte und Hackfrüchte hinterlassen dagegen relativ niedrige EWR-Mengen nach der Ernte im Boden (Abb. 5.2).

Für den Humusumsatz sind nicht nur die Mengen, sondern auch die EWR-Qualität und weitere Faktoren von Bedeutung, wodurch die Rangfolge der Fruchtarten bei der Humusbildung entscheidend verändert wird. Die humifizierende Wirkung der Fruchtarten kann hierbei als Koeffizient dargestellt werden (Humusäquivalente in kg HÄQ/ha u. Jahr), die als komplexe Summenwirkung zwischen Anbaudauer, Bodenruhe, Menge und C/N-Verhältnis der Ernte- und Wurzelreste in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Standortes (Boden, Klima) angesehen wird (Abb. 5.3, Balkenlänge = Variationsbreite der Standorte).

Von den verschiedenen Maßnahmen der Bewirtschaftung wird somit die Humusbilanz entscheidend dadurch bestimmt, welche Fruchtarten zum Anbau gelangen. Durch Feldfutter, Körnerleguminosen und Untersaaten entstehen auf allen Standorten positive Salden. Untersaaten und Zwischenfrüchte können als Maßnahmen angesehen werden, die in Ergänzung einer Hauptfrucht zusätzliche Mengen an

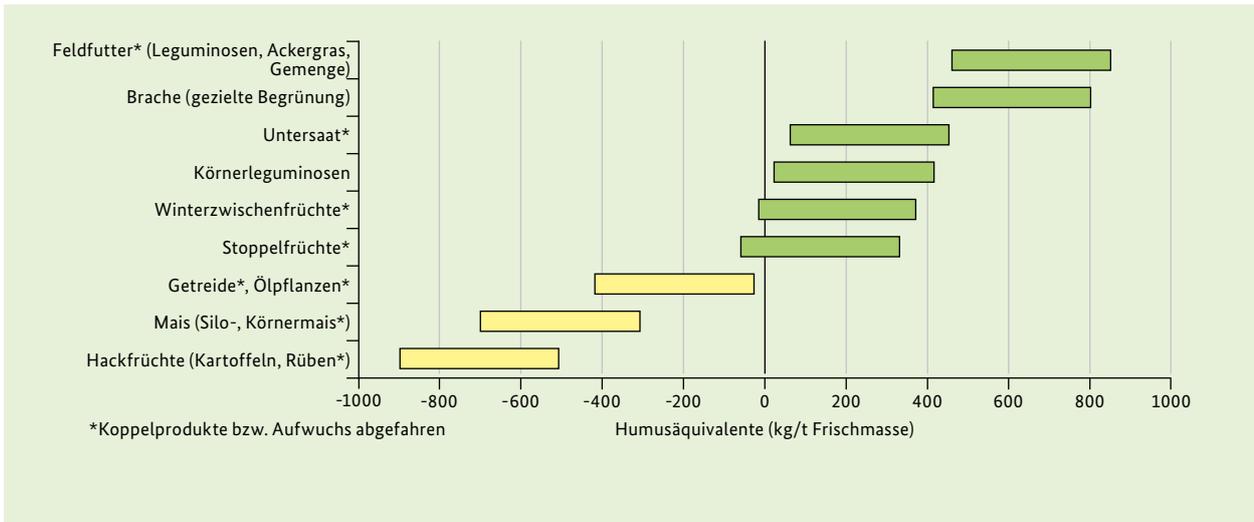


Abb. 5.3: Bandbreite der Humifizierungskoeffizienten (HÄQ) der Fruchtarten (grün = Humusmehrer; gelb = Humuszehrer) (Körschens et al., 2004; Kolbe, 2010b)

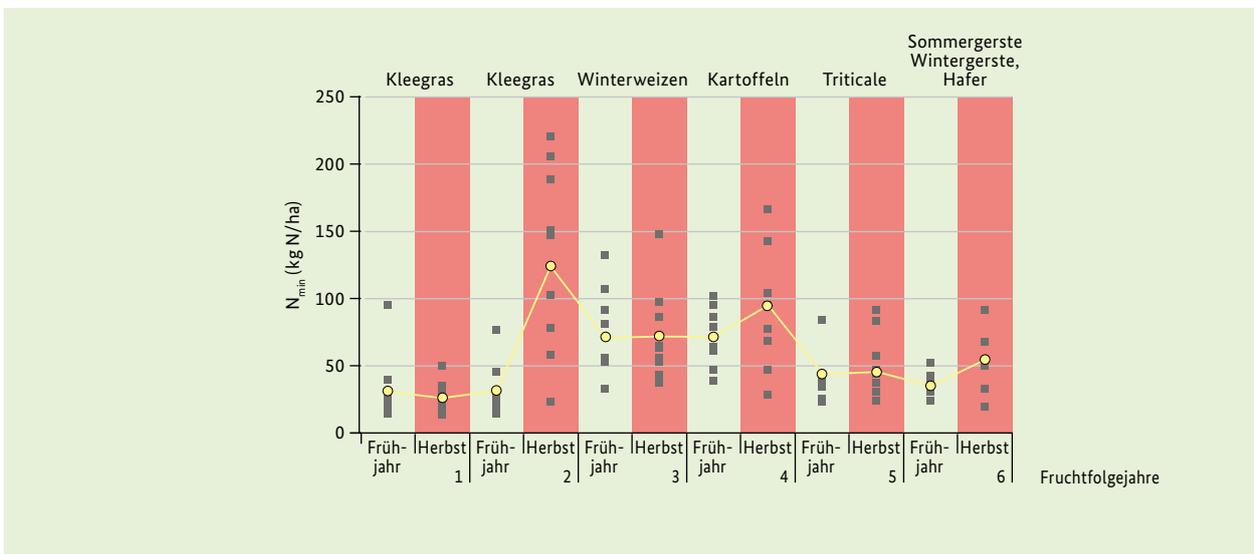


Abb. 5.4: Fruchtfolge-Verlauf der N<sub>min</sub>-Gehalte im ökologischen Landbau (nach Kolbe, LfULG)

organischer Substanz einbringen. Alle Fruchtarten mit positiven Koeffizienten werden daher auch als „Humusmehrer“ bezeichnet.

Je größer der Anteil an Getreide und vor allem an Mais und Hackfrüchten in der Fruchtfolge ist, umso negativer wird der Saldo ausfallen. Weil bei diesen Fruchtarten die eingebrachten EWR-Mengen nicht ausreichen, um den Humusabbau zu kompensieren, werden sie auch als „Humuszehrer“ bezeichnet. Die gewöhnlich hohe Intensität der Bodenbearbeitung infolge Anbau und Erntearbeiten einiger Hackfrüchte verstärkt den Humusabbau zusätzlich.

### 5.1.2.2 Einfluss der Fruchtfolge auf N<sub>min</sub> und Vorfruchtung im ökologischen Landbau

Die Fruchtfolgeposition hat auch für das Nährstoffmanagement eine besondere Bedeutung. Hierbei unterscheiden sich ökologische und konventionelle Anbauverfahren deutlich.

Daher ist die Nährstoffmineralisation und Bereitstellung aus der Umsetzung der Ernte- und Wurzelreststoffe entsprechend der Fruchtfolgeposition im Ökolandbau deutlich höher zu bewerten. Im zeitlichen Verlauf der Fruchtfolgen stellt sich eine typische Veränderung der Bodenfruchtbarkeit ein, die an der Abfolge der N<sub>min</sub>-Werte im Boden kontrolliert werden kann (Abb. 5.4). Infolge typischer Unterschiede in der Mineralisation werden in den Jahren direkt nach Umbruch von Leguminosenbeständen höhere N<sub>min</sub>-Werte ermittelt als in den nachfolgenden Jahren der Rotation.

Bei der Auswahl der Fruchtarten sind daher folgende drei Phasen zu unterscheiden und entsprechend bei der Fruchtfolgegestaltung einzuplanen (Kolbe, 2006):

- Phase I:** Humus und Bodenfruchtbarkeit aufbauende N-zuführende Fruchtarten (Futter- und Körnerleguminosen)
- Phase II:** Starkzehrende Nichtleguminosen
- Phase III:** Schwachzehrende Nichtleguminosen.





Leguminosen in der Fruchtfolge sind hervorragend geeignet sowohl Humusbilanz wie auch Bodenstruktur zu verbessern (Fotos: BÖLN)

Da auch im Ökolandbau meistens keine festen Fruchtfolgen mehr bestehen, können aus einem einfachen graphischen Schema für die jeweilige Fruchtfolgeposition anhand der jeweiligen Vorfrucht-Nachfruchtombinationen günstige Nachfrüchte ausgesucht werden (Abb. 5.5).

### 5.1.2.3 Einsatz der Humusbilanzierung zur Fruchtfolgegestaltung im Ökologischen Landbau

Der Anbau von Leguminosen (Kleearten, Luzerne) alleine oder in Kombination vor allem mit den Gräserarten stellt im Ökolandbau ein weit verbreitetes Fruchtfolgeglied dar. Da die Leguminosen zur Luft-N-Bindung befähigt sind, tragen sie

zu einer Netto-Zuführung an Stickstoff in den Betriebskreislauf bei. Darüber hinaus sorgen die hohen Ernte- und Wurzelreste insbesondere der Futterpflanzen sowie die durch deren oft mehrjährigen Anbau bewirkte Bodenruhe für eine erhebliche Verbesserung der Humusbilanzen eines Betriebes. Die Festlegung eines optimalen Anbauumfanges an diesen Fruchtarten ist daher auch eine wichtige Aufgabe der Fruchtfolgegestaltung.

In den nachfolgend aufgeführten Beispielen werden Fruchtarten mit stark unterschiedlich hohen Anteilen an Bodenfruchtbarkeit fördernden und abbauenden Elementen kombiniert (Tab. 5.2). Von Standortgruppe 1 bis 6 erfolgt aufgrund deutlicher Zunahme der natürlichen

Tab. 5.2: Humusbilanzen (kg HÄQ/ha u. Jahr) inklusive Versorgungsgruppen (A – D) von viehlosen Fruchtfolgebeispielen mit unterschiedlichen Leguminosen-Anteilen verschiedener Standorte im ökologischen Landbau (Kolbe, 2013)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6
<b>Untere Orientierungsgrenze an Leguminosen-Anteilen in der Fruchtfolge</b>						
20% Klee gras, Abfuhr des Aufwuchses	90	12	-70	-18	-100	-211
10% Körnerleguminosen	C	C	B	B	B	A
20% Getreide mit Strohverbleib						
30% Getreide mit Strohabfuhr						
20% Hackfrüchte						
<b>Obere Grenze an Leguminosen-Anteilen in der Fruchtfolge</b>						
50% Klee gras, Abfuhr des Aufwuchses	338	248	154	209	115	-14
15% Getreide mit Strohverbleib	D	C	C	C	C	B
15% Getreide mit Strohabfuhr						
20% Hackfrüchte						

Bodenfruchtbarkeit eine Zunahme der durchschnittlichen Ertragsersparnis der Fruchtarten. Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass in weitgehend viehlosen Anbausystemen der optimale Anteil an Leguminosen stark abhängig ist vom natürlichen Ertragspotenzial des Standortes. Erst bei ca. 25 – 30 % Körnerleguminosen bzw. Futterleguminosen (in Kombination mit 25 % Hackfrüchten und 50 % Getreide) kann das untere Ende der Leguminosenanteile in den gewöhnlichen Fruchtfolgen mit niedrigerem Ertragspotenzial postuliert werden.

Das obere Ende einer sinnvollen Integration von Leguminosen und Gemengen mit Gräsern in der Fruchtfolge wird aus dem zweiten Beispiel sichtbar (Tab. 5.2). Bei Kombinationen aus 50 % Futterleguminosen, 20 % Hackfrüchten und 30 % Getreide inkl. einem geringen Zwischenfruchtanteil werden auf den meisten Standorten positive Humusbilanzen erreicht.

Das Hilfsmittel der Humusbilanzierung (s. Kap. 4.4.2.2) ist im ökologischen Landbau gut geeignet, um den Rahmen einer ordnungsgemäßen Bewirtschaftung abzustecken. Für eine genaue fruchtart- und standortspezifische Düngungsbemessung und Kontrolle der Bodenfruchtbarkeit sind jedoch weitere Methoden des Nährstoffmanagements zu verwenden (Kolbe und Schuster, 2011).

#### 5.1.2.4 Fazit

Dem Ziel der Erreichung und Sicherung eines hohen Status in der Bodenfruchtbarkeit dient nicht nur die Schließung des „großen“ Nährstoffkreislaufes, der die Bereiche des Ex- und Imports in den Betrieb einschließt. Gerade in der „Guten fachlichen Praxis“ dienen Maßnahmen zur Intensivierung des „inneren“ Stoffkreislaufs auf den Ackerschlägen für die Erzielung einer möglichst hohen Nährstoffeffizienz. Die Fruchtfolgegestaltung und gezielte Auswahl an geeigneten Ackerfrüchten stehen hier im Vordergrund. Hierbei sollten u. a. folgende Maßnahmen auch in Zukunft nicht vernachlässigt werden:

- Abwechslungsreiche Fruchtfolgen
- Anbau tiefwurzelnder Pflanzenarten
- Zwischenfrüchte
- Gründüngung
- „Grüne Welle“ durch stetigen Bodenbewuchs
- Gestaltung einer reichhaltigen Landschaft.

### 5.1.3 Fruchtfolgen steuern Bodenorganismen und deren Leistungen (Christoph Emmerling, Stefan Schrader)

Seit Mitte der 90er Jahre ist der Zwischenfruchtanbau in Deutschland drastisch zurückgegangen, obwohl durch ihn einige positive Effekte für die Bodenfruchtbarkeit und nachfolgende Kulturen erzielt werden können. Bodenorganismen können die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig verbessern (s. Kap. 4.6.). Das heißt aber nicht, dass sie auch einen unfruchtbaren Boden fruchtbar machen können. Mit anderen Worten, sie benötigen ein ausreichendes Nahrungsangebot, im Wesentlichen verfügbare organische Substanz. Dies lässt sich z. B. durch die Zufuhr organischer Dünger und durch eine abwechslungsreiche und vielgestaltige Fruchtfolge erreichen.

Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und in gewisser Weise die Flurgliederung sowie die Fruchtfolge bestimmen Vielfalt, Vorkommen, Besiedlungsdichte, Biomasse sowie Aktivität der Bodenorganismen. Die Besiedlung eines Ackerbodens kann allgemein besonders wirksam durch folgende Maßnahmen gefördert werden:

- Reduzierte, standortangepasste Bodenbearbeitung:
  - Bearbeitung bei geeigneter Witterung und Tragfähigkeit des Bodens
  - Möglichst flache, nicht wendende Bearbeitung, Minimalbodenbearbeitung
  - Belassen von Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche (Mulchwirtschaft)
- Ausreichende Versorgung mit organischen Düngern
  - Auf den Standort abgestimmte Kalkung
  - Ausbringung von Wirtschafts- und anderen organischen Düngemitteln (z. B. Kompost)
  - Flache Einarbeitung von Düngern
  - Gründüngung
- Integrierter Pflanzenschutz
  - Mechanischer Pflanzenschutz
  - Anregung natürlicher Selbstregulationsmechanismen
  - Fruchtfolgegestaltung
- Flurgliederung
  - Langfristige Anlage von Strukturelementen, Nischenbildung
  - Nützlingsförderung durch vielseitige Ackerbegleitflora, Erhaltung von Ackerrandstreifen, Feldrainen und Hecken
  - Standortangepasste Bestände
- Vielgliedrige Fruchtfolgen
  - **Zwischenfruchtanbau**
  - Möglichst häufig Mulchsaat
  - Bodenruhe unter Klee, Klee gras und Grünbrache

Tab. 5.3: Vergleich der mikrobiologischen Eigenschaften von Ackerböden ohne Zwischenfruchtanbau, mit Luzernefutterbau und mit Gründüngung, Mittelwerte  $\pm$  S.D. (Höchstwerte sind fett hervorgehoben), signifikante Unterschiede sind mit ungleichen Buchstaben gekennzeichnet

	Biomasse Mikroorganismen [ $\mu\text{g C g}^{-1} \text{TS}$ ]	Stickstoff-Mineralisation [ $\mu\text{g N}_{\text{min}} \text{g}^{-1} \text{TS d}^{-1}$ ]	Enzymaktivität [ $\mu\text{g p-Np g}^{-1} \text{TSh}^{-1}$ ]	organische Bodensubstanz [%]
<b>Ackerbau</b>	280 ( $\pm$ 155) <sup>b</sup>	0,254 ( $\pm$ 0,27) <sup>a</sup>	372 ( $\pm$ 116) <sup>a</sup>	1,36 ( $\pm$ ,21) <sup>a</sup>
<b>Luzerne</b>	<b>354</b> ( $\pm$ 116) <sup>a</sup>	<b>0,378</b> ( $\pm$ 0,35) <sup>a</sup>	<b>618</b> ( $\pm$ 57) <sup>b</sup>	1,66 ( $\pm$ ,17) <sup>b</sup>
<b>Gründüngung</b>	<b>369</b> ( $\pm$ 119) <sup>a</sup>	0,059 ( $\pm$ 0,54) <sup>a</sup>	454 ( $\pm$ 103) <sup>a</sup>	<b>1,81</b> ( $\pm$ ,11) <sup>c</sup>

Tab. 5.4: Regenwürmer (Abundanzen, Biomassen, Artenzahlen) und Collembolen (Abundanzen, Artenzahlen) in Ackerböden ohne Zwischenfruchtanbau, mit Luzernefutterbau und mit Gründüngung (Höchstwerte sind fett hervorgehoben)

	Regenwürmer			Collembolen	
	Abundanz [Ind. $\text{m}^{-2}$ ]	Biomasse [ $\text{g m}^{-2}$ ]	Artenzahl	Abundanz [Ind. $\text{m}^{-2}$ ]	Artenzahl
<b>Ackerbau</b>	13	3,5	3	1.331	12
<b>Luzerne</b>	65	24	5	2.650	7
<b>Gründüngung</b>	<b>116</b>	<b>30</b>	<b>8</b>	<b>14.656</b>	<b>19</b>

In zahlreichen Praxisversuchen zeigte sich, dass durch den **Anbau von Zwischenfrüchten** sowohl der Humusgehalt, die Besiedlung durch Bodenorganismen als auch ihre Aktivität schon nach wenigen Jahren gefördert wurden. Mittel- und langfristig steigt daher auch der Anteil der Biomasse von Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Actinomyceten) an der gesamten organischen Bodensubstanz an. Das heißt, der Anteil der belebten organischen Bodensubstanz ( $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ ) und damit der Anteil des Nährhumus steigen. In vielen Dauerversuchen betrug dieser absolute Anteil 2,3% ohne Zwischenfruchtanbau und wurde durch Zwischenfrüchte auf 2,9% angehoben (Emmerling, 2003).

Ein weiteres Beispiel (Tab. 5.3 und 5.4) zeigt den Vergleich von Böden unter Luzerne und Grünbrache sowie Ackerböden ohne Zwischenfruchtanbau. Durch Zwischenfruchtanbau oder Gründüngung lässt sich der Humusgehalt der Böden drastisch anheben, die Biomasse von Bodenmikroorganismen nimmt deutlich zu und ihre Leistung für den Stickstoff- und Phosphorhaushalt wird ebenfalls gefördert (Tab. 5.3). Auch größere Bodentiere reagieren positiv auf Luzerneanbau und

Gründüngung (Tab. 5.4). Sowohl die Anzahl als auch die Biomasse der Regenwürmer kann auf das bis zu 10-fache ansteigen, ebenso die Besiedlungsdichte durch Collembolen. Auch steigen die Artenzahl und damit die Stabilität der Zoozöosen.

Mit dem Anbau von Zwischenfrüchten hat der Landwirt somit ein Instrumentarium an der Hand, den Anforderungen an einen vorbeugenden Bodenschutz weitgehend gerecht zu werden. Durch den Zwischenfruchtanbau in den fruchtfolgebewingten Pausen zwischen zwei Hauptfrüchten werden folgende positive Effekte für das Bodenleben erreicht, wie z. B.: Erhöhung der organischen Bodensubstanz und Beschattung (Erhöhung des Nahrungsangebotes, Bewahrung der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte), Erosionsminderung, vielfältigere Pflanzenbestände und wechselndes Nahrungsangebot sowie Nährstoffbindung und Konservierung (vor allem Stickstoff). Zudem wird durch den Anbau von Zwischenfrüchten der Schädlingsdruck reduziert und gleichzeitig das ‚antiphytopathogene‘ Potenzial des Bodens erhöht.

## 5.2 Ackerbauliche Maßnahmen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit – Bodenschutz und Bodenschonung

Der Erfolg der Bodenbearbeitung hängt ab von der Qualität aller Bearbeitungsmaßnahmen, die im Verlauf einer Vegetationsperiode von einer zur nächsten Ernte durchgeführt werden und schließt die vorausgehende Ernte selbst mit ein. Die Bewegung des Bodens durch Mischen, Lockern und Wenden oberflächennah bis krumentief erfolgt durch Stoppelbearbeitung, Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat. Damit die mechanischen Eingriffe in den Boden schonend und ohne Beeinträchtigung der Bodenfunktionen erfolgen, ist jede Einzelmaßnahme wichtig und wird als Teil ganzheitlicher Betrachtung nachfolgend vorgestellt.

### 5.2.1 Bodenbearbeitung (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

#### 5.2.1.1 Systematik

In der Systematik der Bodenbearbeitung des KTBL 2015 (Abb. 5.6) werden relevante Verfahren der Bodenbearbeitung und Arbeitsgänge schematisch dargestellt und beschrieben. Für die breite Anwendung der unterschiedlichen Verfahren und Arbeitsgänge in der landwirtschaftlichen Praxis gibt es Spielräume. So kommt unter gemäßigten Klimabedingungen in Mitteleuropa auf einem Großteil der Standorte das gesamte Spektrum von wendender Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat erfolgreich zum Einsatz. Dennoch gibt es klare Präferenzen für bestimmte Intensitäten in Abhängigkeit von Klima und Boden. Bevorzugt wird die tiefe, intensive

Bearbeitung des Bodens in feuchten Regionen mit positiver Wasserbilanz, wenn dadurch die Bodendurchlüftung verbessert wird und die extensive Bearbeitung in trockenen Regionen mit negativer Wasserbilanz durchgeführt.

Die Arbeitserledigung ist im Wesentlichen eine Frage der betrieblichen Organisation. Auf Großbetrieben und bei engen Fruchtfolgen werden getrennte Arbeitsgänge bevorzugt, um Arbeitsspitzen zu brechen. Entscheidend ist hier die Schlagkraft bei der abschließenden Saat. Der Nachteil der geteilten Erledigung von Saatbettbereitung und Saat liegt in der Gefahr von Niederschlägen zwischen den Arbeitsgängen. Auf kleineren und mittleren Betrieben und bei weiten Fruchtfolgen werden Saatbettbereitung und Saat vorzugsweise kombiniert. Die Kombination aller Arbeitsgänge in einem Arbeitsgang ist selten der Fall, da dieses nur auf leichten bis mittleren Böden mit guten Zerfallseigenschaften unter günstigen Feuchtebedingungen wirklich gelingt. In den folgenden Abschnitten werden die für eine bodenschonende Bearbeitung notwendigen Maßnahmen in der zeitlichen Abfolge, beginnend mit dem Strohmanagement bei der Körnerfruchternte, ausgeführt und für das Gesamtverständnis wichtige Zusammenhänge und Erkenntnisse erläutert.

#### 5.2.1.2 Bodenbearbeitung und Arbeitstiefe

Von der Grundbodenbearbeitung geht der intensivste Eingriff in die Bodenstruktur aus, der höchste Verbrauch an Energie und der größte Humusabbau. Es stellt sich die Frage,

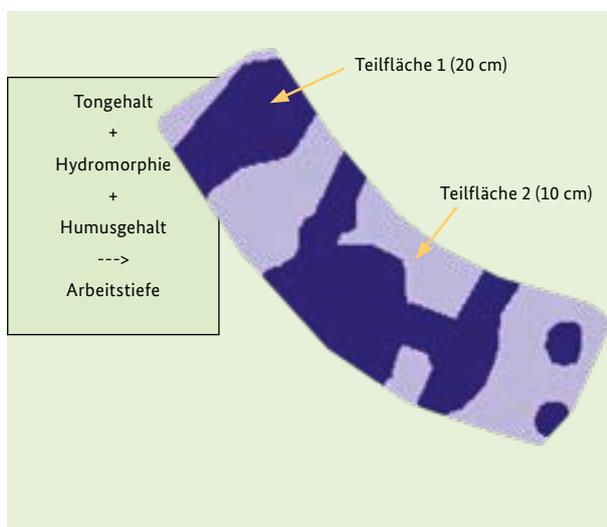
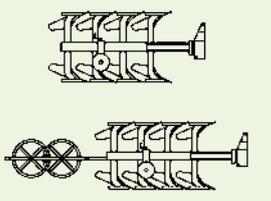
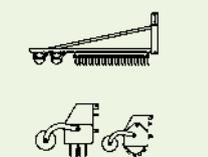
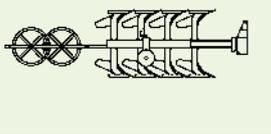
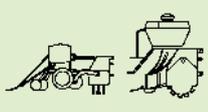
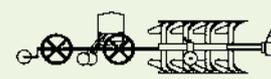
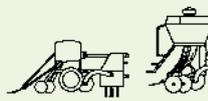
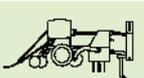
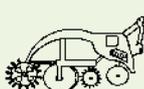
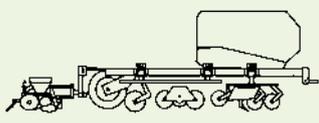
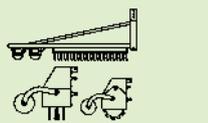
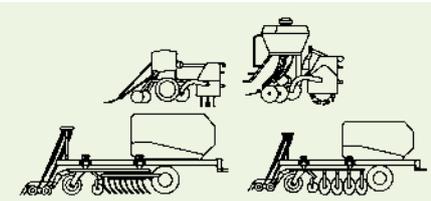
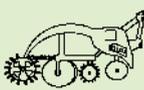
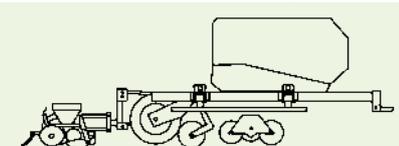


Abb. 5.7: Erstellen einer Applikationskarte für tiefe oder flache Bearbeitung



Erosionsschutz in Fahrgassen (Foto: J. Brunotte)

Verfahren	Grundbodenbearbeitung (intensive Lockerung)	Saatbettbereitung	Saat	Ablauf der Arbeitsgänge
Wendende Bodenbearbeitung				Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
				Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat kombiniert
				Alle Arbeitsgänge kombiniert
Nicht wendende Bodenbearbeitung	mit Lockerung			Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
				Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat kombiniert
				Alle Arbeitsgänge kombiniert
				Partielle <sup>1)</sup> Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
				Partielle <sup>1)</sup> Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung kombiniert, Saat getrennt
				Alle partiellen <sup>1)</sup> Arbeitsgänge kombiniert
Nicht wendende Bodenbearbeitung	ohne Lockerung			Ohne Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
				Ohne Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat kombiniert
				Ohne Grundbodenbearbeitung, partielle <sup>1)</sup> Saatbettbereitung und Saat getrennt
				Ohne Grundbodenbearbeitung, partielle <sup>1)</sup> Saatbettbereitung und Saat kombiniert
Direktsaat				Ohne Bodenbearbeitung, weniger als 1/3 der Reihenweite wird bearbeitet, Bearbeitungstiefe ist Saatgutablagertiefe

<sup>1)</sup> Es werden weniger als 50% der Gesamtfläche bearbeitet. Pflanzenreste bleiben ganzjährig auf der nicht bearbeiteten Bodenoberfläche (KTBL, 2014)

Abb. 5.6: Systematik der Bodenbearbeitung (KTBL, 2015)



Vielfalt an Bodentieren (Foto: St. Schrader)

mit welchen Entscheidungen das Optimum an Bodenschonung, die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der ackerbauliche Erfolg zu erreichen ist. Es gilt durch Abwägen die richtige Abstimmung zwischen dem Boden eines Standorts und der Bearbeitungsintensität zu finden.

Die notwendige Tiefe einer Bodenbearbeitung hängt von der natürlichen Durchlüftung des Bodens ab. Im Rahmen des *pre agro*-Projektes (BMBF-Verbundprojekt zu precision farming), das sich mit standortangepassten, teilflächenspezifischen Lösungen befasste, wurden hierzu Faustzahlen erarbeitet (Voßhenrich et al., 2001). Danach gilt ein Boden als geeignet für Lockerungsverzicht, wenn er ganzjährig luftführende Poren von 13% oder mehr aufweist. Dieser Wert ist auf Sicherheit ausgelegt. Die Erfahrung in der Praxis hat gezeigt, schon 10% reichen aus und auf gewachsenen Direktsaatböden mit einem vernetzten Porensystem dürfen die Werte Luft führender Poren vorübergehend bis auf 5% abfallen.

Limitierend für den Verzicht auf Lockerung sind auch Grund- und Stauwasserböden, sobald dadurch die Verfügbarkeit von Luftsauerstoff eingeschränkt ist. Eine regelmäßige Lockerung ist auch auf zu Verdichtung neigenden Sandböden erforderlich. Hier fehlt die lockernde Wirkung vom

Ton durch Quellen und Schrumpfen. Der Humusgehalt eines Ackerbodens, von dem ebenfalls lockernde Wirkungen ausgehen, sollte boden- und standortüblichen Werten entsprechen. Gehalte unter 1% sind als grenzwertig einzustufen. Eine starke Heterogenität des Humusgehalts ist auf erosionsgefährdeten Standorten in Hanglagen zu beobachten. Hier spielt das Strohmanagement - Stroh sollte zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit möglichst nicht abgeerntet und tief eingearbeitet werden - eine Schlüsselrolle. Nach welchem Schlüssel die Entscheidung für tiefe Lockerung bzw. Lockerungsverzicht möglich ist, wurde im *pre agro*-Projekt (Voßhenrich et al., 2001) erarbeitet. Die Abbildung 5.7 zeigt ein Anwendungsbeispiel.

### 5.2.1.3 Bodenbearbeitung steuert Bodenorganismen und deren Leistungen (Christoph Emmerling, Stefan Schrader)

Bodenbearbeitung stellt einen der weitreichendsten Eingriffe für die biologischen Prozesse im Boden dar. Durch die Bodenbearbeitung wird die Unterbringung und Verteilung der Ernterückstände beeinflusst, was indirekt Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Mikroorganismen

Tab. 5.5: Abundanzen der Bodentiere sowie mikrobielle Biomasse unter konventioneller Bodenbearbeitung (KV), konservierender Bodenbearbeitung (KS) und Direktsaat (DS). Der für eine Organismengruppe jeweils höchste Wert ist fett hervorgehoben (nach van Capelle et al., 2012b)

	KV	KS	DS
<b>Regenwürmer</b> [Ind. m <sup>-2</sup> ]	35,4	56,1	<b>125,4</b>
<b>Enchytraeiden</b> [Ind. 10 <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> ]	5658,7	<b>6797,2</b>	1050,0
<b>Milben</b> [Ind. 10 <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> ]	<b>16,4</b>	11,2	0,9
<b>Collembolen</b> [Ind. 10 <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> ]	<b>13,1</b>	11,2	5,6
<b>Nematoden</b> [Ind. 10 <sup>3</sup> 100g TS <sup>-1</sup> ]	1,8	<b>2,3</b>	2,1
<b>Mikrobielle Biomasse</b> [µg C <sub>mic</sub> g TS <sup>-1</sup> ]	335,1	372,1	<b>394,2</b>

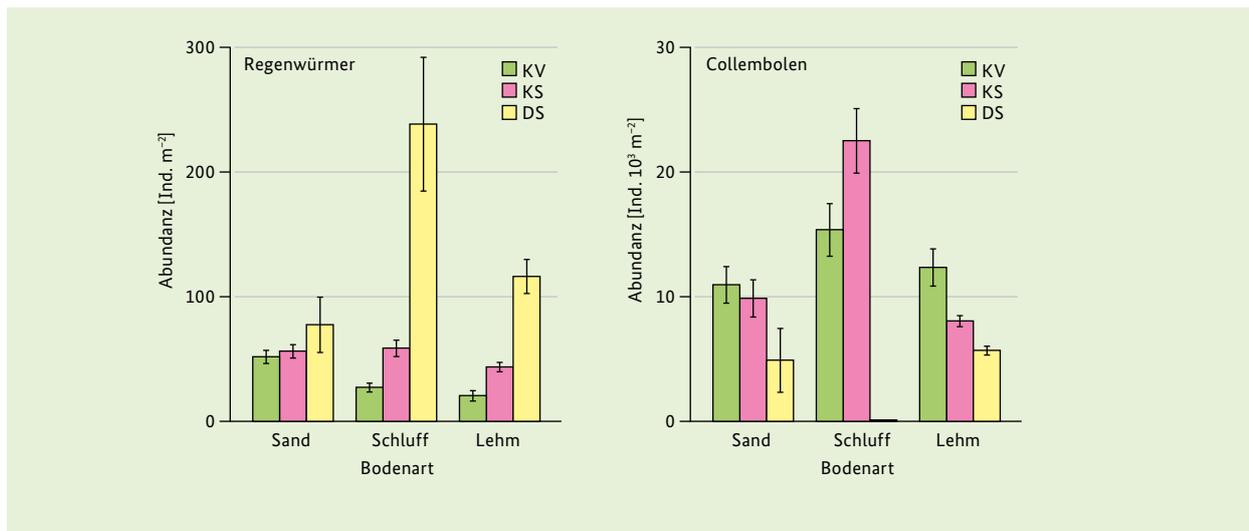


Abb. 5.8: Anzahl von Regenwürmern und Collembolen unter konventioneller Bodenbearbeitung (KV), konservierender Bodenbearbeitung (KS) und Direktsaat (DS) bei verschiedenen Bodenarten (nach van Capelle et al., 2012b)

und die Abbauprozesse, wie z. B. Mineralisations- und Immobilisationsprozesse, hat. Durch die Bodenbearbeitung wird auch die Zusammensetzung und Verbreitung der Bodentiere und damit bestimmte, an Bodentiere geknüpfte Leistungen, wie der Streuabbau, aber auch physikalische Prozesse, wie Bioturbation und Aggregation, beeinflusst.

