

THEMATISCHE SYNTHESE TS1

1

# Boden und Nahrungsmittel- produktion

Raphaël Charles Marina Wendling Stéphane Burgos



## **Boden und Nahrungsmittelproduktion**

---

Thematische Synthese TS1 des Nationalen Forschungsprogramms  
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)

# Vorwort

Der Boden als zentrale Produktionsgrundlage der Landwirtschaft spielte in der ganzen Menschheitsgeschichte eine zentrale Rolle. Technische Entwicklungen wie die Mechanisierung oder der Einsatz chemischer Dünger und der weltweite Handel haben die direkte Abhängigkeit vom Boden als Ernährungsgrundlage scheinbar relativiert – zum Teil mit gravierenden Folgen wie Überdüngung, Bodenerosion oder Versteppung. Mit der Agrarreform der 1990er-Jahre hat die Schweiz eine markante Kurskorrektur vorgenommen. Insbesondere aufgrund der Anforderungen des ökologischen Leistungsnachweises werden die Böden in der Schweiz heute angepasster bewirtschaftet. Seither hat aber auch eine Spezialisierung in der Bewirtschaftung eingesetzt, die die nachhaltige Bewirtschaftung des Bodens in verschiedener Weise strapaziert. Die Autoren und die Autorin der thematischen Synthese TS1 «Boden und Nahrungsmittelproduktion» des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) zeichnen die Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktion und die damit verbundenen Herausforderungen für den Boden in den letzten Jahrzehnten nach. Sie präsentieren die Erkenntnisse von NFP 68-Projekten, die sich mit verschiedenen neuen Ansätzen für den Anbau beschäftigt haben, die Chancen in sich bergen, mit der Bewirtschaftung die Bodenfunktionen zu stärken. Darauf aufbauend skizziert das Autorenteam für die Zukunft eine standortgerechte Landwirtschaft, die sich am Potenzial des Bodens orientiert und durch den minimierten Einsatz von Hilfsstoffen und Maschineneinsatz auszeichnet. Die Realisierung einer Landwirtschaft, die sich verstärkt an der Bodenqualität orientiert, betrachtet es dabei längst nicht nur als Aufgabe der Landwirtinnen und Landwirte, sondern als Aufgabe der ganzen Wertschöpfungskette. Dabei tragen alle involvierten Akteure – von den Produzenten über die verarbeitende Industrie und die Detailhändler bis hin zu den Konsumentinnen und Konsumenten – eine Verantwortung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Böden, sei es in der Schweiz oder anderswo. Die verarbeitende Industrie und die Detailhändler mit ihrer Marktmacht sowohl gegenüber den Lieferanten als auch den Konsumentinnen und Konsumenten nehmen eine besondere Stellung ein. Im Rahmen der verschiedenen Vermarktungslinien und Labels besteht ein erhebliches Potenzial, die bodenschonende Bewirtschaftung zu fördern – zum Wohle des Bodens und der künftigen Generationen.

*Prof. Dr. Emmanuel Frossard*

*Präsident der Leitungsgruppe des Nationalen Forschungsprogramms  
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)*

# Inhaltsverzeichnis

---

**Vorwort** → 5

---

**Inhaltsverzeichnis** → 6

---

**Zusammenfassung** → 8

---

**1. Einleitung** → 10

---

**2. Von der «Boden-Kultur» zum NFP 68** → 11

2.1 Ein Rückblick → 11

2.2 Entwicklung der Landwirtschaft seit der «Boden-Kultur» → 12

2.3 Aktuelle Problemstellungen → 15

2.4 Bodenfunktionen und Bodenqualität → 16

---

**3. Gefährdungen der Bodenqualität** → 17

3.1 Die Bodenverdichtung: ein heimtückisches Phänomen → 17

3.2 Nachhaltige Schäden durch den Verlust an organischer Bodensubstanz → 23

3.3 Erosion: ein nach wie vor ungelöstes Problem → 25

3.4 Die Biodiversität der Böden: ein Schatz, den es zu bewahren gilt → 25

---

**4. Beitrag von Anbausystemen zum Bodenschutz** → 28

4.1 Bodenschutz durch reduzierte Bodenbearbeitung → 28

4.2 Zwischenkulturen: Pflanzen im Dienste des Bodens → 30

4.3 Fruchtfolge: ein entscheidender Faktor → 32

4.4 Die entscheidende Wahl des Anbausystems → 33

---

**5. Pilze und Pflanzen als Düngerersatz?** → 34

5.1 Mykorrhiza: Teamwork → 34

5.2 Von nitratbindenden Zwischenkulturen zum Gründünger → 37

---

---

**6. Kämpfe im Untergrund → 40**

6.1 Nematoden gegen Insekten → 41

6.2 Bakterien mit vielfältigen Waffen → 45

---

**7. Praktische Beurteilung der Bodenqualität → 49**

7.1 Diagnose → 49

7.2 Monitoring → 58

---

**8. Entwicklung neuer Strategien → 61**

8.1 Aktuelle Entwicklungen in der Landwirtschaft → 61

8.2 Erhaltung der Bodenqualität → 64

8.3 Rahmenbedingungen → 67

8.4 Eine hochwertige Nahrungsmittelproduktion zur Inwertsetzung der Ressource Boden → 71

---

**Anhang → 73**

---

A1 Inventar der in der Schweiz durchgeführten Langzeitversuche → 73

Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung  
der Ressource Boden» (NFP 68) → 78

Die Forschungsprojekte des NFP 68 → 80

---

A2 Abbildungsverzeichnis → 84

Tabellenverzeichnis → 85

Glossar → 86

Abkürzungsverzeichnis → 89

Namen von Tier- und Pflanzenarten → 89

Literatur → 90

---

**Impressum → 98**

---

# Zusammenfassung

**Der Boden ist die zentrale Produktionsgrundlage für die Nahrungsmittelproduktion. Seine Qualität wird derzeit insbesondere durch die Bodenverdichtung, den Verlust an organischer Bodensubstanz (obs) und Biodiversität sowie Erosion bedroht. Die thematische Synthese TS<sub>1</sub> «Boden und Nahrungsmittelproduktion» des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) diskutiert die Ergebnisse der NFP 68-Forschungsprojekte zu diesen Herausforderungen und führt sie zur Vision einer standortgerechten, regional angepassten Landwirtschaft zusammen, die sich vermehrt auf die Bodenfunktionen abstützt und mit weniger Maschineneinsatz und weniger Hilfsstoffen arbeitet.**

Der Boden und seine Funktionen bilden die Grundlage zahlreicher für unsere Gesellschaft wichtiger Ökosystemleistungen (ösl). Die thematische Synthese TS<sub>1</sub> «Boden und Nahrungsmittelproduktion» des NFP 68 beschäftigt sich insbesondere mit Eigenschaften, Prozessen und Funktionen des Bodens, die für die Nahrungsmittelproduktion grundlegend oder nützlich sind.

Der Boden ist eine begrenzte, in menschlichen Zeiträumen nicht erneuerbare Ressource, die es zu schützen gilt. Derzeit gefährden in erster Linie vier Prozesse die Bodenqualität und stellen damit eine Gefahr für die landwirtschaftliche Produktion dar: Bodenverdichtung, Verlust an organischer Bodensubstanz (obs), Erosion und Biodiversitätsverlust.

- Die Bodenverdichtung betrifft etwa einen Drittel aller Schweizer Böden. Sie entsteht durch den Einsatz von immer schwereren Maschinen, kennt aber auch andere Ursachen wie Bodenarbeiten, die trotz zu nasser Verhältnisse durchgeführt werden, oder ist die Folge einer reduzierten strukturellen Stabilität des Bodens. Ein solcher Stabilitätsverlust kann mit dem verminderten Gehalt an obs zusammenhängen, die für die chemischen, physikalischen und biologischen Funktionen des Bodens eine zentrale Rolle spielt. Dieses Phänomen und seine Folgen wurden in zahlreichen Langzeitversuchen in der Schweiz beobachtet, auf die NFP 68-Projekte zurückgegriffen haben.
- Der Verlust an obs hat seinen Ursprung in der verminderten Verfügbarkeit von Hofdünger und Kompost, im Abtransport von Ernterückständen oder auch im Fehlen von Wiesen in der Fruchtfolge.
- Die Erosion stellt trotz gezielter Schutzmassnahmen nach wie vor eine Gefahr für die Bodenqualität dar und führt zu irreversiblen Verlusten.
- Mehrere Studien warnen zudem vor den Gefahren im Zusammenhang mit dem Verlust an Biodiversität, weil Bodenlebewesen für zahlreiche Bodenfunktionen eine zentrale Rolle spielen. Der Verlust an Biodiversität lässt sich allerdings bis anhin nur schwer quantifizieren.

Mehrere NFP 68-Projekte haben nach Möglichkeiten gesucht, wie die Bodenqualität bewahrt werden kann. Innovative Anbaupraktiken ermöglichen einen Schutz des Bodens. Zwischenkulturen und eine reduzierte Bodenbearbeitung begrenzen den obs-Verlust, schützen die Bodenoberfläche und verbessern die Bodenstruktur, ohne die Produktion zu

beeinträchtigen. Anbausysteme dieser Art bewahren die Bodenqualität und ermöglichen zugleich eine Regeneration der Bodenfunktionen, die unter intensiven Anbaubedingun- gen gelitten haben. Ziel ist aber auch, den Maschineneinsatz und den Einsatz externer Hilfsstoffe wie Pflanzenschutzmittel in der Bewirtschaftung zu vermindern.

Die Nährstoffversorgung und der Pflanzenschutz stellen wichtige pflanzenbauliche Mass- nahmen dar, zu denen die Bodenorganismen aktiv beitragen können. Speziell untersucht haben Projekte des NFP 68 die Rolle von Mykorrhizapilzen, Zwischenkulturen, entomo- pathogenen Nematoden und Pseudomonas-Bakterien als Düngerergänzung oder biologi- schen Pflanzenschutz. Erforscht wurde auch der Einfluss der landwirtschaftlichen Prak- tiken auf die verschiedenen nützlichen Organismen und die Bedeutung einer Beimpfung mit diesen Organismen. Die Ergebnisse sind ermutigend. Die Studien werden im Hinblick auf eine Praxisanwendung weitergeführt.

Wissenschaftliche Methoden, die im Rahmen des NFP 68 entwickelt oder umgesetzt wur- den, haben zur Erstellung eines Inventars von Diagnose- und Überwachungsinstrumen- ten zur Beurteilung der Bodenqualität geführt. Diese Instrumente richten sich an unter- schiedliche Akteurinnen und Akteure, die am Umgang mit landwirtschaftlichen Böden beteiligt sind.

Die TS<sub>1</sub> diskutiert schliesslich Strategien, die dazu beitragen, die Bodenqualität zu erhal- ten oder zu verbessern und zugleich die Anforderungen an eine nachhaltige Produktion zu erfüllen. Die Strategien berücksichtigen jene Bereiche, in denen nach den Erkennt- nissen des NFP 68 vordringlicher Handlungsbedarf besteht, aber auch die Entwicklung des Umfelds der landwirtschaftlichen Produktion in der Schweiz und die Spannungsfel- der, denen Landwirtinnen und Landwirte ausgesetzt sind. Im Hinblick auf eine nachhal- tige Nutzung der Ressource Boden zeigt die TS<sub>1</sub> die notwendigen Rahmenbedingungen auf verschiedenen Zuständigkeitsebenen – Primärproduktion, Wissenssystem, Agrar- und Lebensmittelbranche sowie Politik – auf. Die vorgeschlagenen Strategien führen zur Vision einer standortgerechten, regional angepassten Landwirtschaft, die sich vermehrt auf die Bodenfunktionen abstützt und weniger externe Hilfsstoffe einsetzt. Sie verlangen von allen Akteurinnen und Akteuren Innovationsgeist, um die Herausforderungen der Zukunft zu meistern.