Die qualitativen und quantitativen Veränderungen von Bodentierpopulationen erfolgen in der Regel tiefgreifender und nachhaltiger als bei den Bodenmikroorganismen, da die Bodentiere in einer ausgeprägten vertikalen Schichtung im Boden verteilt sind. Durch die Bodenwendung kommt es zu einer einschneidenden Umorientierung. Negative Einflüsse, insbesondere durch Bodenverdichtung, sind z. B. für Collembolen (Heisler, zit. in Larink, 1991), Enchytraeiden (Brockmann, 1987) und Regenwürmer bekannt (Aritajat et al., 1977). Bei der jährlichen Bodenbearbeitung werden viele Regenwürmer verletzt, gequetscht oder getötet. Besonders beim Pflügen werden Regenwürmer an die Oberfläche gebracht und von Vögeln gefressen. Durch nicht wendende, konservierende Bodenbearbeitung wird dagegen die Artenzahl, die Abundanz und Biomasse sowie die Aktivität der Regenwürmer gefördert (Ernst und Emmerling, 2009; Emmerling, 2011). Als wahrscheinliche Ursache für das Anwachsen der Populationen und die erhöhte Tätigkeit gelten Bodenruhe und das erhöhte Nahrungsangebot an der Bodenoberfläche.

Eine auf 150 Quellen basierende Literaturstudie zu Felduntersuchungen in Deutschland (van Capelle et al., 2012a bis c), die im Zeitraum von 1950 bis 2010 publiziert wurden, zeigt die unterschiedliche Wirkung der Bodenbearbeitungssysteme konventionell, konservierend und Direktsaat auf verschiedene Gruppen an Bodenorganismen (Tab. 5.5). Danach erreichen Regenwürmer ihre höchste Abundanz unter Direktsaat. Auch die mikrobielle Biomasse weist hier ihren höchsten Wert auf. Im Gegensatz dazu profitieren Milben und Collembolen offenbar von einem umfangreichen Poren- und Hohlraumssystem, wie es durch das Pflügen bei konventioneller Bodenbearbeitung geschaffen wird, weshalb hier

für beide Tiergruppen die höchsten Dichten festzustellen sind. Eine mittlere Stellung nehmen Enchytraeiden und Nematoden ein, die von einer Reduktion der Bearbeitungstiefe und einem Verzicht auf die wendende Bodenbearbeitung grundsätzlich profitieren, dabei allerdings auf ein Mindestmaß an Bodenlockerung durch z. B. Grubbern angewiesen sind. Deshalb sind sie unter konservierender Bodenbearbeitung am häufigsten vertreten.

Die Wirkung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf Bodenorganismen wird durch Standortfaktoren bestimmt. Die Bodenart spielt dabei eine wesentliche Rolle (Abb. 5.8). Das lässt sich besonders deutlich an der Häufigkeit der Collembolen demonstrieren. Nur in schluffigen Böden erreichen sie die höchsten Dichten unter konservierender Bodenbearbeitung, während sie bei anderen Bodenarten unter konventioneller Bodenbearbeitung am häufigsten auftreten (van Capelle et al., 2012a und b) (s. o.). Diese unterschiedlichen Reaktionen lassen sich möglicherweise darauf zurückführen, dass schluffige Böden Wasser und darin gelöste Nährstoffe besser speichern als leichte Böden, gleichzeitig aber nicht so stark zu Vernässung und mangelnder Durchlüftung neigen wie schwere Böden.

Bodenbearbeitung greift zudem in das komplexe Räuber-Beute-Wirkungsgefüge ein. Die Literaturstudie zeigt, dass der Befallsdruck durch bodenbürtige Schaderreger in Systemen mit konservierender im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung durch die Förderung antagonistischer Bodenorganismen häufig zurück geht (van Capelle et al., 2012c). Bei konservierender Bodenbearbeitung nahm z. B. die Besiedlungsdichte phytophager Organismen, wie z. B. phytophage Collembolen (*Onychiuridae*) oder Nematoden (*Ditylenchus dipsaci*, *Heterodea schachtii*) drastisch ab, während räuberische Arten, wie z. B. Raubmilben (*Gamasina*), die sich bevorzugt von Collembolen und Nematoden ernähren, gefördert wurden (Baeumer, 1994). Insgesamt zeigt sich, dass der Befallsdruck durch bodenbürtige Schaderreger unter konservierender Bodenbearbeitung oder Direktsaat nicht



Abb. 5.9: Lange, nicht zersetzte Stoppel erschweren nachfolgenden Arbeitsgang (Foto: H. Voßhenrich)



Abb. 5.10: Akkumulierte Streuhaufen über Gangsystemen von Regenwürmern (Foto: J. Brunotte)

zwingend einen erhöhten Einsatz an Pflanzenschutzmitteln erfordert. Allerdings müssen in diesem Zusammenhang standortspezifische Unterschiede, wie etwa die Bodenart und potenzielle Interaktionen mit antagonistischen Bodenorganismen berücksichtigt werden (van Capelle et al., 2012c).

### 5.2.2 Strohmanagement (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

Erfolgreiche Bodenbearbeitung, die Bodenschutz und Bodenfruchtbarkeit einbezieht, gelingt nur auf der Basis eines kontrollierten Strohmanagements. Dies beginnt streng genommen bereits mit der Sortenwahl des Getreides und allen weiteren Maßnahmen, die dazu beitragen, dass ein Getreidebestand bis zur Ernte nicht ins Lager geht. Denn nur bei stehendem Getreide ist es möglich, Stoppellänge, Häckselqualität und Strohverteilung bedarfsgerecht zu gestalten.

Die anzustrebende **Stoppellänge** hängt ab vom folgenden Verfahren der Bodenbearbeitung und Bestellung und dem Zeitpunkt der angestrebten Maßnahmen. Eine lange Stoppel, 20 cm und länger, ist zu erwägen, wenn eine Direktsaat geplant ist, da stehende Stoppeln den Sävorgang in der Regel weniger beeinträchtigen als gehäckseltes am Boden liegendes Stroh. Das Design, der Reihenabstand und der Strohertrag spielen für den reibungslosen Ablauf der Direktsaat eine Rolle. Lange Zeitspannen zwischen Ernte und Bestellung, wie im Falle einer Sommerung, sprechen ebenfalls für die Langstoppel, da das Stroh über Winter zermürbt und den Ablauf der Arbeiten im Nachwinter nicht mehr beeinträchtigt. Lange Stoppel schützen den Boden vor Verschlämmung und Erosion durch Wasser und sind besonders wirksam gegenüber Winderosion. Sie sind gegenüber Verwitterung und Zersetzung durch Mikroorganismen beständiger als am Boden liegendes gehäckseltes Stroh, was dem Landwirt die Möglichkeit bietet, regulierend einzugreifen. Bei engen Zeitspannen zwischen zwei Winterungen, das ist in gemäßigten Zonen



Abb. 5.11: Schlechte Strohquerverteilung mit einem Variationskoeffizienten (VK) von 52% – an den Seiten liegt kaum noch Stroh

Mitteleuropas der Regelfall, sind kurze Stoppel zu wählen, um für die flache Stoppelbearbeitung und die danach folgenden Arbeitsgänge einen reibungslosen Ablauf zu garantieren. Lange unzeretzte Stoppel sind sperrig und beeinträchtigen den Fluss des Bodens bei Bearbeitung, Saatbettbereitung und Saat (Abb. 5.9).

Welche **Häcksellängen** bei der Mähdruschernte anzustreben sind, hängt davon ab, ob eine schnelle Zersetzung des Strohs erwünscht ist oder nicht. Je kürzer und gespleißter das Häckselgut ist, umso schneller wird es von den Organismen des Bodens aufgenommen. Bei genauer Kenntnis der Standortverhältnisse kann auch über die Wahl der Häcksellänge und des Spleißgrades regulierend in die Aktivität der Mikroorganismen (Abb. 5.10) und damit die Bedeckung des Bodens mit Stroh eingegriffen werden. Wie bei der Stoppellänge ist auch hier abzuwägen: Je kürzer die Zeitspannen und je höher das Ertragsniveau, umso kürzer sollten die Häcksellängen gewählt werden, um die biologische Aktivität anzuregen und einen störungsfreien Stroh-/Bodenfluss bei Stoppelbearbeitung, Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat zu unterstützen.

Die **Verteilung des Strohs** durch den Mähdruscher hat in allen Fällen gleichmäßig zu erfolgen. Ein Variationskoeffizient von mindestens 30% ist anzustreben, aber erst ein Wert von 20% würde allen Ansprüchen einer gleichmäßigen Querverteilung genügen. Tatsächlich finden wir im Durchschnitt der landwirtschaftlichen Praxis Werte, die deutlich höher liegen. Teile des Bodens quer zur Arbeitsrichtung bleiben dann nahezu oder vollständig unbedeckt und sind in der Folge allen Witterungseinflüssen ausgeliefert. Das erfüllt nicht den Anspruch an eine hochwertige Erledigung der Arbeit und den Schutz des Bodens zur Sicherung der Fruchtbarkeit. Je länger die Zeitspannen nach der Ernte bis zur Wiederbegrünung durch eine Zwischen- oder Folgefrucht sind, umso fataler wirken sich schlechte Qualitäten der Arbeitserledigung bei Strohverteilung und -einarbeitung aus (Abb. 5.11).



Abb. 5.12: Indoorversuch: Eingearbeitetes und aufliegendes Stroh (Foto: H. Voßhenrich)

Welchen grundsätzlichen regulierenden Einfluss das Stroh an der Bodenoberfläche „**Stroh als Isolierschicht**“ für Bodenfeuchte hat, zeigt nachfolgend aufgeführter Versuch.

Ein Versuch unter Laborbedingungen bei 18 °C Raumtemperatur und 50% rel. Luftfeuchte mit drei verschiedenen Böden verdeutlicht den Einfluss unterschiedlicher Platzierung des Strohs auf die Verdunstung des Wassers.

Gehäckseltes Stroh wurde in drei verschiedene Böden (lehmgiger Sand, Ton, Schluff) mit gleichem Wassergehalt eingearbeitet bzw. oben aufgelegt (Abb. 5.12). Die insgesamt sechs Stroh-Bodenvarianten wurden danach in regelmäßigen Abständen gewogen und so durch Gewichtsverlust die Verdunstung bestimmt.

Die Verdunstungskurven (Abb. 5.13) zeigen die wassersparende Wirkung von aufliegendem Stroh im Vergleich zu eingearbeitetem Stroh. Bei aufliegendem Stroh verläuft die Wasserabgabe durch Verdunstung gleichmäßig (Kurvenverlauf geradlinig) und bei eingearbeitetem Stroh beginnt die Verdunstung intensiv (starker Kurvenanstieg) und nimmt danach ab (verminderter Kurvenanstieg). Dieser Kurvenverlauf ist bei jedem der drei Versuchsböden zu beobachten.

Begleitet wurde der Laborversuch auf Praxisflächen. Auf einem Tonboden wurde der Einfluss des Strohs nach unterschiedlicher Bearbeitung des Bodens erfasst. Wegen hoher Niederschläge (Juli 122 mm, August 99 mm, September 149 mm, Oktober 34 mm, November 103 mm und Dezember 72 mm) war es im Jahr 2007 zu keinem Zeitpunkt möglich, den Boden für Direktsaat unter akzeptablen Feuchteverhältnissen anzutreffen. Die Spatenprobe (Abb. 5.14) verdeutlicht dies anschaulich. Unter der isolierenden Strohmatte war der Boden in der zweiten Jahreshälfte 2007 für tiefe Bearbeitung, Bestellung und Saat stets zu feucht. Wurde der Boden im Vergleich dazu nur einmal flach bearbeitet, so konnte er antrocknen und die für eine weitere Maßnahme notwendigen Strukturen erreichen (Abb. 5.15).

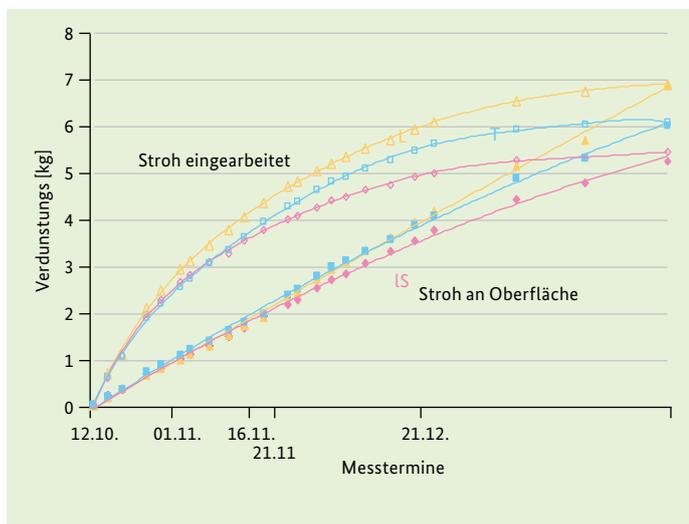


Abb. 5.13: Verdunstungskurven für aufliegendes und in Boden eingearbeitetes Stroh bei lehmigem Sand (IS), Lehm (L) und Ton (T)



Abb. 5.14: Spatenprobe: Durch hohen Feuchtegehalt klebt der Boden am Spaten (Foto: H. Voßhenrich)



Abb. 5.15: Spatenprobe: Der Boden ist angetrocknet und fällt locker (Foto: H. Voßhenrich)

Wie beide Versuche zeigen, geht von Stroh an der Bodenoberfläche eine isolierende Wirkung aus, welche die Verdunstung des Bodenwassers einschränkt. Auf trockenen Standorten mit limitiertem Wasserhaushalt ist diese Wirkung erwünscht und trägt gleichermaßen zum Schutz der Verdunstung und zum Schutz gegen Witterungseinflüsse bei. Auf feuchten Standorten dagegen muss die isolierende Strohmatte durch flache Bearbeitung des Bodens aufgebrochen werden, um erst durch die angeregte Verdunstung und Abtrocknung des Bodens die Bedingungen für nachfolgende Maßnahmen der Bodenbearbeitung und/oder Bestellung zu verbessern. Zwei verschiedene Ausgangssituationen, ausgelöst durch unterschiedliche Witterung, erfordern also zwei gegensätzliche Strategien, die dem Ziel dienen, günstige Bodenstrukturen für nachfolgende Arbeitsgänge zu schaffen. Die Komplexität in der Bodenbearbeitung wird dadurch deutlich.



Abb. 5.16: Durchwuchsrapss zwischen den Reihen (Foto: H. Voßhenrich)

### 5.2.3 Stoppelbearbeitung (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

Die Aufgabe der Stoppelbearbeitung ist es, keimfähige Ausfallsamen der geernteten Hauptfrucht sowie der Unkräuter und Ungräser auflaufen zu lassen, den Abbau organischer Pflanzenreststoffe einzuleiten und die Bodenstruktur für die sich anschließende flache oder tiefe Bearbeitung vorzubereiten.

Der Erfolg der Stoppelbearbeitung hängt von Zeitpunkt, der Intensität und Häufigkeit einzelner Maßnahmen ab. Unter normalen Bedingungen gilt es, die Bodenrestfeuchte nach der Ernte zu nutzen. Der erste Arbeitsgang unmittelbar nach der Ernte sollte den Boden nur leicht berühren. Ziel ist es, durch Entmischen die keimfähigen Ausfallsamen mit dem noch feuchten Boden nach der Ernte in Kontakt zu bringen oder die Bodenrestfeuchte für den Aufgang einer Zwischenfrucht zu nutzen. Dies gelingt am ehesten mit dem Striegel. Bereits die Bedeckung mit 2-3 cm Boden würde die Keimbereitschaft einiger Feinsamen vermindern und im Boden konservieren. Das hohe Potenzial an Rapssamen und Gräsern, das sich über Jahre in vielen Böden angereichert hat, ist diesem Umstand geschuldet (Abb. 5.16). Die erforderliche extrem flache und wiederholte Stoppelbearbeitung mit dem Striegel, die vor allem zum Vernichten von Ackerfuchschwanzsamen dringend erforderlich ist, dient nebenbei auch dem Bodenschutz. Die Pflanzenreststoffe verbleiben an der Bodenoberfläche und schützen diesen vor Witterungseinflüssen durch Verdunstung, Niederschlag und Wind.

Über die Intensität der Stoppelbearbeitung lässt sich schließlich der Feuchtezustand des Bodens regulieren und für nachfolgende Arbeitsgänge vorbereiten. So ist z. B. bei hoher Bodenfeuchte auf einem bindigen Boden vor der tiefen

Grundbodenbearbeitung eine flache Stoppelbearbeitung auf ca. 5 cm Tiefe ratsam. Dieser flache Eingriff regt die Verdunstung an, zerstört die isolierende Strohschicht und verbessert die Zerfallsbereitschaft des Bodens. Der energetische Aufwand nachfolgender Arbeiten ist dadurch geringer, da der zerfallsbereite Boden entlang der natürlichen Bruchstellen auseinander fällt und die natürlichen Strukturen erhalten bleiben. Belange des Bodenschutzes und der Nachhaltigkeit stehen hier mit den ackerbaulich notwendigen Maßnahmen im Einklang.

#### 5.2.4 Mulch- und Direktsaat (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

Mulchsaat ist die Ablage von Saatgut in ein mit Pflanzenresten durchsetztes Saatbett. Trotz der erschwerten Bedingungen im Vergleich zur Saat in ein reststofffreies Saatbett, muss eine gleichmäßige Ablagetiefe auf festem, Kapillarwasser führenden Furchengrund und eine gleichmäßige Bedeckung der Saat mit einem locker aufliegenden Boden-Strohgemisch gelingen. Das ist nur möglich, wenn alle zuvor beschriebenen Anforderungen an das Strohmanagement erfüllt sind und sich das Saatbett trotz hoher Strohkonzentration als homogen erweist. Der Kontakt der Saat mit Strohresten schadet nur, wenn durch zu hohe Strohkonzentration (Strohnester), ausgelöst durch ungleichmäßige Verteilung und Einarbeitung des Strohs, der Kontakt zu den Bodenteilchen erheblich beeinträchtigt ist.

Einfache nur federbelastete Schleppschare scheiden für die Mulchsaat aus. Damit das Säschar starken Widerständen im Mulchsaatbett nicht unkontrolliert ausweicht, muss Mulchsaat taugliche Sätechnik mit hohem Schardruck (> 30 kp) ausgestattet und gleichzeitig z. B. über Stützrollen gegen unkontrolliert tiefes Eindringen in den Boden abgesichert sein. Die optimale Führung dieser Mulchsaateinheit kann in einem Parallelogramm erfolgen (Abb. 5.17). Um die

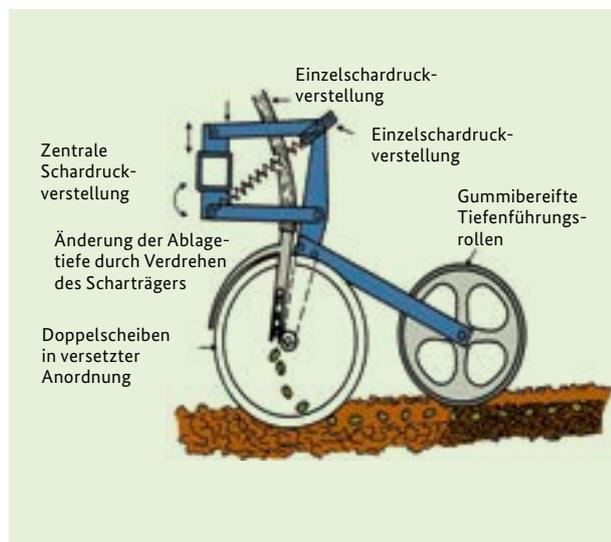


Abb. 5.17: Sätechnik im Parallelogramm geführt (Fa. Lemken)

Konzentration organischer Reste im Bereich des Schares in Grenzen zu halten, kann vorauslaufend ein abrollendes oder reiðendes Werkzeug zum Einsatz kommen. Alle Voraussetzungen erfüllt die Mulchsaat taugliche Einzelkorn-Sätechnik (Abb. 5.18).

Direktsaattaugliche Sätechniken arbeiten mit Schardrücken oberhalb von 50 kp, um die Saat optimal im Boden abzulegen. Es gelten höchste Anforderungen an das Strohmanagement, damit eine gleichmäßige Saatgutablage möglich wird und Verstopfungen im Schar-Zwischenbereich nicht auftreten. Abrollende Systeme (Abb. 5.19) arbeiten in der Regel störungsfreier, platzieren die Saat aber nicht vollständig auf den reststofffreien Saatbettgrund, da sie nicht in der Lage sind, bei kurzen Zeitspannen zwischen Ernte und Saat noch frisches Stroh durchzuschneiden. Auf Griff stehende Systeme unterfahren die aufliegenden Stroh- und Pflanzenreste und platzieren dadurch die Saat in das freigeräumte Saatbett. Diesem Vorteil der besseren Samenplatzierung steht der Nachteil einer größeren Verstopfungsfahrer gegenüber.

Sicheres, verstopfungsfreies Arbeiten kann durch Erweitern der Reihenabstände gefördert werden. Mehrere bislang unveröffentlichte Tastversuche deuten darauf hin, dass zumindest auf Hohertragsstandorten mit einem Kornertrag von 10 Tonnen und einem Strohertrag von 8-9 Tonnen, Wintergetreide bei Reihenabständen bis 24 cm (=doppelter Getreide-Reihenabstand) noch volle Ertragsleistung liefern kann. Ein Reihenabstand im Bereich von 16-18 cm für Mulch und Direktsaat ist daher zu vertreten, da keine Ertragsrisiken zu erwarten sind, die Vorteile einer störungsfreien Saat aber genutzt werden können.

Da durch die zunehmende Verwendung von Hybridsaatgut die Saatstärken bei Raps und Getreide abnehmen und dadurch die Anforderungen an Dosier- und Ablagetechnik ähnlich hoch wie bei Einzelkornsaat von Zuckerrüben und Mais sind, ist es angemessen, über eine Universalsämaschine mit Kornvereinzelnachzudenken. Diese kann zur



Abb. 5.18: Für Mulchsaat taugliche Einzelkornsätechnik (Foto: J. Brunotte)

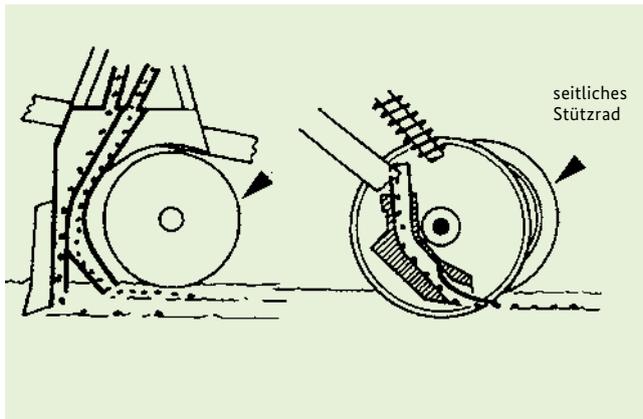


Abb. 5.19: Auf Griff stehendes Zinkenschar kombiniert mit Düngerausbringung unterhalb des Saathorizonts und abrollendes Einschiebschar (Köller und Linke, 1997)

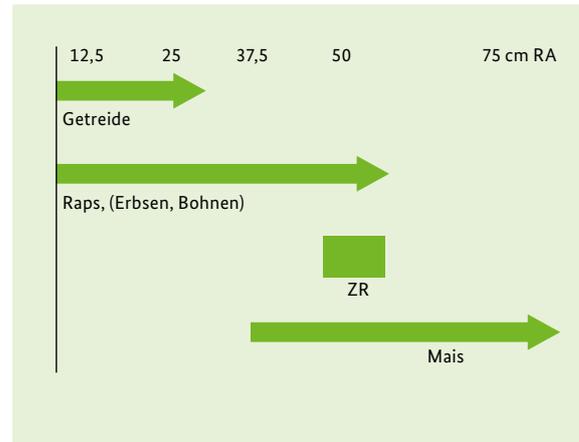


Abb. 5.20: Mögliche Reihenabstände (RA) für unterschiedliche Kulturen (H. Voßhenrich)

Getreide-, Raps-, Zuckerrüben- und Maissaat eingesetzt werden. Zur Saat müssten nur die Dosierorgane und die Säschare ausgetauscht werden. Getreide und Raps könnten bei einfach erweitertem Reihenabstand (bis 18 bzw. 24 cm) gesät werden, Zuckerrüben und Mais bei einem vielfachen Abstand. Technisch wäre dies möglich, da die Vereinzlungstechniken mittlerweile auch für Getreide angeboten werden. In welchem Spielraum sich die Reihenabstände unterschiedlicher Körnerfrüchte bewegen und überschneiden, zeigt die Abbildung 5.20.

### 5.2.5 Streifenbearbeitung und Aussaat (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

Die Streifenbodenbearbeitung mit und ohne Lockerung ist eine auf Streifen begrenzte Bearbeitung des Bodens mit den gleichen Vorgaben und Definitionen einer ganzflächigen Bearbeitung. Zwischen den bearbeiteten Streifen, die maximal 50% der Gesamtfläche einnehmen, bleibt der Boden nach der Ernte unberührt.

Die Streifenbearbeitung nutzt einerseits die Vorteile der krumentiefen ganzflächigen Bearbeitung durch tiefes Lockern und Mischen (Abb. 5.21). Sie kann erfolgreich auf dicht gelagerten sandigen wie schluffigen Böden mit guten Fließigenschaften eingesetzt werden und eignet sich auch für Grund- und Stauwasserböden, die unter Sauerstoffmangel leiden, solange diese bei der Bearbeitung in trockenem Zustand gut zerfallen. Auf bindigen, schlecht schüttenden Lehm- und Tonböden ist der Erfolg der Streifenbearbeitung bei derzeitigem Stand der Technik noch begrenzt. Auf grund- und stauwasserfernen, gut durchlüfteten Lehm- und Tonböden wiederum wäre eine Streifensaar ohne Lockerung ackerbaulich wie technisch möglich.

Die Streifenbodenbearbeitung bietet andererseits auch die Vorteile der Direktsaat, da die unbearbeiteten Streifen sich durch hohe Tragfähigkeit und Befahrbarkeit auszeichnen. Durch die unberührten Stoppel und organischen Reststoffe besteht ein wirksamer Schutz gegen Witterungseinflüsse. Die ohnehin geringe Gefahr durch Erosion in den bearbeiteten Streifen lässt sich in Hanglagen zusätzlich durch Arbeiten in Hanglinie einschränken.



Abb. 5.21: Winterweizen und -rapsbestand nach Streifenbearbeitung (Foto: H. Voßhenrich)

### 5.2.6 Auswirkung unterschiedlicher Bearbeitung auf Bodenbedeckung und Energieverbrauch (Hans Voßhenrich, Joachim Brunotte)

Die **Bedeckung des Bodens mit Stroh** aus Ernteresten ist abhängig von der Art und der Intensität der Bodenbearbeitung. Ein Versuch unter Praxisbedingungen mit handelsüblicher Technik soll dies verdeutlichen.

In nach Raps bestelltem Winterweizen wurde die Bedeckung des Bodens durch Raps-Erntereste bonitiert (Tab. 5.6). Der höchste Bedeckungsgrad wurde nach Direktsaaten mit über 60% Bedeckung gemessen. Durch einmalige flache Bearbeitung mit einer Grubber-Scheibeneggenkombination auf 6 cm Tiefe und anschließender Bestellung sank der Bedeckungsgrad auf ca. 15%. Erfolgte die Bestellung aktiv mit einem Kreiselgrubber, so lag der Wert leicht darunter, im Fall passiver Bestellung mit gezogener Sätechnik leicht darüber. In der Größenordnung verringerte sich die Bedeckung des Bodens um den „Faktor 4“. Durch einen zusätzlichen Arbeitsgang vor der Bestellung auf 12 cm Tiefe verminderte sich die Bedeckung auf ca. 7%. Das entspricht nochmals einer Halbierung der Oberflächenbedeckung, während ein zusätzlicher dritter Arbeitsgang auf 18 cm Tiefe keinen weiteren Effekt auf den Bedeckungsgrad mehr hatte. Demzufolge geht der stärkste Effekt vom ersten Arbeitsgang aus. Mit weiteren Arbeitsgängen nimmt die Wirkung deutlich ab. Dieser grundsätzliche Zusammenhang gilt für die Einarbeitung unterschiedlicher Stroharten. Im Einzelfall kann aber das Ausmaß variieren. Hier spielen Häcksellänge, Stoppellänge (vgl. Abb. 5.9) u. a. eine Rolle.

Für die Bedeckung des Bodens mit Stroh (Raps, Getreide) in den Monaten nach der Bestellung bis zum Bestandesschluss im Frühjahr ist die biologische Aktivität mit ausschlaggebend. Auf lehmigen Böden ist der Abbau der organischen Reststoffe intensiver als auf sandigen Böden, bei ausgeglichenem Wasser-/Lufthaushalt besser als unter trockenen oder nassen Bedingungen. Um schließlich unter Praxisbedingungen einen definierten Bedeckungsgrad über die Wintermonate hinaus bis in das Frühjahr (bis zum Bestandesschluss) zu ermöglichen, ist das Zusammenspiel der unterschiedlichen Faktoren zu beachten.

Der **Energieverbrauch** für Pflug (30 cm), Grubber-Scheibeneggenkombination (konservierend 20 cm, tief) und Grubber-Scheibeneggenkombination (konservierend 10 cm, flach) wurde auf einem Praxisstandort in Schleswig-Holstein (stark lehmiger Sand) ermittelt. Der Standort war geprägt durch ein Relief mit wechselnden Höhenunterschieden zwischen 4 und 28 über NN.

Der Dieserverbrauch (Abb. 5.22) für die drei Intensitäten verhielt sich überschlägig im Verhältnis 3 : 1,5 : 1. Absolut wurden mit dem Pflug (30 cm) auf 20% der Fläche weniger als 20 Liter/ha verbraucht. Der Verbrauchsschwerpunkt bewegte sich zwischen 20-25 Liter/ha. Am Hang und den Kuppenschultern wurden Spitzenwerte erreicht, die bei 30 Litern lagen. Am Hang war dieses bedingt durch den Anstieg und an den Kuppenschultern auch durch die schlechtere Zerfalleneigung des Bodens durch verminderten Humus und erhöhten Tongehalt. Die konservierend tiefe Bearbeitung (20 cm) streute um 10 Liter/ha, am Hang und den Kuppenschultern darüber, auf der Restfläche leicht darunter liegend. Der Verbrauch für konservierend flache Bearbeitung streute zwischen 5 und 10 Liter/ha.

Das stark ausgeprägte Relief des Standortes verursachte im Zusammenspiel mit den drei Bearbeitungsintensitäten erhebliche Unterschiede im **Schlupf** (Abb. 5.23). Im Schwerpunkt lagen die Werte mit Pflug zwischen 10 und 15%, selten unter 10%, am Hang und den Kuppenschultern stiegen sie bis auf 20% an. Für die konservierend tiefe Bearbeitung (20 cm) lag der Schlupf auf 1/3 der Fläche unter 5%, in den meisten Fällen zwischen 10 und 15% und überschritt nur selten die 15%-Marke. Für die flache Bearbeitung (10 cm) lagen die Schlupfwerte im Wesentlichen unter 5%.

Da die Bedeckung des Bodens mit Stroh diesen vor extremen Witterungseinflüssen schützt und die biologische Aktivität fördert, gleichzeitig ein niedriger Energieverbrauch bei Bodenbearbeitung und Bestellung die Ressourcen schont und niedrige Schlupfwerte die Struktur des Bodens schonen, sollte die reduzierte Intensität auf dafür geeigneten Böden grundsätzlich der Bearbeitung mit Pflug vorgezogen werden. Dies erhöht die Rentabilität eines Betriebes und trägt gleichzeitig zum Erhalt und zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit bei.

Tab. 5.6: Bodenbedeckung durch Rapsstroh in bestelltem Winterweizen nach 1, 2, und 3 Arbeitsgängen (AG) mit einer Grubber-Scheibeneggen-Kombination

Bedeckung nach Direktsaaten (> 60%)			
Bedeckung nach 1, 2 und 3 Arbeitsgängen mit Grubber-Scheibeneggen-Kombi + Bestellung			
1 AG (6cm)	➡ ca. 15 % Bedeckung		
2 AG (6+12cm)		➡ ca. 7 % Bedeckung	
3 AG (6+12+20cm)			➡ ca. 7 % Bedeckung
In Kombination mit aktiver Bestellung ist die Einarbeitung sperriger Stoppel besser als mit passiver Bestellung			

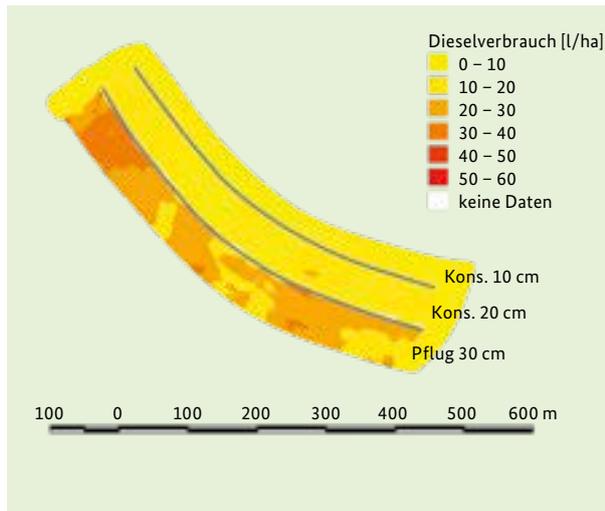


Abb. 5.22: Dieselverbrauch auf einer Praxisversuchsfläche für Bodenbearbeitung mit Pflug (30 cm), konservierend tief mit Lockerung (20 cm) und konservierend flach ohne Lockerung (10 cm)

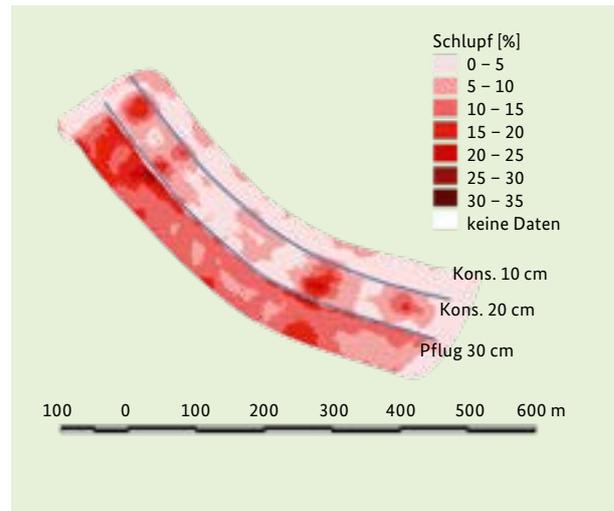


Abb. 5.23: Schlepper-Radschlupf auf einer Praxisversuchsfläche für Bodenbearbeitung mit Pflug (30 cm), konservierend tief mit Lockerung (20 cm) und konservierend flach (10 cm)

### 5.2.7 Schutzmaßnahmen gegen Bodenerosion (Rainer Duttmann, Michael Kuhwald, Joachim Brunotte)

#### 5.2.7.1 Vorsorge

Bodenabträge sind durch eine standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung möglichst zu vermeiden (BBodSchG § 17 (2), 4).

#### Bodenerosion auf Ackerland ist beherrschbar.

Wirksamer Bodenerosionsschutz setzt an den Wurzeln des Abtragungsprozesses an. Die Anwendung entsprechender Vorsorgemaßnahmen ist dabei von den jeweiligen Standortbedingungen, d. h. von der potenziellen oder der tatsächlichen Erosionsgefährdung abhängig. Vorsorge gegenüber Bodenerosion lässt sich durch acker- und pflanzenbauliche sowie durch verfahrenstechnische Maßnahmen erreichen.

Ein zentrales Ziel solcher Maßnahmen ist die schützende Bodenbedeckung (s. Kap. 4.8.3 und 4.8.4). Sie lässt sich im Grunde – soweit es Standort-, Anbausystem- und Fruchtfolgebedingungen zulassen – von „0 auf 100 %“ verbessern:

*Bodenoberfläche ohne Bedeckung (etwa nach Pflugfurche) < Mulchsaat mit Saatbettbereitung < Mulchsaat ohne Saatbettbereitung < Direktsaat < Bedeckung durch Kulturpflanzenbestand < Grünland/Dauerbrachen (ganzjährige Bodenbedeckung)*

Vorsorge gegenüber Bodenabtrag lässt sich durch weitere acker- und pflanzenbauliche sowie durch verfahrenstechnische Maßnahmen erreichen (Tab. 5.7).

Maßnahmenziele, entsprechende Maßnahmen und Beispiele geben einen Überblick dafür, welche Möglichkeiten

„Guter fachlicher Praxis“ heute in der Landwirtschaft zur Verfügung stehen (siehe auch aid-Broschüre „Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ Nr. 3614 (Brunotte et al., 2015)).

Weitere Handlungsempfehlungen liegen in guter Nährstoff- und Humusversorgung (s. Kap. 4.4), in der Kalkdüngung (s. Kap. 4.5), in der organischen Düngung (s. Kap. 5.3) sowie beim Strohmanagement (s. Kap. 5.2.2).

Alle Maßnahmen können entweder einzeln oder in Kombination eingesetzt werden. Sie zielen primär darauf ab:

1. die Energie des Regenniederschlages, des Oberflächenabflusses und des Windes zu vermindern,
2. die Infiltrations- und Wasseraufnahmefähigkeit durch Erhöhung des Porenvolumens und der Porenkontinuität zu verbessern und so insbesondere dem Auftreten von Wassererosion vorzubeugen und
3. die Gefügestabilität des Oberbodens zu erhöhen, wodurch nicht nur der Verschlammung entgegengewirkt werden kann, sondern auch den erodierenden Kräften des Oberflächenwassers und des Windes.

#### 5.2.7.2 Fazit

Die Erosionsgefahr kann auf erosionsgefährdeten Standorten wirksam reduziert werden durch: eine gute Humus- und Kalkversorgung der Böden, weite Fruchtfolgen, Zwischenfruchtanbau (auch über Winter), konservierende Bodenbearbeitung (Sommer, 1998), Streifenbearbeitung und Direktsaatverfahren.

Für eine ausführliche Darstellung empfehlenswerter Erosionsschutzmaßnahmen sei auf die aid-Broschüre „Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ (aid, 2015) verwiesen.

Tab. 5.7: Maßnahmen zur Vorsorge gegenüber Wasser- und Winderosion (zusammengestellt nach Mosimann et al., 1991; KTBL, 1998; Frielinghaus und Deumlich, 2004; Duttmann et al., 2010; aid, 2015)

Maßnahme	Beispiel	Maßnahmenziel
<b>Fruchtfolgegestaltung, Fruchtartenwahl</b>	Verringerung des Anteils an spätdeckenden und weitreihigen Fruchtarten (Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln usw.) auf erosionsanfälligerem Ackerland oder kompletter Verzicht auf spätdeckende Kulturen in Flächen mit hoher Bodenerosionsgefährdung	Erhöhung des Zeitraumes und des Flächenanteils mit schützender Bodenbedeckung
	Erhöhung des Anteils mehrjähriger Futterpflanzen (z. B. Klee gras) in der Fruchtfolge	Erhöhung der Bodenbedeckung im Winterhalbjahr
	Wintergetreide statt Sommergetreide	
<b>Zwischenfruchtanbau</b>	Zwischenfrüchte nach einer früh geernteten Hauptfrucht und vor einer im Frühjahr gesäten Folgefrucht (z. B. Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln): Futterpflanzen, Gründüngung oder nicht frostharte Fruchtarten wie Gelbsenf, Phacelia oder Ölrettich	Erhöhung der Bodenbedeckung im Winterhalbjahr Verringerung erosionsfördernder Brachezeiten (insbesondere vor Sommerkulturen)
<b>Untersaaten</b>	Untersaaten (z. B. Klee- und Klee grasuntersaaten) insbesondere bei Mais (nur bedingt geeignet auf Standorten mit geringem Wasserspeichervermögen und häufigem Wassermangel)	Erhöhung der Bodenbedeckung Verringerung der Nährstoffauswaschung
<b>Streifenbearbeitung</b>	Beschränkung der Bodenbearbeitung auf schmale Saatstreifen (z. B. bei Mais, Zuckerrüben und Raps), während die dazwischen liegenden, mit Mulch bedeckten Abschnitte unbearbeitet bleiben	Erhöhung der Bodenbedeckung Schonung der Bodenstruktur in den unbearbeiteten Saatzwischenreihen
<b>Konservierende Bodenbearbeitung</b>	Einsatz nicht wendender Bodenbearbeitungsgeräte. Ernterückstände (z. B. Stroh) oder Pflanzenreste verbleiben an der Bodenoberfläche oder werden flach eingearbeitet.  Bestellverfahren: • Mulchsaat mit Saatbettbereitung • Mulchsaat ohne Saatbettbereitung • Direktsaat (Einsaat ohne Bodenbearbeitung in die Stopeln der Vorfrucht oder in die Reststoffe einer abgestorbenen Zwischenfrucht)	Reduzierung des Zeitraumes mit fehlender Bodenbedeckung Schaffung/Erhalt eines stabilen Bodengefüges Förderung des Bodenlebens Erhöhung der Infiltrationskapazität Erhöhung der Tragfähigkeit des Bodens
<b>Veränderung des Arbeitsverfahrens</b>	Zusammenlegung von Arbeitsgängen  Reduzierung des Fahrspuranteils  Fahrgassenbegrünung (z. B. Intervallbegrünung)	Reduzierung linienhafter Erosion in Fahrgassen • wirksam gegen Wassererosion  Verringerung der mechanischen Bodenbelastung in Fahrgassen • wirksam gegen Wassererosion
<b>Veränderung von Fahrzeugparametern</b>	Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche, Reduzierung des Reifeninnendruckes, Reduzierung der Radlast	Erhalt der Regenerationsfähigkeit der Bodenfunktionen durch bodenschonende Befahrung
<b>Weitere Maßnahmen</b>	Verkürzung der Hanglänge durch Unterteilung der Schläge  Vermeidung hangabwärts gerichteter Fahrgassen  Verkürzung der Feldlänge in Hauptwindrichtung  Bearbeitung quer zur Hauptwindrichtung	Verringerung der linienhaften Erosion in Fahr- und Bearbeitungsspuren • wirksam gegen Wassererosion  Verringerung von Oberflächenabfluss bei Bearbeitung quer zur Hangfalllinie • wirksam gegen Wassererosion  Verringerung der Windwirklänge • wirksam gegen Winderosion  Erhöhung der Oberflächenrauigkeit • wirksam gegen Winderosion

### 5.2.8 Bodenschonendes Befahren (Joachim Brunotte, Rainer Duttmann, Michael Kuhwald)

Bei der Landbewirtschaftung werden leistungsfähige Maschinen, Geräte und Fahrzeuge eingesetzt. Es liegt im Interesse des Landwirtes und wird seit Inkrafttreten des Bundesbodenschutzgesetzes auch vom Gesetzgeber verlangt, dass Landbewirtschaftung Vorsorgepflichten erfüllt und gegebenenfalls Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu berücksichtigen hat. Einer Bodenverdichtung durch Befahren ist also vorzubeugen.

Maschinen und Fahrzeuge belasten den Ackerboden in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden. Die Befahrbarkeit ist eine Eigenschaft des Systems Boden/Fahrwerk und wird durch physikalische Bodenparameter, durch biologische, ökologische und technische Parameter bestimmt (VDI-Richtlinie 6101, 2014).

#### 5.2.8.1 Bodenphysikalische Parameter

Um die Auswirkungen der mechanischen Belastung von Landmaschinen auf das Bodengefüge beurteilen zu können, sind eine Reihe von technischen Fahrzeugparametern zu berücksichtigen: Radlast / Kontaktfläche / Kontaktflächen- druck / Reifeninnendruck / Spurfleichenanteil / Überrollhäufigkeit. So können generell ganze Fruchtfolgen über mehrere Jahre, eine Frucht mit allen Arbeitskettens oder eine einzelne Maschine betrachtet werden. Als Beispiel dient die Arbeitskette einer Silomaisernnte in einphasigem Verfahren mit parallel fahrenden Häckselgutwagen. Dieses Verfahren hat in der Praxis die stärkste Verbreitung.

In Abbildung 5.24 ist die Veränderung der **gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf)** vor und nach der Befahrung dargestellt. Zur Beurteilung wird die Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (Ad-Hoc-AG, 2005) herangezogen. In der gepflügten Krume (20 cm Tiefe) ist die Minderung der Wasserleitfähigkeit messbar – sie sinkt bei Überrollung mit dem Silomaishäcksler bzw. dem Häckselgutwagen von kf 5 „sehr hoch“ auf kf 3 „mittel“. Folgen beide Fahrzeuge derselben Spur wird der angegebene Schwellenwert von 10 cm/d (Tab. 4.1) sogar unterschritten und die Stufe „sehr gering“ erreicht. In der Krumbasis (30 cm) – dem Übergang zum Unterboden, lagert der Boden insgesamt dichter und ist auch homogener. Der kf-Wert nimmt für „Häcksler solo“ und „Häcksler + Transportfahrzeug“ von „mittel“ auf „gering“ ab. Im nahen Unterboden sind die Kennwerte wieder leicht erhöht. Die Einzelgespanne haben keine Veränderung des kf-Wertes bewirkt, nur die sechsfache Überrollung der gesamten Arbeitskette reduziert die Werte von „hoch“ auf „gering“ und damit wird der Schwellenwert leicht unterschritten.

Die Maßnahmen zur Bestandesführung laufen heute zu 100 % in **Fahrgassen** ab. Diese bieten Platz für Reifen bis 600 mm Breite. Während Düngestreuer hauptsächlich angebaut sind (2 Überrollungen), erfolgt der Pflanzenschutz fast ausschließlich mit angehängten Pflanzenschutzspritzen (3 Überrollungen) und lässt Reifeninnendrucke von < 1 bar zu. Inwieweit Bodenfunktionen im Bereich der Fahrgassen erhalten bleiben, kann recht gut mit der **Regenwurmaktivität** des *Lumbricus terrestris* dargestellt werden. Er kann Boden mit einem Druck von bis zu 1,2 bar verdrängen und entwickelt seine Aktivität vornehmlich dort, wo organische Reststoffe auf der Bodenoberfläche liegen. Punktuelle Praxisversuche über zwei Jahre belegen, dass in der Fahrgasse 21 bzw. 12 Regenwurmkonzentrationshaufen/m<sup>2</sup> (= über einem Regenwurmengang zusammengezogene Strohhäufchen

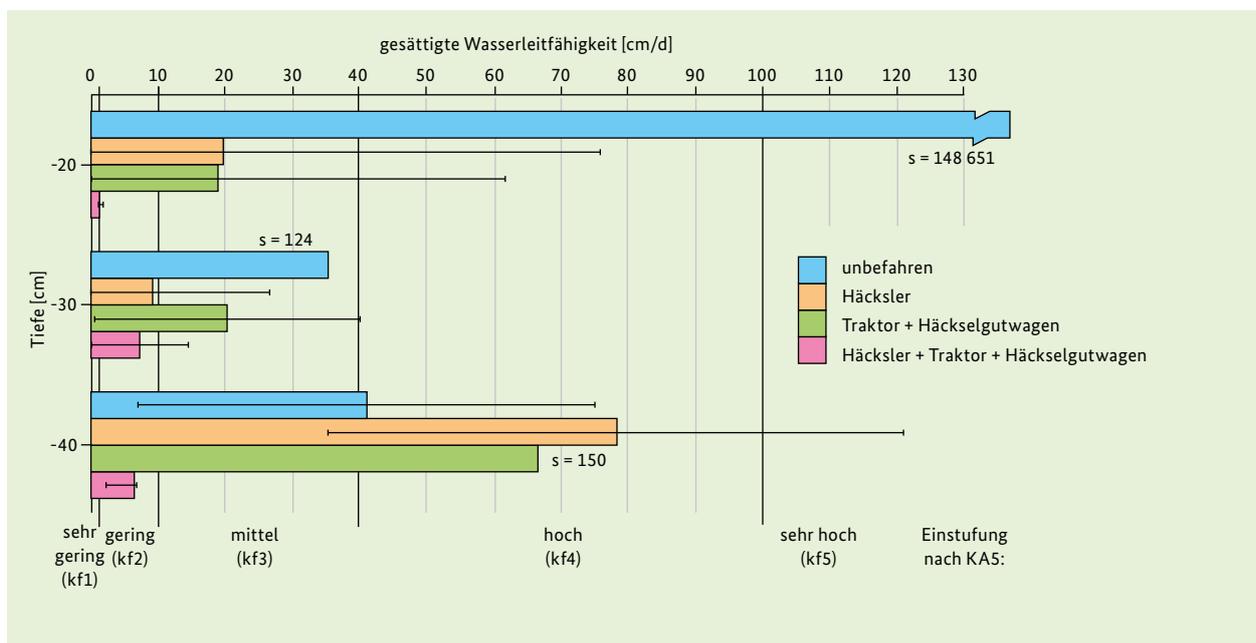


Abb. 5.24: Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernnte (Ut 2-3, Lö) (Brunotte et al., 2015)

vermischt mit Regenwurmlosung) (Fründ, 2010) und in der Fläche entsprechend 33 bzw. 16 Gänge/m<sup>2</sup> zu finden waren (Brunotte, 2007). Das bedeutet, dass der eingestellte Reifendruck von < 1 bar den Tiefgräbern Bewegungsmöglichkeit in dem Fahrgassenbereich ermöglicht. Neben der Lebensraumfunktion werden andere Funktionen wie Wasser- und Lufttransport gewährleistet.

Insbesondere bei der Ernte von Massengütern (Zuckerrüben, Kartoffeln) kommt es zu einer Überrollung der gesamten Fläche mit hohen Lasten (12 t Radlast). Messungen zur Regenwurmpopulation zeigen den Einfluss von Bodenbearbeitung und Belastung. Mulchsaatverfahren bewirken durch organische Reststoffe an der Oberfläche eine höhere Regenwurmmaktivität (330 /0,3 m<sup>3</sup>) als Pflugbearbeitung (220 /0,3 m<sup>3</sup>), sowohl in der Individuenzahl als auch bei der Biomasse (Abb. 5.25). Wird der Boden mit einem Zuckerrübenroder mit 10 t Radlast 1 x überrollt, geht die Anzahl bei Mulchsaat um 40% zurück, beim Pflug um 65%. Auf dem Vorgewende ist aufgrund hoher Radlast und hoher Überrollhäufigkeit eine Abnahme von 80% zu verzeichnen. Die starke Reduzierung der Regenwürmer liegt sicherlich auch in der Methode begründet, da beim Ausgraben hauptsächlich die Flachgräber erfasst werden. Die hydrologisch wichtigeren Tiefgräber (*L. terrestris*) ziehen sich durch die Erschütterungen in tiefere Schichten zurück – ihre vertikal verlaufenden Gänge werden durch Befahrung eher gestaucht und gewährleisten weiter die wichtigsten Bodenfunktionen (Wasser- und Luftleitfähigkeit, Wurzelwachstum).

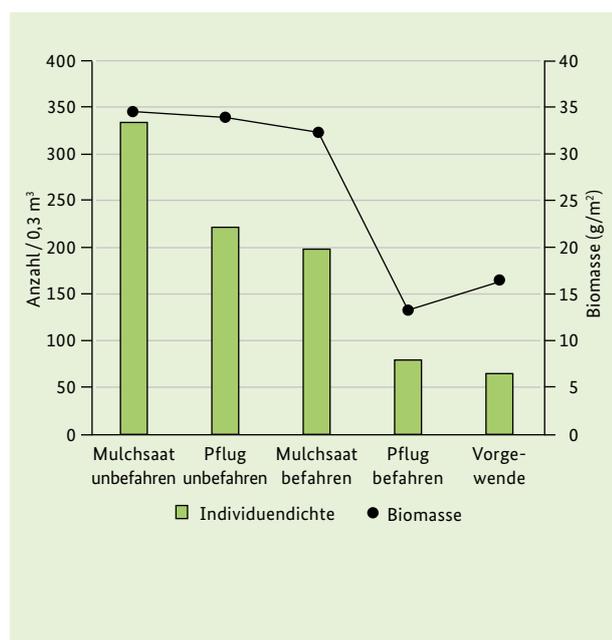


Abb. 5.25: Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollernter (nach Epperlein und Joschko, 2002)

### 5.2.8.2 Pflanzenbauliche Parameter

Die Auswirkungen einer Befahrung durch Landmaschinen auf die Bodenstruktur kann neben bodenphysikalischen Parametern auch mit **pflanzenbaulichen Parametern** beschrieben werden. Das ausgesuchte Beispiel greift ein Fruchtfolgeglied „Zuckerrüben – Winterweizen“ heraus – zu beiden Früchten hat eine Mulchsaat mit 20 cm tiefer Lockerung stattgefunden. Quantifiziert wird die mechanische Belastung durch die Zuckerrübenernter auf das Wurzelwachstum der Folgefrucht Weizen (Abb. 5.26). Die mechanische Belastung unterscheidet sich in der Radlast und der Überrollhäufigkeit. Beim 6-reihigen Selbstfahrer hat die höhere Radlast von 10 t mit 1-facher Überrollung gegenüber der gezogenen Maschine mit geringerer Radlast von 1 – 5 t und 6-facher Überrollung das **Wurzelwachstum** nicht stärker beeinträchtigt. Das bedeutet, dass bei geringerer Radlast die Mehrfachbefahrung wie eine stufenweise Erhöhung der Radlast wirken kann (siehe auch Tijink und Spoor, 2004). Der Vergleich beider Ernteverfahren mit dem unbefahrenen Zustand deutet auf die stabile Bodenstruktur nach konservierender Bodenbearbeitung bei mittlerer Feuchte („feu 3“) hin.

Unterschiedliche Bodenbearbeitung vor Zuckerrüben erzeugt unterschiedliche Tragfähigkeiten für die Erntemaschinen. Die mechanische Belastung von Landmaschinen verändert Parameter wie Trockenrohdichte, Wasser-, Lufthaushalt und den Humusgehalt und wirkt damit indirekt auf die **Ertragsentwicklung**. Wird der Weizen ertrag über einen langen Zeitraum von 15 Jahren betrachtet, so hat er in der Kernproduktionsfläche kaum auf die Befahrung reagiert – nur bei einer flachen Bearbeitung von 10 cm (MSoL=Mulchsaat ohne Lockerung) sinkt der Ertrag um 3 dt/ha (Abb. 5.27). Bei einem Weizenpreis von 20 €/dt ist eine krumentiefe Lockerung

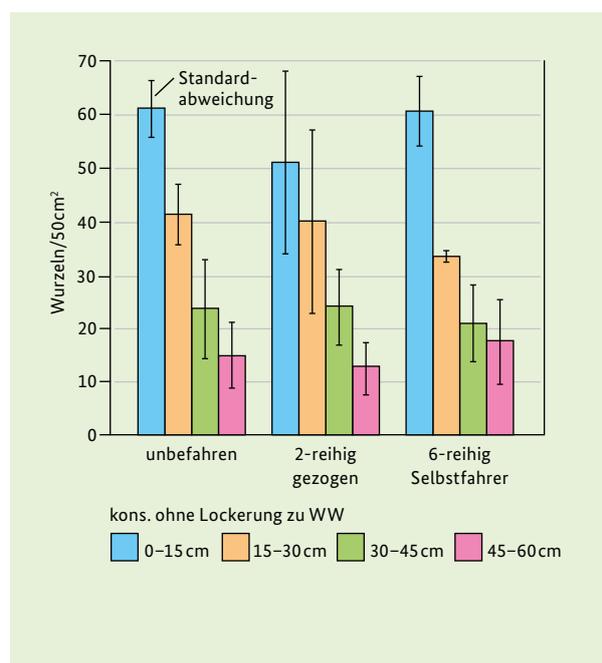


Abb. 5.26: Wurzel-dichte bei Winterweizen nach Befahren mit unterschiedlichen Zuckerrüben-Köpfrödebunkern (Sommer et al., 2001)

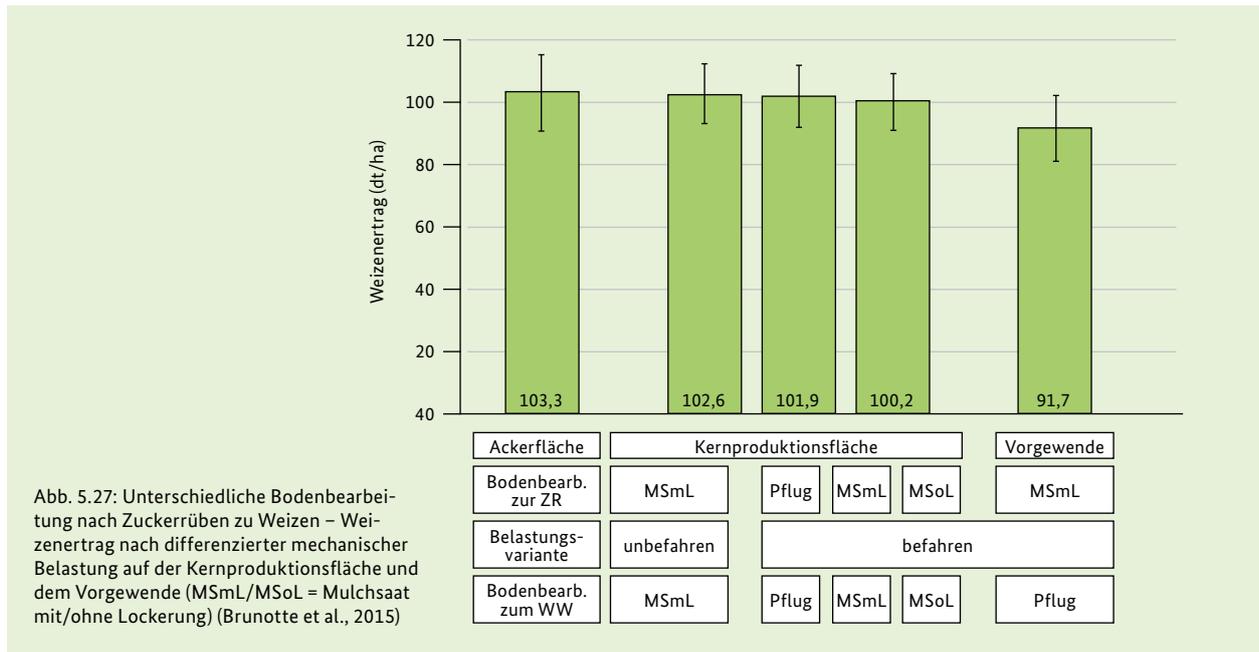


Abb. 5.27: Unterschiedliche Bodenbearbeitung nach Zuckerrüben zu Weizen – Weizenenertrag nach differenzierter mechanischer Belastung auf der Kernproduktionsfläche und dem Vorgewende (MSmL/MSoL = Mulchsaat mit/ohne Lockerung) (Brunotte et al., 2015)

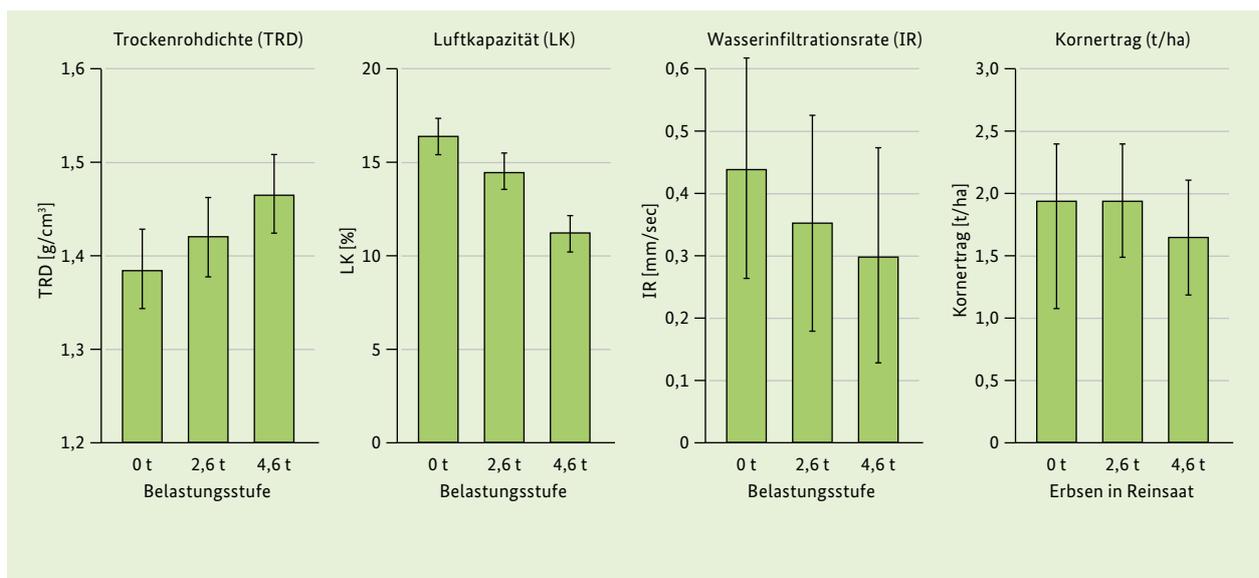


Abb. 5.28: Einfluss von mechanischer Belastung beim Anbau von Körnerleguminosen im ökologischen Landbau (Wild et al., 2013)

also rentabel. Wenn, wie am Vorgewende, hohe Radlasten (Bunker voll) mit hohen Überrollhäufigkeiten auftreten, ist mit einem reduzierten Ertrag von 10% zu rechnen, weil die Bodenfruchtbarkeit im Vorgewendebereich gemindert ist.

Ist die Bodenstruktur hinsichtlich Sauerstoffversorgung und Wasserdränung beeinträchtigt, kann die Entwicklung z. B. von Körnererbsen sehr sensibel darauf reagieren. Zur Verdeutlichung wird ein Praxisversuch von Wild et al. (2013) herangezogen.

Die Aussaat von Erbsen erfolgte nach Pflugfurche. Mit einem Traktorreifen 650/65 R 38 wurden 2,6 t bzw. 4,6 t mit angepasstem Reifeninnendruck von 0,6 bar bzw. 1,6 bar abgestützt. Die geringe Last tritt bei abgesenkter Säkombination in der Kernproduktionsfläche und die hohe Last bei ausgehobener Maschine am Vorgewende auf. In der Reihenfolge

„unbefahren => 2,6 t => 4,6 t“ nahmen in einer Tiefe von 10–15 cm die Trockenrohdichte zu, die Luftkapazität ab, die Wasserinfiltration ab und der Ertrag in der hohen Belastungsstufe um ca. 10% ab (Abb. 5.28).

Dass schon die mittlere Radlast von 4,6 t die bodenphysikalischen Parameter und den Ertrag beeinflussen, ist folgendermaßen zu erklären:

1. Bei der Aussaat im Frühjahr ist aufgrund der Winterniederschläge immer mit feuchtem Unterboden und feuchter unterer Krume zu rechnen, was die Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes erhöht.
2. Die Pflugfurche ist gegenüber der nicht wendenden Bodenbearbeitung weniger tragfähig.
3. Die Erbse reagiert im Vergleich zum Weizen sehr viel empfindlicher auf Bodenverdichtungen.

Insbesondere der **Anbau von Zwischenfrüchten** fördert den Gefügebau, das Pflanzenwachstum und damit die Bodenfruchtbarkeit. Auf den erosionsgefährdeten Standorten wird bereits seit den 1980er Jahren der Zwischenfruchtanbau zur Verminderung von Wassererosion und Bodenverdichtungen realisiert. Ertragsserhebungen über 15 Jahre in der westlichen Vorharz-Region zeigen, dass die Mulchsaaten zu einer Stabilisierung und leichtem Anstieg der Rübeneträge geführt haben (Abb. 5.29). Insbesondere die Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (=MSoS) schneidet aufgrund des geringen Spuranteils auf den verdichtungsempfindlichen Tonstandorten gut ab. Muss der Tonboden bearbeitet werden, sollten im Sinne von CTF (=controlled traffic farming) die Spuren von der Sekundärbodenbearbeitung und Aussaat übereinander liegen, um den verdichteten Bereich so klein wie möglich zu halten. Dadurch wird auch stauende Nässe vermieden und die Durchlüftung des Bodens gewährleistet. Weitere positive Effekte zum Zwischenfruchtanbau vor dem Hintergrund, Humus zu fördern, Erosion und Verdichtung zu vermeiden, finden sich in der aid-Broschüre „Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz“ Nr. 3614 (Brunotte et al., 2015).