2012 lancierte der Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) im Auftrag des Bundesrates das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) mit dem Ziel, das Wissen über das Bodensystem zu verbessern, Instrumente für die Bewertung der Bodenqualität zu entwickeln und Strategien zur nachhaltigen Nutzung zu erarbeiten. Die vorliegende thematische Synthese TS<sub>1</sub> «Boden und Nahrungsmittelproduktion» zeigt die Bedeutung dieser Zielsetzungen für die Nahrungsmittelproduktion auf. Sie legt dar, wie anhand der Erkenntnisse des NFP 68 landwirtschaftliche Böden in der Schweiz bewirtschaftet werden sollen, damit eine nachhaltige Produktion gewährleistet ist. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, die Entwicklung der Herausforderungen und Problemstellungen seit dem Nationalen Forschungsprogramm «Nutzung des Bodens in der Schweiz» (NFP 22) bis zum NFP 68 aufzuzeigen (Kapitel 2). Das prioritäre Ziel der wissenschaftlichen Forschung besteht darin, grundlegende Erkenntnisse zur Lösung von Problemen zu liefern, und nicht, Rezepte zur Bewältigung praktischer Herausforderungen zu finden. In dieser Perspektive stellt die TS<sub>1</sub> die wichtigsten Ergebnisse der Projekte des NFP 68 den aktuellen Problemstellungen in der Agrar- und Nahrungsmittelproduktion gegenüber. Entsprechend befasst sich Kapitel 3 mit den grössten Gefährdungen der Bodenqualität. Wie jede nur begrenzt verfügbare natürliche Ressource muss auch der Boden geschützt werden. Dieser Schutz betrifft eine Reihe physikalischer, chemischer und biologischer Funktionen. Die Forschungsergebnisse des NFP 68 ermöglichen insbesondere ein besseres Verständnis zweier Hauptprobleme: der Verdichtung und des Verlusts an organischer Bodensubstanz (OBS).

Kapitel 4 befasst sich mit Anbauverfahren, die grundlegend sind für den Bodenschutz, insbesondere eine reduzierte Bodenbearbeitung und Zwischenkulturen.

Die Kapitel 5 und 6 gehen auf die Bedeutung der Biodiversität ein und erläutern die wichtigsten Beiträge von Bodenorganismen im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelproduktion: Sie betreffen die Ernährung der Pflanzen (Kapitel 5) und die Pflanzengesundheit (Kapitel 6).

Nach der Präsentation der Projektergebnisse stellt Kapitel 7 Diagnose- und Monitoring-Instrumente zur Beurteilung der Bodenqualität vor, bevor in Kapitel 8 neue Strategien zur Steuerung der Bodenqualität diskutiert werden.



### 2.1 Ein Rückblick

«Boden-Kultur – Vorschläge für eine haus-hälterische Nutzung des Bodens in der Schweiz» heisst der Titel des 1991 publizierten Schlussberichts<sup>1</sup> des Nationalen Forschungsprogramms «Nutzung des Bodens in der Schweiz» (NFP 22), des letzten, das das Thema Boden untersucht hat. Zur damaligen Landwirtschaft heisst es darin, sie sei «einseitig darauf ausgerichtet, vermarktbare Güter zu produzieren. Damit immer weniger werden Nebenleistungen erbracht, die früher mit der landwirtschaftlichen Nutzung verbunden waren, wie die Regelung des Naturhaushaltes und die Erhaltung von Lebensräumen und Landschaften.» Diese intensive Landwirtschaft war das Ergebnis einer Agrarpolitik, die seit dem Zweiten Weltkrieg über mehrere Generationen entwickelt wurde. Die Probleme, die 1991 im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Böden genannt wurden, waren «Verdichtung und Erosion, Ansammlung von Schadstoffen, Vernichtung von Bodenlebewesen, Ausräumung der Kulturlandschaft, Verdrängung und Ausrottung der wildlebenden Flora und Fauna». Die Bilanz der Bodenfruchtbarkeit zeigte, dass eine Verringerung dieser Belastungen nur durch die Kontrolle der Emissionen und der direkten Einträge von Schadstoffen möglich war. Zudem sollte eine «sanftere», vielseitige Landwirtschaft gefördert werden, die neben der Nahrungsmittelproduktion weitere Funktionen erfüllen könnte. Die Agrarpolitik habe dazu geführt, dass Produktionsmethoden toleriert und unterstützt wurden, «welche den Boden schädigen und die naturnahen Flächen zerstören».

Der Schlussbericht bilanzierte: «Eine Abkehr von der Tendenz zur weiteren Intensivierung ist vorläufig nicht absehbar.» Die Expertinnen und Experten waren

sich einig, dass «erhebliche Technologie- und Intensivierungsschübe in der Landwirtschaft» noch bevorstünden und diese «Entwicklung [...] schrittweise von der multifunktionalen zur monofunktionalen Bodennutzung» führen würde. Die Autoren von «Boden-Kultur» forderten unter anderem eine multifunktionale Landwirtschaft auf der Grundlage eines neuen Gesellschaftsvertrags zwischen der Allgemeinheit und der Landwirtschaft, um eine Ökologisierung der landwirtschaftlichen Produktion zu ermöglichen. Die Grundlagen für eine entsprechende integrierte Produktion (IP; Glossar, S. 86) waren bereits vor langer Zeit gelegt worden – nicht nur durch die Wissenschaft, beispielsweise die Erklärung von Ovronnaz der Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB) von 1977, sondern auch durch Vertreterinnen und Vertreter der Praxis, die im selben Jahr den Groupement des Arboriculteurs Lémaniques pratiquant les Techniques Intégrées (GALTI) gründeten<sup>2</sup>. Es dauerte allerdings bis 1993, bis die IP als Ökoprogramm für die Schweizer Landwirtschaft eingeführt wurde. Bereits 1996 beteiligten sich zwei Drittel und drei Jahre später 90 Prozent aller Landwirtinnen und Landwirte daran. Die Umsetzung dieser Politik führte zu grossen Veränderungen in der Schweizer Landwirtschaft, die zweifellos als revolutionär betrachtet werden können. Die Neuausrichtung der Landwirtschaftspolitik wurde 1996 vom Stimmvolk an der Urne gutgeheissen, womit der Grundsatz einer nachhaltigen und auf den Markt ausgerichteten landwirtschaftlichen Produktion in der Bundesverfassung verankert wurde (Art. 104 BV; SR 101). Sie bildet bis heute die Grundlage der Agrarpolitik, deren Programm vom Bund alle vier Jahre überarbeitet wird.

## Formen der Landwirtschaft

Die verschiedenen Formen der Landwirtschaft können hinsichtlich des menschlichen Eingriffs in die natürliche Dynamik und in Bezug auf ihre Komplexität, Diversifizierung und Aggradation (im Gegensatz zu Vereinheitlichung, Vereinfachung und Degradation) gefasst werden<sup>3</sup>. Mögliche Differenzierungsebenen sind die Anbaufläche (Parzelle), das Anbausystem (Fruchtfolge), das Produktionssystem (Landwirtschaftsbetrieb) oder das Landwirtschaftsgebiet (Einzugsgebiete, Regionen).

Die ökologisch intensive Landwirtschaft rückte insbesondere in den letzten Jahren in den Vordergrund und taucht in mehreren Projekten des NFP 68 auf. Sie stützt sich auf die natürlichen Funktionen, die ein Ökosystem zu bieten hat<sup>4</sup>. Doré et al. haben fünf weitere Stossrichtungen hinzugefügt, die die Landwirtschaft zur Stärkung der ökologischen Intensivierung verfolgen kann<sup>5</sup>: Nutzung von Fortschritten in den Pflanzenwissenschaften, Entwicklung von Anbausystemen, die sich an natürlichen Ökosystemen orientieren, Nutzung von Praxiswissen zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung und Innovation sowie Anwendung neuer methodischer Ansätze, das heisst eine systematischere Nutzung von Meta-Analysen und vergleichenden Systemanalysen.

### 2.2 Entwicklung der Landwirtschaft seit der «Boden-Kultur»

Die heutige Landwirtschaft ist aus einer Reihe von landwirtschaftlichen Revolutionen hervorgegangen, die seit dem 19. Jahrhundert geprägt sind durch die Mechanisierung mit schweren Geräten und den zunehmenden Einsatz von Hilfsstoffen<sup>6</sup>. Seit der Einführung der IP in der Schweiz ist das Interesse der Gesellschaft und der Politik an der Landwirtschaft und den Böden sehr hoch geblieben. Dies führte zur Erarbeitung gesetzlicher Instrumente wie des Landwirtschaftsgesetzes (LwG, SR 910.1) und der Verordnung über die Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12) und von Anreizen wie dem ökologischen Leistungsnachweis (öLN), die für eine multifunktionale Landwirtschaft und eine ökologischere Produktion plädieren. Gegenwärtig umfassen diese Instrumente für einen aktiven Bodenschutz:

- den öLN (ausgeglichene Düngerbilanz, geregelte Fruchtfolge, geeigneter Bodenschutz, gezielte Auswahl und Anwendung von Pflanzenschutzmitteln),
- Ressourceneffizienzbeiträge im Rahmen der Direktzahlungsverordnung (DZV, SR

910.13, Art. 77 bis 82, einschliesslich der Beiträge für schonende Bodenbearbeitung),

- die Programme für die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (Art. 77a und 77b LwG, darunter die Nitratprogramme),
- Beiträge zu Produktionssystemen (Bio- und Extenso-Produktion, graslandbasierte Milch- und Fleischproduktion).

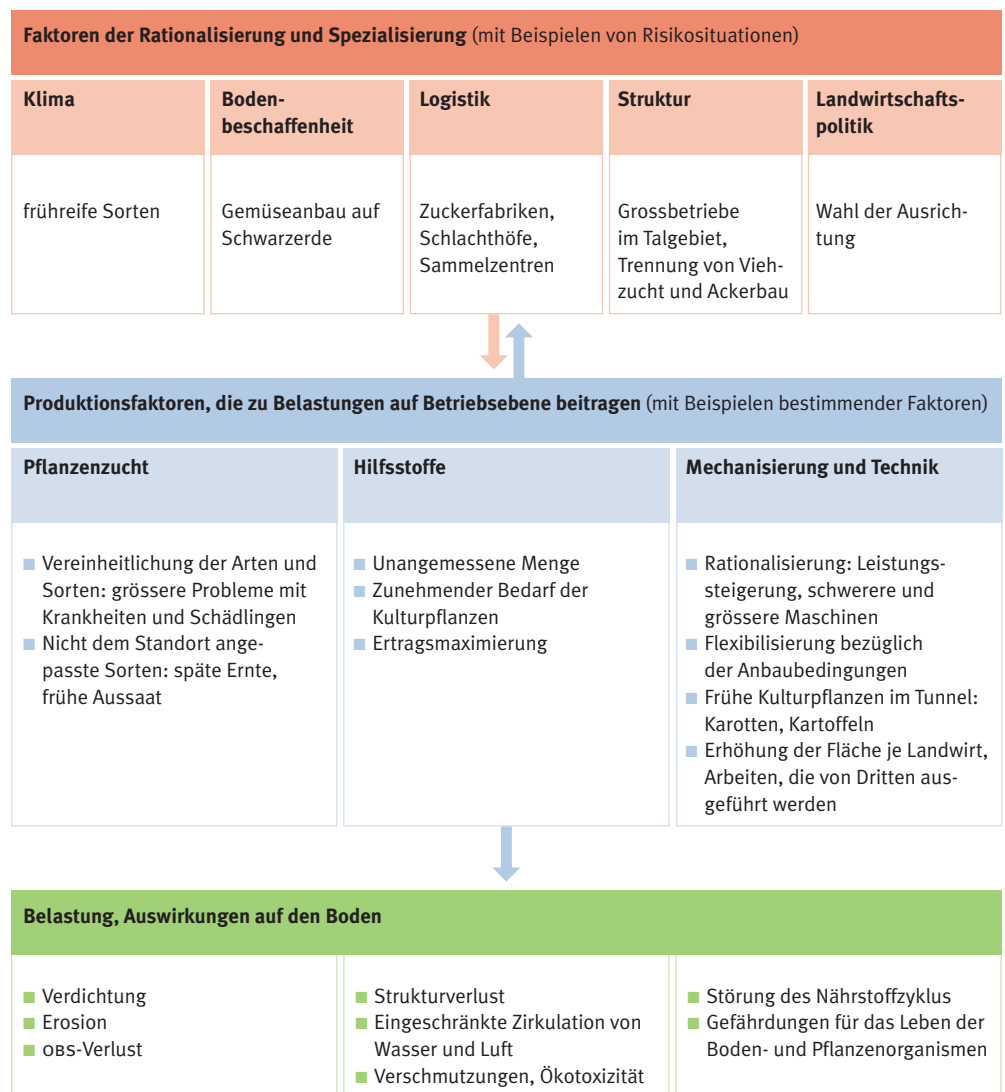
Diese neue Schweizer Politik, die auch in anderen Ländern verfolgt wird, führte zur Entwicklung verschiedener kontextabhängiger Formen der Landwirtschaft (Kasten). Gegenwärtig unterscheidet man in der Schweiz im Wesentlichen zwischen zwei Systemen der landwirtschaftlichen Produktion: Auf den insgesamt 1,05 Millionen Hektaren landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) wird mehrheitlich IP auf der Basis des öLN betrieben, rund 14 Prozent der LN werden biologisch bewirtschaftet (142 000 ha)<sup>7</sup>, während die industrielle Landwirtschaft wirtschaftlich nicht rentabel ist. Bei den Anbausystemen sind Formen konservierender Landwirtschaft zu nennen, die extensive Bewirtschaftung mit Extenso-Anbau oder die graslandbasierte Futterproduktion in gewissen Tierproduktionsbetrieben. Hinter all diesen Bezeichnungen verbirgt sich allerdings

ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher landwirtschaftlicher Praktiken.