### 5.2.8.3 Schlussfolgerungen – bodenschonender Technikeinsatz zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit

Aus Staturserhebungen zum Bodenzustand und Belastungsversuchen unter Landmaschinen kann eine Entscheidungsmatrix abgeleitet werden, die in der Praxis bei Investitionen und der Einsatzplanung ein wichtiges Managementinstrument zur **Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden** darstellt (Abb. 5.30). Zur Beschreibung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit werden nutzungsbedingte Bodenübersichtskarten herangezogen, ergänzt durch Wetterdaten des DWD

(=Deutscher Wetterdienst) zur Berechnung der mittleren Bodenfeuchte (Brunotte und Lorenz, 2015). Der Druckbelastbarkeit/Tragfähigkeit von Böden (X-Achse) wird die Druckbelastung von landwirtschaftlichen Maschinen gegenübergestellt (Y-Achse) (siehe Abb. 5.30). So können im Vorfeld eine Veränderung des Bodengefüges, eine evtl. Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und damit eine Minderung der Bodenfruchtbarkeit abgewendet werden. Vor Ort kann vom Praktiker der Zustand der Bodenstruktur vor/nach dem Befahren mit der Feldgefügeansprache beurteilt werden (siehe Abb. 4.4).

Als Bewertungskriterien auf der Maschinenseite werden zunächst eine Reihe von technischen Parametern (wie Radlast, Kontaktfläche, Kontaktflächendruck, Reifeninnendruck, Spurflächenanteil, Überrollhäufigkeit, ...) erhoben. Grundlage für die Bewertung sind Befahrungsversuche – hier am Beispiel der Silomaiserte dargestellt. Aus der Veränderung der bodenphysikalischen Parameter (hier  $k_t$  aus Abb. 5.24) kann die mechanische Belastung durch Landmaschinen bewertet werden. Die herkömmliche Silomaiserte mit parallelfahrenden Transportfahrzeugen wird aufgrund von hoher Überrollhäufigkeit und hohen Straßen-Reifeninnendrucks als „hohe mechanische Belastung“ eingestuft. Der Schnittpunkt mit der angenommenen vertikalen Standortgeraden liegt im „kritischen“ Bereich, d. h. dieses Ernteverfahren kann im Mittel der Jahre kaum bodenschonend erfolgen. Besser sieht es mit der Verfahrenskette aus, bei der Feld- und Straßentransport getrennt werden. So können auf dem Acker die Häckselgutgespanne mit geringem Reifeninnendruck von 1,5 bar gefahren werden, was sich positiv auf die Bodenstruktur auswirkt. Auch erfolgt bei diesem Verfahren keine Verschmutzung der Straßen. Ein weiterer Beitrag zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit wird geleistet, wenn die Ernte mit Bunkerhäcksler erfolgt, da hier bei abgesenktem Reifeninnendruck zusätzlich die Überrollhäufigkeit entschieden

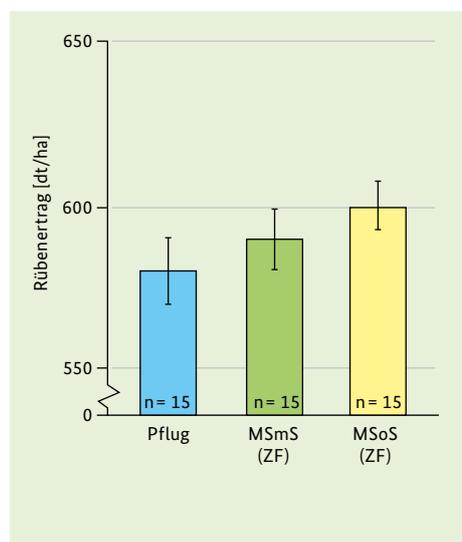


Abb. 5.29: Ertragsniveau von Zuckerrüben nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung über einen Zeitraum von 15 Jahren am Standort Adenstedt. MSmS/MSoS = Mulchsaat mit/ohne Saatbettbereitung, ZF = Zwischenfrucht (Brunotte und Sommer, 2001)



Optimale Bodenzustände bei der Zuckerrübenerte (Foto: J. Brunotte)

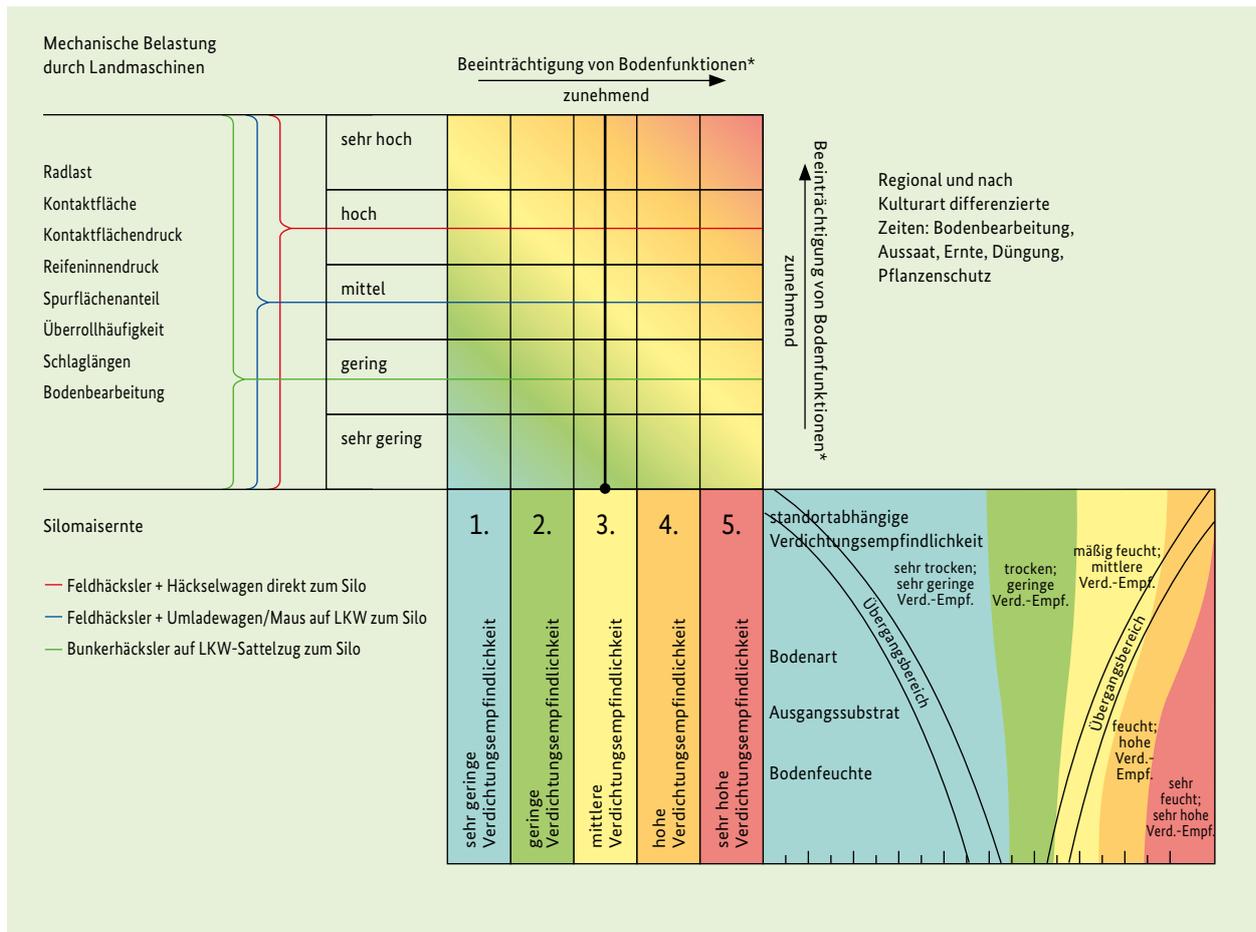


Abb. 5.30: Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Silomaisernnte (Lorenz und Brunotte, 2015)

gemindert wird. Voraussetzung ist, dass die Schlaglänge an die Bunkerkapazität angepasst wird (Brunotte und Fröba, 2007; Brunotte et al., 2011).

Teure Spezialmaschinen, insbesondere zur Ernte, fordern aus Rentabilitätsgründen hohe **Auslastungsgrade** – dies umso mehr, wenn sie nicht nur kostendeckend eingesetzt werden, sondern einen Gewinn erwirtschaften sollen. Zählt die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zu den prioritären Zielen der Landbewirtschaftung, kann sich der Einsatz nicht ausschließlich nach der technischen Machbarkeit richten. Es müssen Zeitfenster eingebaut werden, in denen die Maschinen nach hohen Niederschlagsmengen pausieren. Da wir heute ein hohes Niveau beim technischen Fortschritt haben, muss nicht auf eine kurze Nutzungsdauer abgezielt werden. Eine ein bis zwei Jahre längere Nutzungsdauer schafft Freiräume, den Einsatz bei kritischen Bodenzuständen zu unterbrechen.

#### 5.2.8.4 Fazit

Es gibt einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen der nachhaltigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und dem Ziel, Bodenfunktionen wiederherzustellen, zu verbessern

und zu erhalten. Vor dem Hintergrund, schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, werden Veränderungen pflanzenbaulicher und bodenphysikalischer Parameter infolge mechanischer Belastungen von Maschinen angesprochen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Auswahl bodenschonender Technik in Verbindung mit einer Verbesserung der Tragfähigkeit des Bodens (durch nicht wendende Bodenlockerung) und einer moderaten Maschinenauslastung die wichtigsten Bausteine eines nachhaltigen Managements Maschine/Boden/Pflanze genannt sind. Überfahren in Zeiten hoher Wassersättigung des Bodens und hohe Radlasten bei gleichzeitig hohem Reifeninnendruck sind zu vermeiden.

Möglichkeiten bodenschonender Bewirtschaftung ergeben sich auch hier durch Zwischenfruchtanbau, mehrgliedrige Fruchtfolgen und Reifendruckverstellanlagen, die den Reifeninnendruck an die jeweils vorgefundene Bodenfeuchtesituation adaptieren lassen.

Zukünftige Forschung und Beratung hat für eine Akzeptanzverbesserung der Handlungsempfehlungen in der Praxis zu sorgen, um die Bodenfruchtbarkeit auch weiter nachhaltig zu gestalten.

## 5.3 Organische Düngung

### (Hartmut Kolbe)

Organische Dünger besitzen sowohl eine Humus- als auch eine Nährstoffwirkung (Abb. 5.31). Sie verbessern die physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften. Durch Reproduktion der durch Mineralisierungsprozesse abgebauten organischen Bodensubstanz tragen sie zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit wesentlich bei. Langfristig ist die Zufuhr organischer Dünger so zu bemessen, dass standort- und fruchtfolgetypische Gehalte an organischen Bodensubstanzen aufrechterhalten werden.

#### 5.3.1 Einfluss der organischen Materialien auf den Humusumsatz

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung (Gehalte an Lignin, Stickstoff, C/N-Verhältnis) sind die organischen Materialien nach der Ausbringung durch ein deutlich unterschiedliches Abbauverhalten gekennzeichnet (Abb. 5.32). Abbaustabile Materialien mit sehr weiten C/N-Verhältnissen, wie Torf, Holz und Baum-Nadeln weisen einen langsamen Abbau auf. Nach drei Jahren sind meistens noch 40 – 60% der eingebrachten Substanzmenge strukturell nachweisbar. Durch Belassen auf der Bodenoberfläche (z. B. von Stroh zum Erosionsschutz) kann der Abbau zwischenzeitlich um ca. 20 Wochen verzögert werden. Bei vielen landwirtschaftlich nutzbaren Materialien sind jedoch nach Aufbringung und Einarbeitung nach einem Jahr meistens 70% und bei

Volfrage von relativ engen C/N-Verhältnissen auch über 80% der eingebrachten Substanzmengen im Boden nicht mehr nachweisbar.

In Bezug auf die ausgebrachte Düngermenge stellt sich nach Gründüngung sowie meistens auch bei Strohzufuhr nur eine geringe Humuswirkung ein. Dagegen weisen vor allem die verschiedenen Kompostarten sowie auch Gärrückstände und Stallung bei stetiger Zufuhr eine hohe Humusanreicherung auf (Abb. 5.33). Folgende Rangfolge der absteigenden Reproduktionsleistung organischer Materialien kann formuliert werden:

Kompost > Rottemist > Gärprodukte > Frischmist > Rindergülle > Schweinegülle > Stroh > Gründüngung

Sehr abbaustabile und nährstoffärmere Materialien (z. B. Bio- und Grüngutkomposte, aber auch Stroh) zeigen vergleichsweise eine geringe Nährstofffreisetzung, wodurch sie zum Humusaufbau im Boden besonders geeignet erscheinen (z. B. auf humusverarmten Flächen bzw. für Sonderkulturen). Mit Hilfe der Verwendung von Nutzwert- und Vorsorgeindizes kann die Qualität unterschiedlicher Düngemittel und organischer Bodenhilfsstoffe hinsichtlich des Wertes an Nährstoffen, Bodenverbesserung, Humusreproduktion sowie der Schadstoffgehalte besser miteinander verglichen werden (BGK, 2013).



Abb. 5.31: Allgemeine Wirkung organischer Dünger auf den Boden (nach Albert et al., 2007)



Moderne Gülleausbringtechnik (Foto: J. Brunotte)

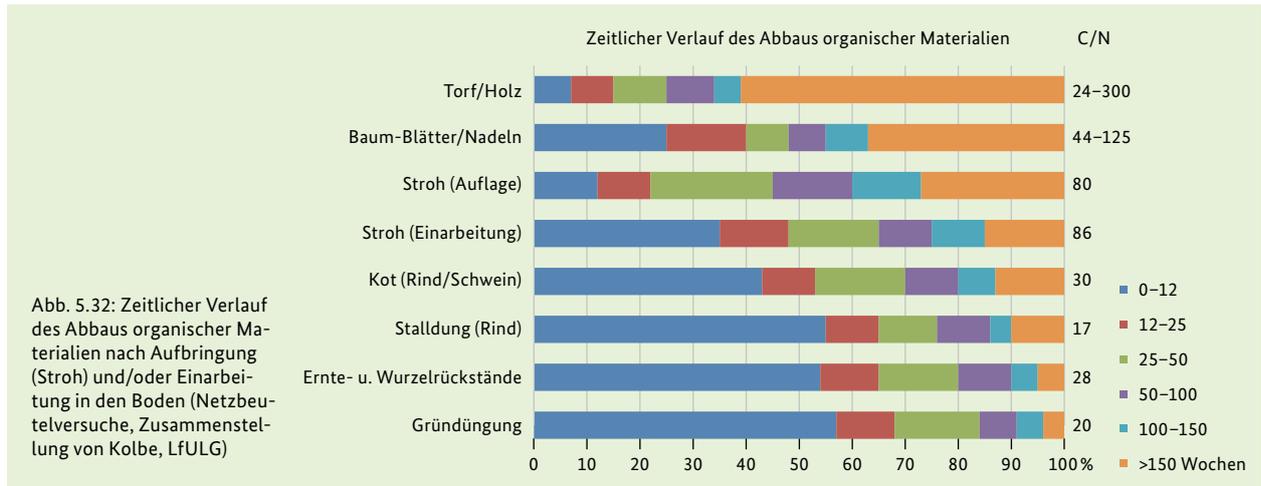


Abb. 5.32: Zeitlicher Verlauf des Abbaus organischer Materialien nach Aufbringung (Stroh) und/oder Einarbeitung in den Boden (Netzbeurteilung, Zusammenstellung von Kolbe, LfULG)

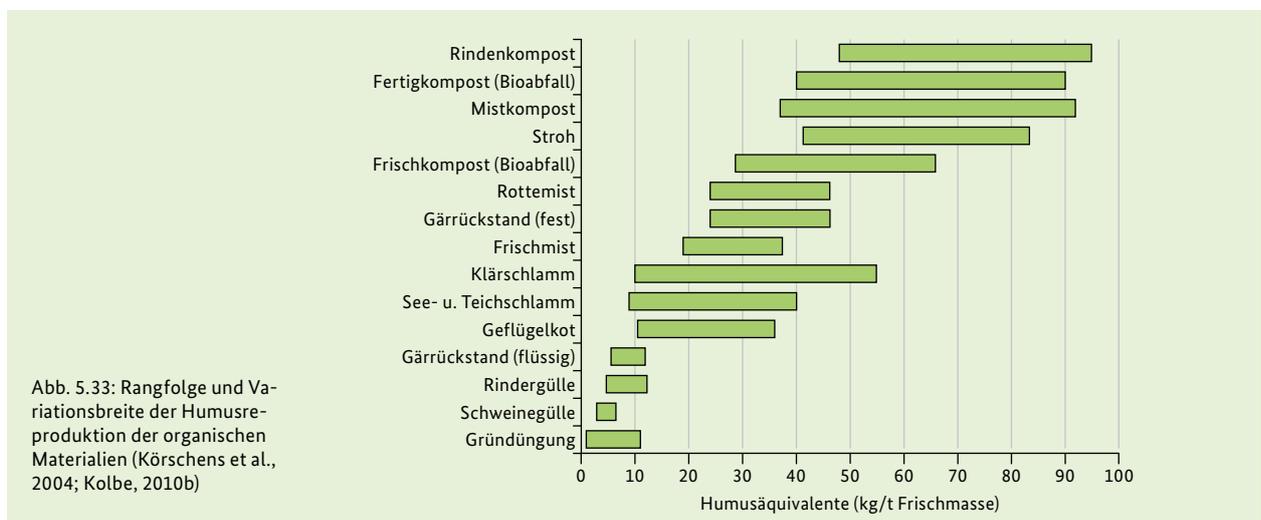


Abb. 5.33: Rangfolge und Variationsbreite der Humusproduktion der organischen Materialien (Körschens et al., 2004; Kolbe, 2010b)

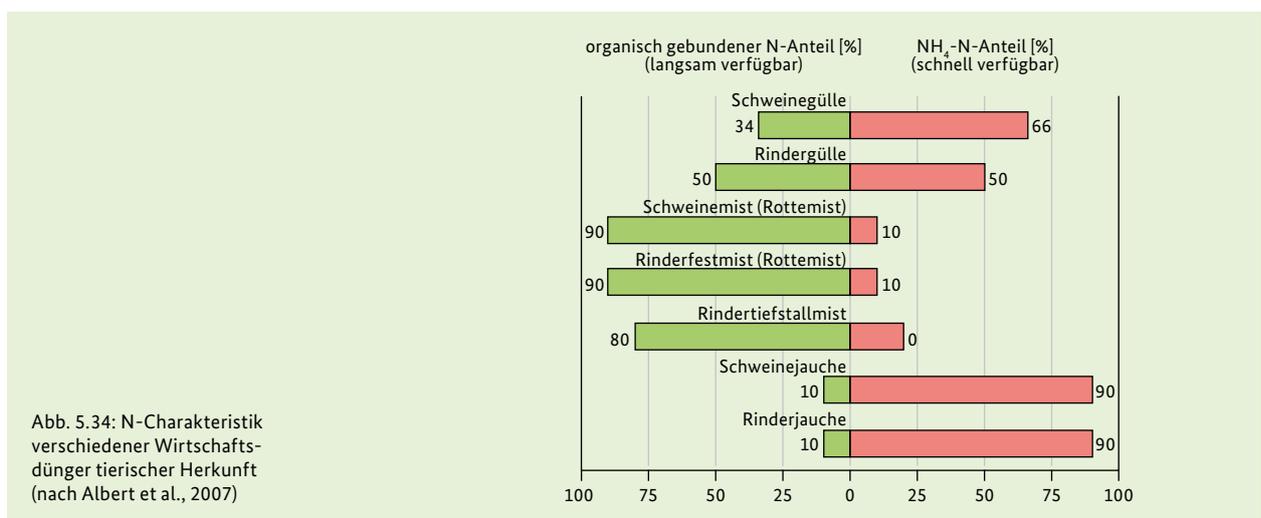


Abb. 5.34: N-Charakteristik verschiedener Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft (nach Albert et al., 2007)

Am Beispiel des Stickstoffs wird die Nährstoffwirkung organischer Dünger von folgenden Faktoren beeinflusst:

- C:N-Verhältnis und Stabilität der organischen Substanz
- von den Anteilen an organisch und mineralisch gebundenem Stickstoff (Abb. 5.34)
- Termin der Ausbringung (Herbst oder Frühjahr)
- Einarbeitung in den Boden
- Witterungsverhältnisse zur Ausbringung und danach
- Standortbedingungen wie Bodenart, Niederschläge, Gründigkeit
- angebaute Fruchtart.

### 5.3.2 Anhebung der Humusgehalte und Einsatz von Biokohle

Aufgrund der günstigen Wirkungen des Humus auf viele Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit wären Verfahren zur Anhebung der Humusgehalte von großer Bedeutung. So gibt es immer wieder Bemühungen, durch hohen Einsatz von organischen Materialien mit deutlicher Humuswirkung, z. B. durch Einsatz hoher Mengen an Komposten, eine substantielle Verbesserung der Humusgehalte des Bodens zu erreichen.

Diese Verfahren haben nur geringe Aussichten auf Erfolg. Da diese Materialien einem fortwährenden Umsatz mit letztendlich vollständigem Abbau unterliegen, müssen die hohen Zufuhren stetig aufrechterhalten werden. Infolge des Abbaus wird zudem aber nicht nur Kohlendioxid frei, sondern es erfolgt – auch beim Einsatz eines nährstoffarmen Materials – mit der Zeit eine hohe Rate an Nährstofffreisetzung, die die durchschnittlichen mit den Ernten abgefahrenen Nährstoffmengen übersteigen und somit die Nachhaltigkeit des Systems langfristig überfordern können.

Eine dauerhafte Anhebung der Humusgehalte gelingt daher in der Regel nur, wenn der Abbau der zugeführten organischen Materialien weit über das Maß der Humifizierungskoeffizienten der Komposte hinaus verlangsamt bzw. ganz zum Stillstand gebracht werden kann. In der Diskussion stehen hier Verfahren, den Anteil des Dauerhumus zu erhöhen durch:

- Erhöhung des inerten Humusgehaltes
- Vertiefung der Ackerkrume, um den Kontakt des Untergrund-Tongehaltes mit der organischen Substanz zu erhöhen
- „Vergrabung“ oder Versiegelung von Humusmaterialien in den Untergrund des Ackerlandes
- Anhebung des Grundwasserspiegels zur Verringerung des Sauerstoffkontaktes der humusabbauenden Mikroorganismen
- Einsatz von Biokohlen (Terra-Preta).

Unter den klimatischen Verhältnissen Mitteleuropas laufen zur Zeit einige Versuche zur Prüfung von Biokohlen, die nach heutigem Wissen maßgeblich für die dauerhafte Sicherung hoher Gehalte an organischer Substanz in einigen tropischen Böden Südamerikas verantwortlich sind. Für die über lange Zeit andauernde hohe Ertragsfähigkeit dieser Böden scheint der Kohleanteil ein entscheidender Faktor zu sein, der durch seine Stabilität und günstige physikalisch-chemische Eigenschaften zu einer hohen Wasser- und Luftkapazität, Speicherung und Pufferung von Nährstoffen sowie zu einer günstigen Besiedlung mit Bodenorganismen führt (Sohi et al., 2010; Haubold-Rosar et al., 2014).

Nur bei einer hohen Abbauresistenz und Stabilität der in den Boden eingebrachten Biokohlen kann davon ausgegangen werden, dass die Humusgehalte dann auch über lange

Zeit (Jahrhunderte) keinem nennenswerten Abbau unterliegen. Der Humifizierungskoeffizient würde dann bei nahezu 100 kg HÄQ je 1 dt C<sub>org</sub> liegen (zum Vergleich: Fertigkompost = 50 kg HÄQ/dt C<sub>org</sub>, Ebertseder et al., 2014). Allerdings, man beachte den Unterschied: Bei der Holzkohle ist dann nur eine einmalige Zufuhr in entsprechender Höhe erforderlich, während beim Kompost die Anreicherung nur bei stetiger, wiederholter Zufuhr gegeben ist!

Biokohlen erscheinen dann auch für eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung (C-Sequestrierung) im Boden durch einen Entzug an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre zur Begrenzung des Klimawandels geeignet. Es besteht jedoch noch ein **erheblicher Forschungsbedarf**, bevor praktische Handlungsempfehlungen zum Einsatz von Biokohlen zur meliorativen Bodenverbesserung gegeben werden können.

### 5.3.3 Fallbeispiel: Verbesserungsvorschläge für Betriebe mit unausgeglichener Versorgung bei der organischen Substanz

#### 5.3.3.1 Unterversorgung

Liegen defizitäre Humusbilanzen der VDLUFA-Versorgungsklassen B und A vor, sollten unter Beachtung von Standortunterschieden nachfolgend genannte Verbesserungsstrategien ins Auge gefasst werden.

#### Nebenprodukt-Management!

In getreidebetonten, aber auch in hackfruchtbetonten viehlosen Anbausystemen fallen erhebliche Mengen an Nebenprodukten in Form von Stroh und anderen Koppelprodukten an. Von den humusmehrenden Komponenten der Humusbilanzen beruhen hierbei oft über 50 – 90% auf dem anfallenden Stroh, insbesondere der klassischen Getreidearten. Der humusmehrende Wert von verschiedenen Nebenprodukten ist in Abhängigkeit vom Ertragsniveau des Standortes folgendermaßen anzusetzen:

- **Getreidestroh 3,2 – 7,2 t/ha:**  
217 – 489 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Rapsstroh 4,3 – 8,5 t/ha:**  
292 – 577 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Körnermaisstroh 7,5 – 11,0 t/ha:**  
niedriger Wert (41,3 kg HÄQ/t)  
310 – 454 kg HÄQ/ha u. Jahr  
hoher Wert (83,4 kg HÄQ/t)  
626 – 917 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Zuckerrüben-Blatt 35,0 – 52,5 t/ha:**  
niedriger Wert (1,0 kg HÄQ/t)  
35 – 53 kg HÄQ/ha u. Jahr  
mittlerer Wert (3,2 kg HÄQ/t)  
112 – 168 kg HÄQ/ha u. Jahr



Kombination von Arbeitsgeräten spart zusätzliche Überfahrten und schont dadurch den Boden (Foto: H. Honecker)

- **Zwischenfrucht-, Untersaat- und Klee gras-Aufwüchse 10 – 30 t/ha:**  
mittlerer Wert 10% TM (3,2 kg HÄQ/t)  
32 – 96 kg HÄQ/ha u. Jahr  
hoher Wert 20% TM (11,0 kg HÄQ/t)  
110 – 330 kg HÄQ/ha u. Jahr.

Als Faustzahlen für eine Abfuhrbegrenzung gilt es, nicht mehr als 50% des Strohanfalls abzufahren (auf umsatzstarken Standorten 25 %, auf umsatzträgen Standorten 75 % des Aufkommens).

#### **Integration von humusmehrenden Zwischen- und Hauptfrüchten in die Anbausequenz!**

In Abhängigkeit vom Standort können folgende humusmehrende Beträge durch Zwischen- und Hauptfrüchte angerechnet werden:

- **Stoppelfrüchte (inkl. 15 t/ha Gründüngung)**  
–10 – 380 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Winterzwischenfrüchte (inkl. 20 t/ha Gründüngung)**  
40 – 434 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Untersaaten (inkl. 15 t/ha Gründüngung)**  
108 – 498 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Körnerleguminosen inkl. Stroh (2,0 – 5,0 t/ha Korn)**  
20 – 410 kg HÄQ/ha u. Jahr
- **Futterleguminosen, Ackergras:**  
Ansaatjahr  
260 – 650 kg HÄQ/ha u. Jahr  
Hauptnutzungsjahr  
460 – 850 kg HÄQ/ha u. Jahr.

Eine weitere, sehr effektive Möglichkeit zur Aufbesserung defizitärer Humusbilanzen besteht in der Integration einer Zweitfrucht in Form der Zwischenfrucht, da die bestehenden

Fruchtfolgen hierzu meistens kaum verändert oder angepasst werden müssen. So können durch den Anbau von Zwischenfrüchten, z. B. in Form der Untersaat, in Energiefruchtfolgen mit hohen Maisanteilen ungünstige Humusbilanzen soweit aufgebessert werden, dass ausgeglichene Salden auf Dauer gewährleistet werden.

Stark mit organischer Substanz unterversorgte Fruchtfolgen beruhen oft auf dem Anbau weniger Fruchtarten, die zudem aus dem Spektrum stark humuszehrender Arten stammen. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Anbausequenzen möglichst auf jedem Ackerschlag ein Minimum von drei Fruchtarten nicht unterschreiten und eine Art dem Spektrum der Humusmehrer zuzuordnen ist.

#### **Integration organischer Düngemittel!**

##### **5.3.3.2 Überversorgung**

#### **Günstige Kombinationen zwischen humusmehrenden und -zehrenden Komponenten anstreben!**

Immer dann, wenn der Anteil an Humuszehrer in den Bilanzen ungefähr 2/3 der Gesamtwerte übersteigt, werden ungünstige Einstufungen der Versorgungsklassen B (– A) ermittelt. Auf der anderen Seite wird infolge eines steigenden Versorgungsgrades mit organischer Substanz die Klasse D erreicht, wenn die Humuszehrer 1/3 des Gesamt-Versorgungsbereichs unterschreiten.

#### **N-Bindung durch Stroh ist nur begrenzt nutzbar!**

In den Betrieben dient das Stroh auch dazu, den verfügbaren Stickstoff aus der Güllezufuhr kurzfristig zu binden. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, dass bei insgesamt zu hoher

Zufuhr auf lange Sicht gesehen diese N-Festlegung nicht erhalten bleibt und es sogar zu einer verstärkten Freisetzung an Stickstoff kommen kann.

#### **Außerbetriebliche Strohverwertung!**

Durch die außerbetriebliche Strohverwertung kann die Versorgungslage um 217 – 489 kg HÄQ/ha entlastet werden, was die Bilanzen auf vielen Standorten in der Weise verbessern kann, dass die Versorgungsgruppe E unterschritten wird. Daher kann die außerbetriebliche Verwertung des Strohs entscheidend zur Entlastung des Humussaldos beitragen. Eine Entlastung der Überversorgung mit Stickstoff gelingt hierdurch jedoch kaum.

#### **Günstige Standortwahl!**

Nach diesen Ergebnissen kann eine intensive Schweineproduktion auf den umsetzungsstarken Standorten viel leichter etabliert werden, als auf den anderen Standorten. Diese Regionen sind deshalb besonders prädestiniert, weil die Humuszehrer (und das Stroh bei Abfuhr) eine relativ höhere Bedeutung aufweisen. Gleichzeitig sorgt das hohe Ertragspotenzial dieser Böden für eine sinnvolle Nutzung der anfallenden Mengen an organischen Düngern (Gülle).

#### **Tierhaltung auf optimale Bestandsgrößen begrenzen!**

In viehhaltenden Betrieben ist es in der Regel einfacher, einen günstigen Humusspiegel aufrechtzuhalten. Eine Tierhaltung zwischen 0,7 – 2,0 GV/ha kann für die meisten Standorte als optimal angesehen werden. Bei zu hohem Viehbesatz kommt es dagegen leicht zu einer Überversorgung mit organischer Substanz.

#### **Anwendung verbesserter Verfahren zur Düngungsbemessung!**

Entsprechend dem Nährstoffanfall aus organischen Düngemitteln ist gegebenenfalls auch auf eine mineralische Düngung zu verzichten, um eine Überversorgung mit

bestimmten Nährstoffen auf Dauer zu verhindern. In diesen Betrieben ist zudem die mineralische NPK-Düngung weitgehend als Ausgleichsdüngung zu bemessen. Es sollten Verfahren zur Anwendung kommen, bei denen die Stickstoffbemessung auf Gesamt-N-Basis und zudem die N-Nachlieferung aus der jährlichen Mineralisation aus den zurückliegenden Fruchtfolgerotationen möglichst vollständig berücksichtigt werden.

#### **Gezielte Änderung der Fruchtfolgen!**

Auch auf Flächen mit hoher Nährstoffzufuhr bzw. mit hohem Versorgungsgrad an Grundnährstoffen (Klassen D u. E) und an Stickstoff muss die Zufuhr an organischen Düngemitteln reduziert werden. Dies trifft auch dann zu, wenn entsprechend dem Ergebnis der Humusbilanzierung eigentlich noch ein Bedarf an organischer Substanz vorhanden ist. In diesen Fällen sollten als Fruchtarten die Humusmehrer verstärkt zum Anbau kommen (Ackergras, Zwischenfrüchte), weil hierdurch eine Erhöhung der organischen Substanz stattfindet, ohne dass eine Zufuhr an Nährstoffen erfolgt. Auch eine Stärkung der Getreidearten zulasten der Hackfrüchte und Mais in der Fruchtfolge erfüllt diese Aufgabe. Steht Stickstoff nicht im Überfluss zur Verfügung, so kann der Humusspiegel auch durch Anbau von Futter- und Körnerleguminosen aufgebessert werden.

#### **Außerbetriebliche Verwertung nährstoffreicher organischer Düngemittel!**

Bei einem deutlichen Überhang an nährstoffreichen organischen Düngemitteln sollten Wege einer außerbetrieblichen Verwertung geprüft werden. Dies kann z. B. durch Tausch mit nachgefragten anderen Produkten im Kreis der Nachbarbetriebe organisiert werden. Zur Nutzung im großen Umfang sind aber auch Verwertungslinien durch Trocknung und Mischung zu Düngemitteln und anderen Produkten mit spezieller Zusammensetzung und Verwertung in der technischen Prüfung.



Zwischenlagerung von Kompost am Feldrand. Wenn Kompost eingesetzt wird, darauf achten, dass ein Prüfzeugnis vorliegt. (Foto: M. Schneider)

## 5.4 Kalkdüngung

(Karl Severin)

Durch Kalkung sollen die physikalischen (Gefüge-/Krümelstabilität, Wasserspeicherkapazität und -leitfähigkeit, Luftleitfähigkeit), die chemischen (Nährstoffverfügbarkeit) und die biologischen Eigenschaften (Bodenflora und Fauna, Wurzelwachstum, Humusgehalt und -qualität) erhalten und verbessert werden. Dagegen sollen Erosion und Verdichtung möglichst vermieden und die Schwermetallverfügbarkeit eingeschränkt werden.

Aus der Bestimmung des Boden pH-Wertes, seiner Bodenart und seines Humusgehaltes wird der Kalkdüngerbedarf für die Erreichung des optimalen pH-Wertes (Klasse C nach VD-LUFA, 2000) berechnet. Die Klasse C (Tabelle 4.15) zeichnet sich aus durch optimale Bedingungen für Bodenstruktur mit stabilem Krümelgefüge, Nährstoffverfügbarkeit, Bodenleben und Schwermetallverfügbarkeit. In Klasse C sind geringe bzw. keine Mehrerträge durch Kalkdüngung zu erwarten.

Aus der pH-Klasse ergibt sich eine „Erhaltungskalkung“, „Aufkalkung“ oder „Gesundungskalkung“.

Die Erhaltungskalkung wird im Zustand der Klasse C gedüngt und entspricht den natürlichen Kalkverlusten aus Niederschlägen, Bodenatmung sowie den Entzügen durch die Kulturpflanzen und den Verlusten aus der Verwendung saurer wirkender Düngemittel. Diese Kalkmenge reicht für eine Fruchtfolge und gilt für kalkanspruchsvolle Kulturarten. Die Menge wird für eine Krumentiefe von 20 – 30 cm berechnet. Die Kalkmenge ist umso höher, je höher der anzustrebende pH-Wert ist.

In den Klassen B und A mit niedriger und sehr niedriger Kalkversorgung muss eine hoch oder sehr hoch über die Erhaltungskalkung hinausgehende Kalkmenge als Aufkalkung oder Gesundungskalkung gegeben werden. Dabei dürfen bestimmte Höchstmengen, zur Vermeidung eines zu raschen pH-Anstiegs, der mit der Festlegung von Spurennährstoffen verbunden ist, nicht überschritten werden. In Klasse A sollte nach Möglichkeit jedes Jahr unabhängig von der Fruchtart bis zur Erreichung der Klasse C gekalkt werden. Die Kalkung hat Vorrang vor anderen Düngungsmaßnahmen. In der Klasse D sollte eine Kalkung unterbleiben.

In Klasse E ist der pH-Wert viel zu hoch mit der Folge verminderter Nährstoffverfügbarkeit und den daraus resultierenden Ertrags- und Qualitätseinbußen; insbesondere auf Sand und lehmigen Sanden. Da sich die natürliche Abnahme der pH-Werte je nach Niederschlagshöhe nur sehr langsam vollzieht, muss eine notwendige Herabsetzung gegebenenfalls durch die Verwendung saurer Düngemittel unterstützt werden.

Im Bodenuntersuchungsattest werden die empfohlenen Kalkmengen in dt CaO/ha ausgewiesen. Die Kalkmengen gelten, wenn nicht extra angegeben, für eine Krume mit 20 – 30 cm Mächtigkeit.

Für Kalkungen stehen verschiedene Kalkdüngemitteltypen mit unterschiedlichen Gehalten und Wirkungsgeschwindigkeiten zur Verfügung. Diese Kalkdünger enthalten unterschiedliche Gehalte an Calcium und Magnesium in den Bindungsformen Oxid, Carbonat oder Silikat. Neben Calcium verfügt auch Magnesium über eine basische Wirkung.



Kalkstreuer im Einsatz (Foto: landpixel)

Diese Gehalte werden mit den Bindungsformen auf den Deklarationen oder Lieferscheinen angegeben.

Neben den Gehaltsangaben in der jeweiligen Bindungsform wird der Gehalt an „basisch wirksamen Bestandteilen“ (Neutralisationswert) bei allen Kalken jeweils in % CaO ausgewiesen. Dieser Wert umfasst die Summe aller basischen Calcium- und Magnesiumverbindungen. Der Gehalt an „basisch wirksamen Bestandteilen“ kann für die Bemessung der Kalkgabe herangezogen werden.

Die Wahl des Kalkdüngers richtet sich nach dem Ziel der Kalkdüngung (Erhaltungskalkung, Aufkalkung, Gesundungskalkung), der Wirkungsintensität und dem Preis pro kg wirksamer Kalk unter Berücksichtigung des Magnesiumanteils.

Branntkalke heben pH-Werte sehr rasch an und werden in der Regel zur Gesundungs- und Aufkalkung von mittleren und schweren Böden eingesetzt. Branntkalk ist wegen seiner schnellen basischen Wirkung für leichte Böden und humusreiche Böden ungeeignet; Spurennährstofffestlegungen und

Humusabbau wären die Folgen. Nach der Ausbringung sollte der Kalk unverzüglich auf eine mittlere Krumentiefe eingearbeitet werden. Branntkalk sollte wegen seiner ätzenden Wirkung nicht zur Kopfkalkung eingesetzt werden.

Kohlensaure Kalke und silikatische Kalke zeichnen sich durch eine milde Wirkung aus und sind geeignet für leichte Böden. Auf mittleren und schweren Böden werden Kohlensaure Kalke zur Erhaltungskalkung eingesetzt und können bei höherer Wirkungsgeschwindigkeit (z. B. Kohlensaure Kalke aus Kreide) auch zur Aufkalkung (Klasse B) verwendet werden.

Auf Grünland sollten langsam wirkende carbonatische oder silikatische Kalke eingesetzt werden.

Je nach Herkunft können Kalke wichtige Nebenbestandteile enthalten. In Kohlensäuren Magnesiumkalken aus Dolomit reichen die Magnesiumgehalte bis 40 % Magnesiumcarbonat. Diese Kalke eignen sich zur Magnesiumdüngung leichter Böden. Bei Böden mit pH-Werten oberhalb 6,5 ist die Magnesiumwirkung stark eingeschränkt. Ebenso sind

Tab. 5.8: Wichtige Kalkdünger

Kalkdünger	Kalkgehalt in %, Mindestgehalt in (%)	Bindungsform	Basisch wirksame Bestandteile in % CaO	Wirkung, wichtige Nebenbestandteile
<b>Kohlensaurer Kalk</b>	(75) ≥ 75 – 95 % CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub>	Carbonate	42 – 53	Langsame und nachhaltige Wirkung, Erhaltungskalkung
<b>Kohlensaurer Magnesiumkalk</b>	(75, mind. ≥ 15 % MgCO <sub>3</sub> ) ≥ 75 – 95 % CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub>	Carbonate	44 – 56	Langsame und nachhaltige Wirkung, Erhaltungskalkung
<b>Branntkalk</b>	(65) 75 – 95 % CaO + MgO	Oxide	75 – 95	Schnelle Wirkung, Auf- und Erhaltungskalkung
<b>Magnesium-Branntkalk</b>	(65, darin mind. ≥ 15 % MgO), 75 – 90 % CaO + MgO	Oxide	75 – 90	Schnelle Wirkung, Auf- und Erhaltungskalkung
<b>Mischkalk</b>	(50) 60 – 65 % CaO, zum Teil als MgO	Carbonate, Oxide, Hydroxide	60 – 65	Mittel schnelle Wirkung, Auf- und Erhaltungskalkung
<b>Konverterkalk feucht-körnig</b>	(40) 45 % CaO, davon 7 % MgO	Silikate und Oxide	46	Langsame und nachhaltige Wirkung, Erhaltungskalkung
<b>Kalkdünger aus der ... insgesamt 23 Kalkarten</b>				
<b>Herstellung von Zucker (Carbokalk)</b>	(30) 31 – 32 % CaO davon 1 % MgO	Carbonate	30 – 32	Mittel schnelle Wirkung, Auf- und Erhaltungskalkung ca. 0,4 % N, 0,6-1,0 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 12 – 15 % organische Substanz
<b>Aufbereitung von Trink- und Brauchwasser</b>	(30) > 31 % CaO	Carbonate; keine Schlämme aus der Enteisung und der Entmanganung	30	Langsame und nachhaltige Wirkung, Erhaltungskalkung



Brantkalk am Feldrand zur Grunddüngung im Frühjahr (Foto: Landpixel)

magnesiumreiche Kalke für Marschböden wegen ihrer nachteiligen Wirkung auf die Bodenstruktur ungeeignet.

Die Wirkungsgeschwindigkeit von Carboalk aus frischgefälltem Calciumcarbonat ist wegen seiner feinen Körnung sehr gut zur Aufkalkung geeignet. Auf leichten Standorten sollten die Gaben nicht zu hoch bemessen werden. Die pH-Werte können schnell zu stark ansteigen. Außerdem können die feinen Kalkpartikel vor ihrer Auflösung aus der Krume in den Unterboden ausgetragen werden.

Konverterkalk enthält neben Calcium- und Magnesium wesentliche Phosphatgehalte und Spurennährstoffe. In Carboalk sind für die Düngung beachtenswerte Stickstoff- und Phosphatmengen enthalten.

Grundsätzlich sollte bei einer Kalkung der ausgebrachte Kalk gut in den Boden eingemischt werden. Bei der Ausbringung mit schweren Geräten ist auf die Vermeidung von Bodenbelastungen zu achten. In der Regel bietet sich eine Ausbringung nach der Ernte mit anschließender Stoppelbearbeitung an.

Wenn es die Ausbringungsbedingungen zulassen, sollten gepflügte schluffreiche Böden zur Verminderung von Verschlammungen, die zu Erosionen und verminderter Bodendurchlüftung führen können, im Frühjahr vor der Aussaat mit schnell wirksamen Kalken gedüngt werden. Die Calciumionen führen zu einer Verklebung bzw. Flockung der Schluffteilchen untereinander und mit den Tonhumuskomplexen. Zur Erhöhung der Calciumkonzentration in der Bodenlösung eignen sich wasserlösliche Calciumverbindungen

wie Calciumsulfat (Gips) besser als langsam lösliche kohlen-saure und silikatische Kalke. Unter Beachtung seiner möglichen nachteiligen Wirkung auf die Keimung kann vor der Aussaat auch Brant- oder Mischkalk gedüngt werden.

Sollen zeitgleich stickstoffhaltige Dünger, wie z. B. Gül-  
len, ausgebracht werden, sollten keine intensiv wirksamen Brantkalke oder Mischkalke ausgebracht werden. Bei solchen Anwendungen kann es zu Stickstoffverlusten in Form von Ammoniakemissionen kommen. Carbonatische (z. B. Kohlensäure Kalke) und silikatische (z. B. Konverterkalke) Kalke führen dagegen nicht zu solchen Stickstoffverlusten.



Pflanzen auf fruchtbaren Böden mit ausgeglichenen Nährstoffverhältnissen haben ein ausgeprägtes Wurzelsystem (Foto: P. Meyer)

## 5.5 Schutz von Bodenorganismen im Zulassungsverfahren von Pflanzenschutzmitteln

(Bernd Hommel, Dieter Felgentreu)

### 5.5.1 Einleitung

Die Sicherung der für die Bodenfruchtbarkeit wichtigen ökologischen Dienstleistungen unzähliger Arten von Mikro- und Makroorganismen im Boden kann über Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst werden (Abb. 5.35). Eine besondere Herausforderung für die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit sind Nebenwirkungen von Agrarchemikalien, insbesondere von Pflanzenschutzmitteln (PSM). Unannehmable Auswirkungen der Pflanzenschutzmittel auf die Bodenorganismen können ihre ertragssichernde Wirkung konterkarieren. Dieser konkrete Zusammenhang von Risiko und Nutzen der PSM wird bei der Entwicklung, Bewertung und Zulassung sowie der Anwendung von PSM berücksichtigt. In der Bundesrepublik Deutschland sind aktuell ca. 250 Wirkstoffe in über 1400 verschiedenen Handelsprodukten einzeln oder als Mischung auf dem Markt. PSM mit Anwendungshinweisen zu Nebenwirkungen auf Bodenorganismen, wie den Regenwürmern, sind die große Ausnahme (BVL, 2015).

Nachfolgend werden (a) das Prozedere der Zulassungsprüfung zum Schutz der Bodenorganismen und (b) am Beispiel der Kupferverbindungen die Problematik der Risiko- und Nutzenabwägung dargestellt.

### 5.5.2 Rechtlicher Rahmen für das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (PSM)

Die Verordnung 1107/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates regelt sowohl die Genehmigung der Wirkstoffe, der Safener und Synergisten als auch das Inverkehrbringen von PSM in der Europäischen Union (EU, 2009). Absolute Voraussetzung für das Bewertungsverfahren von PSM ist, dass die enthaltenen Wirkstoffe, Safener und Synergisten von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) genehmigt worden sind. Nach Artikel 4 der Verordnung 1107/2009/EG darf das Inverkehrbringen (Verkauf und Anwendung) eines PSM nur dann erfolgen, wenn es als Folge der Anwendung entsprechend der Guten Pflanzenschutzpraxis und unter der Voraussetzung realistischer Anwendungsbedingungen keine unannehmbaren Auswirkungen auf die Umwelt hat (EU, 2009).

Im Laufe des Genehmigungsverfahrens von PSM werden deshalb auf der Grundlage von GLP (Gute Laborpraxis)-konformen Studien, die der Antragsteller zu erbringen hat, Verbleib, Ausbreitung und Verhalten in der Umwelt, insbesondere Kontamination von Oberflächengewässern, Grundwasser, Luft und Boden geprüft. Weiterhin werden die akuten und

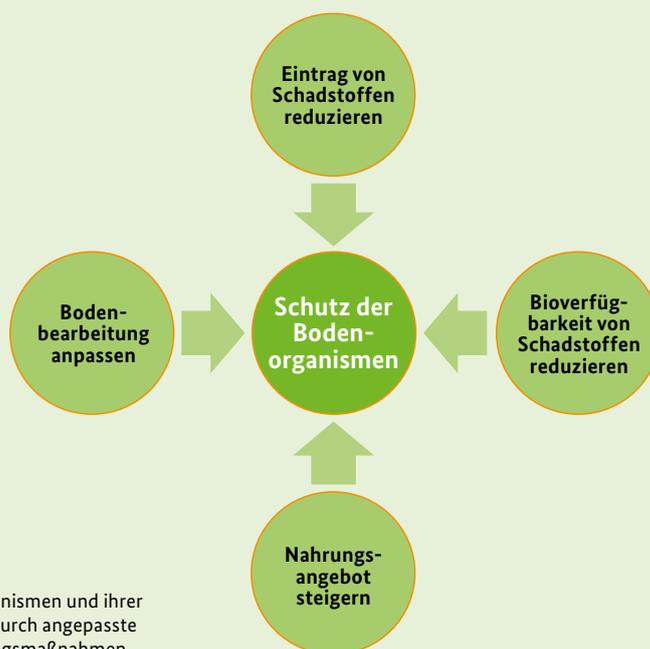


Abb. 5.35: Schutz der Bodenorganismen und ihrer ökologischen Dienstleistungen durch angepasste Bewirtschaftungs- und Förderungsmaßnahmen



Ausgraben von Regenwürmern für die Ermittlung der Auswirkungen von Pflanzenschutzstrategien (Versuchsfeld des JKI in Dahnsdorf, Land Brandenburg; Foto: Hommel/JKI)

chronischen Auswirkungen auf Nichtzielorganismen, Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und das Ökosystem von den beteiligten Behörden bewertet.

In Deutschland arbeiten bei der Zulassung die folgenden Behörden zusammen:

- das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL)
- das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR)
- das Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI) und
- das Umweltbundesamt (UBA).

Die Datenanforderungen für PSM zum Schutz der Bodenorganismen sind in der Verordnung 545/2011/EG unter den Punkten 10.6 „Auswirkungen auf Regenwürmer und andere, wahrscheinlich gefährdete nicht zu den Zielgruppen gehörende Bodenmakroorganismen“ und 10.7 „Auswirkungen auf nicht zu den Zielgruppen gehörende Bodenmikroorganismen“ definiert worden (EU, 2011).

### 5.5.3 Bewertung der Auswirkungen von PSM auf den Boden

Die Prüfung der Auswirkungen eines PSM ist modular aufgebaut (Abb. 5.36). Für die Bewertung der Auswirkungen des PSM und seiner Metabolite (Abbauprodukte) auf Bodenorganismen müssen die Antragsteller auf der Grundlage von zertifizierten Richtlinien, z. B. der OECD, Daten zur akuten Toxizität (z. B. die Mortalität betreffend) vorlegen. Werden bestimmte Werte, sog. Triggerwerte, überschritten (z. B. aufgrund einer langen Verweildauer der Wirkstoffe oder ihrer Metabolite im Boden) erhöht sich der Umfang der Prüfungen (z. B. zur chronischen Toxizität, die die Reproduktion und das

Verhalten der Organismen umfasst). Der Triggerwert für die akute Toxizität ist dabei mit 10 doppelt so groß wie der für die chronische Toxizität. In der Abb. 5.36 sind die einzelnen Schritte für die Generierung von relevanten Zulassungsdaten vereinfacht dargestellt. Dabei nimmt von Schritt 1 bis 4 der Prüfungsaufwand deutlich, aber auch die realistische Abbildung der Auswirkungen im Feld zu, insbesondere aufgrund realitätsnaher Expositionswerte. Computermodelle (Schritt 5) können durch die Berücksichtigung von weiteren relevanten Mittel- und Umweltdaten die realistische Abbildung der Auswirkungen von PSM auf Bodenorganismen erhöhen.

Die Bewertung der Risiken richtet sich nach:

- dem beantragten Anwendungsgebiet (Indikation),
- der Art der Ausbringung (Applikation),
- der Höchstaufwandmenge,
- der Anwendungshäufigkeit und
- den Auswirkungen auf Nichtzielorganismen.

Ob die Anforderungen für eine Zulassung erfüllt sind, prüfen die beteiligten Bewertungsbehörden innerhalb von zwölf Monaten. Werden Nachforderungen notwendig, z. B. bei unvollständig eingereichten Unterlagen oder fehlerhaften Studien, ruht diese Frist. Eine Kurzfassung des abschließenden positiven Zulassungsberichts (Registration Report) wird in Deutschland vom BVL in deutscher Sprache im Internet veröffentlicht ([www.bvl.bund.de](http://www.bvl.bund.de)). In Form von Anwendungsbestimmungen können Maßnahmen zur Risikominimierung festgesetzt werden (z. B. Abstandsaufgaben zu Gewässern, Ausbringung abends erst nach Bienenflug). Die Zulassung wird für höchstens zehn Jahre erteilt, kann aber auf Antrag mehrmals verlängert werden. Eine Zulassung kann, z. B. auf der Grundlage neuer Erkenntnisse aus dem Nachzulassungsmonitoring, jederzeit von der Zulassungsbehörde aufgehoben oder geändert werden.

### 5.5.4 Ermittlung der Auswirkungen von PSM auf Bodenmakroorganismen

Die akuten Toxizitätsdaten beinhalten die Mortalität, insbesondere die Konzentration, bei der 50% der Versuchstiere gestorben sind ( $LC_{50}$ ). Die chronischen Toxizitätsdaten wiederum zeigen die langfristigen Auswirkungen des Mittels und seiner Metabolite insbesondere auf die Reproduktion und das Verhalten der Bodenorganismen an (Tab. 5.9). Hier spielt die Konzentration eine Rolle bis zu der keine Auswirkungen beobachtet werden (No Observed Effect Concentration,

NOEC). Für die Ermittlung dieser Toxizitätsdaten werden Labor-, Halfreiland- und Freilandstudien mit Indikatororganismen verschiedener trophischer Ebenen durchgeführt (Abb. 5.36). Die Labor- und Halfreilandstudien basieren in aller Regel auf der Verwendung von sensitiven und leicht im Labor zu haltenden Standardorganismen, wie z. B. dem Kompostregewurm *Eisenia fetida*, der Collembolenart *Folsomia candida* und der Milbenart *Hypoaspis aculeifer*. Bleiben Auswirkungen der Mittel und seiner Metabolite im Labor aus oder sind vertretbar gering, kann auf die nächsten Stufen der Prüfung (Halfreiland- oder Freilandstudien) verzichtet werden. Der Grund dafür ist, dass im natürlichen Substrat Boden

Tab. 5.9: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter für die Kalkulation der Risiken von PSM für Nichtzielorganismen

Kriterium	Beschreibung	Bedeutung
$PEC_{soil}$	Erwartete Umweltkonzentration für das PSM im Boden [Predicted Environmental Concentration Soil]	Kalkulation der Höhe der Exposition in 5 cm Bodentiefe
$DT_{90}$	Erforderliche Dauer, bis 90% des PSM abgebaut sind [Period Required for 90% Degradation]	Kalkulation der Dauer der Exposition im Boden
$LC_{50}$	Konzentration, bei der 50% der Versuchstiere sterben [Lethal concentration for 50% mortality]	Kalkulation der akuten Toxizität im Labortest
NOEC	Konzentration des PSM, bei der noch keine Auswirkungen, insbesondere auf die Reproduktion, erwartet werden [No Observed Effect Concentration]	Kalkulation der chronischen Toxizität im Halfreiland- und Freilandtest
$TER_A$	Akutes Toxizität-Exposition-Verhältnis [Acute Toxicity Exposure Ratio]: $TER_A = LC50 / PEC_{soil}$	$TER_A \geq 10$ bedeutet: ein geringes Risiko für die akute Toxizität
$TER_{LT}$	Langfristiges Toxizität-Exposition-Verhältnis [Long-Term Toxicity Exposure Ratio]: $TER_{LT} = NOEC / PEC_{soil}$	$TER_{LT} < 5$ bedeutet: zusätzliche Studien im Halfreiland mit natürlichem Substrat oder Freiland notwendig
NO686	Schädigend für Regenwurmpopulationen	Kennzeichnungsaufgabe in Deutschland für zugelassene Mittel hinsichtlich Regenwurmtoxizität

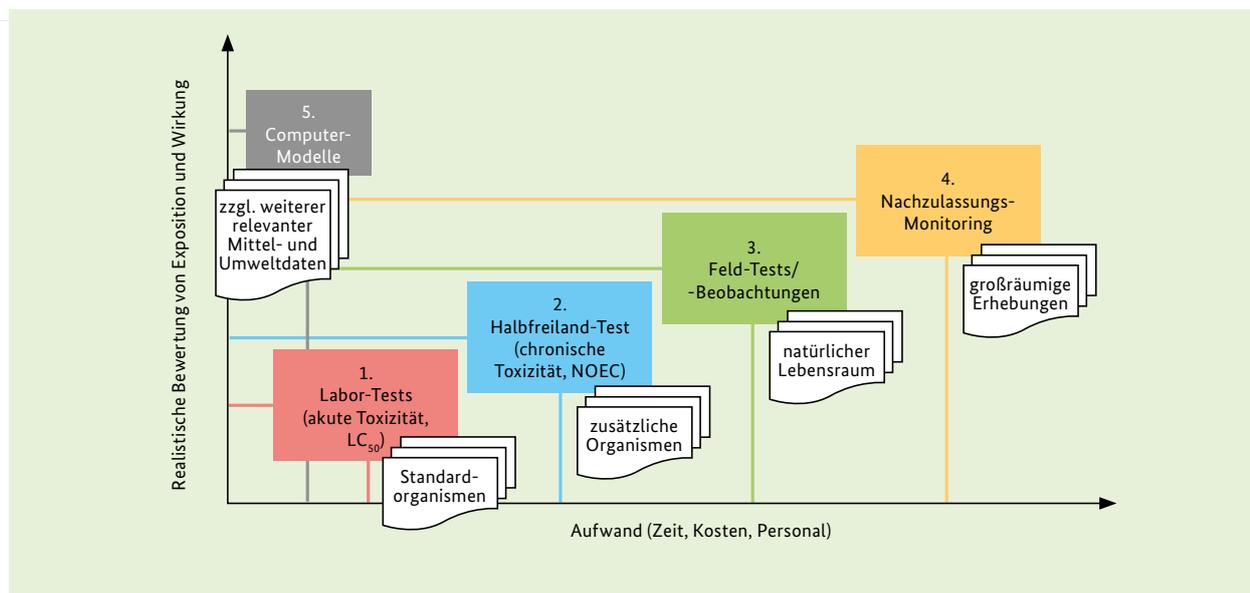


Abb. 5.36: Algorithmus der Datenerhebung für die Bewertung von PSM hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Nichtzielorganismen (z. B. Mikroorganismen, Regenwürmer) in Abhängigkeit von Aufwand und Realitätstiefe. Computermodelle können die Daten aus den Erhebungen 1 bis 4 berücksichtigen und durch weitere relevante Mittel- und Umweltdaten ergänzt werden.

oder im Freiland die Exposition der Organismen und damit die Auswirkungen deutlich geringer sind als im Labor.

Ob nun das Mittel oder seine Metabolite überhaupt (unannehmbare) toxische Auswirkungen zeigen, hängt davon ab, wie viel vom Mittel und von seinen Metaboliten auf den Boden gelangt und dort (länger) verbleibt bzw. bioverfügbar ist. Dafür wird die prognostizierte Umweltkonzentration des Mittels und seiner Metabolite in 5 cm tiefem Boden kalkuliert (Predicted Environmental Concentration,  $PEC_{soil}$ ). Von Bedeutung für die chronischen Auswirkungen ist weiterhin der kalkulierte Zeitraum, bis zu dem 90% des Mittels abgebaut werden (Period Required for 90% Degradation,  $DT_{90}$ ). Werden hier bestimmte Werte überschritten, sind Studien zur chronischen Toxizität (z. B. die Reproduktion betreffend) dringend erforderlich.

Für die finale Risikobewertung sind insbesondere die drei Werte  $LC_{50}$ , NOEC und  $PEC_{soil}$  eine wesentliche Grundlage für die Berechnung des akuten und langfristigen Toxizität-Exposition-Verhältnisses (Toxicity Exposure Ratio:  $TER_A$  und  $TER_{LT}$ ). Wenn der Quotient  $LC_{50}/PEC_{soil}$  einen  $TER_A$  von  $\geq 10$  erreicht, dann wird ein geringes Risiko für die akute Toxizität unterstellt. Und umgekehrt, wenn dieser Wert unterschritten wird, dann werden Studien zur chronischen Toxizität für die Berechnung des NOEC essenziell. Sollte der resultierende Quotient  $NOEC/PEC_{soil}$  einen  $TER_{LT}$ -Wert von größer 5 erreichen, dann wird ein geringes Risiko für die Meso- und Makrofauna des Bodens unterstellt. Liegt  $TER_{LT}$  jedoch unter 5, so werden zusätzlich zu den Laborstudien Halfreilandstudien mit natürlichem Substrat (Boden) oder Studien im Freiland notwendig. Im Rahmen der Vorsorge kann es auch für besonders kritische Pflanzenschutzmittel notwendig werden, die TER-Werte nach oben zu verschieben, z. B. von 5 auf 15.

### 5.5.5 Ermittlung der Auswirkungen von PSM auf Bodenmikroorganismen

Die Prüfung der Auswirkungen von PSM auf die Aktivität, Diversität und Stoffwechselleistungen mikrobieller Lebensgemeinschaften im Boden ist ebenfalls von grundlegender Bedeutung. Mikroorganismen, wie Bakterien, Pilze, Algen, Myxomyceten und Protozoen, spielen in allen Ökosystemen beim Auf-, Ab- und Umbau von natürlichen und künstlichen Substanzen eine entscheidende Rolle. Eine unannehmbare Beeinträchtigung dieser ökologischen Leistung durch PSM stellt daher ein wichtiges Ausschlusskriterium für die Genehmigung auf Inverkehrbringen dar.

Mit ihren enzymatischen Fähigkeiten sind die Mikroorganismen an allen wichtigen Stoffkreisläufen, wie z. B. für Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor, beteiligt. Damit tragen sie zu einer kontinuierlichen Versorgung mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen bei. Sie treten durch Oxidation, Reduktion und sorptive Prozesse in Wechselwirkung mit Metallen, organischen und anorganischen Stoffen und können

damit das Vorkommen und die Verbreitung sowie die biologische Verfügbarkeit dieser Substanzen beeinflussen. Mikroorganismen können relativ schnell auf veränderte Umweltbedingungen reagieren und sind somit auch Indikatoren für eine mögliche Gefährdung des Habitats Boden. Jede gewollte (z. B. durch Fruchtfolge, Änderung der Bodenbearbeitung, Ausbringung von Agrarchemikalien) oder ungewollte (z. B. durch Klimawandel) Veränderung der Substrat- und Umweltbedingungen führt zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung und zur Änderung der Stoffwechselleistungen. Viele dieser Spezies sind nicht kultivierbar und man kennt ihre Funktion im Ökosystem bzw. in den Stoffwechselkreisläufen nicht.

Erst mit der Entwicklung kulturunabhängiger Methoden basierend auf Genotyp (Amann et al., 1995) und Phänotyp (Zelles, 1996) kann man die große Vielfalt der Bodenmikroorganismen darstellen und ihre Veränderung in der Zusammensetzung als Reaktion auf Umwelteinflüsse erfassen.

Bei einer genaueren Kenntnis der Zusammensetzung und potenziellen Leistung standortspezifischer Populationen von Bodenmikroorganismen könnte der zu erwartende Stoffumsatz, die Bildung pflanzenverfügbarer Nährstoffe und der Abbau, z. B. toxischer Schadstoffe, eingeschätzt bzw. durch gezielte Maßnahmen gefördert werden. Vom biologischen Standpunkt aus ist die Erhaltung der biologischen Vielfalt und die Sicherung der Lebensraumfunktionen ein Hauptziel zum Schutz einer nachhaltigen Landnutzung.

Um die oben beschriebenen Wirkungen zu erkennen und zu erfassen sind meist mehrere Methoden und Prüfungen empfehlenswert, da die PSM unterschiedliche Stoffwechselwege und Aktivitäten beeinflussen können. Die OECD empfiehlt, dass Prüfungen von Effekten bei der Stickstoff-Transformation im Labormaßstab vorgelegt werden. Nationale und internationale Normungsorganisationen (z. B. DIN/ISO, CEN, VDLUFA) haben entsprechende Testmethoden standardisiert und eine Reihe weiterer Untersuchungsmethoden entwickelt.

In der Regel wird mit zwei Konzentrationen getestet, der einfachen Aufwandmenge (berechnet für eine Eindringtiefe von 0 bis 5 cm) und der bis zu 10 fachen Aufwandmenge, abhängig von der Anzahl der Anwendungen pro Saison oder der zu erwartenden Umweltkonzentration im Boden ( $PEC_{soil}$ ). Für eine positive Bewertung müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: während der 28 bis zu 100 Tage dauernden Exposition darf der Unterschied zur unbehandelten Kontrolle (vergleichbarer Boden ohne PSM) in einem sandigen Boden den Auslösewert von 25% nicht über- oder unterschreiten. Ein Unterschied zu den Prüfungen mit anderen Nichtzielorganismen ist, dass dem Testboden keine Indikator- oder Standardorganismen zugesetzt werden.