Diese hängen direkt davon ab, ob technische Entwicklungen im Zusammenhang mit der Pflanzenzucht, dem Einsatz von Hilfsstoffen oder der Mechanisierung übernommen werden oder nicht. Sie sind aber auch durch die Strategien bestimmt, die

eingesetzt werden, um pedologische und klimatische Prozesse zu regulieren und sich gewissermassen von den damit verbundenen Zwängen zu befreien. Die ultimative Lösung in dieser Hinsicht ist der Hors-sol-Anbau im Gewächshaus, der das Risiko von Ernteausfällen begrenzt. Ebenso beeinflussen räumliche Entwicklungen, die in einer Spezialisierung der Landwirt-

**Abbildung 1**  
Wichtigste Faktoren, die zur Entwicklung der regionalen landwirtschaftlichen Aktivitäten und Anbautechniken beigetragen haben, sowie potenzielle Belastungen und negative Auswirkungen auf den Boden.



schaft zum Ausdruck kommen, und die angebauten Kulturen den Einsatz von Produktionsfaktoren, was positive oder negative Auswirkungen auf die Bodenqualität hat.

Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Faktoren im Zusammenhang mit den Entwicklungen der Schweizer Landwirtschaft seit dem NFP 22 Anfang der 1990er-Jahre. Die Betriebe und Regionen haben sich aufgrund von klimatischen, topografischen, pedologischen, aber auch logistischen, strukturellen oder regionalpolitischen Kriterien spezialisiert. Diese Entwicklung wurde gefördert oder überhaupt erst möglich gemacht von Neuerungen in der Pflanzenzucht, der Mechanisierung und der Technik und bei den Hilfsstoffen. Sie haben zur Lösung gewisser Probleme beigetragen, aber auch dazu geführt, dass Herausforderungen, Belastungen oder negative Auswirkungen nach wie vor bestehen oder neue dazugekommen sind. Dazu zählen die Bodenverdichtung, die Erosion sowie der Verlust an OBS und biologischer Vielfalt, die das NFP 68 genauer untersucht hat.

Laut Bundesamt für Statistik (BFS) verlor die Schweizer Landwirtschaft zwischen 1990 und 2015 zwei Prozent ihrer Produktionsfläche oder 17 000 Hektaren an andere Nutzungen wie Siedlungen, Strassen, Aufforstungen usw. In dieser Zeit verschwanden 40 000 Betriebe und 99 000 Arbeitsstellen (Tab. 1). 40 000 Hektaren offene Ackerfläche werden inzwischen als Grünland oder für andere landwirtschaftliche und nicht landwirtschaftliche Nutzungen verwendet. Verändert hat sich auch der Bestand der immatrikulierten landwirtschaftlichen Fahrzeuge. Ihre Zahl nahm um 17,3 Prozent zu. Der gesamte Motorfahrzeugbestand verzeichnete in dieser Zeit einen Zuwachs von 55,8 Prozent. Der Anteil der landwirtschaftlichen Traktoren mit einem Gesamtgewicht über fünf Tonnen hat um das 60-fache zugenommen. Jeder dritte Traktor gehört heute in diese Kategorie. Dieser zunehmende Maschineneinsatz hängt vor allem mit dem Rationalisierungsbedarf und dem technologischen Fortschritt zusammen, aber auch mit der von den global tätigen Fahrzeugherstellern angestrebten Entwicklung. Der Phosphor-Eintrag

**Tabelle 1**  
Entwicklung der Landwirtschaft von 1990 bis 2015.

Quelle: Bundesamt für Statistik

	Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN, in 1000 ha)					Produktionsstruktur (in 1000)		Einträge (in 1000 t)			
	Total	Offene Acker- flächen	Grün- flächen	Dauer- kulturen	Übrige Nutzungen	Anzahl Betriebe	Anzahl Beschäf- tigte	Anzahl landwirt- schaftliche Fahrzeuge	Stickstoff total	Phosphor total	Wirkstoffe
1990	1067	313	725	22	7	93	254	163	291	46	2,3
2015	1050	273	739	24	14	53	155	191	250	28	2,1
Differenz	-17	-40	+14	+2	+7	-40	-99	+28	-41	-18	-0,2
Veränderung	-2%	-13%	+2%	+9%	+100%	-43%	-39%	+17%	-14%	-39%	-9%

ging stark zurück, weit stärker als jener von Stickstoff und Wirkstoffen (Pflanzenschutzmittel PSM). Diese Entwicklungen führten, je nach Boden-, Klima- oder strukturellen Bedingungen, zu ganz unterschiedlichen Produktionsintensitäten. Insgesamt blieben die Erträge stabil, während die Qualitätsanforderungen gestiegen sind (Qualitätsabgeltungen). Zwar existieren keine langfristigen Daten zum Selbstversorgungsgrad, der Agrarbericht 2017 des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW)<sup>8</sup> zeigt aber, dass die Viehwirtschaft den Hauptpfeiler der Schweizer Landwirtschaft darstellt mit einem Inlandanteil am Konsum tierischer Produkte von 99 Prozent im Jahr 2015. Im gleichen Zeitraum betrug der Inlandanteil am Konsum der pflanzlichen Produkte 42 Prozent. Der Brutto-Selbstversorgungsgrad der Schweizer Landwirtschaft erreichte 2015 59 Prozent, der Netto-Selbstversorgungsgrad – unter Berücksichtigung der Futtermittelimporte – betrug 51 Prozent. In Bezug auf die Energienutzung und den Einsatz von Düngemitteln und PSM wird der Importanteil nicht erhoben.

### 2.3 Aktuelle Problemstellungen

Die Bundesämter publizieren regelmässig Berichte über den Zustand der Landwirtschaft, die aktuellen Herausforderungen und Gefahren. Der Agrarbericht 2014 vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Themen, die landwirtschaftliche Böden betreffen:

- Die Schadstoffbelastung des Bodens lässt sich auf zwei klar identifizierte Quellen zurückführen: Schwermetalle und Nährstoffüberschüsse im Zusammenhang mit importierten Futtermitteln (Kraftfutter, Futterergänzungen) sowie Wirkstoffe und Schwermetalle aus PSM.
- Die Einfuhr von Futtermitteln gewinnt weiter an Bedeutung. Sie verschärft die Ungleichgewichte in den Nährstoffkreisläufen (Phosphor) in Regionen mit Viehwirtschaft und erhöht zudem die Schwermetalleinträge (Kupfer und Zink in Nahrungsergänzungsmitteln). Dieses Problem untersuchte das NFP 69-Projekt MISOTRAG.
- PSM und ihre Rückstände sind aufgrund ihrer (Öko-)Toxizität umstritten. Ihre langfristigen Emissionen und Auswirkungen sind noch immer schlecht dokumentiert. Ein klarer Trend bezüglich ihrer Verwendung konnte nicht beobachtet werden.
- Die Phosphor-(P-)Überschüsse wurden landesweit zwischen 1990 und 2000 stark vermindert. Seit 2004 ist dieser Rückgang jedoch nur noch gering, weil mehr Futtermittel importiert wird, ohne dass der Einsatz mineralischer Düngemittel entsprechend zurückgegangen wäre. Die P-Bilanz ist auf Betriebsebene zwar ausgeglichen. Hinsichtlich des Filtrations- und Reinigungsvermögens des Bodens in gewissen auf die Viehwirtschaft spezialisierten Regionen (Zugersee, Greifensee) sind die Einträge weiterhin zu hoch. Wie das NFP 68-Projekt FRÜHWARNSYSTEM aufgezeigt hat, ist – auf die Parzellen bezogen – die Umgebung von Gebäuden am stärksten belastet<sup>10</sup>. Hingegen ist die Phosphorbilanz grosser Ackerbaubetriebe ohne Viehhaltung eher negativ. Der Transfer zwischen Betrieben mit zu viel und solchen mit zu wenig Nährstoffen ist allerdings noch begrenzt.
- Bei grossen, viehlosen Ackerbaubetrieben ist eine Tendenz zum Humusverlust festzustellen. Diese Entwicklung ist im Zusammenhang mit der Spezialisierung der Betriebe auf einen zu rigiden Abtransport von Ernterückständen und fehlende Transfers von organischen Düngern zwischen den Betrieben (Stroh gegen Gülle) zurückzuführen.
- In den Ackerbaubetrieben werden die Vorschriften zwar eingehalten, die Boden-

bedeckung ist aber bescheiden – durchschnittlich 60 Prozent mit Abweichungen je nach landwirtschaftlichen Praktiken.

Im Bericht zum Bodenschutz in der Landwirtschaft<sup>11</sup> haben das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2016 die Schadstoffbelastung, die Erosion und die Verdichtung als die drei grössten aktuellen Gefahren für die Fruchtbarkeit der Böden in der Schweiz beschrieben.

## 2.4 Bodenfunktionen und Bodenqualität

Einige Probleme präsentieren sich heute ähnlich wie zur Zeit des NFP 22. Mit dem Einbezug der Bodenfunktionen und der Bodenqualität in die Analyse verfolgte das NFP 68 einen innovativen Ansatz. Die Bodenqualität<sup>12</sup>, also die Fähigkeit eines Bodens, seine Bodenfunktionen innerhalb der Grenzen eines Ökosystems zu erfüllen, bringt die Multifunktionalität der Böden ebenso zum Ausdruck wie die Variabilität, die durch die Vielfalt der Böden, aber auch die Nutzungen und die gesellschaftlichen Entscheide geprägt wird. Der Boden erfüllt dabei nicht nur land- und forstwirtschaftliche Produktionsfunktionen, sondern auch Funktionen wie die Reinigung des Wassers oder als Lebensraum. Ein besseres Verständnis der Bodenfunktionen ist insofern von Bedeutung, als sie Ökosystemleistungen erbringen, die zur umfassenden oder teilweisen Lösung aktueller Probleme mobilisiert werden können. Arbeiten im Rahmen des NFP 68<sup>13</sup> verdeutlichen die Bedeutung des Bodens für die Erbringung von Ökosystemleistungen und betonen die mangelnde Berücksichtigung in der Entscheidungsfindung (thematische Synthese TS3 «Eine Bodenagenda für die Raumplanung»<sup>14</sup>). Um die Rolle der Bodenfunktionen aufzuzeigen und ihre Berücksichtigung bei Nutzungsentscheiden zu fördern, konzentrierten sich die NFP 68-

Projekte darauf, diejenigen Eigenschaften und Prozesse des Bodens vertieft zu analysieren, die diesen Funktionen und damit den erwarteten Ökosystemleistungen zugrunde liegen.

In einer landwirtschaftlichen Produktion, die den Boden als natürliche Ressource nutzt, stehen die folgenden Funktionen im Vordergrund:

- Produktionsfunktion: unter anderem Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte und von Trinkwasser
- Regulierungsfunktion: Speicherung, Filterung und Reinigung von Wasser, Nährstoffen, Schwermetallen oder Schadstoffen
- Lebensraum für Mikroorganismen: Mykorrhizierung, symbiotische N-Fixierung, Biokontrolle und Pflanzen

Diese Funktionen sind zentral für die natürliche Fruchtbarkeit des Bodens, die Ernährung und die Gesundheit der Pflanzen. Sie erbringen Leistungen, die es ermöglichen, pflegende Eingriffe in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung – Bodenbearbeitung, Ausbringen von Dünger, Pflanzenschutzmassnahmen – zu begrenzen.