### 5.5.6 Verfügbarkeit von für Regenwürmer und Bodenmikroorganismen schädlichen PSM

Im Online-BVL-Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel werden insgesamt 1424 verfügbare Mittel aufgeführt (Stand: Mai 2015). Davon sind lediglich acht Mittel, ausnahmslos Fungizide, als schädigend für Regenwurmpopulationen eingestuft (Auflage: NO686). Von den acht Mitteln enthalten sieben kupferhaltige Verbindungen (Kupfersulfat, Kupferhydroxid) und eins die Wirkstoffe Propiconazol und Fenpropidin. Das Mittel mit den letzten beiden Wirkstoffen zeigt mit 0,4 einen kritischen  $TER_{LR}$ -Wert (BVL, 2009). Auch kupferhaltige Mittel verfügen mit 0,5 bis 1 über einen kritischen  $TER_{LR}$ -Wert (EFSA, 2013). Insbesondere wenn der NOEC-Wert 15 mg Kupfer pro kg Boden unterschreitet, dann ist das langfristige Risiko für Regenwürmer in den Dauerkultur-Anwendungen nicht akzeptabel (BVL, 2014).

Mikroorganismen und Regenwürmer haben ihren Lebensraum und ihre große ökologische Bedeutung auch auf landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Flächen, auf denen PSM seit vielen Jahrzehnten regelmäßig angewendet werden. Managementmaßnahmen zur Risikominimierung – wie das z. B. bei Bienen und anderen terrestrischen Nichtzielorganismen machbar ist – würden hier nicht greifen. Zum Schutz der Tiere und wegen des hohen Risikos würde von Seiten der Managementbehörde BVL von vornherein keine Zulassung erteilt werden. Das wissen auch die Entwickler von PSM und sondern deshalb schon frühzeitig solche risikobehafteten Substanzen aus.

Mit den regenwurmschädlichen Kupferverbindungen ist die Situation etwas komplizierter. Diese Pflanzenschutzmittel

werden schon seit über 100 Jahren zur Kontrolle von Pilzkrankheiten im Wein-, Obst- und Hopfenanbau angewandt. Ein Verbot aufgrund der akuten Regenwurmtoxizität wäre konsequent (Jänsch und Römbke, 2009). Bei einer Risiko-Nutzen Abschätzung würden aber insbesondere ökologisch erzeugte Pflanzenprodukte im Wein- und Obstbau schwer betroffen sein, da es gegenwärtig keine geeigneten Substituten gibt. Die gesamte Branche würde zur Disposition stehen! Deshalb hat die Europäische Kommission entschieden, die Zulassung der Kupferverbindungen vorläufig bis zum 31. Januar 2018 zu befristen und die Antragsteller aufgefordert, Maßnahmen zu ergreifen, die die schädlichen Auswirkungen der Kupferverbindungen auf Bodenorganismen, insbesondere auf die Regenwürmer, begrenzen (EU, 2015). In dieser Richtlinie wird gefordert: „Die Antragsteller legen der Kommission, der Behörde und den Mitgliedstaaten ein Überwachungsprogramm für gefährdete Gebiete vor, in denen die Kontamination von Böden und Gewässern (einschließlich Sedimenten) durch Kupfer Anlass zur Sorge gibt oder geben könnte.“

Das Julius Kühn-Institut hat in diesem Zusammenhang von 2010 bis 2014 exemplarisch in einer großen Anzahl von Weinberglagen Untersuchungen durchgeführt (Abb. 5.37) und dabei festgestellt, dass viele Böden mit hohem Gesamtkupfergehalt – wie erwartet – eine geringe Diversität der Regenwurmart und geringe Individuendichten zeigen. Aber es gab auch viele Flächen, die trotz hoher Kupfergesamtgehalte über absolut intakte Regenwurmgesellschaften verfügen. Eine Selektion bestimmter Arten als Folge der Kupferexposition wurde nicht beobachtet (Strumpf et al., 2015). Auch bei den Bodenmikroorganismen wurden trotz langjähriger Einträge keine negativen Effekte festgestellt (Felgentreu, 2014).



Abb. 5.37: Erhebungen zum Regenwurmbesatz in mit Kupfer kontaminierten Weinbergböden (Foto: JKI)



Abb. 5.38: Positive (grün) und negative (braun) Korrelation ausgewählter Parameter des Bodens, der Mikroorganismen- und der Regenwurmgesellschaften: Je dunkler die Farbe (Korrelationskoeffizient -1 bzw. +1) desto enger ist der Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen (Erklärung: C<sub>org</sub> = organischer Kohlenstoffgehalt, DHA = Dehydrogenase-Aktivität, qCO<sub>2</sub> = metabolischer Quotient, C<sub>mik</sub> = mikrobieller Kohlenstoffgehalt, Cu<sub>wurm</sub> = Kupfergehalt im Regenwurm, SW\_Index = Shannon-Wiener-Index der Regenwurmbiodiversität, FM<sub>wurm</sub> = Frischmasse Regenwurm)

Die Erklärung dafür scheint simpel: Sowohl die Organismen als auch der Anteil des biologisch aktiven Kupfers am Gesamtgehalt hängen von einer ganzen Reihe von pedologischen (Abb. 5.38), agronomischen und klimatischen Bedingungen und damit vom Standort ab. Auch muss angenommen werden, dass sich die Bodenorganismen über den jahrzehntelangen Kontakt an Kupfer angepasst haben (Langdon et al., 2001). Eine standortspezifische Betrachtung der Auswirkungen ist letztlich erforderlich (Jänsch und Römbke, 2009).

Eine rasche Festlegung des größten Teiles des Kupfers durch Bindung an mineralische und organische Bodenpartikel und Ausfällung als unlösliche anorganische Salze verringert den bioverfügbaren Anteil deutlich und damit mögliche toxische Effekte auf Bodenorganismen im Freiland (Strumpf et al., 2015). Hier liegt vielleicht der Schlüssel für den verantwortungsvollen Umgang mit den Kupferverbindungen im Pflanzenschutz, das heißt die Anwendung in kritischen Lagen verbunden mit Maßnahmen, die einerseits Bodenorganismen fördern und andererseits die Mobilisierung von bioverfügbarem Kupfer im Boden minimieren.

### 5.5.7 Fazit

Bei der Prüfung von Pflanzenschutzmitteln werden die Auswirkungen auf Nichtzielorganismen im Boden auf der Basis von standardisierten Methoden umfänglich berücksichtigt. Sowohl die Studien zur Wirkung als auch zur Exposition basieren dabei auf realistischen Umweltszenarien. Die Mittel dürfen keine unannehmbaren Auswirkungen auf die Umwelt haben. Das Ergebnis ist, dass nur ganz wenige Mittel in Deutschland mit relevanten Nebenwirkungen auf Bodenorganismen auf dem Markt sind. Hierzu gehören die seit vielen Jahrzehnten z. B. im Weinbau ausgebrachten Kupferverbindungen. Alternative Verfahren, wie z. B. resistente Sorten oder die Umwelt weniger belastende Mittel, stehen noch nicht im ausreichenden Maße für die Substitution von Kupferverbindungen zur Verfügung. Untersuchungen in vielen Weinbaulagen mit hohen Gesamtkupfergehalten haben gezeigt, dass die Biodiversität und ökologische Leistung von Bodenorganismen nicht nur vom Kupfer, sondern von einer Reihe von Boden-, Anbau- und Klimafaktoren abhängig sind. Auch haben sich in vielen Anbaugebieten die Bodenorganismen an die Auswirkungen von Kupfer angepasst. Viele dieser Faktoren können gezielt beeinflusst und dadurch die Bodenorganismen gefördert und gestärkt werden. Unter Berücksichtigung dieser Handlungsoptionen sollte eine Fortsetzung der Anwendung von Kupferverbindungen im Pflanzenschutz auf der Grundlage von Minimierungsstrategien zukünftig vertretbar sein.

# 6

(Foto: F. Mohr)

## Zusammenfassung und Ausblick

Der Boden hat eine herausragende Bedeutung als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen sowie als Lebensraum für Bodenorganismen. Er bindet Nährstoffe, sichert die Ernährung, filtert und speichert eindringendes Wasser, ist einer der größten Kohlenstoffspeicher – der Schutz dieser Ressource ist lebensnotwendig. Zur Unterstützung dieses Bodenschutzgedankens gibt es seit 1998 eine gesetzliche Grundlage, das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG).

Böden in Deutschland sind sehr fruchtbar und sichern hohe Erträge. Für die Ertragsfähigkeit des Bodens ist die Bodenfruchtbarkeit entscheidend mit ihrer ‚natürlichen‘ und einer ‚kulturbedingten‘ Komponente.

Joachim Brunotte

Ertragsrelevante Bodeneigenschaften – qualitativ und quantitativ – bestimmen den Status der Bodenfruchtbarkeit eines Standortes. Dieser gibt – als dynamisches System auf der Basis physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften – mit Klima, Bodentyp und Bodenart im Wesentlichen seine natürliche Bodenfruchtbarkeit vor. Hinzu kommt die durch Bewirtschaftung entstehende kulturbedingte Bodenfruchtbarkeit, wiederum ein dynamisches System mit zahlreichen Einflussgrößen. Von denen werden im Sinne der Zielsetzung der Broschüre einige behandelt, welche durch Managementmaßnahmen positiv zu beeinflussen sind: Bodengefüge/Bodenfunktionen, Wasser- und Lufthaushalt, Wurzelwachstum, Nährstoffversorgung inkl. Kalk, Humusversorgung, biologische Aktivität und funktionelle Vielfalt, Bodenabtrag und Bodenverdichtung. Schon diese sind durch komplexe Wechselwirkungen geprägt.

Gleiches gilt auch für die getroffene Auswahl von Maßnahmen, mit denen der Ackerbauer zur weiteren Verbesserung der ‚Guten fachlichen Praxis‘ beitragen kann: Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung, Förderung der bodenbiologischen Aktivität sowie schonende Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Zwischen diesen wiederum gibt es zahlreiche Wechselwirkungen.

So nehmen Fruchtfolge (inkl. Zwischenfrucht), Bodenbearbeitung und Düngung – insbesondere die organische Düngung mit ihren Auswirkungen auf den Humushaushalt – Einfluss auf das Bodengefüge/die Bodenfunktionen, den Wasser- und Nährstoffhaushalt, schließlich das Wurzelsystem. Dieses wirkt im Gegenzug durch Wurzelatmung sowie durch Abgabe von Wurzelinhaltsstoffen an Mikroorganismen, die in der Rhizosphäre leben, positiv auf Bodeneigenschaften. Andererseits können Schwermetalle für Bodenorganismen, Pflanzen sowie Tiere und Menschen toxisch sein. Sie werden hauptsächlich über die Düngung und atmosphärische Deposition in die Böden eingetragen.

Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und die Förderung bodenbiologischer Aktivität bieten die entscheidenden Möglichkeiten für Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit in vielen Ackerbaugebieten und zur Vorbeugung gegen bzw. Minderung von Bodenabtrag. Auch geringe Abtragsraten infolge Wasser oder Wind führen – bei fortgesetztem Eintreffen – zur sukzessiven Abnahme der Krümmenmächtigkeit und zum schleichenden Verlust der Produktions-, Filter- und Puffer- sowie der Lebensraumfunktion. Letztere gewinnt übrigens immer stärker an Bedeutung, zumal die Wechselwirkung zwischen landwirtschaftlicher Produktion und funktionierendem Lebensraum im Boden unbestritten ist. Daher rührt die notwendige Förderung der Vielfalt der Bodenorganismen und deren Leistungen. Dafür ist ein Schlüsselparameter die Bodenbedeckung, die einerseits Schutz vor

Bodenerosion und andererseits Nahrung für Regenwürmer und andere Bodenorganismen bietet. Damit ist die Bodenbearbeitung angesprochen. Bei nicht wendender konservierender Bodenbearbeitung werden pflanzliche Reststoffe nicht tief ‚vergraben‘, sondern sie können auf und nahe der Bodenoberfläche ihre Schutzfunktion für den Lebensraum darunter übernehmen. Bodenerosion vorzubeugen, kommt damit unmittelbar der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zugute.

Fruchtfolge (inkl. Zwischenfrucht), organische Düngung und schonender Pflanzenschutzmitteleinsatz sind die Schlüsselmaßnahmen zur Förderung der mikrobiellen Biomasse sowie der mikrobiellen Aktivität. Biodiversität und ökologische Leistung von Bodenorganismen hängen allerdings nicht nur vom Gehalt an biologisch verfügbaren Substanzen, sondern von einer Reihe Boden-, Anbau- und Klimafaktoren ab. Das heißt, die Bodenfruchtbarkeit stellt ein dynamisches System dar mit zahlreichen Verknüpfungen und Wechselwirkungen einzelner Komponenten und Einflussgrößen.

Im Bundes-Bodenschutzgesetz wird als einer von insgesamt sieben Grundsätzen „die Vermeidung von Bodenverdichtung“ genannt. Bodenverdichtung ist ein wesentlicher Opponent für die Bodenfruchtbarkeit. Und wiederum ist es nicht nur eine Maßnahme der Bodenbewirtschaftung, die vorzubeugen hilft. Eingebettet in das gesamte Anbausystem (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung etc.) ist Sorge zu tragen, dass die mechanische Belastung durch leistungsfähige und häufig schwere Landtechnik die Bodenfunktionen nicht nachhaltig schädigt. Technische Möglichkeiten für ‚bodenschonendes Befahren‘ sind stärker als bisher in die Praxis einzuführen und zu nutzen. Sie reichen jedoch nicht aus, wenn nicht ebenso Standortfaktoren (Klima), Anbausystem (z. B. Grünland bzw. Ackerbau), Bodenbearbeitung (Bodenlockerung) bis hin zu den aktuellen Niederschlägen Berücksichtigung finden.

In unseren Böden laufen gleichzeitig und kontinuierlich stets eine Vielzahl von einander bedingenden Umsetzungs-, Austausch- und Transportprozessen ab. Verknüpfungen und komplexe Wechselwirkungen zwischen den mannigfaltigen Einflussgrößen auf die Bodenfruchtbarkeit kommen in dem dynamischen System Boden hinzu.

Daraus ergibt sich ein hoher Anspruch an die **Gute fachliche Praxis**, die stets – standort-, betriebs- bis teilflächen-spezifisch – zu verbessern ist. Forschung sowie praxisrelevante Entwicklung und Einführung von Verfahren und Managementanleitungen sind deshalb auch zukünftig gefordert – auch, um die Ressource Boden zu schützen und eine noch nachhaltigere Landnutzung voranzutreiben.

# 7

(Foto: P. Meyer, BLE)

## Anhang

# Literaturverzeichnis

- ABDEL-SABOUR, M. F. (2014): Uranium fixation and removal from different soil types: review. *Journal of Nuclear Energy Science and Power Generation Technology* 3(3): 1–9
- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung – 5. Auflage*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S., ISBN 978-3-510-95920-4
- AGRARZAHLVERPFLVVO (Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung) (2014): *Verordnung über die Einhaltung von Grundanforderungen und Standards im Rahmen unionsrechtlicher Vorschriften über Agrarzahlungen*. Fassung vom 17. Dezember 2014, Berlin
- AHRENS, K. (1976): *Columella. Über Landwirtschaft. Ein Lehr- und Handbuch der gesamten Acker- und Viehwirtschaft aus dem 1. Jahrhundert u. Z.* Akademie-Verlag Berlin. 466 S.
- ALBERT, E., FÖRSTER, F., ERNST, H., KOLBE, H., DITTRICH, B., LABER, H., HANDSCHACK, M., KRIEGHOFF, G., HEIDENREICH, T., RIEHL, G., HEINRICH, S., ZORN, W. (2007): *Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis*. Broschüre. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden
- ALBRECHT, R. (2002): *Vorfruchtwert von Körnerleguminosen in getreidebetonten Fruchtfolgen*. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) Jena, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, 32–37
- ALHASSOUN, R. (2009): *Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils*. Schriftenreihe „Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut“, 156 S., ISBN 978-3-930037-54-4
- ALLOWAY, B. J. (1999): *Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen*. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, 540 p, ISBN 3-540-62086-9
- ALPMANN, D., BRAUN, J., SCHÄFER, B. C. (2013): *Auf Körnerleguminosen setzen? top agrar*, 3, 96–99
- AMANN, R., LUDWIG, W., SCHLEIFER, K. H. (1995): *Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation*. *Microbiol. Rev.* 59, S. 143–149
- ARITAJAT, U., MADGE, D. S., GOODERHAM, P. T. (1977): *The effects of compaction of agricultural soils on soil fauna*. 1. Field investigations. *Pedobiologia*, 17, 262–282
- FINK, A. (1979): *Dünger und Düngung*. Verlag Chemie Weinheim New York
- ASKARI, M. S., CUI, J., HOLDEN, N. M. (2013): *The visual evaluation of soil structure under arable management*. *Soil and Tillage Research* 134, S. 1–10
- AUERSWALD, K. (2006): *Soil Erosion in Europe – Germany*. In: BOARDMAN, J., POESEN, J. (Eds.): *Soil erosion in Europe*. Chichester, S. 213–230
- AUERSWALD, K., SCHYDER, H. (2009): *Böden als Grünlandstandorte. Ein Handbuch der Bodenkunde*, ed. H.-P. F.-H. Blume, P., Frede, W. R., Horn, H.-G., Stahr, K.
- BACH, M. (2008): *Äolische Stofftransporte in Agrarlandschaften. Experimentelle Untersuchungen und räumliche Modellierung von Bodenerosionsprozessen durch Wind*. Dissertation Kiel
- BACHMANN, G., KÖNIG, W., KOHL, R. (1995): *Handlungskonzept des Bodenschutzes zur Begrenzung von Stoffeinträgen in den Boden*. Unveröffentlicht, zitiert in: Bannick, C. G. und Autorenkollektiv (2001) *Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden*. Berlin: UBA, 126 p, Texte 59/01
- BAEUMER, K. (1991): *Bodenfruchtbarkeit als wissenschaftlicher Begriff: Kenngrößen und Prozesse im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Produktion im Agrarökosystem*. *Berichte über Landwirtschaft, Neue Folge*, 203. Sonderheft, Band 1, *Bodenfruchtbarkeit*, S. 29–45
- BAEUMER, K. (1992): *Allgemeiner Pflanzenbau*, 3. Aufl. UTB 18, Vlg. Ulmer, Stuttgart
- BAEUMER, K. (1994): *Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung von Bodennutzungssystemen im Hinblick auf die vermehrte Nutzung von Selbstregulationsmechanismen im Agrarökosystem*. *Berichte über Landwirtschaft*, 209. SH, 102–122, Verl. P. Parey, Hamburg, Berlin
- BBodSchG (1998): *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998*. Zuletzt geändert am 24.2.2012. 12 S. Online verfügbar unter [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschg/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschg/gesamt.pdf), Zugriff am 18.06.2015
- BECKER, B., TIEDEMANN, M. (2012): *Bundes-Bodenschutzgesetz. Kommentar – Stand 4.2012*. 1. Ordner z.Zt. ca. 1.800 Seiten; Loseblattwerke RS Schulz Verlag
- BECKER, K.-W., FREDE, H.-G., HUGENROTH, P., KLAGES, F.-W., MEYER, B., WILDHAGEN, H. (1984): *Bodenkunde – Aspekte und Grundlagen*. Institut für Bodenwiss. Göttingen, Eigenverlag
- BEYLICH, A., OBERHOLZER, H.-R., SCHRADER, S., HÖPER, H., WILKE, B.-M. (2010): *Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils*. *Soil and Tillage Research* 109, S. 133–143
- BGK (2013): *Nutzwert- und Vorsorgeindex. Bewertung organischer Dünge- und Bodenverbesserungsmittel nach Nutzwert- und Vorsorgeindex*. Bundesgütegemeinschaft Kompost, Köln
- BLIEFERT, C. (1994): *Umweltchemie*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 453 p, ISBN 3-527-28692-6

- BLUME, H. P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B.-M. (2013): Lehrbuch der Bodenkunde, Scheffer/Schachtschabel, Spektrum Akademischer Verlag
- BLUME, H.-P., HORN, R., THIELE-BRUHN, S. (Hrsg.) (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Aufl., Weinheim, S. 199–215
- BLUME, H.-P., STAHR, K., LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. überarb. Aufl., Spektrum Akad. Verl., Heidelberg; 255 S., ISBN 978-3-8224-1553-0
- BMELV (2014): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Broschüre „Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion“
- BMEL (2015): Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Umsetzung der EU-Agrarreform in Deutschland, Ausgabe 2015
- BMU/BMVEL (2003): Vorschlag für die Festlegung von Schadstoffgrenzwerten in einer Artikelverordnung zur „Bewertung von Düngemitteln“. Bericht des UBA an BMU vom 24.06.2003 (unveröffentlicht)
- BMVEL (Bundesministerium Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft) (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bonn
- BOGUSLAWSKI (1965): Zur Entwicklung des Begriffs Bodenfruchtbarkeit. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde, 108, S. 97–115
- BÖHM, W. (1979): Methods of Studying Root Systems. Ecological Studies 33, Springer-Verl., Berlin, Heidelberg, New York, 188 S., ISBN 3-540-09329-X
- BÖHNER, J., SCHÄFER, W., CONRAD, O., GROSS, J., RINGELER, A. (2003): The WEELS model: Methods, results and limitations. CATENA 52 (3–4), S. 289–308
- BROCKMANN, W. G. (1987): Einflüsse mechanischer Bodenveränderungen auf Abundanz und Biomasse von Enchytraeiden (Oligochaeta). Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 16, 427–430
- BRUNOTTE, J., LORENZ, M. (2015): Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Wunschtraum oder bereits Realität?“ S. 11–17. In: Schwere Maschinen, enge Fruchtfolgen, Gärreste – eine Gefahr für die Bodenfruchtbarkeit? Fachtagung BMEL, Würzburg 18./19.6.2015, 67 S.
- BRUNOTTE, J., FRÖBA, N. (2007): Schlaggestaltung – kostensenkend und bodenschonend. KTBL-Schrift 460, 178 S.
- BRUNOTTE, J., ORTMEIER, B. (2007): Fächer zur Bestimmung des Oberflächenbedeckungsgrades durch organische Rückstände. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Betriebstechnik, Braunschweig. 18 Farbbilder, laminiert
- BRUNOTTE, J., SOMMER, C. (2001): Mulchsaatverfahren zu Zuckerrüben – Entwicklung und heutige Bedeutung. Zuckerrübe 50 (4), S. 226–231
- BRUNOTTE, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off, und Mykotoxinbildung im Getreide. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 305, ISBN 978-3-86576-029-6, 159 S.
- BRUNOTTE, J., BRANDHUBER, R., BREITSCHUH, T., BUG, J., BUSCH, M., VON CHAPPUIS, A., FRÖBA, N., HENKE, W., HONEKER, H., HÖPPNER, F., LIST, M., MOSIMANN, T., ORTMEIER, B., SCHMIDT, W., SCHRADER, S., VORDERBRÜGGE, T., WEYER, T. (2015): Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. BMEL Bonn, aid, 118 S.
- BRUNOTTE, J., DEMMEL, M., FRÖBA, N., UPPENKAMP, N., WEISSBACH, M. (2011): Boden schonen und Kosten senken. KTBL-Heft 89, Darmstadt, 64 S.
- BRUNOTTE, J., SENGER, M. (2012): Wieder ein Gefühl für den Boden bekommen – Hilfsmittel zur Bodengefügeansprache durch den Praktiker. Landwirtschaft ohne Pflug 1/2 2012, 14–15
- BRUNOTTE, J., SENGER, M., VON HAAREN, M., HEYN, J., BRANDHUBER, R., VOSSHENRICH, H., EPPERLEIN, J., VORDERBRÜGGE, T., ORTMEIER, B., LORENZ, M. (2012): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker, Braunschweig, vTI, Tafel, 3. Auflage
- BRUNOTTE, J., WINNIGE, B., FRIELINGHAUS, M., SOMMER, C. (1999): Der Bedeckungsgrad – Schlüssel für Gute fachliche Praxis im Hinblick auf das Problem Bodenabtrag in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz H2, S. 57–61
- BRUSSARD, L., KUYPER, T. W., DIDDEN, W. A. M., DE GOEDE, R. G. M., BLOEM, J. (2004): Biological soil quality from biomass to biodiversity – Importance and resilience to management stress and disturbance, In Schjønning, P., Elmholt, S., Christensen, B.T.: Challenges in Modern Agriculture. CABI, Wallingford, pp. 139–161
- BUHRE, C., KLUTH, C., BÜRCKY, K., MÄRLÄNDER, B., VARRELMANN, M. (2009): Integrated control of root and crown rot in sugar beet: combined effects of cultivar, crop rotation, and soil tillage. Plant Disease 93, 155–161
- BURKHARDT, U., RUSSELL, D. J., DECKER, P., DÖHLER, M., HÖFER, H., LESCH, S., RICK, S., RÖMBKE, J., TROG, C., VORWALD, J., WURST, E., XYLANDER, W. E. R. (2014): The Edaphobase project of GBIF-Germany—A new online soil-zoological data warehouse. Applied Soil Ecology 83, 3–12
- BUSCHIAZZO, D. E., FUNK, R. (2015): Wind erosion of agricultural soils and the carbon cycle. In: BANWART, S. A., NOELLEMEYER, E., MILNE, E. (Eds.): Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits. CABI, Wallingford, S. 161–168
- BUSCHIAZZO, D. E., ZOBECK, T. M., ABASCAL, S. A. (2007): Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. J. Arid Environ. 69 (1), S. 29–39
- BVL (2009): PSM-Zulassungsbericht (Registration Report): Agent. 024177-00/00, 46 S.
- BVL (2014): PSM-Zulassungsbericht (Registration Report): Cuprozin progress. 006895-00/01, 33 S.
- BVL (2015): [http://www.bvl.bund.de/DE/04\\_Pflanzenschutzmittel/01\\_Aufgaben/02\\_ZulassungPSM/01\\_ZugelPSM/psm\\_ZugelPSM\\_node.html](http://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/psm_ZugelPSM_node.html). (Zugriff am 31.05.2015)

- CHANDER, K., EBERHARDT, U., JOERGENSEN, R. G., KLEIN, T. (2002): Decomposition of carbon-14-labelled wheat straw in repeatedly fumigated and non-fumigated soils with different amounts of heavy metal contamination. *Biology and Fertility of Soils* 35, 86–91
- CHEPIL, W. S. (1960): Conversion of Relative Field Erodibility to Annual Soil Loss by Wind. *Soil Science Society of America Journal* 24, S. 143–145
- COLAZO, J. C., BUSCHIAZZO, D. (2015): The impact of agriculture on soil texture due to wind erosion. *Land Degrad. Develop.* 26 (1), S. 62–70
- CONANT, R. T., PAUSTIAN, K., ELLIOTT, E. T. (2001): Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications* 11 (2): 343–355
- CONSTANTIN, J., MARY, B., LAURENT, F., AUBRION, G., FONTAINE, A., KERVEILLANT, P., BEAUDOIN, N. (2010): Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agric. Ecosys. Environm.* 135, 268–278
- CRAMER, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. *Bonner Bodenkundl. Abhandlungen*, 44, 198 S.
- DELSCHEN, T. et al. (1998): Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigungen/Altlasten-Pflanze. In: Rosenkranz D., Einsele G., Harreß, H.-M. (eds) Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Loseblattsammlung. Berlin: Erich Schmidt Verlag, Band 3, 28. Lfg XII/98, Rn 9009, ISBN 3-503-02718-1
- DELSCHEN T., RÜCK, F. (1997): Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung von schwermetallbelasteten Böden im Hinblick auf den Pfad Boden/Pflanze. *Bodenschutz* 4/97: 114–121
- DEUMELANDT, P., HOFMANN, B. und CHRISTEN, O., (2010): Einfluss unterschiedlicher Anbaukonzentrationen und Anbaupausen auf Bodeneigenschaften und Erträge im Zuckerrübenfruchtfolgeversuch Etzdorf. *Archives Agronomy Soil Sci.* 56, 393–404
- Diez, Th., Weigelt, H. (2000): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising-München
- DIN 19682-2: 2007-11 (2007): Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 2: Bestimmung der Bodenart, Berlin, Beuth-Verlag
- Direktzahlungen-Verpflichtungen-Verordnung vom 04. November 2004 BGBl I, S. 2778, zuletzt geändert am 20.04.2011, BGBl I, S. AT44 V1
- DUTTMANN, R. (2001): Bodenfeuchte als Steuergröße der Bodenerosion. *Geogr. Rundsch.* 53 (5), S. 24–32
- DUTTMANN, R., BACH, M. (2006): Long-term wind erosion and its impact on soil heterogeneity in sandur plain landscapes in northern Germany. In: HORN, R., FLEIGE, H., PETH, S., PENG, X. (Eds.): Soil management for sustainability. *Advances in Geocology* 38, Reiskirchen, S. 309–319
- DUTTMANN, R., BACH, M., HERZIG, A. (2011): Abtrag von Böden. In: BLUME, H.-P., HORN, R., THIELE-BRUHN, S. (Hrsg.): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Aufl., Weinheim, S. 199–215
- DUTTMANN, R., BRUNOTTE, J. (2002): Oberirdische Stofftransporte in Agrarlandschaften. *Geograph. Rundsch.* 54 (5), S. 26–33
- DUTTMANN, R., HASSENPLUG, W., BACH, M., LUNGERSHAUSEN, U., FRANK, J.-H. (2011): Winderosion in Schleswig-Holstein. Kenntnisse und Erfahrungen über Bodenverwehungen und Windschutz. *Geologie und Boden* 15. Schriftenreihe Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), Flintbek
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) (1996): Bodenerosion durch Wasser. Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 239/1996, Bonn
- EBERTSEDER, T., ENGELS, C., HEYN, J., REINHOLD, J., BROCK, C., FÜRSTENFELD, F., HÜLSBERGEN, K.-J., ISERMANN, K., KOLBE, H., LEITHOLD, G., SCHMID, H., SCHWEITZER, K., WILLMS, M., ZIMMER, J. (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Speyer
- EC (European Commission) (2012): The State of Soil in Europe. A contribution of the JRC to the EEA Environment State and Outlook Report – SOER 2010. Report EUR 25186 EN, Luxemburg
- ECHEVARRIA, G., SHEPPARD, M. I., MOREL, J. L. (2001): Effect of pH on the sorption of uranium in soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 53: 257–264
- EFSA (2013): Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of confirmatory data submitted for the active substance Copper (I), copper (II) variants namely copper hydroxide, copper oxchloride, tribasic copper sulfate, copper (I) oxide, Bordeaux mixture. *EFSA Journal* 2013; 11 (6): 3235, 40 S.
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer Stuttgart. 272 S.
- ELLMER, F., GÄBERT, T., BAUMECKER, M. (2012): Was sagen uns Dauerversuche über den Fruchtbarkeitsstatus der Böden? *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 24: 21–24
- EMMERLING, C. (2011): Bedeutung der pfluglosen Bodenbearbeitung für die Biodiversität. In: Landwirtschaftskammer und Landesregierung Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Bodenbearbeitungssysteme im Fokus von Ökonomie und Ökologie – Handreichung für eine differenzierte Beurteilung, Bad Kreuznach, S. 81–92
- EMMERLING, C., UDELHOVEN, T. (2002): Discriminating factors of soil quality parameters at landscape-scale. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 706–712
- EPPERLEIN, J., JOSCHKO, M. (2002): Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollerntern. Schriftliche Mitteilung, Berlin
- ERNST, G., EMMERLING, C. (2009): Impact of five different tillage types on soil organic carbon content and the density, biomass, and community composition of earthworms after a ten year period. *European Journal of Soil Biology*, 45, 247–251
- ERNST, G., FELTEN, D., VOHLAND, M., EMMERLING, C. (2009): Impact of ecophysiologicaly different earthworm species on soil water characteristics. *European Journal of Soil Biology*, 45, 207–213

- EU (2009): VERORDNUNG (EG) Nr. 1107/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union L309, S. 1–50
- EU (2015): Durchführungsverordnung (EU) 2015/232 der Kommission vom 13. Februar 2015 zur Änderung und Berichtigung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 540/2011 hinsichtlich der Bedingungen für die Genehmigung des Wirkstoffs Kupferverbindungen. Amtsblatt der Europäischen Union L39, S. 7–10.
- EU (2011): VERORDNUNG (EU) Nr. 545/2011 DER KOMMISSION vom 10. Juni 2011 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Datenanforderungen für Pflanzenschutzmittel. Amtsblatt der Europäischen Union L155, S. 67–126
- FELGENTREU, D. (2014): Einfluss von Kupfer auf die Aktivität von Bodenmikroorganismen in ausgewählten Böden deutscher Weinanbaugebiete. *Journal für Kulturpflanzen* 65(12), S. 466–478
- FIEDLER, H. J. (2001): Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. *Forum EIPOS. expert verlag*, 598 S., ISBN 978-3-8169-1875-2
- FLEIGE, H., HORN, R., WEISSBACH, M. (1999): Bodenerosion in Fahrspuren und mögliche Erosionsschutzmaßnahmen. *Wasser und Boden* 51 (12), S. 33–36
- FOLLETT, R. F. (2000): Organic Carbon Pools in Grazing Land Soils. In *The Potenzial of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*: CRC Press
- FRANKO, U., OELSCHLÄGEL, B., SCHENK, S. (1995): Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. *Ecological Modelling* 81 (1–3): 213–222
- FRANKO, U., KOLBE, H., THIEL, E., LIESS, E. (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma* 166, 119–134
- FRESE, H. (1969): Bodenfruchtbarkeit – auch heute noch aktuell? In: *technische Zivilisation – Möglichkeiten und Grenzen*. G. Fischer Vlg. Stuttgart, S. 86–107
- FRIELINGHAUS, M., DEUMLICH, D. (2004): Wassererosion. In: H.-P. Blume (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes*. 3. Aufl., Landsberg/L., S. 220–231
- FRIELINGHAUS, M., DALCHOW, C., SCHÄFER, H. (2003): Bodenlandschaften im Jung- und Altmoränengebiet. *Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges.* 100, 188
- FRÜND, H.-C. (2010): Verfahrensvorschlag bodenbiologische Standortindikation. Tagungsbeitrag zu: Gemeinsame Sitzung Kommission III DBG und Fachgruppe 4 BVB; Titel der Tagung: Boden und Standortqualität – Bioindikation mit Regenwürmern; FH Osnabrück 25.–26.02.2010; Berichte der DBG online <http://www.dbges.de>
- FRYREAR, D. W. (1998): Mechanics, measurement and modelling of wind erosion. *Advances in Geocology* 31, S. 291–300
- FRYREAR, D. W., BILBRO, J. D., SALEH, A. (2000): RWEQ. Improved wind erosion technology. *J. Soil Water Cons.* 55, S. 183–189
- FUNK, R. (2011): Winderosion. In: BLUME, H.-P., HORN, THIELE-BRUHN, R. (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen*. 4. Aufl. Weinheim, S. 215–223
- GÄBERT, T. A. (2014): Organisch-mineralische Düngung marginaler Sandböden. Bodenchemische, -physikalische und pflanzenbauliche Implikationen. Diss. Humboldt-Univ. zu Berlin. 150 S.
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch – Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion, 2. Aufl., Verl. Paul Parey, Berlin, Hamburg; S.148–149, ISBN 3-489-61510-7
- GELDMACHER VON, MALLINCKRODT, M., SCHALLER, K.-H. (2004): Acute and Chronic Toxicity of Metals and Metal Compounds for Man. In: MERIAN, E., ANKE, M., IHNAT, M., STOEPLER, M. (eds): *Elements and Their Compounds in the Environment*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, pp. 415–432, ISBN 3-527-30459-2
- GISI, U. (1990): *Bodenökologie*. Georg Thieme Vlg. Stuttgart, New-York
- GLA und LfU (2003): *Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren*. Bayerisches Geologisches Landesamt, München und Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Augsburg, 62 S., ISBN 3-936385-44-0
- GOOSSENS, D., GROSS, J. (2002): Similarities and dissimilarities between the dynamics of sand and dust during wind erosion of loamy sandy soil. *Catena* 47 (4), S. 269–289
- GOOSSENS, D., GROSS, J., SPAAN, W. (2001): Aeolian dust dynamics in agricultural land areas in Lower Saxony, Germany. *Earth Surf. Proc. Land.* 26 (7), S. 701–720
- GUO, L. B., GIFFORD, R. M. (2002): Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology* 8 (4): 345–360
- GUPTA, C. K., SINGH, H. (2003): *Uranium Resource Processing. Secondary Resources*. Berlin: Springer Verlag, 519 p, ISBN 3-540-67966-9
- HAGEN, L. J. (1991): A wind erosion prediction system to meet user needs. *Journal Soil Water Conservation* 46 (2), S. 106–111
- HARRACH, T. (2011): Schutz der Ackerböden vor Verdichtung und Erosion durch reduzierte Bodenbearbeitung und Förderung der Regenwurmakktivität – Mit Grundzügen eines Leitbildes „Anzustrebendes Bodengefüge“. *Bodenschutz*, H. 2, S. 49–53
- HARTGE, K.-H., HORN, R. (2001): Die physikalische Untersuchung von Böden. 3. Aufl., Spektrum Akad. Verl., Heidelberg; 177 S., ISBN 3-827-41240-4
- HAUBOLD-ROSAR, M., KERN, J., REINHOLD, J. (2014): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. *Forschungskennzahl (UFOPLAN) 371271222*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- HAUER, M., KOCH, H.-J., MITTLER, S., WINDT, A., KRÜSSEL, S., SCHLINKER, G., WOLLENWEBER, D., RUSTEMEYER, C., MÄRLÄNDER, B. (2015): Zwischenfruchtanbau, Sortenwahl, N-Düngung: Wirkung auf N-Versorgung und Ertrag von Zuckerrüben sowie auf die Nematodendichte. *Sugar Industry* 140

- HEYLAND, K.-U. (1996): Allgemeiner Pflanzenbau, Vlg. E. Ulmer, Stuttgart
- HINTERMAIER-ERHARD, G., ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 338 p, ISBN 3-432-29971-0
- HIRNER, A. V., REHAGE, H., SULKOWSKI, M. (2000): Umweltgeochemie. Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Geosphäre. Darmstadt: Steinkopff Verlag, 836 p, ISBN 3-7985-1232-9
- HOPKINS, W. G. (1995): Introduction to Plant Physiology. John Wiley and Sons, New York; 464 S., ISBN 0-471-54547-3
- HUELSBERGEN, K.-J. (2015): Optimierung der N-Effizienz auf Betriebsebene. SKW-Fachtagungen „Düngung 2015“. [http://www.skwp.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/Vortraege/Optimierung\\_N-Effizienz\\_Huelsbergen\\_FTD\\_2015.pdf](http://www.skwp.de/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege/Optimierung_N-Effizienz_Huelsbergen_FTD_2015.pdf)
- HUNGATE, B. A., HOLLAND, E. A., JACKSON, R. B., CHAPIN III, F. S., MOONEY, H. A., FIELD, C. B. (1997): The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. *Nature* 388 (6642): 576–579
- JACKSON, R.B., CANADELL, J., EHLERINGER, J.R., MOONEY, H.A., SALA O.E., SCHULZE, E.D. (1996): A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, S. 389–411
- JÄNSCH, S., RÖMBKE, J. (2009): Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff: Ökologische Auswirkungen der Akkumulation von Kupfer im Boden. Forschungsbericht 360 03 040 UBA-FB 001261. Umweltbundesamt. Texte 10/09, 70 S.
- JÄNSCH, S., STEFFENS, L., HÖFER, H., HORAK, F., ROSS-NICKOLL, M., RUSSELL, D., TOSCHKI, A., RÖMBKE, J. (2013): State of knowledge of earthworm communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. – *Soil Organisms* 85, 215–233
- JÉGOU, D., BRUNOTTE, J., ROGASIK, H., CAPOWIETZ, Y., DIESTEL, H., SCHRADER, S., CLU-ZEAU, D. (2001): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology* 38, S. 329–336
- JONES, M. B., DONNELLY, A. (2004): Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* 164 (3): 423–439
- JÖRGENSEN, R. G. (1995): Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode. *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 104, 229 S.
- JOST, B. (2003): Untersuchungen und Kalkulationstabellen zur Schätzung der N<sub>2</sub>-Fixierungsleistung und der N-Flächenbilanz beim Anbau von *Lupinus albus* und *Lupinus luteus* in Reinsaat und *Vicia faba* und *Pisum sativum* in Reinsaat und im Gemenge mit *Avena sativa*. Dissertation, Fakultät Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen
- KABATA-PENDIAS, A. (2001): Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, Florida: CRC Press, 413 p, ISBN 0-8493-1575-1
- KAUPENJOHANN, M. (2012): Bodenfruchtbarkeit erkennen, erhalten und vermehren: Stand des Wissens und Perspektiven. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 24: 1–4
- KHARIKOV, A. M., SMETANA, V. V. (2000): Heavy metals and radioactivity in phosphate fertilizers: short term detrimental effects. Zu finden in <[http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2000\\_biblio\\_126.pdf](http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2000_biblio_126.pdf)>
- KIVELITZ, H., LÜTKE ENTRUP, N. (2005): Der Grassamenanbau im Fokus von Umweltaspekten und ökonomischen Anforderungen, 46. Fachtagung des DLG-Ausschusses „Gräser, Klee und Zwischenfrüchte“, „Züchtungsperspektiven und Saatgutproduktion bei Gräsern, Klee und Zwischenfrüchten“ in Fulda
- KLAPP, E. (1958): Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus. Vlg. Paul Parey Berlin und Hamburg
- KLIMANEK, E.-M. (1997): Bedeutung der Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten für die organische Substanz des Bodens. *Arch. Agron. Soil Scie.* 41: 6, S. 485–511
- KOCH, H.-J., JACOBS, A. (2014): Was leistet Winterweizen nach verschiedenen Vorfrüchten. *Zuckerrübe* 63 (2), 35–37
- KOLBE, H. (2000): Landnutzung und Wasserschutz. Der Einfluss von Stickstoff-Bilanzierung, N<sub>min</sub>-Untersuchung und Nitrat-Auswaschung sowie Rückschlüsse für die Bewirtschaftung von Wasserschutzgebieten in Deutschland. WLV Wissenschaftliches Lektorat & Verlag, Leipzig
- KOLBE, H. (2006): Fruchtfolgegestaltung im ökologischen und extensiven Landbau: Bewertung von Vorfruchtwirkungen. *Pflanzenbauwissenschaften* 10, 82–89
- KOLBE, H. (2007): Anforderungen an die Humusbilanzierung in der Praxis des ökologischen Landbaus. In: *Berichte aus dem ökologischen Pflanzenbau. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, Heft 9, 58–69
- KOLBE, H. (2008): Fruchtfolgegrundsätze im Ökologischen Landbau. Faltblatt, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
- KOLBE, H. (2010a): Einfluss der Landnutzung auf Kriterien des Wasserschutzes. *Wasser und Abfall* 12, 5, 42–44
- KOLBE, H. (2010b): Site-adjusted organic matter-balance method for use in arable farming systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 678–691
- KOLBE, H. (2012): Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau. In: *Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)*, Heft 19, 4–85
- KOLBE, H. (2013): Anwendungsbeispiele zur standortangepassten Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
- KOLBE, H., SCHUSTER, M. (2011): Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb. Untersuchungsmethoden. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
- KÖLLER, LINKE (1997) in: LÜTKE ENTRUP, N., SCHÄFER, B. C. (Hrsg.) (2011): *Lehrbuch des Pflanzenbaus*, Band 2: Kulturpflanzen. 3. Auflage, AgroConcept, Bonn. S. 132
- KÖPPEN, D. (2002): Entwicklung und Inhalt der Kategorie „Bodenfruchtbarkeit“ (Development and Contents of the Category „Soil Fertility“). *Zeitschrift für Pflanzenbauwissenschaften* 2 (6), S. 57–62

- KÖPPEN, D. (Hrsg.) (2004): Bodenfruchtbarkeit im Agroökosystem. Verl. Dr. Kovac. 2 Bd. 854 S.
- KÖRDEL, W., HERRCHEN, M., MÜLLER, J., KRATZ, S., FLECKENSTEIN, J., SCHNUG, E., SARING, D. R., THOMA, J., HAAMAN, H., REINHOLD, J. (2007): Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung. Forschungsbericht 202 33 305 und 202 74 271, UBA-FB 001017. UBA-Texte 30/07
- KÖRSCHENS, M. (2010): Der organische Kohlenstoff im Boden (C<sub>org</sub>) - Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. Archives Agronomy Soil Sci. 56, 375-392
- KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E., BÖNIG, H., EICH, D., ELLERBROCK, R., FRANKO, U., HÜLSBERGEN, K.-J., KÖPPEN, D., KOLBE, H., LEITHOLD, G., MERBACH, I., PESCHKE, H., PRYSTAV, W., REINHOLD, J., ZIMMER, J. (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. VDLUFA, Bonn
- KÖRSCHENS, M., MERBACH, I., SCHULZ, E. (2002): 100 Jahre Statistischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt. Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
- KOSMAS, C., GERONTIDIS, S., MARATHIANOU, M., DETSIS, B., ZAFIRIOU, T., VAN MUYSEN, W., GOVERS, G., QUNINE, T., VAN OOST, K. (2001): The effects of tillage displace soil on soil properties and wheat biomass. Soil Till. Res. 58, S. 31-44
- KRAMPS-ALPMANN, D., SCHÄFER, B.C., BRAUN, J., ZERHUSEN- BLECHER, P. (2015): Auftrieb für die Körnerleguminosen? Dreijährige Ergebnisse aus Praxisbetrieben zur Wirtschaftlichkeit, Raps, 3, Special Körnerleguminosen, 2-5
- KRATZ, S., GODLINSKI, F., SCHNUG, E. (2011): Heavy Metal Loads to Agricultural Soils in Germany from the Application of Commercial Phosphorus Fertilizers and Their Contribution to Background Concentration in Soils. In: Merkel B, Schipek M (eds.) The new uranium mining boom – challenges and lessons learned. Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 755-762
- KRATZ, S., SCHNUG, E. (2005): Schwermetalle in P-Düngern. In: Haneklaus S, Rietz RM, Rogasik J, SCHRÖTTER S (eds) Recent advances in agricultural chemistry, Landbauforschung Völkenrode SH 286: 37-45
- KRATZ, S., SCHNUG, E. (2006): Rock phosphates and P fertilizers as sources of U contamination in agricultural soils. In: Merkel BJ, Hasche-Berger A (eds) Uranium in the environment: mining impact and consequences. Berlin, Heidelberg, New York, pp. 57-67
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.) (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für Gute fachliche Praxis. Arbeitspapier 266, Münster
- KTBL (2015): Faustzahlen für den Ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, Datensammlung 19517, 760 S.
- KUKA, K., ILLERHAUS, B., FRITSCH, G., JOSCHKO, M., ROGASIK, H., PASCHE, M., SCHULZ, H., SEYFARTH, M. (2012): Maschinelle Entnahme ungestörter Bodenprobensäulen für die Röntgen-Computertomographie (german). Zfp-Journal of DGZfP 129 (1): 42-46
- KUKA, K., ILLERHAUS, B., FOX, C. A., JOSCHKO, M. (2013): X-ray Computed Microtomography for the Study of the Soil-Root Relationship in Grassland Soils. gsvadzone 12 (4)
- KUNDLER, P., STEINBRENNER, K., SMUKALSKI, M., KUNZE, A., QUAST, J., ROTH, D. (1989): Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. 1. Auflage, Berlin, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 452 S., ISBN 3-331-00358-1
- KUNTZE, H. (1972): Bodenerhaltung bei zunehmender Belastung. Berichte über Landwirtschaft, Neue Folge, Band 50, Heft 1, S. 26-39
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verl., Frankfurt/Main; 574 S.
- LABO (1998): Länderübergreifende Hintergrundwerte für Böden. In: Rosenkranz, D., Einsele, G., Harreß, H.-M. (eds) Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Loseblattsammlung. Berlin: Erich Schmidt Verlag, Band 3, 28. Lfg XII/98, Rn 9006, ISBN 3-503-02718-1
- LABO (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. 3. Überarbeitete Auflage. Download von: www.labo-deutschland.de/documents/LABO-HGW-Text\_4e3.pdf und Anhang www.labo-deutschland.de/documents/Hintergrundwerte\_Anhang\_a79.pdf (am 25.06.2015)
- LAL, R., HENDERLONG, P., FLOWERS, M. (1998): Forages and row cropping effects on soil organic carbon and nitrogen contents. In Management of carbon sequestration in soil, ed. R. Lal, Kimble, J. M., Follett, R. F., Stewart, B. A., 365-379 Boca Raton: CRC Press Inc.
- LANGDON, C. L., PEARCE, T. G., MEHARG, A. A., SEMPLE, K. T. (2001): Resistance to copper toxicity in populations of the earthworms Lumbricus rubellus and Dendrodrilus rubidus from contaminated Mine wastes. Environmental Toxicology and Chemistry 20(10), S. 2336-2341
- LARINK, O. (1991): Bodentiere als Bewohner und Gestalter von Bodenraumes. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. 2. Gefüge. Berichte über Landwirtschaft 204, 83-95
- LASER, H. (2016): Zwischen- und Zweitfrüchte – Bausteine nachhaltiger Intensivierung im Pflanzenbau, aid-Heft 1060
- LAZAR, S., KNAPPE, F. (2006): Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade, Forschungsbericht (FKZ 203 74 275) für das Umweltbundesamt (unveröffentlicht)
- LEBERT, M., BRUNOTTE, J., SOMMER, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden – Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA-Texte 46/04, ISSN 0722-186X, 122 S.
- LECAIN, D. R., MORGAN, J. A., SCHUMAN, G. E., REEDER, J. D., HART, R. H. (2002): Carbon exchange and species composition of grazed pastures and enclosures in the shortgrass steppe of Colorado. Agriculture, Ecosystems and Environment 93 (1-3): 421-435

- LORENZ, M., BRUNOTTE, J. (2015): Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Lasteinträge von Landwirtschaftlichen Maschinen. Projektbericht Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig, 69 S.
- LÜTKE ENTRUP, N (2018): Zwischen- und Zweitfrüchte – Bausteine nachhaltiger Intensivierung im Pflanzenbau, BZL-Broschüre 1060
- MAKESCHIN, F. (1997): Earthworms (Lumbricidae: Oligochaeta): Important promoters of soil development and soil fertility In: G. Benckiser: Fauna in soil ecosystems: recycling processes, nutrient fluxes, and agricultural production, Marcell Dekker, New York, p. 173–223
- MASTEL, K. (2002): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung Nr. 24. LAP Forchheim (Hrsg.)
- McTAINSH, G., STRONG, C. (2007): The role of aeolian dust in ecosystems. *Geomorphology* 89 (1–2), S. 39–54
- MERIAN, E. (1984) Metalle in der Umwelt. Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. Weinheim: Verlag Chemie, 722 p, ISBN 3-527-25817-5
- MITSCHERLICH, E. A. (1909): Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtsch. Jahrb.* 38, 537–552
- MONTGOMERY, D. R. (2010): Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. Reihe Stoffgeschichten, oekom verlag, München, 347 S., ISBN 978-3-86581-197-4
- MORTVEDT, J. J., BEATON, J. D. (1995): Heavy Metal and Radionuclide Contaminants in Phosphate Fertilizers. In: SCOPE 54 – Phosphorus in the Global Environment – Transfers, Cycles and Management, chapter 6, zu finden in <<http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope54/6mortvedt.htm>>
- MOSIMANN, T. (1995): Schätzung der Bodenerosion in der Praxis und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenabtrag. In: ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., EINSELE, G., HARRESS, H.-M. (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Teil 4070, Berlin, 34 S.
- MOSIMANN, T. (1998): Bodenerosion im Bodenschutzvollzug. In: Richter, G. (Hrsg.): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 171–184
- MOSIMANN, T., BUG, J., STEINHOFF, B. (2012): Zwölf Jahre Bodenerosionsmonitoring in Niedersachsen: Wie hoch ist der Bodenabtrag und was trägt Dauerbeobachtung zur Modellierung der Bodenerosion und des Stofftransports in die Gewässer bei? In: HÖPER, H. und MEESENBURG, H. (Hrsg.): Tagungsband „20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen“. Geoberichte 23. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, S. 95–110
- MOSIMANN, T., MAILLARD, A., MUSY, A., NEYROUD, J.-A., RÜTTIMANN, M., WEISSKOPF, P. (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Themenbericht des Nationalen Forschungsprogrammes „Nutzung der Böden der Schweiz“, Liebefeld-Bern
- MOSIMANN, T., RÜTTIMANN, M. (1995): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Volkswirtschafts- und Sanitätsdirektion. Kanton Basel-Landschaft (Hrsg.), Liestal/Schweiz
- MOSIMANN, T., SANDERS, S. (2004): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater in Niedersachsen. Ackerbaugebiete im nördlichen Niedersachsen. Selbstverlag, Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Universität Hannover
- MOSIMANN, T., SANDERS, S., BRUNOTTE, J. (2008): Erosionsschutz in Fahrgassen. *Landtechnik*, 63 (1), S. 20–21
- MÜCKENHAUSEN, E. (1956): Typologische Bodenentwicklung und Bodenfruchtbarkeit. Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 60
- MUELLER, L., KAY, B.D., HU, C., LI, Y., SCHINDLER, U., BEHRENDT, A., SHEPARD, T. G., BALL, B. C. (2009): Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany. Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil and Tillage Research* 103, S. 178–187
- MUELLER, L., SHEPARD, G., SCHNINDLER, U., BALL, B. C., MUNKHOLM, L. J., HENNINGS, V., SMOLENTSEVA, E., RUKHOVIC, O., LUNKIN, S., HU, C. (2013): Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil and Tillage Research* 127, S. 74–84
- MUNLV (2007): Schutzwürdige Böden in Nordrhein-Westfalen. Bodenfunktionen bewerten. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), 43 S., Online verfügbar unter: [http://www.bodenwelten.de/sites/default/files/thema/docs/Broschuere\\_Schutzwuerdige\\_Boeden\\_und%20Bodenfunktionen.pdf](http://www.bodenwelten.de/sites/default/files/thema/docs/Broschuere_Schutzwuerdige_Boeden_und%20Bodenfunktionen.pdf), Zugriff am 24.06.2015
- NAW (Normenausschuss Wasserwesen im DIN) (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN 19708. Beuth, Berlin
- NAW (Normenausschuss Wasserwesen im DIN) (2013): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind. DIN 19706, 2013-02. Beuth, Berlin
- NIKLAUS, P. A., GLÖCKLER, E., SIEGWOLF, R., KÖRNER, C. (2001): Carbon allocation in calcareous grassland under elevated CO<sub>2</sub>: A combined <sup>13</sup>C pulse-labelling/soil physical fractionation study. *Functional Ecology* 15 (1): 43–50
- NLÖ (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie) (2003): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen. Teil 1: Bodenerosion und Bodenversiegelung. Nachhaltiges Niedersachsen 23, Hildesheim
- NOLTING, K., BRUNOTTE, J., LORENZ, M., SOMMER, C. (2006): Bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. *Landtechnik* 61 (4), S. 190–191
- OECD Guideline 216 (2000): OECD-Guideline for the Testing of Chemicals, Soil Microorganisms: Nitrogen Transformation Test, Guideline 216, January 21, 2000
- PAUL, E. A., CLARK, F. E., BIEDERBECK V. O. (1979): Microorganisms. In Coupland RT, ed. Grassland ecosystems of the world: analysis of grasslands

- PEERLKAMP, P. K. (1967): Visual estimation of soil structure. In: DE BOODT, M., DE LEENHERR, D. E., FRESE, H., LOW, A. J., PEERLKAMP, P. K. (Eds.): West European methods for soil structure determination 2 (11). State Faculty Agricultural Science, Ghent, Belgium, S. 216–223
- POWLSON D. S., BROOKES, P. C., CHRISTENSEN, B. T. (1987): Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 159–164
- RAVEN, K. P., LOEPPERT, R. H. (1997): Trace element composition of fertilizers and soil amendments. *Journal of Environmental Quality* 26:551–557
- REEDER, J. D., SCHUMAN, G. E. (2002): Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution* 116 (3): 457–463
- RENIUS, W., LÜTKE ENTRUP, E., LÜTKE ENTRUP, N. (1992): Zwischenfruchtbau zur Futtergewinnung und Gründüngung. DLG-Verlag, Frankfurt (Main), 244 S.
- RILLIG, M. C., WRIGHT, S. F., ALLEN, M. F., FIELD, C. B. (1999): Rise in carbon dioxide changes soil structure. *Nature* 400 (6745): 628–628
- ROGASIK, J., SMUKALSKI, M., OBENAUF, S. (1992): Cover crops on sandland in Germany: husbandry and fate of nitrogen. *Asp. Appl. Biol.* 30, S. 309–316
- RÖMBKE, J., JÄNSCH, S., HÖFER, H., HORAK, F., ROSS-NICKOLL, M., RUSSELL, D., TOSCHKI, A. (2013): State of knowledge of enchytraeid communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. – *Soil Organisms* 85, 123–146
- RÖMBKE, J., JÄNSCH, S., ROSS-NICKOLL, M., TOSCHKI, A., HÖFER, H., HORAK, F., RUSSELL, D., BURKHARDT, U., SCHMITT, H. (2012): Erfassung und Analyse des Bodenzustands im Hinblick auf die Umsetzung und Weiterentwicklung der Nationalen Biodiversitätsstrategie. – UBA-Texte 33/2012, Umweltbundesamt Berlin: 386 pp
- RÖMBKE, J., SOUSA, J.-P., SCHOUTEN, T., RIEPERT, F. (2006): Monitoring of soil organisms: a set of standardized field methods proposed by ISO. *European Journal of Soil Biology* 42, S. 61–64
- ROTTLÄNDER, E., REINHARD, P., RENTSCHLER, M. (1997): Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse. Ein interdisziplinäres Studienbuch. DIFF (Hrsg.), Universität Tübingen, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 663 S., ISBN 3-540-61556-3
- RUF, T., EMMERLING, C. (2015): Boden gut machen – der Trierer Bodenqualitätstest zur Beurteilung des Bodenzustandes im Feld. *DLZ Agrarmagazin* 4/2015, 58–63
- RUYSSCHAERT, G., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G. (2004): Soil loss due to crop harvesting: significance and determining factors. *Progr. Phys. Geogr.* 28 (4), S. 467–501
- RUYSSCHAERT, G., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G. (2006): Soil losses due to crop harvesting in Europe. In: BOARDMAN, J., POESEN, J. (Eds.): *Soil erosion in Europe*. Chichester, S. 609–621
- SANDERS, S. (2007): Erosionsmindernde Wirkung von Intervallbegrünungen in Fahrgassen. Untersuchungen im Weizen- und Zuckerrübenanbau mit Folgerungen für die Anbaupraxis. Geosynthesis 13, Physische Geographie und Landschaftsökologie, Universität Hannover
- SAUERBECK, D. (1985): Funktionen, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrikulturchemischer Sicht. Materialien zur Umweltforschung. Stuttgart und Mainz: Verlag W. Kohlhammer, 259 p, ISBN 3-17-003312-3
- SCHAEFER, M. (2012): Wörterbuch der Ökologie. 5. Auflage, Spektrum Akademiker Verlag, Heidelberg, 392 S., ISBN 978-3-8274-2561-4
- SCHEFFER, F., LIEBEROTH, I. (1957): Bodenfruchtbarkeit und Bodenertragsfähigkeit. *Landw. Forschung*, 10, S.H., 1–7
- SCHILLING, G. (2004): Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag, 464 p, ISBN 3-8252-8189-2
- SCHMID, B., SCHELSKE, O. (1997): Der Boden lebt. In: Politische Ökologie. Sonderheft 10: Bodenlos – Zum nachhaltigen Umgang mit Böden 1997, S. 60
- SCHNEIDER, M. (2010): Kritischer Blick in den Boden. *Top Agrar Sonderheft*, 12–15
- SCHNEIDER, M. (2014): Auf Übergangslagen müssen wir umdenken! *Praxisnah* 4/2014, 8–10
- SCHNUG, E., KRATZ, S., FLECKENSTEIN, J. (2006): Quantifizierung diffuser und nutzungsspezifischer Stoffeinträge in Böden über verschiedene Eintragspfade – Ermittlung von Stoffgehalten in Nahrungs- und Futtermittelpflanzen in unbelasteten Böden. Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes F+E FKZ 203 74 275/2 (unveröffentlichter Bericht)
- SCHOO, B., SCHROETTER, S., SCHITTENHELM, S. (unveröffentlicht): Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Durchwachsenen Silphie. Zwischenbericht zum FNR-Projekt „Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) als eine Biomassepflanze der Zukunft, Förderkennzeichen 11NR044, Laufzeit 1.2.2012 bis 31.07.2015
- SCHOO, B., WESSEL-TERHARN, M., SCHROETTER, S., SCHITTENHELM, S. (2013): Vergleichende Untersuchung von Wurzelmerkmalen bei Silphie und Mais. In: Pekrun et al. (Hrsg.): Nachhaltige Erzeugung von Nachwachsenden Rohstoffen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 25, Verl. Liddy Halm, Göttingen; S. 241–242, ISSN 0934-5116
- SCHRADER, S. (2001): Ackerboden als Nutz- und Schutzgut aus ökologischer Sicht. *Wasser und Boden* 53, S. 4–8
- SCHRADER, S., SEIBEL, C. (2001): Impact of cultivation management in an agroecosystem on hot spot effects of earthworm middens. *European Journal of Soil Biology* 37, 309–313
- SCHRADER, S., ZHANG, H. (1997): Earthworm casting: Stabilization or destabilization of soil structure? *Soil Biology and Biochemistry* 29, 469–475
- SCHROEDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten. 5. Rev. U. erw. Aufl. von W.E.H. Blum, Hirt in der Gebr.-Borntraeger-Verl.-Buchhandl., Berlin, Stuttgart; 175 S., ISBN 3-443-03103-X
- SCHROETTER, S., FUNDER U., PANTEN, K. (2012): Schutzgut Boden, die Lebensgrundlage für Pflanzen, Tiere und Menschen. Präsentation auf der Grünen Woche, 20.-29.01.2012, Online verfügbar unter [http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam\\_uploads/\\_PB/pdf/Praesentation\\_IGW2012\\_Schutzgut%20Boden\\_Lebensgrundlage\\_Pflanze\\_Tiere\\_Menschen.pdf](http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_PB/pdf/Praesentation_IGW2012_Schutzgut%20Boden_Lebensgrundlage_Pflanze_Tiere_Menschen.pdf), Zugriff am 26.06.2015