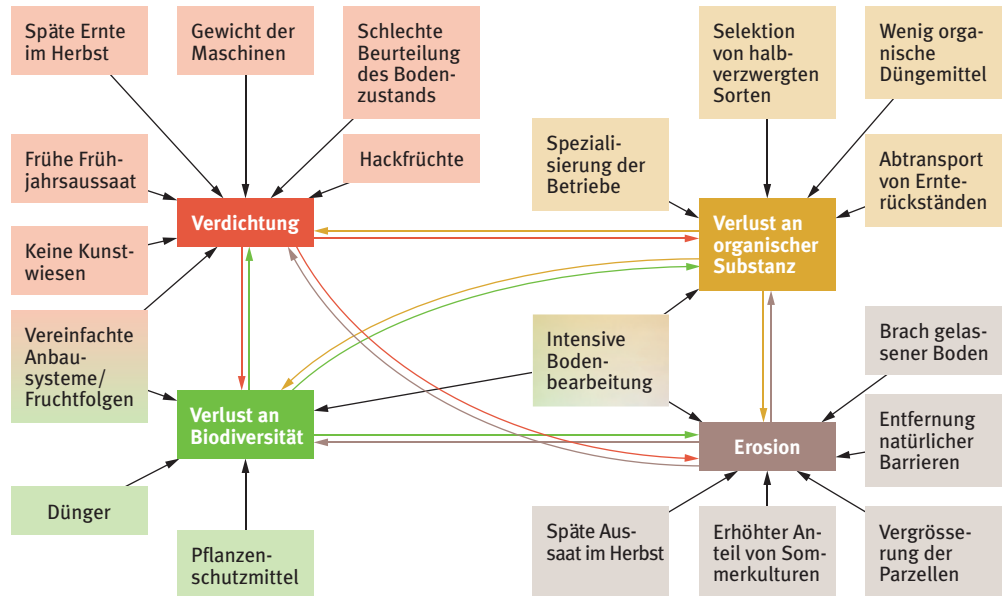
Abbildung 2 zeigt die vier wesentlichen Gefährdungen des landwirtschaftlichen Bodens – Bodenverdichtung, OBS-Verlust, Erosion und Biodiversitätsverlust –, die verantwortlichen Faktoren und die Wechselwirkungen. Während sich NFP 68-Projekte mit der Bodenverdichtung (NFP 68-Projekt BODENVERDICHTUNG) und dem OBS-Verlust (u. a. NFP 68-Projekte KOHLENSTOFFEINTRAG und GRÜNDÜNGUNG) vertieft auseinandergesetzt haben, wurden die Bodenerosion und der Biodiversitätsverlust der Böden nicht untersucht. Diese Gefährdungen werden hier nur kurz angesprochen und in den Kapiteln 4, 5 und 6 näher beleuchtet.

Die Forschungsprojekte des NFP 68 konnten nicht alle Themen abdecken, die die Forschung beschäftigen oder in der Gesellschaft diskutiert werden. Dazu zählen insbesondere die chemischen Belastungen des Bodens (Pestizide, Schwermetalle, Versauerung). Diese Fragestellungen bilden jedoch auch den Hintergrund der verschiedenen Kapitel.

## 3.1 Die Bodenverdichtung: ein heimtückisches Phänomen

Bodenverdichtung stellt eine erhebliche Gefährdung für die Produktivität der modernen Landwirtschaft und andere Funktionen des Bodens dar. Sie tritt beim Einsatz landwirtschaftlicher Maschinen dann auf, wenn deren Gewicht die Tragfähigkeit des Bodens übersteigt. Derzeit existiert in der Schweiz dazu keine grossflächige Überwachung. Schätzungen gehen aber davon aus, dass beispielsweise in der Zentralschweiz ein Drittel der Böden stark verdichtet sind<sup>15</sup>. Seit langem ist bekannt, dass Böden, auf denen Gemüse angebaut wird, für eine Verdichtung anfällig sind. Gegenwärtig leiden jedoch immer mehr auch Böden unter Verdichtungsschäden, die für den Ackerbau oder als Wiesen genutzt werden. Dies ist vor allem eine Folge der immer schwereren Maschinen. Andere Faktoren wie die Spezialisierung der Betriebe, die Vereinfachung der Anbausysteme oder der Fruchtfolge erhöhen die Verdich-

**Abbildung 2**  
Die vier wichtigsten Gefährdungen des Bodens, die in dieser Studie berücksichtigt wurden, Verbindungen zwischen diesen Gefährdungen und den dafür verantwortlichen Faktoren.



## Auswirkungen der Bodenverdichtung

Im Rahmen des NFP 68-Projekts **BODENVERDICHUNG** wurde 2014 eine Versuchsanlage zur Beobachtung der Bodenstruktur eingerichtet («Soil Structure Observatory» [sso] bei Agroscope in Zürich-Reckenholz)<sup>16</sup>. Sie dient dazu, die Entwicklung der Bodenfunktionen nach einer Verdichtung langfristig zu untersuchen und verschiedene Praktiken zur Wiederherstellung der Struktur und der Funktionen des Bodens zu testen. Dabei werden nach der initialen Verdichtung die Wirkungen von vier Bewirtschaftungsverfahren untersucht: Schwarzbrache, Dauerwiese sowie Fruchtfolge mit und Fruchtfolge ohne Bearbeitung (Triticale, Silomais, Winterweizen, Herbstraps). Bei der Schwarzbrache und der Dauerwiese wird der Boden nicht bearbeitet und es werden keine landwirtschaftlichen Maschinen eingesetzt. Bei den Parzellen mit Fruchtfolge lässt sich das Potenzial einer rein biologischen Regeneration (durch Pflanzen und Regenwürmer, ohne Bodenbearbeitung) vergleichen mit dem in der Praxis üblichen Verfahren einer physischen Wiederherstellung durch Bodenbearbeitung (Pflügen), gefolgt vom Anbau einer Kulturpflanze (biologische Regeneration).

tungsgefahr. Risikofaktoren der Fruchtfolge sind in dieser Hinsicht ein hoher Anteil an Hackfrüchten (Kartoffeln, Zuckerrüben usw.), fehlende Kunstwiesen, eine ungeeignete Fruchtfolge oder die Verwendung von Sorten, die im Frühjahr früh gesät werden, wenn die Böden noch feucht sind, oder spät geerntet werden, wenn die Böden bereits wieder mit Wasser gesättigt sind. Der *obs*-Verlust ist ein Faktor, der sich langfristig negativ auswirkt. Hinzu kommt, dass das Wissen über die bodenverdichtende Wirkung der Maschinen fehlt oder der Zustand des Bodens (Feuchtigkeit, Tragfähigkeit) vor den Arbeiten nicht richtig beurteilt wird.

Die Folgen der Verdichtung wurden im NFP 68-Projekt **BODENVERDICHUNG** im Rahmen der Versuchsanlage zur Beobachtung der Bodenstruktur untersucht (Kasten).

### Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Bodens

Die Verdichtung führt zu einer Verformung im Boden und einer Veränderung seiner Struktur, das heisst der räumlichen Anordnung seiner Bestandteile und der Bodenporen. In verdichteten Böden ist der Anteil der Makroporen, die ein rasches

Versickern von Wasser gewährleisten, und von Mesoporen stark reduziert, was die Porosität des Bodens und die Konnektivität der Poren verringert (Abb. 3) und die Bodendichte erhöht. Die Versuchsanlage zur Beobachtung der Bodenstruktur hat gezeigt, dass diese Veränderungen der physischen Eigenschaften des Bodens über den Bereich der Bodenbearbeitung hinaus bis in eine Tiefe von etwa einem halben bis in eine Tiefe von etwa einem halben Meter zu beobachten sind<sup>16</sup>. Sie beeinträchtigen das Transportvermögen für Flüssigkeiten und Gase ebenso wie die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Das Wasserinfiltrationsvermögen der Bodenoberfläche wurde im Versuch in Reckenholz um das Dreifache reduziert<sup>16</sup>. Das bedeutet, dass der Boden nach der Verdichtung praktisch undurchlässig ist, weil seine Oberfläche durch Landmaschinen zusammengepresst wurde. Ebenso wurde der Durchdringungswiderstand in den obersten 30 Zentimetern bereits nach einmaligem Befahren massiv auf rund das Doppelte erhöht (Durchdringungswiderstand von ca. 2,5 MPa) im Vergleich zum nicht verdichteten Bereich der Parzelle. Ein erhöhter Widerstand (ab 2 MPa) vermindert das Wurzelwachstum von Kulturpflanzen jedoch wesentlich<sup>17,18</sup>. Die Verdichtung verändert zudem die chemischen Reaktionen und die Verfügbarkeit



von Nährstoffen, weil sie die Belüftung beeinflusst und die Lebensraumbedingungen für die aeroben Bodenorganismen verschlechtert. Dies führt zu einem Dominoeffekt, der sich auf eine ganze Reihe von Bodenfunktionen auswirkt, die mit der Biodiversität verbunden sind – vom Wasserkreislauf (Absorption, Speicherung, Filtration) über die Nahrungsmittelproduktion bis hin zur Klimaregulierung<sup>19</sup>. Im ersten Jahr nach dem Verdichtungsereignis vermindert sich der Ertrag um 20 bis 80 Prozent. Je nach den ergriffenen Regenerationsmassnahmen schwindet der Einfluss der Verdichtung danach mehr oder weniger schnell.

#### Auswirkungen auf das Wurzelsystem der Pflanzen

Die Bodenverdichtung verändert die Bedingungen für das Wurzelwachstum, was Auswirkungen auf Grösse, Architektur und Anatomie der Wurzeln hat. Das NFP 68-Projekt BODENVERDICHUNG studierte erstmals

die Auswirkungen der Verdichtung auf das Wurzelsystem von Getreide (Triticale) und Soja. Es wies insbesondere nach, dass die Wurzelsysteme in einen verdichteten Boden deutlich weniger tief eindringen. Hinsichtlich der Anatomie wurden je nach Art unterschiedliche Reaktionen beobachtet (Kasten, S. 20).

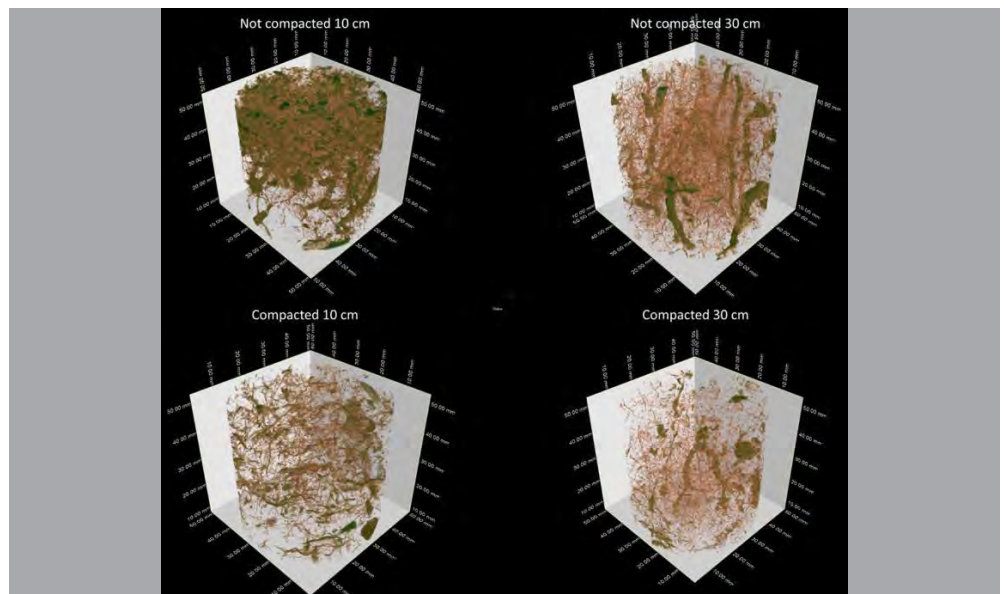
#### Auswirkungen auf Regenwürmer und die mikrobielle Biomasse

Der Versuch in Reckenholz hat zudem gezeigt, dass die Regenwurmpopulation innerhalb von zwei Monaten nach der Verdichtung um mehr als 50 Prozent abnahm (Tab. 2, S. 20)<sup>16</sup>. Dieser Verlust wird auf die erhöhte Mortalität während der Verdichtung und die weniger günstigen Lebensbedingungen danach zurückgeführt. Bei der mikrobiellen Biomasse wurde kein unmittelbarer Effekt beobachtet. Aufgrund der physikalischen Bodenveränderungen sind aber langfristige Auswirkungen zu erwarten, ist doch bekannt, dass anaerobe

#### Abbildung 3

Porosität bei nicht verdichtetem (oben) und verdichtetem Boden (unten) in einer Tiefe von 10 Zentimetern (links) und 30 Zentimetern (rechts) zwei Wochen nach der initialen Bodenverdichtung.

NFP 68-Projekt BODENVERDICHUNG<sup>16</sup>.



Bakterien, also solche, die an eine geringe Sauerstoffverfügbarkeit angepasst sind, in verdichteten Böden selektioniert werden<sup>20</sup>.

#### a) Regenerationsmechanismen eines verdichteten Bodens

Im Gegensatz zu den Auswirkungen der Verdichtung auf die Bodenprozesse sind die an der Regeneration verdichteter Böden

beteiligten Mechanismen ebenso wie die ökologischen und ökonomischen Kosten der Verdichtung noch relativ wenig dokumentiert. Die ökologischen Kosten hängen mit den verminderten Bodenfunktionen zusammen, die ein verdichteter Boden erbringen kann, während die ökonomischen Kosten dem Ertragsausfall und den indirekten Kosten – höherer Düngemittel- und

**Tabelle 2**  
Regenwurm-Biomasse in nicht verdichtetem und verdichtetem Boden zwei Monate nach der Verdichtung.

Kategorien (Kap. 7.1.3, S. 57)	Kontrollgruppe nicht verdichteter Boden	Verdichteter Boden	Verdichteter Boden/ Kontrollgruppe
	kg/ha		
Epigäische Arten	115	35	0,30
Endogäische Arten	476	155	0,33
Anözische Arten	1484	605	0,41
Total Biomasse	2075	794	0,38

NFP 68-Projekt BODENVERDICHUNG<sup>16</sup>.

### Auswirkungen der Bodenverdichtung auf das Wurzelsystem der Pflanzen

Die Bodenverdichtung beeinflusst die Architektur und Anatomie der Wurzeln von Triticale und Soja stark, wobei die Auswirkungen je nach Art unterschiedlich sind (Abb. 4)<sup>21</sup>. Bei Triticale wurde die Entwicklung des Wurzelsystems deutlich eingeschränkt und die Durchwurzelungstiefe war geringer als in nicht verdichteten Böden. Zudem waren eine starke Verminderung der Anzahl Kronenwurzeln (Nodalwurzeln) und ein stärkeres oberflächliches Wurzelwachstum als unter nicht verdichteten Bedingungen zu beobachten. Die Verdichtung führte zudem zu einer verminderten Verzweigung der Wurzeln und zu dickeren Wurzeln, sodass diese einfacher in verdichtete Schichten vordringen konnten. Die Vergrößerung des Wurzeldurchmessers geht einher mit einer Vergrößerung der Oberfläche der Wurzelrinde (Wurzelkortex), wobei die Entwicklung des Zentralzylinders nicht von der Verdichtung beeinflusst wurde. In diesem zentralen Teil der Wurzeln befinden sich die Leitgefäße. Im Kortex führte die Verdichtung zur Bildung von Aerenchymen, einem Gewebe, das die Durchlüftung der Wurzeln ermöglicht. Diese anatomische Anpassung gewährleistet die Sauerstoffzirkulation bis in die Wurzelspitzen und ermöglicht dadurch, dass die Pflanzen trotz der beschränkten Verfügbarkeit von Sauerstoff in verdichteten Böden weiterhin wachsen.

Bei Soja zeigten sich die verdichtungsbedingten Veränderungen des Wurzelsystems in Bezug auf die Architektur (Vergrößerung des Durchmessers) und die Anatomie (Bildung von Aerenchymen) im Jugendstadium ebenfalls. Allerdings waren sie in der voll entwickelten Wurzel aufgrund des Wachstums von Seitenwurzeln nicht mehr zu erkennen. In einem späteren Entwicklungsstadium wirkte sich die Bodenverdichtung hauptsächlich auf das Wachstum der Pfahlwurzel aus, die einen kleineren Durchmesser und eine weniger grosse Durchwurzelungstiefe aufwies als unter nicht verdichteten Bedingungen. Die Anzahl Adventiwurzeln bei Soja wurde von der Verdichtung nicht beeinflusst. Auf der anatomischen Ebene waren die Oberfläche des Zentralzylinders und des Kortex der Pfahlwurzel in verdichteten Böden verkleinert.

Energiebedarf für die Bodenbearbeitung usw. – entsprechen. Folgekosten, die ausserhalb der verdichteten Parzelle etwa aufgrund von erosionsbedingten Sedimentansammlungen und Klimaveränderungen im Zusammenhang mit der Produktion von  $N_2O$  usw. anfallen, sind ebenfalls zu berücksichtigen, und zwar von der Phase der Verdichtung bis zur vollständigen Regeneration aller Bodenfunktionen. Zu diesem Zweck ist es wichtig zu wissen, wie schnell sich die Bodenstruktur regeneriert. Bis anhin konzentrierten sich die meisten Untersuchungen auf den Ertrag<sup>22,23</sup>. Erst seit kurzem befassen sich einige wenige Studien mit der Struktur des Bodens und mit seinen Transportfunktionen<sup>24–26</sup>.

Zu unterscheiden ist die Regeneration aufgrund biotischer Mechanismen (Pflanzenwurzeln, Bodenfauna) von jener aufgrund abiotischer Verfahren (Bodenbearbeitung mit Landmaschinen, Phänomene des Schrumpfens und Quellens). Im Reckenholz-Versuch wird die Regeneration

durch die Bodenbearbeitung in einer klassischen Fruchtfolge mit einer rein biologischen Regeneration verglichen. Das NFP 68-Projekt **BODENVERDICHUNG** untersuchte insbesondere die Durchmischung des Bodens (Bioturbation) durch Pflanzenwurzeln und Regenwürmer.

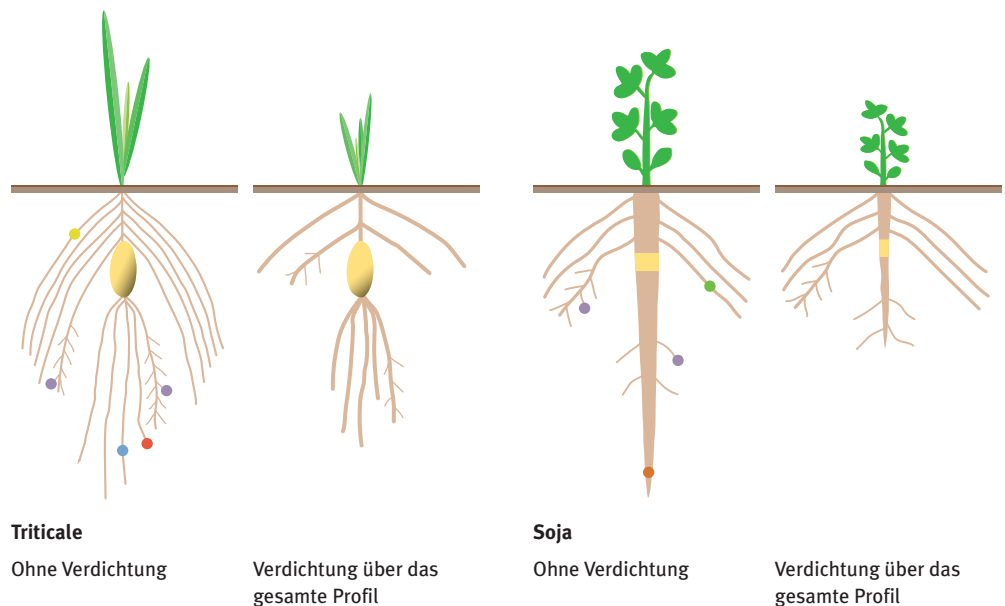
### Bodenregeneration durch Bodenbearbeitung und Anbau

Die ersten Ergebnisse des Reckenholz-Versuchs zeigen, dass durch Pflügen die Lagerungsdichte der bearbeiteten Schicht (0–30 cm) auf ein ähnliches Niveau gesenkt werden kann wie vor der Verdichtung. Die Bodenbearbeitung trägt auch dazu bei, die Makroporosität des Bodens teilweise zu regenerieren, wodurch sich die Luftdurchlässigkeit verbessert. In den tieferen Schichten werden diese Eigenschaften durch die Bodenbearbeitung nicht regeneriert, sodass eineinhalb Jahre nach der Verdichtung der Wasser- und Gastransport durch die Bodenbearbeitung trotz deutlich

**Abbildung 4**  
Schematische Darstellung des Wurzelsystems von Triticale und Soja in nicht verdichteten und verdichteten Böden

(angepasst nach<sup>21</sup>)

- Nodalwurzel
- Seitenwurzel
- Primärwurzel
- Keimwurzel
- Pfahlwurzel
- Adventivwurzel



verändertem Zustand des Bodens nicht wiederhergestellt war. Angesichts der Veränderungen der Feinstruktur des Bodens ist eine intensive Bodenbearbeitung nur eine beschränkte und vorübergehende Lösung.

Im NFP 68-Projekt **BODENVERDICHTUNG** wurde auch eine neue Methode zur Bodenregeneration getestet, die darin besteht, mithilfe von Metallstangen künstliche Poren zu schaffen (Abb. 5). Dieser Test hat gezeigt, dass die Wurzeln die Fähigkeit besitzen, aktiv in Richtung von Stellen zu wachsen, die einen geringeren physischen Widerstand bieten und eine höhere Sauerstoffkonzentration aufweisen. Dabei wurden artenspezifische Unterschiede im Verhalten nachgewiesen<sup>27</sup>. Während gewisse Arten den geringeren Widerstand innerhalb von Makroporen nutzen, um Wurzeln zu bilden (Mais), durchqueren andere diese Poren mehrheitlich nur und profitieren dabei von einer zusätzlichen Sauerstoffquelle (Soja, Weizen). Eine Perforation

des Bodens wirkt sich jedoch unabhängig von der Art günstig auf die oberirdische Biomasse und die Blattfläche aus<sup>27</sup>. Die Tests erfolgten bisher allerdings nur in der Klimakammer oder auf einer begrenzten Feldfläche. Es würde sich lohnen, sie in der Praxis als Alternative zu Regenerationsversuchen durch Bearbeitung oder Auflockerung und als potenzielle sanfte Technologie durchzuführen.

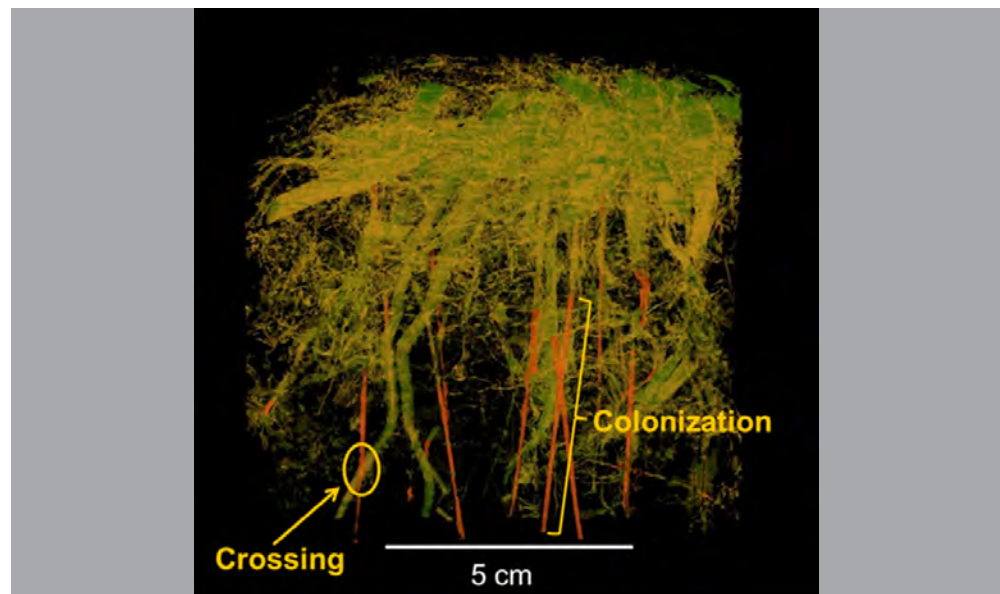
### Bodenregeneration durch biotische Mechanismen

Das Wachstum der Pflanzenwurzeln und die Aktivität der Regenwürmer tragen zur Wiederherstellung der Bodenstruktur bei. Diese sogenannte biotische Regeneration der Bodenstruktur gilt als schnellste Methode: Sie verläuft 20-mal schneller als die Regeneration über gewisse abiotische Prozesse (Quellen und Schrumpfen). Sie wird wahrscheinlich verbessert, wenn der Wassergehalt des Bodens ähnlich oder höher ist als die Feldkapazität (maximale

Abbildung 5

Wurzel, die eine künstlich erzeugte Makropore durchquert (orange; Crossing), und Wurzel, die in der Makropore wächst (Colonization).