- SCHROETTER, S., ROGASIK, J., SCHNUG, E. (2006): Root growth and agricultural management. In: Lal, R. (Hrsg.): *Encyclopedia of Soil Science*. 2nd ed., vol. 2, Taylor und Francis, New York, Basel; S.1531-1534, ISBN 0-8493-5054-9
- SCHULTHEIß, U., GOLDBACH, H., WICKE, W., UIHLEIN, A., STEFFENS, G. (2003): Heavy metal balances in livestock farming. In: KTBL (ed) *Assessment and Reduction of Heavy Metal Inputs into Agro-Ecosystems. Concerted Action AROMIS, Workshop in Kloster Banz, Germany, November 24 to 25, 2003, Abstracts*, pp. 33–36
- SCHULZE LAMMERS, P., STRÄTZ, J. (2003): Progress in soil tare separation in sugar beet harvest. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166 (1), S. 126–127
- SCHUMAN, G. E., REEDER, J. D., MANLEY, J. T., HART, R. H., MANLEY, W. A. (1999): Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications* 9 (1): 65–71
- SCHÜTZE, G., DÄMMGEN, U., SCHLUTOW, A., BECKER, R., NAGEL, H.-D., WEIGEL, H.-J. (2003): Risikoabschätzung der Cadmium-Belastung für Mensch und Umwelt infolge der Anwendung von cadmiumhaltigen Düngemitteln. *LandbauforschVölkenrode* 53 2/3: 63–170
- SCHWERTMANN, U., VOGL, L., KAINZ, M. (1987): *Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*. 2. Aufl. (1990), Ulmer, Stuttgart
- SHAO, Y. (2000): *Physics and modelling of wind erosion*. 1. Aufl. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Shepherd, T.G., Stagnari, F., Pinate, M., Benites, J. (2008): *Visual Soil Assessment - Field guide for annual crops*. FAO, Rome, Italy
- SMIT, A. L. (2000): *Root methods: a handbook*. Springer-Verl., Berlin, Heidelberg, New York; 587 S., ISBN 3-540-66728-8
- SOHI, S. P., KRULL, E., LOPEZ-CAPEL, E., BOL, R. (2010): A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105, 47–82
- SOLLY, E., SCHÖNING, I., BOCH, S., MÜLLER, J., SOCHER, S. A., TRUMBORE, S. E., SCHRUMPF, M. (2013): Mean age of carbon in fine roots from temperate forests and grasslands with different management. *Biogeosciences* 10 (7): 4833–4843
- SOMMER, C. (1998): *Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme*. Habilitation, Braunschweig/Kassel. *Landbauforschung Völkenrode*, SH 191
- SOMMER, C., BRUNOTTE, J., ORTMEIER, B. (2001): Bodenverdichtung – Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. *Zuckerrübe*, 6, S. 364–371
- SOUSSANA, J. F., LOISEAU, P., VUICHARD, N., CESCHIA, E., BALESSENT, J., CHEVALLIER, T., ARROUAYS, D. (2004): Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20 (SUPPL.): 219–230
- SPONAGEL, H., GROTTENTHALER, K.-J., HARTMANN, R., HARTWICH, P., JOISTEN, H., KÜHN, D., SABEL, K.-J., TRIDL, R. (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart. 5. Aufl., 342
- SPRENGEL, C. PH. (1845): *Die Lehre vom Dünger oder Beschreibung aller bei der Landwirtschaft gebräuchlicher vegetabilischer und mineralischer Düngermaterialien nebst Erklärungen ihrer Wirkungsart*. Immanuel Müller, Leipzig. 512 S.
- STICHER, H. (2000): Bodenschutz – was ist zu schützen? In: *Bodenschutz – Anspruch und Wirklichkeit*. Hohenheimer Umwelttagung, Band, 32, S. 23–32
- STRUMPF, T., STRASSEMEYER, J., KRÜCK, S., HORNEY, P., HOMMEL, B., FELGENTREU, D., HERWIG, N. (2015): Methodische Aspekte bei der Erhebung von Regenwurmlebensgemeinschaften im Qualitätsweinbau. *Journal für Kulturpflanzen* 67(1), S. 5–21
- THAER, A. D. (1810): *Grundsätze der rationellen Landwirtschaft*. 2. Band. Realschulbuchhandlung Berlin. 107 ff.
- THE WEINBERG GROUP INC. (2000): *Health Risk Evaluation of Select Metals in Inorganic Fertilizers Post Application*. Prepared for: The Fertilizer Institute (TFI), January 16, 2000. Washington. Zu finden in <<http://www.aapfco.org/tfiRiskStd.pdf>>
- TIJINK, F. G. J., SPOOR, G. (2004): Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. *Zuckerindustrie* 129, (9), S. 647–652
- UBA (Umweltbundesamt) (o.J.): *Wie hoch ist die Bodenerosion durch Wasser in Deutschland tatsächlich?* URL: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion>. Letzter Zugriff: 30.06.2015
- UBA (1993) *Basisdaten Toxikologie für umweltrelevante Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten*. Berlin: UBA, 213 p, Texte 4/93
- UTERMANN, J., DUIJNISVELD, WHM., GODBERSEN, L., FUCHS, M. (2009): Uran in Böden und Sickerwässern – gibt es Indizien für eine phosphordüngerbürtige Uran-Anreicherung? *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 191 (2), 4 pp. – [http://eprints.dbges.de/191/2/Utermann\\_DBG\\_2009.pdf](http://eprints.dbges.de/191/2/Utermann_DBG_2009.pdf)
- UTERMANN, J., FUCHS, M., DÜWEL, O. (2008): *Flächenrepräsentative Hintergrundwerte für Arsen, Antimon, Beryllium, Molybdän, Kobalt, Selen, Thallium, Uran und Vanadium in Böden Deutschlands aus länderübergreifender Sicht*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Archiv Nr. 10040/08,71 pp
- VAN CAPELLE, C., SCHRADER, S., BRUNOTTE, J. (2012a): Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota - A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology* 50, 165–181
- VAN CAPELLE, C., SCHRADER, S., BRUNOTTE, J. (2012b): *Bodenleben erhalten und fördern – Wie Bodentiere auf unterschiedliche Bearbeitungsverfahren reagieren*. Landwirtschaft ohne Pflug 1/2-2012, 17–22
- VAN CAPELLE, C., SCHRADER, S., BRUNOTTE, J. (2012c): *Bodenbearbeitung steuert phytopathogene Bodenorganismen und ihre Antagonisten*. Bodenschutz 4-2012, 120–126
- VAN DER WERFF, P. A., AMELSVOORT, P. A. M., MARINISSEN, J. C. Y., FRISSEN, P. (1995): The influence of earthworms and Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza on the availability of phosphate in ecological arable farming. *Acta Zoologica Fennica* 196, 41–44
- VAN KAUWENBERGH, S. J. (1997): Cadmium and other minor elements in world resources of phosphate rock. *The Fertilizer Society, Proceedings No. 400*, ISBN 0-85310-034-9

- VAN OOST, K., GOVERS, G. (2006): Tillage Erosion. In: BOARDMAN, J., POESEN, J. P. (Eds.): Soil Erosion in Europe. Chichester, S. 599–608 (b)
- VAN OOST, K., GOVERS, G., DE ALBA, S., QUINE, T.A. (2006): Tillage Erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography* 30 (4), 443–446
- VAN VEEN, J. A., LILJEROTH, E., LEKKERKERK, L. J. A., VAN DE GEIJN, S. C. (1991): Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO<sub>2</sub> levels. *Ecological Applications* 1 (2): 175–181
- VAN-CAMP, L., BUJARRABAL, B., GENTILE, A.R., JONES, R.J. A., MONTANARELLA, L., OLAZABAL, C., SELVARADJOU, S.-K. (Eds.) (2004): Reports of the Technical Work Groups established under the Thematic Strategy for soil protection. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 21319 EN/2, Vol. 2, Luxembourg
- VDLUFU (ed) (2002): Stellungnahme des VDLUFU zur Konzeption von BMVEL und BMU vom Juni 2002 „Gute Qualität und sichere Erträge. Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?“, Dezember 2002, Bonn
- VDLUFU (2000): Standpunkt-Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden, 8 S. <http://www.vdlufa.de>
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2014): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. – VDI-Richtlinie 6101
- VERHEIJEN, F. G. A., JONES, R. J. A., RICKSON, R. J., SMITH, C. J. (2009): Tolerable versus actual erosion rates in Europe. *Earth-Sci. Rev.*, 94, S. 23–38
- VON WULFFEN, C.: Ideen zur Grundlage einer Statik des Landbaues. Möglinsche Annalen der Landwirtschaft, Bd. 11. Berlin, 1823, Realschulbuchhandlung. 389–465
- VON WULFFEN, C.: Sendschreiben an den Herrn Staatsrath Thaer über die Statik des Landbaus. In Bezug auf No. I im 2ten Hefte S. 235 des 1sten Bandes. Möglinsche Annalen der Landwirtschaft, Bd. 2. Berlin, 1818, Realschulbuchhandlung. 238–265
- VORDERBRÜGGE, T. (2004): Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes. *Bodenschutz* 2/04, S. 44–52
- VOSSHENRICH, H. H., MARQUERING, B., GATTERMANN, B., TÄGER-FARNY, W., ORTMEIER, B., SOMMER, C. (2001): Managementsystem for DGPS-supported primary soil tillage. Third European conference on precision agriculture (vol.2), S. 731
- WANG, Y., BÖLTER, M., CHANG, Q., DUTTMANN, R., MARX, K., PETERSEN, J. F., WANG, Z. (2015): Functional dependencies of soil CO<sub>2</sub> emissions on soil biological properties in northern German agricultural soils derived from a glacial till. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* 65 (3): 233–245
- WESSOLEK, G., KÖNIG, R., RENGER, M. sowie unter Mitwirkung von ROTH, C., BOHL, H., PLAGGE, R. (1992): Entwicklung und Anwendung von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen für Hangstandorte. *Bodenökologie und Bodengese 8, Fachgebiete Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Inst. f. Ökologie, TU Berlin*
- Weyer, T., Boeddinghaus, R. (2009): Bodenverdichtung vermeiden - Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV). Referat Öffentlichkeitsarbeit.
- WHITEHEAD, D. C. (2001): Nutrient Elements in Grassland: Soil Plant Animal Relationships. Oxon, New York: CABI Publishing
- WILD, M., BRANDHUBER, R., DEMMEL, M., GRONLE, A., MÖLLER, D., SCHMIDT, H., WOLF, D. (2013): Bodenstruktur und Bestellung. In: Körnerleguminosen und Bodenfruchtbarkeit. BLE, Bonn, S. 16–23
- WOLFARTH, F., SCHRADER, S., OLDENBURG, E. (2013): Bodenfauna als Ökologischer Dienstleister – Collembolen und Nematoden fördern den Abbau von Deoxynivalenol in Fusarium-infiziertem Weizenstroh. *Gesunde Pflanzen* 65, 169–176
- WOODRUFF, N. P., SIDDOWNAY, F. H. (1965): A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29, S. 602–609
- WYSOCKA-CZUBASZEK, A., CZUBASZEK, R. (2014): Tillage erosion: the principles, controlling factors and main implications for future research. *J. Ecol. Eng.* 15 (4), S. 150–159
- YEATES, G. W. (2003): Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils* 37, 199–210
- ZELLES, L. (1996): Fatty acid patterns of microbial phospholipids and lipopolysaccharides. In: SCHINNER, F., ÖHLINGER, R., KANDELER, E., MARGESIN, R. (Eds.): *Methods in Soil Biology*. Springer, Berlin, S. 80–93
- ZOBECK, T. M., BADDOCK, M. S., VAN PELT, R., TATARKO, J., ACOSTA-MARTINEZ, V. (2013): Soil property effects on wind erosion of organic soils. *Aeolian Research* 10, S. 43–51

## Autorenverzeichnis



### PD Dr. Joachim Brunotte

Thünen-Institut für Agrartechnologie  
 Bundesallee 47  
 38116 Braunschweig  
 Tel. 0531 596 4494 4102  
 joachim.brunotte@thuenen.de

Studium der Agrarwissenschaften in Kiel, anschließend Promotion im Fach landwirtschaftliche Verfahrenstechnik zum Thema Bodenschutz/Bodenschonung. Von 1991–1993 Aufbau der Abteilung „Agroservice im Zuckerrübenanbau“ bei der Kleinwanzlebener Saatzucht AG (KWS) in Einbeck. Seit 1993 Wissenschaftler am Institut für Betriebstechnik der FAL und seit 2008 Leiter der AG Boden/Pflanze am Thünen-Institut für Agrartechnologie. 2007 Habilitation an der Humboldt-Universität zu Berlin und Privatdozent in der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät.



### Prof. Dr. Rainer Duttmann

Geographisches Institut der  
 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
 Lehrstuhl für Physische Geographie,  
 Landschaftsökologie und Geoinformation  
 Ludewig-Meyn-Straße 14  
 24098 Kiel  
 Tel. 0431 880 3426  
 duttmann@geographie.uni-kiel.de

Studium der Geographie und Biologie anschließend Promotion und Habilitation an der Universität Hannover. Seit 2001 Professor für Physische Geographie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und Inhaber des Lehrstuhls für Physische Geographie, Landschaftsökologie und Geoinformation. Arbeitsgebiete: Modellierung von Landschafts- und Bodenprozessen, Bodenerosionsforschung, Bodenregionalisierung und Bodenschutz.



### Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer (i. R.)

Universitätsprofessor a. D.  
 Humboldt-Universität zu Berlin  
 Albrecht-Thaer-Weg 5  
 14195 Berlin  
 Tel. 030 209346397  
 frank.ellmer@agr.ar.hu-berlin.de

Studium der Agrarwissenschaften in Halle/Saale und Berlin; Promotion zum Dr. agr. (1982); Habilitation (1990); 1992–93 Lehrbeauftragter für Pflanzenbau an der Georg-August-Universität Göttingen; 1993–2018 Professur für Acker- und Pflanzenbau an der Humboldt-Universität zu Berlin; 2010–2014 Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät an der Humboldt-Universität zu Berlin



### Prof. Dr. Christoph Emmerling

Universität Trier  
 FB VI – Raum- und Umweltwissenschaften  
 Fach Bodenkunde  
 Campus II, Behringstraße 21  
 54296 Trier  
 Tel. 0651 201 2238  
 emmerling@uni-trier.de

Außerplanmäßiger Professor im Fach Bodenkunde des Fachbereiches Raum- und Umweltwissenschaften der Universität Trier. Lehr- und Forschungsschwerpunkte: Allgemeine und Angewandte Bodenbiologie, Landnutzungswandel und erneuerbare Rohstoffe mit Schwerpunkt Energiepflanzenanbau. 2001 bis 2005: Vorsitzender der Kommission Bodenbiologie der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.



### **Dr. Dieter Felgentreu**

Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)  
 Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz  
 Königin-Luise-Str. 19  
 14195 Berlin  
 Tel. 030 8304 2365  
 dieter.felgentreu@julius-kuehn.de

Studium der Biologie an der Humboldt Universität und Promotion am Institut für Pflanzenschutzforschung in Kleinmachnow. Seit 1991 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Julius Kühn-Institut am Standort Berlin vorrangig beschäftigt mit der biologischen Prüfung von Chemikalien. Langjährige Erfahrung mit der Bewertung der Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln im Bereich Boden im Rahmen des Zulassungsverfahrens. Mitarbeiter beim DIN Unterausschuss 4 „Biologische Verfahren“. Seit 2013 Leiter Arbeitsgruppe Auswirkungen von Agrarchemikalien auf Bodenmikroorganismen.



### **Wilfried Henke**

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE),  
 Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL)  
 Deichmannsaue 29  
 53179 Bonn  
 Tel.: 0228 6845 2644  
 E-Mail: wilfried.henke@ble.de

Studium der Agrarwissenschaften (Dipl.-Ing. agr.) an der Justus-Liebig-Universität in Gießen mit den Schwerpunkten Pflanzenbau, Bodenkunde und Landtechnik. Als Wissenschaftsredakteur im Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) für die Experten- und Fachkommunikation vorwiegend im Bereich Acker- und Pflanzenbau tätig.



### **Dr. Bernd Hommel**

Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)  
 Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz  
 Königin-Luise-Str. 19  
 14195 Berlin  
 Tel. 030 8304 2350  
 bernd.hommel@julius-kuehn.de

Studium der Agrarwissenschaften und Promotion im Fachbereich Pflanzenschutz an der Universität Leipzig, Institut für tropische und subtropische Landwirtschaft. Seit 1992 Wissenschaftler am Julius Kühn-Institut (bis 2007 Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, BBA) mit Forschungen zur Folgenabschätzung gentechnisch veränderter Pflanzen und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Mitarbeit in Gremien der EU und OECD. Seit 2013 stellvertretender Institutsleiter am JKI, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz in Berlin und Leiter der Arbeitsgruppe Auswirkungen von Agrarchemikalien auf Bodenmakroorganismen.



### **Hubert Honecker (i. R.)**

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn  
 Ref. 711, Pflanzenbau & Grünland  
 Rochusstr. 1  
 53123 Bonn  
 Tel. 0228 99 529 3602  
 hubert.honecker@bmel.bund.de

Hubert Honecker studierte an der Universität Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich Agrar in Soest von 1978-1981 Landwirtschaft mit dem Schwerpunkt Pflanzenbau und Agrarökonomie. Als Dipl.-Ing. für Landbau (FH) ist er im Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft tätig im Bereich Allgemeiner Pflanzenbau, Boden, fachlichen Regelungen unter Cross-Compliance, der Eiweißpflanzenstrategie und derzeit der Ackerbaustrategie.



### **Dr. Heinz-Josef Koch**

Institut für Zuckerrübenforschung  
Holtenser Landstr. 77  
37079 Göttingen  
Tel. 0551 5056250  
koch@ifz-goettingen.de

Studium der Agrarwissenschaften an der Fachhochschule Soest und der Georg-August-Universität Göttingen, Promotion im Pflanzenbau bei Prof. Baeumer. Im Jahr 1991 trat er in das Institut für Zuckerrübenforschung ein und leitet seit 1992 dort die Abteilung Pflanzenbau. Er ist in der Lehre und Betreuung von Studierenden der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen tätig und arbeitet in mehreren nationalen und internationalen Arbeitsgruppen mit. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodenstruktur, Pflanzenernährung und Düngung.



### **Dr. Hartmut Kolbe (i. R.)**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen  
Altes Dorf 19  
04435 Schkeuditz  
Tel.: 03420413018  
hartmutkolbe@yahoo.de

Studium der Landwirtschaft an der Fachhochschule Osnabrück und Universität Göttingen, Promotion am Institut für Agrikulturchemie zum Thema „Kartoffeldüngung unter differenzierten ökologischen Bedingungen“. Seit 1992 in der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, später Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Leipzig und Nossen. Aufbauarbeit Ökologischer Landbau, angewandte Forschung in den Bereichen Pflanzenbau, Pflanzenernährung und Düngung. Seit 2016 im (aktiven) Ruhestand.



### **Dr. Sylvia Kratz**

Julius Kuhn Institut (JKI)  
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen  
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (Abt. Bodenkunde, Geb. 250)  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Tel. 0531-5962144  
Sylvia.kratz@julius-kuehn.de

Wissenschaftlerin am Julius Kühn Institut (JKI). Aufgaben und Forschungsgebiete: Entwicklung von Methoden und Kriterien zur Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit und des Versorgungszustandes von Boden mit Nährstoffen (Schwerpunkt: Phosphor) und des Düngedarfes. Entwicklung von Methoden und Kriterien zur Bestimmung der Wirksamkeit und Sicherheit von Düngemitteln und Bodenhilfsstoffen (Schwerpunkte: Phosphor-Löslichkeit; Schwermetallbelastung). Entwicklung und Bewertung von Methoden, pflanzenbaulichen Indikatoren und Gütekriterien zur Bestimmung der Fruchtbarkeit und Funktionalität landwirtschaftlicher Böden.



### **Dr. Michael Kuhwald**

Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Physische Geographie, AG Landschaftsökologie und Geoinformation  
Ludwig-Meyn-Straße 14  
24118 Kiel  
Tel.: 0431 8802057  
E-Mail: kuhwald@geographie.uni-kiel.de

Studium der Geographie mit den Nebenfächern Bodenkunde, Hydrologie und Naturschutz an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. In den Abschlussarbeiten standen Bodenentwicklungsprozesse in Texas (Bachelorarbeit) und die Winderosionsmodellierung in Schleswig-Holstein (Masterarbeit) im Vordergrund. Seit März 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geographischen Institut der CAU zu Kiel in der AG Landschaftsökologie und Geoinformation, mit zunächst überwiegender Tätigkeit in der Lehre (GIS, Physische Geographie, Exkursionen, Studienprojekte). Promotion im Februar 2019 mit dem Thema „Detektion und Modellierung von Bodenverdichtung: Von Felduntersuchungen zur regionalen Risikobewertung“. Seitdem PostDoc am Geographischen Institut in Kiel.



### **Dr. Katrin Kuka**

Stabsstelle „Grünland“  
 Julius Kuhn-Institut (JKI)  
 Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen  
 Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 Tel. 0531 596 2350  
 katrin.kuka@julius-kuehn.de

Studium der Geographie, Bodenkunde und Geologie an der MLU Halle-Wittenberg. Anschließend Doktorandin am UFZ Leipzig-Halle und 2005 Promotion zum Dr. rer. nat. an der MLU Halle-Wittenberg zu dem Thema „Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der Grundlage von bodenstrukturabhängigen Umsatzprozessen“. Von 2005-2014 PostDoc am UFZ Leipzig-Halle und ZALF Müncheberg. Seit 08/2014 Leitung der Stabsstelle „Grünland“ am JKI Braunschweig.



### **Dr. Meinhard List**

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)  
 Referat 612  
 Rochusstr. 1  
 53123 Bonn  
 Tel. 0228 99 529 4375  
 meinhard.list@bmel.bund.de

Studium der Rechtswissenschaften an der Universität Bielefeld. Erste juristische Staatsprüfung am OLG Hamm. Referendariat und zweite juristische Staatsprüfung am Kammergericht Berlin. Promotion 2011 zum Thema Datenschutz im unionsrechtlichen Leistungssystem. Bis 2012 Tätigkeit als Rechtsanwalt und Justitiar im Bereich des Landwirtschaftsrechts. Seitdem Referent im BMEL. Zunächst in den Referaten „Steuern“ sowie „Cross Compliance“, danach an der Ständigen Vertretung der Bundesrepublik Deutschland bei der EU. Derzeit im Referat „EU-Koordinierung/ EU-Ratspräsidentschaft“ in Bonn.



### **Kirstin Marx**

Ehemals Stabsstelle Boden am Thünen-Institut

Seit dem 1. Juni 2015 arbeitete Frau Kirstin Marx in der Stabsstelle Boden des Thünen-Instituts in Braunschweig. Als Geografin hat Frau Marx an der Christian-Albrechts-Universität Kiel im Bereich Physische Geografie – Landschaftsökologie und Geoinformation mit dem Schwerpunkt Bodenschutz gearbeitet. Vor ihrer Kieler Zeit war sie in der Projektarbeit bei der Stiftung Ökologie & Landbau in Bad Dürkheim tätig - im Bereich ländliche Raumentwicklung, Agrar-Biodiversität und EU-Fördermittel.

seit 2018 im Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau  
 Tel.: 0340 21030 Zentrale, E-Mail: kirstin.marx@uba.de



### **Berthold Ortmeier (i. R.)**

Thünen-Institut für Agrartechnologie  
 Bundesallee 47  
 38116 Braunschweig  
 Tel. 0531 596 4371 (4102)  
 Bertold.ortmeier@thuenen.de

Studium an der Universität Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich Agrar in Soest (Ing. grad.)  
 Arbeitsgebiet: Mitarbeiter in der AG Boden/Pflanze am Thünen-Institut für Agrartechnologie. Seit März 2018 im Ruhestand



**Prof. Dr. Bernhard C. Schäfer (Dir. und Prof.)**

Julius Kühn-Institut  
Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit  
Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig  
Tel. 0531/299-4300  
bernhard.carl.schaefer@julius-kuehn.de

Studium der Agrarwissenschaften an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und der Georg-August-Universität Göttingen, Promotion in der Phytopathologie bei Prof. Heitefuß. Von 1994-2002 Berater für Pflanzenschutz und Pflanzenbau bei der Landwirtschaftskammer Hannover, Bezirksstelle Northeim, dort Leitung des Fachgebietes Pflanzenbau. Von 2002 bis 2019 Professor für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung an der Fachhochschule Südwestfalen, Agrarwirtschaft Soest. Wissenschaftliche Leitung des Versuchsgutes Merklingsen. Arbeitsschwerpunkte: Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Körnerleguminosen. Ehrenamtliche Tätigkeit bei der DLG und der UFOP. Seit März 2019 Leiter des Instituts für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit im Julius Kühn-Institut.



**Prof. Dr. Stefan Schrader**

Thünen-Institut für Biodiversität  
Bundesallee 65  
38816 Braunschweig  
Tel. 0531 596 2514  
stefan.schrader@thuenen.de

Studium der Biologie, Promotion zum Dr. rer. nat. und Habilitation für Bodenbiologie und Bodenökologie an der TU Braunschweig. Seit 2003 Leiter der AG „Strukturelle und Funktionelle Bodenzoologie“ am Thünen-Institut für Biodiversität in Braunschweig und dort seit 2019 stellvertretender Institutsleiter. Lehrveranstaltungen für Studierende der Biologie und Umweltwissenschaften an der TU Braunschweig.



**Dr. Susanne Schroetter (i. R.)**

Julius-Kühn-Institut (JKI)  
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen  
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Studium der Agrarwissenschaften an der Martin-Luther-Universität in Halle (Saale), Promotion zum Thema „Anbau von Kreuzifern zur Gründüngung nach späträumenden Hauptfruchten“. 1980-1991 Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg; 1992-1998 Institut für agrarrelevante Klimaforschung der FAL Braunschweig; 1999-2007 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL Braunschweig; seit 2008 Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Institutes in Braunschweig. Forschungsschwerpunkte: Interaktionen Boden-Wurzel-Pflanze im Hinblick auf Nährstoffverfügbarkeit, Nährstoffkonservierung, Wassernutzungseffizienz. Ansprechpartnerin für die Internetplattform „humusnetzwerk.de“ im Rahmen der JKI-Trägerschaft. (seit Dez. 2017 im Ruhestand)



**Marion Senger**

Landwirtschaftskammer Niedersachsen  
Unternehmensbereich Pflanze  
Wunstorfer Landstr. 11  
30453 Hannover  
Tel. 0511 3665 4250  
marion.senger@lwk-niedersachsen.de

Studium der Allgemeinen Agrarwissenschaften in Hohenheim/Stuttgart im Bereich Pflanzenbau mit Schwerpunkt Ökologische Bodenkunde am Institut für Bodenkunde und Standortslehre. Sie ist Assessorin für Agrarstruktur und Landeskultur. Derzeit berät und unterrichtet sie Landwirte und Berater im Bereich Boden, Bodenbearbeitung und Bodenschutz bei der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Sie ist Vorsitzende der Bodenspezialisten der Bundesländer, Arbeitskreisleiterin bei der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB e. V.) und Mitglied beim Bundesverband Boden (BVB e. V.).



**Dr. Karl Severin (i. R.)**

Carl-Zuckmayer-Straße 4  
31787 Hameln  
Handy: 157 5824 8672  
E-Mail: dr.k.severin@freenet.de

Bei der Landwirtschaftskammer Niedersachsen mit folgenden Arbeitsgebieten beschäftigt: Düngung/Düngemittel, amtliche Düngemittelanalytik und Probenahme, Boden, Bodenschutz, Bodendauerbeobachtungsflächen, landwirtschaftliche Umweltberatung und -untersuchungen, Abfallrecht mit Klarschlammverordnung und Bioabfallverordnung.  
Ab dem 01.12.2019 im Ruhestand.



**Dr. Barbara Urban**

Thünen-Institut für Agrartechnologie  
Bundesallee 47  
38116 Braunschweig  
Tel. 0531 596 4150  
barbara.urban@thuenen.de

Dr.-Ing. (Umweltplanung) und technische Mitarbeiterin. Studium der Umweltplanung und Promotion zum Thema „Biologische Vielfalt in Ökobilanzen“ an der Leibniz Universität Hannover. Langjährige Tätigkeit am Thünen-Institut bzw. vormals FAL. Seit 2014 Mitarbeit in der AG Boden/Pflanze am Thünen-Institut für Agrartechnologie.



**Dr. Thomas Vorderbrügge (i. R.)**

vormals: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden  
Panoramastr. 55  
65199 Wiesbaden  
0611 424348  
vorderbrueggeth@online.de

Studium der Agrarwissenschaften in Gießen, Promotion am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung in Gießen, seit 1990 beim Hessischen Landesamt für Bodenforschung bzw. Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Dezernat Boden und Altlasten. Arbeitsschwerpunkte: Bodenschutz und angewandte Bodenkunde, Auswertung von Daten der Bodenschätzung für den Bodenschutz, Entwicklung von Methoden zur Bewertung von Bodenfunktionen gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz, Bodenschutz in der Planung.  
Seit Juni 2021 im Ruhestand.



**PD Dr. Hans Voßhenrich (i. R.)**

Thünen-Institut für Agrartechnologie  
Bundesallee 47  
38116 Braunschweig  
Tel. 0531 596 4469  
hans.vosshenrich@thuenen.de

Studium der Agrarwissenschaften in Gießen und Bonn. Promotion, Habilitation und Privatdozent an der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel. Seit 1999 Wissenschaftler am Institut für Betriebstechnik der FAL, jetzt AG Boden/Pflanze am Thünen-Institut für Agrartechnologie. Seit 2020 im Ruhestand.

Stand: Dez. 2021

Einige Kolleginnen und Kollegen sind in den wohlverdienten Ruhestand gegangen, recht herzlichen Dank für die immer gute Zusammenarbeit. Einige Kolleginnen und Kollegen sind einer neuen beruflichen Herausforderung gefolgt, auch hier recht herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit. Nicht zuletzt denen, die „im Boot“ geblieben sind, einen recht herzlichen Dank. Insbesondere Frau Dr. B. Urban und Herrn Dr. J. Brunotte

Wilfried Henke

# KTBL-Veröffentlichungen



Schrift

Grube, J.

## **Streifenbodenbearbeitung Eine Bestandsaufnahme aus Forschung und Beratung**

Die Schrift richtet sich an Vertreter der landwirtschaftlichen Beratung sowie an praktische Landwirte und Lohnunternehmer. Sie gibt einen Überblick über den Stand der Versuche zum Thema Streifenbodenbearbeitung in Forschung und Beratung.

Darmstadt, 2021, 116 Seiten, Bestell-Nr. 11521, 22 €



Schrift

## **Betriebsplanung Landwirtschaft 2020/21**

Maschinenkosten kalkulieren oder Arbeitsprozesse und Produktionsverfahren planen: Für die Betriebszweige Pflanzenproduktion und Tierhaltung bietet die 27. Auflage des KTBL-Standardwerkes umfassende Daten und Informationen. Die kostenfreien Web-Anwendungen unter [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de) ergänzen die gedruckte Datensammlung.

Darmstadt, 2020, 768 Seiten, Bestell-Nr. 19526, 26 €



Schrift

## **Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen**

Die Versorgung von Traktoren, Mähreschern, Häckslern und anderen selbstfahrenden Maschinen mit Antriebsenergie ist für die landwirtschaftliche Produktion von entscheidender Bedeutung. Die Verwendung von Biokraftstoffen aus heimischer Produktion oder der Einsatz von elektrischem Strom als Antriebsenergie können Lösungsansätze sein.

Darmstadt, 2020, 132 Seiten, Bestell-Nr. 11519, 24 €



## **KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft**

Das KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft ist Nachschlagewerk für all diejenigen, die Maschinen- und Verfahrenskosten kalkulieren und ihre Arbeitswirtschaft planen wollen oder sich einfach für einen bestimmten Wert interessieren. Für die wichtigsten pflanzenbaulichen Produktionszweige und Tierhaltungsverfahren findet der Nutzer arbeits- und betriebswirtschaftliche Daten sowie hilfreiche Informationen rund um Landwirtschaft.

Darmstadt, 2015, 288 S., Bestell.-Nr. 19518, 15 €

### **Bestellhinweise**

**Besuchen Sie auch unseren Internet-Shop [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)**

Porto- und Verpackungskosten werden gesondert in Rechnung gestellt.

Preisänderungen vorbehalten. Wir freuen uns auf Ihre Bestellung. Senden Sie diese bitte an:

KTBL, Bartningstraße 49, D-64289 Darmstadt | Tel.: +49 6151 7001-189 | Fax: +49 6151 7001-123

E-Mail: [vertrieb@ktbl.de](mailto:vertrieb@ktbl.de) | [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)



# Was bietet das BZL?

## Internet

### **www.landwirtschaft.de**

Vom Stall und Acker auf den Esstisch – Informationen für Verbraucherinnen und Verbraucher

### **www.praxis-agrar.de**

Von der Forschung in die Praxis – Informationen für Fachleute aus dem Agrarbereich

### **www.bzl-datenzentrum.de**

Daten und Fakten zur Marktinformation und Marktanalyse

### **www.bildungsserveragrar.de**

Gebündelte Informationen zur Aus-, Fort- und Weiterbildung in den Grünen Berufen

### **www.nutztierhaltung.de**

Informationen für eine nachhaltige Nutztierhaltung aus Praxis, Wissenschaft und Agrarpolitik

### **www.oekolandbau.de**

Das Informationsportal rund um den Öko-Landbau und seine Erzeugnisse

## Social Media

Folgen Sie uns auf Twitter, Instagram und YouTube



@bzl\_aktuell



@mitten draussen



Bundesinformationszentrum Landwirtschaft

## Medienservice

Alle Medien erhalten Sie unter  
[www.ble-medienservice.de](http://www.ble-medienservice.de)



## Unsere Newsletter

[www.landwirtschaft.de/newsletter](http://www.landwirtschaft.de/newsletter)

[www.praxis-agrar.de/newsletter](http://www.praxis-agrar.de/newsletter)

[www.oekolandbau.de/newsletter](http://www.oekolandbau.de/newsletter)

[www.bmel-statistik.de/newsletter](http://www.bmel-statistik.de/newsletter)

# Impressum

1585/2022

## Herausgeberin

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)  
Präsident: Dr. Hanns-Christoph Eiden  
Deichmanns Aue 29  
53179 Bonn  
Telefon: +49 (0)228 6845-0  
Internet: [www.ble.de](http://www.ble.de)

## Autorenschaft

siehe Inhaltsverzeichnis  
Seite 3 bis 6 und die Seiten  
135 bis 140 (Autorenverzeichnis)

## Redaktion

Wilfried Henke, BZL

## Gestaltung

Arnout van Son, Alfter

## Titelbild

© Landpixel

## Bilder (Inhalt und Rückseite)

Bildautoren jeweils am/im Bild

## Druck

Kunst-und Werbedruck GmbH & Co. KG,  
Hinterm Schloss 11,  
32549 Bad Oeynhausen

Das Papier besteht zu 100% aus Recyclingpapier.

Nachdruck oder Vervielfältigung – auch auszugsweise –  
sowie Weitergabe mit Zusätzen, Aufdrucken oder Aufklebern  
nur mit Zustimmung der BLE gestattet.

2. Auflage 2022

ISBN 978-3-8308-1407-8

© BLE 2022

## Bestellungen an:

BLE-Medienservice  
c/o IBRo Versandservice GmbH  
Kastanienweg 1  
18184 Roggentin  
Telefon: +49 (0)38204 66544  
Telefax: +49 (0)228 8499-200  
[bestellung@ble-medienservice.de](mailto:bestellung@ble-medienservice.de)

Alle Medien auch als Download: [www.ble-medienservice.de](http://www.ble-medienservice.de)



(Fotos: P. Meyer, BLE)

Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) ist der neutrale und wissenschaftsbasierte Informationsdienstleister rund um die Themen Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Imkerei, Garten- und Weinbau – von der Erzeugung bis zur Verarbeitung.

Wir erheben und analysieren Daten und Informationen, bereiten sie für unsere Zielgruppen verständlich auf und kommunizieren sie über eine Vielzahl von Medien.

**[www.praxis-agrar.de](http://www.praxis-agrar.de)**