Foto: Tino Colombi



---

## Fazit – Bodenverdichtung

- Bodenverdichtung vermindert die Entwicklung der Wurzeln und den Ernteertrag.
  - Die Bodenstruktur ist insofern eine der fragilsten Eigenschaften des Bodens, als sie in wenigen Minuten zerstört wird und auch über mehrere Jahre nur schwer wieder aufgebaut werden kann.
  - Durch Bodenbearbeitung werden die Wasser- und Gastransporteigenschaften auf der mikroskopischen Ebene nicht wiederhergestellt.
  - Pflanzen und Regenwürmer spielen eine entscheidende Rolle bei der Wiederherstellung der Porosität des Bodens.
- 

Speicherfähigkeit des Bodens nach Abfließen des freien Wassers), da dies den mechanischen Widerstand des Bodens reduziert und Wurzeln und Regenwürmern das Durchdringen erleichtert.

Das NFP 68-Projekt **BODENVERDICHUNG** untersuchte die Fähigkeit von Wurzeln und Regenwürmern, in verdichtete Böden vorzudringen. Es hat nachgewiesen, dass Pflanzen ein höheres Durchdringungsvermögen besitzen als Regenwürmer und somit weniger von der Verdichtung betroffen sind. Aufgrund ihres geringeren Durchmessers brauchen Pflanzen weniger Energie, um eine bestimmte Längeneinheit in den Boden vorzudringen, aber mehr Energie je Hohlraumvolumen. Zudem erforderte das langsame Vordringen der Pflanzen im Vergleich zu den Regenwürmern weniger Energie<sup>28</sup>.

### b) Regenerationszeit

Aufgrund geringer Erfahrungswerte aus dem Reckenholz-Versuch lässt sich der Zeitbedarf für die Regeneration der Bodenfunktionen erst schwer einschätzen. Ausgehend von einer linearen Erholung der Bodenfunktionen dürfte die Regenerationszeit zwei bis vier Jahre betragen. Gewisse Prozesse entwickeln sich jedoch nicht linear: Die Regeneration schwächt

sich nach einer ersten Phase mit einer raschen Verbesserung ab<sup>29</sup>. Aufgrund dieses Verlaufs ist mit einer längeren Regenerationszeit in der Grössenordnung von zehn Jahren zu rechnen. Die Regeneration des Ertrags verläuft entsprechend, wobei aber der effektive Ertrag auch zehn Jahre nach der Verdichtung noch vermindert bleibt (um rund 1,5%)<sup>30</sup>. Bei einer Verdichtung des Untergrundes verläuft die Regeneration langsamer und führt zu einer dauerhaften Produktionsverminderung<sup>23</sup>.

## 3.2 Nachhaltige Schäden durch den Verlust an organischer Bodensubstanz

Organische Bodensubstanz (obs; Humus) entsteht aus frischer organischer Substanz (pflanzlichen und tierischen Abfällen), die auf den Boden gelangt und vor allem durch Bodenmikroorganismen zersetzt und umgewandelt wird. Die obs spielt eine grundlegende Rolle im Boden: Sie trägt zur Speicherung von Nährstoffen und Wasser bei, fördert die Strukturierung des Bodens und nährt die Bodenorganismen. Zwar gilt der obs-Gehalt als eine kurzfristig relativ stabile Eigenschaft, in vielen landwirtschaftlichen Böden ist jedoch eine tendenzielle Abnahme zu beobachten. Aufgrund seiner zentralen Rolle kann sich jede Verringerung des obs-Gehalts auf sämtliche Bodenfunktionen auswirken und die landwirtschaftliche Produktion langfristig gefährden. Es ist deshalb wichtig, Anbau-praktiken zu übernehmen, die es ermöglichen, den obs-Gehalt zu erhalten oder zu steigern und jene Praktiken einzuschränken, die den Verlust beschleunigen.

Mehrere Langzeitversuche in der Schweiz berichten über eine obs-Abnahme (Tab. 3, S. 24) – ein Ergebnis, das verschiedene Studien des NFP 68 bestätigen. Es wurden mehrere Faktoren identifiziert, die für den Rückgang des obs-Gehalts in landwirt-

schaftlichen Böden verantwortlich sind. Die Spezialisierung der Betriebe führte in der Regel zu einer räumlichen Trennung der Ackerflächen von der Viehwirtschaft. Dies, kombiniert mit dem erleichterten Zugang zu künstlichen Düngemitteln, veranlasste zahlreiche Betriebe dazu, sich für eine rein mineralische Düngung auf Kosten von Hofdünger zu entscheiden. Mineralische Düngemittel versorgen die Pflanzen zwar mit gewissen Nährstoffen und regen damit das Wachstum rasch an. Allerdings ermöglichen sie nicht, den obs-Verlust durch Mineralisierung zu kompensieren. Andere Faktoren wie der systematische Abtransport von Getreidestroh oder das Fehlen von Wiesen in der Fruchtfolge verstärken den obs-Verlust. Derzeit verfügen die Betriebe über keinerlei Anhaltspunkte für die Beurteilung der Gefährdung durch diese Praktiken. Dies wäre jedoch wichtig, wurde doch im Projekt «Sol Vaud» festgestellt, dass 86 Prozent der viehlosen Betriebe

ihr Stroh exportieren und nur ein Drittel von ihnen diesen Verlust durch die Rücknahme von Mist ausgleichen<sup>35</sup>. Dagegen importieren die Hälfte der Betriebe mit Viehhaltung Stroh und drei Viertel exportieren keine Gülle. Hinzu kommt, dass die intensive Bodenbearbeitung die Mineralisierung der obs beschleunigt und damit langfristig zu einer Verringerung des obs-Gehalts beiträgt.

Das NFP 68-Projekt KOHLENSTOFFEINTRAG untersuchte das Wurzelsystem von Ackerpflanzen, da 30 bis 90 Prozent des Kohlenstoffs (C) über die Wurzeln in den Boden gelangen<sup>36</sup>. Ausserdem ist C aus Wurzeln gleichmässiger in den verschiedenen Schichten verteilt und beständiger als C aus oberirdischen Pflanzenteilen<sup>37</sup>. Es wurde nachgewiesen, dass das Verhältnis von unterirdischem zu oberirdischem C je nach Kulturpflanze ganz unterschiedlich ist, wobei der unterirdische Anteil bei

**Tabelle 3**  
obs-Entwicklung in Schweizer  
Langzeitversuchen (Anhang 1,  
S. 73).

Versuch	Ort	Tongehalt %	Fruchtfolge (Jahre)	Boden- bearbeitung	Düngung	OBS-Gehalt		Anzahl Jahre zwischen den beiden Analysen	Publikation
						Beginn %	Ende %		
P29C – Boden- bearbeitung (Tonboden)	Changins VD	48	4	Pflügen	Dünger	4,8	3,9	44	<sup>31</sup>
P29C – Boden- bearbeitung Schluffboden	Changins VD	25	4	Pflügen	Dünger	2,6	2,1	44	<sup>31</sup>
P24A – Bearbeitung Düngemittel	Changins VD	14	5	Pflügen	Dünger	2,0	1,3	33	<sup>32</sup>
DOK – Anbausystem	Therwil BS		7		Dünger	2,6	2,2	20	<sup>33</sup>
ZOFE – Düngung	Reckenholz ZH	14	8	Pflügen	Dünger	2,7	2,1	60	<sup>34</sup>

Weizen höher ist als bei Mais oder Soja. Ausserdem steigt die Produktion von C in den oberirdischen Pflanzenteilen mit zunehmender Düngemenge (ZOFFE-Versuch; Anhang 1, S. 73) und ist in einem herkömmlichen System höher als im biologischen System des DOX-Versuchs (Anhang 1, S. 73). Hingegen wurde kein Einfluss der Düngung auf den Eintrag von Boden-C durch die Wurzeln und die Rhizodeposition beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Düngung und das Bewirtschaftungssystem keine Hebel sind, mit denen sich der C-Eintrag über die Wurzeln erhöhen lässt. Das NFP 68-Projekt KOHLENSTOFFEINTRAG hat zudem gezeigt, dass die Sortenzüchtung zu einer sukzessiven Abnahme der Wurzeltiefe und der Produktion von Biomasse durch die Einzüchtung von Halbzergwuchs-Genen (Introgression) geführt und damit zu einer Verringerung der OBS-Einträge beigetragen hat. Eine Rückkehr zu älteren Sorten könnte somit eine Möglichkeit sein, wie der OBS-Eintrag durch die Kulturen erhöht werden kann. Weitere Lösungsvorschläge werden in Kapitel 4 beleuchtet.

### 3.3 Erosion: ein nach wie vor ungelöstes Problem

Erosion zeichnet sich aus durch den Verlust von Boden durch Wasser oder Wind. Mit einer intensiven Bewirtschaftung der Böden und der Beseitigung natürlicher Barrieren (Bäume, Hecken) trägt die Landwirtschaft stark zu diesen Verlusten bei. Die Vergrösserung der Parzellen nach der Zusammenlegung von Grundstücken, die Umwandlung von Naturwiesen in Kulturland, dessen Boden auf unbestimmte Zeit brach bleibt, späte Aussaaten im Herbst, ein zunehmender Anteil früher Sommerkulturen, die den Boden erst spät bedecken, eine intensive Bodenbearbeitung oder auch ein Verlust an OBS verschärfen das Problem.

Erosion beeinträchtigt die landwirtschaftliche Produktion, weil die Schäden oft irreversibel sind. Denn jeder Verlust an OBS ist verbunden mit einem Verlust an OBS und Nährstoffen und einer Verminderung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Die Schäden greifen zudem über die direkt von der Erosion betroffene Zone hinaus: Wasser und Sedimente fliessen in Nachbarparzellen, Infrastrukturen werden beschädigt oder Wasserläufe verschmutzt.

In der Schweiz führt die Erosion zu einem Bodenabtrag auf Ackerland von durchschnittlich 2,1 Tonnen pro Hektare und Jahr<sup>38</sup>. Auf Basis eines Modells und von Standortfaktoren wie Relief, Bodeneigenschaften und Niederschlag wurde eine hoch aufgelöste Erosionsrisikokarte im 2 × 2-Meter-Raster für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz erstellt<sup>39</sup>. Mit ihr liess sich nachweisen, dass 44 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) in der Talzone von Erosion bedroht sind. Die Erosionskarte ermöglicht es, exponierte Zonen rasch zu identifizieren und notwendige Massnahmen einzuleiten. Neben den Ackerflächen können auch alpwirtschaftliche Nutzflächen von Erosion bedroht sein, oft aufgrund der Beweidung. Angesichts drohender irreversibler Erosionschäden sind Präventionsmassnahmen von höchster Bedeutung. Einige Lösungsansätze werden in Kapitel 4 diskutiert.

### 3.4 Die Biodiversität der Böden: ein Schatz, den es zu bewahren gilt

Im Bericht zum Zustand der Biodiversität in der Schweiz hält das BAFU fest, dass sie nicht zufriedenstellend ist<sup>40</sup>. Nicht nur sind natürliche oder extensiv bewirtschaftete Flächen verloren gegangen. Auch Ackerflächen bieten wegen der Vereinheitlichung der Vegetation und der Anwendung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln

keinen günstigen Lebensraum mehr für die biologische Vielfalt. So schwächt der regelmässige Einsatz von Herbiziden die Ackerbegleitflora: 2017 wurden bereits 42 Prozent ihrer Arten als gefährdet eingestuft. Der Einsatz von systemisch wirkenden Insektiziden erhöht den Druck auf Insekten, vor allem auf die blütenbesuchenden Tiere. Andere landwirtschaftliche Faktoren wie die Bodenverdichtung oder der *obs*-Verlust können insbesondere Bodenorganismen negativ beeinflussen. Bis anhin ist der Biodiversitätsverlust wahrscheinlich aufgrund der Komplexität und Vielfalt der Bodengemeinschaften nur wenig dokumentiert. Im NFP 68 war kein Projekt spezifisch diesem Thema gewidmet. Hingegen wurde der Einfluss einiger landwirtschaftlicher Praktiken auf gewisse Organismen genauer untersucht.

Der Boden zählt zu den grössten Reservoiren der Artenvielfalt. Schätzungen zufolge enthält ein Gramm Boden Millionen von Bakterien, die mehreren Millionen

verschiedenen Arten angehören<sup>41</sup>. Hinzu kommen zahlreiche Pilze, Springschwänze, Nematoden, Gliederfüsser (Arthropoden) und Regenwürmer (Abb. 6)<sup>42</sup>. Diese Bodenorganismen tragen zur Erfüllung zahlreicher Bodenfunktionen bei. Der zahlenmässige Rückgang und die schwindende Artenvielfalt können also negative Auswirkungen auf die Leistungen haben, die vom Boden erwartet werden.

Die Makrofauna, zu der die anözischen Regenwürmer, die tiefe, senkrechte Wohnröhren bauen, zählen, übt eine durchwühlende und durchmischende Funktion aus (Bioturbation). Diese Tiere bringen die *obs* von den oberflächlichen Schichten in die Tiefe und transportieren mineralische Stoffe an die Oberfläche. Die Röhren, die sie dabei bilden, spielen eine zentrale Rolle für die Belüftung, die Wasserspeicherung und die Durchlässigkeit des Bodens. Zur Megafauna zählende Tiere wie Wühlmäuse oder Maulwürfe graben auch grössere Gänge.

Durch die Einnahme mineralischer und organischer Stoffe sind Regenwürmer und Mikroarthropoden massgeblich an der Bildung von Aggregaten beteiligt. Die Aggregatbildung wird zudem durch Pilzfäden und Pflanzenfasern begünstigt. Bakterien und Pilze sondern Polysaccharide ab, die als «Klebstoff» dienen und die Aggregate umhüllen.

Die Mineralisierung und Humifizierung von *obs* hängt ebenfalls von einer ganzen Reihe von Bodenorganismen ab<sup>43</sup>. Die Makrofauna zerteilt die frische organische Bodensubstanz und beginnt mit ihrer Zersetzung, die von den Mikroorganismen weitergeführt wird.

Mehrere Organismen tragen über symbiotische Beziehungen auch direkt zur Ernäh-

**Abbildung 6**  
Tausendfüsser spielen eine wichtige Rolle als Humusbildner.

Foto: iStockphoto





rung der Pflanzen bei (biologische Bindung von Luftstickstoff, Mykorrhizierung).

Die Bodenorganismen interagieren miteinander, entweder durch Prädation oder Konkurrenz. So können die Populationen im Gleichgewicht gehalten werden. Ausserdem stellen sie die Zersetzung von Aas sicher. Schliesslich verbreiten die Mes- und die Makrofauna auch Sporen und Bakterien.

Neben diesen zahlreichen Funktionen, die zur Nahrungsmittelproduktion beitragen, ist der Boden auch Ursprung von Krankheiten, Schädlingen und Unkräutern. Er kann auch Quelle antibiotischer Resistenzgene sein, die auf den Menschen übertragen werden können. Die Antibiotikaresistenz gilt heute als eines der grossen

Probleme der öffentlichen Gesundheit. In organischen Düngern (Gülle und Mist) von mit Antibiotika behandelten Tieren wurden Resistenzgene nachgewiesen<sup>44</sup>. Solche Dünger werden auf die Felder ausgetragen. Das NFP 68-Projekt ANTIBIOTIKARESISTENZEN befasste sich mit der Bedeutung von Resistenzgenen in Schweizer Böden und den Auswirkungen der Bewirtschaftungsmethoden auf die Resistenzdynamik. Gemäss diesen Ergebnissen enthalten die untersuchten Böden sehr unterschiedliche Resistenzgene, jedoch nur in sehr geringer Menge. Sie stellen demnach keine Gefahr für die menschliche Gesundheit dar. Die Präsenz von Resistenzgenen war nach dem Austragen von Gülle allerdings stark erhöht, erreichte nach einigen Wochen jedoch wieder das ursprünglich geringe Niveau<sup>45</sup>.

#### 4.1 Bodenschutz durch reduzierte Bodenbearbeitung

Die konservierende Landwirtschaft verfolgt drei Grundsätze, um die landwirtschaftlich bedingte Degradation der Böden zu vermindern und ihre Fruchtbarkeit langfristig zu verbessern: schonende Bodenbearbeitung, ganzjährige Bodenbedeckung durch Kulturen oder Ernterückstände und eine vielfältige Fruchtfolge. Pflügen ermöglicht eine effiziente Kontrolle von Unkräutern, das Einarbeiten von Hofdünger in den Boden und beschleunigt gleichzeitig die *obs*-Mineralisierung. Eine intensive Bodenbearbeitung führt somit langfristig zu einem tieferen *obs*-Gehalt. Landwirtinnen und Landwirte praktizieren deshalb heute zunehmend eine reduzierte Bodenbearbeitung oder gar die Direktsaat. Die reduzierte Bodenbearbeitung hat zahlreiche direkte oder indirekte Vorteile, die mit der grösseren Menge von Ernterückständen auf der Bodenoberfläche zusammenhängen. Sie ermöglicht es, die Fruchtbarkeit des Bodens zu schützen, seine Tragfähigkeit zu verbessern, die Erosion und den Oberflächenabfluss einzuschränken und die biologische Aktivität zu bewahren<sup>46</sup>.

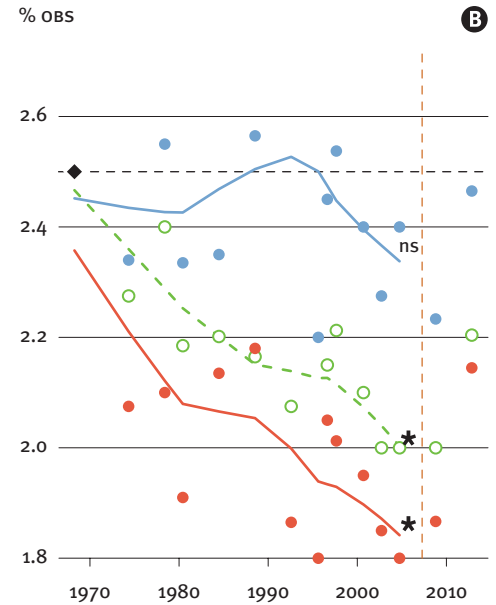
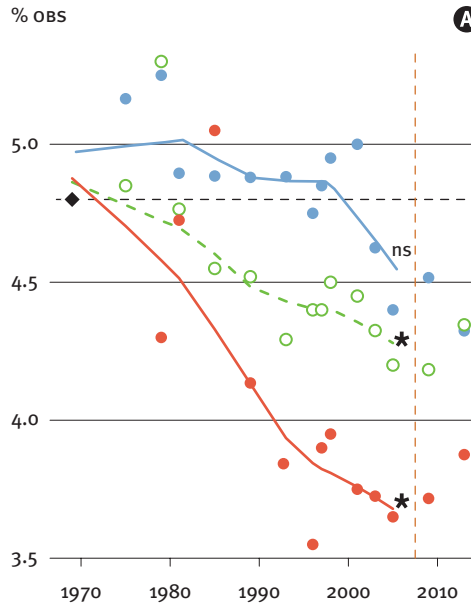
Das NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG untersuchte den Einfluss der Bodenbearbeitung auf verschiedene Bodeneigenschaften im Langzeitversuch P29C in Changins VD. In diesem wurden vier Methoden verglichen, die seit 1969 eingesetzt werden: Pflug (20–25 cm), tiefe Bodenbearbeitung ohne Drehung (20–25 cm), oberflächliche Bodenbearbeitung ohne Drehung (10–15 cm) und minimale Bodenbearbeitung (5–8 cm). 2007 wurde die oberflächliche Bodenbearbeitung ohne Drehung durch die Direktsaat ersetzt. Bei Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung fielen die Erträge ähnlich hoch aus wie bei einer Bearbeitung mit Pflug<sup>31</sup>, während die Direkt-

saat weniger Ertrag brachte. Allerdings sind bis anhin erst wenige Daten verfügbar. Mehrere Studien haben Ertragsrückgänge während der ersten Jahre nach der Umstellung nachgewiesen<sup>47,48</sup>. Dieser Rückgang ist vor allem darauf zurückzuführen, dass es eine gewisse Zeit dauert, bis das System angepasst ist und sich die Landwirtinnen und Landwirte die neuen Techniken angeeignet haben<sup>48,49</sup>. Nach einigen Jahren erreichen die Erträge in der Regel das frühere Niveau. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Anbausystemen ist die Anzahl Interventionen. Sie ist bei einer minimalen Bearbeitung deutlich tiefer als beim Pflügen (etwa dreimal weniger), bei der Direktsaat sogar noch tiefer. Die Intensität der Störungen ist bei einer minimalen Bodenbearbeitung somit viel weniger hoch. Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass der Boden bei ungünstigen Feuchtigkeitsbedingungen bearbeitet wird. Das Risiko einer Bodendegradation wird damit reduziert.

Die langfristige Beobachtung hat auch gezeigt, dass durch eine reduzierte Bodenbearbeitung der *obs*-Verlust begrenzt werden kann. Während beim Pflügen der *obs*-Gehalt der Oberflächenschicht (0–20 cm) in 44 Jahren stark gesunken ist und bei Tonboden (48% Ton) von 4,8 auf 3,9 Prozent und bei Lehmboden (25% Ton) von 2,6 auf 2,1 Prozent abgenommen hat, war der Rückgang bei einer minimalen Bodenbearbeitung nicht signifikant (0,5% bei Tonboden und 0,1% bei Lehmboden, Abb. 7). Zudem führt eine reduzierte Bodenbearbeitung zu einer hohen *obs*-Konzentration an der Bodenoberfläche (Abb. 8)<sup>50–53</sup>, weil die Ernterückstände an der Oberfläche verbleiben und nicht beim Pflügen in die Tiefe eingearbeitet werden. Die *obs* an der Oberfläche ist von grösserer Bedeutung als jene in tieferen

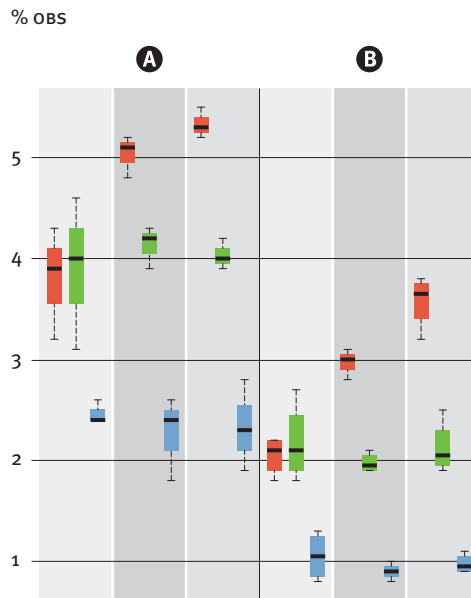
**Abbildung 7**  
Entwicklung des obs-Gehalts im P29C-Versuch in Changins VD 1970–2016 nach Bodenbearbeitung und Bodentyp, angepasst nach<sup>31</sup>.

- A** Tonboden
- B** Schluffboden
- Pflug
- Grubber/Direktsaat
- minimale Bodenbearbeitung
- Einführung von Gründüngungen
- ◆ OBS-Gehalt zu Beginn des Versuchs im Jahr 1969
- Versuchs im Jahr 1969
- ns nicht signifikante Trends
- \* signifikante Trends



**Abbildung 8**  
Verteilung des obs-Gehalts im P29C-Versuch in Changins VD 2015 nach Tiefe, Art der Bodenbearbeitung (Pflügen, Direktsaat und minimale Bodenbearbeitung) und Bodentyp, angepasst nach<sup>31</sup>.

- A** Tonboden
- B** Schluffboden
- Pflug
- Direktsaat
- minimale Bodenbearbeitung
- 0–5 cm
- 5–20 cm
- 20–50 cm



Schichten, weil sie direkt zur Erosionsprävention beiträgt und die Versickerung von Wasser verbessert<sup>54</sup>. Ein ähnliches Bild zeigte sich auch bei der Direktsaat: Offenbar genügen sieben Jahre Direktsaat, um den Bodenzustand zu verbessern.

Eine reduzierte Bodenbearbeitung kann allerdings auch Nachteile mit sich bringen, insbesondere eine höhere Unkrautdichte. Entsprechende Bewirtschaftungssysteme basieren zudem oft auf einem regelmäßigen Einsatz von Herbiziden. Auch kann eine reduzierte Bodenbearbeitung die Ausbreitung von Krankheiten wie der Pilzkrankheit Fusariose fördern. Pflügen gilt oft als bestes Mittel zur Eindämmung einer Krankheitsübertragung zwischen zwei Kulturen. Entsprechend ist es wichtig, eine reduzierte Bodenbearbeitung mit anderen Verfahren zu kombinieren, die eine Ausbreitung von Unkräutern und Krankheiten verhindern, beispielsweise durch den Anbau von Zwischenkulturen.

## 4.2 Zwischenkulturen: Pflanzen im Dienste des Bodens

Zwischenkulturen werden zwischen zwei Hauptkulturen angebaut und bleiben mehr oder weniger lang bestehen: je nach Kulturen in der Fruchtfolge zwischen wenigen Tagen und mehreren Monaten. Zwischenkulturen werden nicht geerntet, sondern wegen ihrer Ökosystemleistungen angebaut, beispielsweise zur Reduktion der Nitratauswaschung, zur Stickstoffzufuhr für die Folgekultur, als Erosionsschutz oder zur Kontrolle von Schädlingen und Unkräutern. Je nach angestrebtem Hauptziel variiert die Bezeichnung: So spricht man etwa von nitratbindenden Zwischenkulturen, wenn das Ziel darin besteht, überschüssiges Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) zu binden, um Verluste durch Auswaschung zu vermindern. Zwischenkulturen werden als «Gründünger» bezeichnet, wenn sie prioritär Nährstoffe für die Folgekultur liefern sollen, während «Bodenbedeckungen» in erster Linie

dem Schutz der Bodenoberfläche vor Erosion dienen.

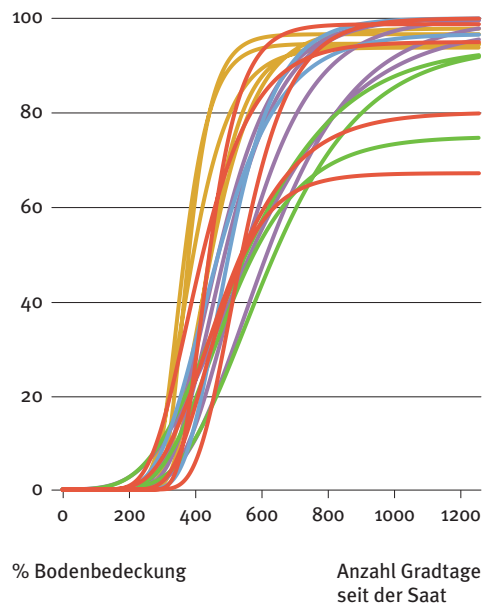
Zwischenkulturen schützen die Bodenoberfläche während einer Zeit, in der der Boden in der Regel brachliegt, und ermöglichen so eine Verminderung der Erosionsrisiken. Für einen wirksamen Schutz wird allgemein eine Mindestbedeckung des Bodens von 30 Prozent empfohlen<sup>55</sup>. Im Rahmen des NFP 68-Projekts GRÜNDÜNGUNG wurde in Changins ein Screening von zwanzig Gründungsarten unter nichtlimitierenden Bedingungen (Bodenbearbeitung vor Aussaat, Vorkultur Luzerne) durchgeführt: Alle getesteten Arten überschritten diesen Grenzwert der Bodenbedeckung sehr rasch und erreichten nach einem Monat Wachstum oft eine Abdeckung von 100 Prozent (Abb. 9)<sup>58</sup>. Zwar wurde in zahlreichen Versuchen am gleichen Standort in der Regel ein hoher Grad der Bodenbedeckung beobachtet<sup>56</sup>, doch zeigte sich auch, dass die Anbautechnik und die Wahl der Pflanzen bei gewissen Wachstumsbedingungen für einen guten Bodenschutz von grosser Bedeutung sind.

Das Wurzelsystem der Zwischenkulturen ist ebenfalls ein wesentliches Element für den Bodenschutz, weil es die Bodenoberfläche stabilisiert. Werden die Pflanzen der Zwischenkultur zerstört, hinterlassen ihre Wurzeln Makroporen im Boden, die als Durchflusskanäle für Wasser dienen und damit den Oberflächenabfluss deutlich vermindern<sup>57</sup>.

Zwischenkulturen schützen nicht nur die Bodenoberfläche, sondern regenerieren auch nachweislich die Struktur verdichteter Böden und sind damit eine Alternative zur intensiven Bodenbearbeitung. Winterrettich (Abb. 10) beispielsweise kann dank seiner grossen Pfahlwurzel in verdichtete

**Abbildung 9**  
Dynamik des Bodenbedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Zeit seit der Saat für eine Auswahl von sechs Arten.

- Kreuzblütler
- Leguminosen
- Süssgräser
- Korbblütler
- Andere



Schichten vordringen<sup>59</sup>. Im NFP 68-Projekt GRÜNDUNGUNG hat eine Charakterisierung des Wurzelsystems von zwanzig Arten gezeigt, dass auch andere Arten wie Sonnenblumen, Niger oder Ackerbohnen Wurzeln mit einem grossen Durchmesser haben<sup>58</sup> und somit nützlich sein könnten, um verdichtete Böden zu regenerieren. Wie sich nach der Zwischenkultur zeigte, hatten die Wurzeln Poren gebildet, die den Anbau und die Entwicklung der Hauptkultur erleichterten, was sich positiv auf den Ertrag auswirkte<sup>60</sup>.

Weil Zwischenkulturen nicht geerntet werden, liefern sie organischen Kohlenstoff und tragen damit zur Bildung von OBS bei. Durch eine sorgfältige Wahl der Art und eine umsichtige Bewirtschaftung können mit einer Zwischenkultur unter günstigen Wachstumsbedingungen über 6 Tonnen Biomasse (Trockensubstanz) pro Hektare gewonnen werden, unter üblichen Wachstumsbedingungen sind es 3 bis 4 Tonnen/ha<sup>58</sup>. Durch die Kombination mehrerer

Arten ist ein Produktionsgewinn von mehr als 1 Tonne/ha möglich<sup>61</sup>. Um die Regeln einer optimalen Mischung zu definieren, untersuchte das NFP 68-Projekt GRÜNDUNGUNG die Mechanismen, die diesem Gewinn zugrunde liegen. So ist es unter eingeschränkten Wachstumsbedingungen grundlegend, Arten mit sich ergänzenden Merkmalen zu kombinieren, wie etwa Phazelia und Erbsen. Hingegen zeigte die gegenseitige Ergänzung der Arten bei guten Wachstumsbedingungen einen sehr geringen Einfluss auf die Produktivität. Unter solchen Bedingungen ist es offenbar wichtiger, Arten mit einer ähnlichen Konkurrenzfähigkeit zu mischen – beispielsweise braunen Senf mit Sandhafer. Gemäss den Erkenntnissen aus dem Projekt GRÜNDUNGUNG passen sich Artenmischungen besser an variable Wachstumsbedingungen an. So ermöglicht eine Mischung von Arten mit unterschiedlichen idealen Wachstumsbedingungen eine gute Produktion von Biomasse und einen effizienten Bodenschutz. Durch die Kombination von sich ergänzenden Arten können unterschiedliche Funktionen erfüllt werden; beispielsweise sorgen Leguminosen für eine Stickstoffzufuhr, während nichtleguminöse Arten Nährstoffe im Boden wiederverwerten<sup>62</sup>.

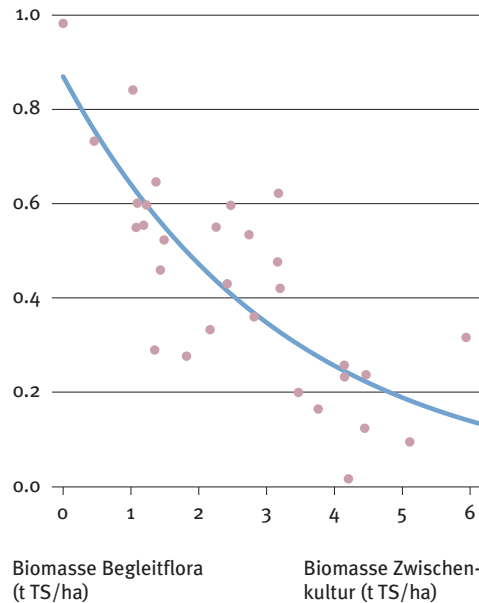
Die Fähigkeit einer Zwischenkultur, die Begleitflora zu bekämpfen, hängt sowohl mit dem Ausmass der Bodenbedeckung als auch mit der Menge der von ihr erzeugten Biomasse zusammen (Abb. 11, S. 32)<sup>56</sup>. Ein Screening mehrerer frostempfindlicher Arten, die vor Mais angebaut wurden, hat ergeben, dass eine Zwischenkultur die Unkräuter vor Winterbeginn effizient kontrolliert und die Unkrautbekämpfung somit reduziert werden kann. Insbesondere kann auf eine vorgängige Bekämpfung, beispielsweise mit Glyphosat, verzichtet werden.

**Abbildung 10**  
Winterrettich, nach drei Monaten Wachstum.

Foto: Lucie Büchi, Agroscope



**Abbildung 11**  
 Anteil der Biomasse der Begleitflora an der Biomasse der Zwischenkultur (angepasst nach<sup>56</sup>).



Durch die Wiederverwertung von Bodennährstoffen und die symbiotische Stickstofffixierung tragen Zwischenkulturen auch zur Versorgung der Pflanzen bei (Kap. 5.2, S. 37).

All diese Vorteile erhöhen die Produktivität der Folgekultur. Das NFP 68-Projekt GRÜNDUNG untersuchte über einen Zeitraum von drei Jahren auch den Einfluss von sieben Zwischenkulturen auf die Ertragsleistung von Weizen. Aufgrund relativ schwieriger Wachstumsbedingungen wurden insbesondere in den ersten beiden Jahren je nach Art der Zwischenkultur sehr grosse Schwankungen bei der Ertragsleistung beobachtet. Dies unterstreicht die Bedeutung der Artenwahl. Eine grosse Menge an Biomasse, die durch die Zwischenkultur erzeugt wurde, ermöglichte eine effiziente Kontrolle der Unkräuter. Bei einer reduzierten Bodenbearbeitung und Direktsaat konnten die Unkräuter durch die Zwischenkultur in einem ähnlichen Ausmass kontrolliert

werden wie mit Pflügen. Ebenso war bei der Direktsaat der Weizen ertrag nach einer produktiven Zwischenkultur ähnlich hoch wie auf gepflügten Flächen. Schlug eine Zwischenkultur fehl, resultierten allerdings nur sehr geringe Erträge.

### 4.3 Fruchtfolge: ein entscheidender Faktor

Die Wahl der Kulturen für die Fruchtfolge und den Fruchtwechsel beruht auf den pedologischen Eigenschaften und den klimatischen Merkmalen einer Parzelle. Mit einer ausgewogenen Fruchtfolge und einer Vielfalt der angebauten Arten lässt sich eine Übertragung von Krankheiten und Schädlingen vermeiden, die Menge des Unkrauts eindämmen und die Nutzung der Wasser- und Nährstoffressourcen optimieren. Sie trägt damit zur Bodenqualität bei. Die Fruchtfolge gilt bei Praktikerinnen und Praktikern zwar häufig als vorteilhaft; Beweise dafür lassen sich jedoch nur schwer erbringen. Ein 1967 gestarteter Langzeitversuch, in dem eine klassische Fruchtfolge mit dem Anbau von Winterweizen in Monokultur (P20, Anhang 1, S.73) verglichen wird, liefert aber einige Hinweise. Die Varianzanalyse des Ertrags von drei verschiedenen Jahren zeigt, dass die Fruchtfolge bis zu 66 Prozent der Schwankungen erklärt. Der Rest verteilt sich auf die Bodenbearbeitung (9%), die Sorte (13%), den Pflanzenschutz (2%) und Interaktionen (10%)<sup>63</sup>. Diese Ergebnisse sind nicht einfach zu erklären. Wahrscheinlich spielen die Bodenorganismen eine massgebliche Rolle, da die anderen Faktoren des Bodens kontrolliert waren. Aufgrund dieser Ergebnisse nutzten zwei Projekte des NFP 68 diesen Versuch, um die Auswirkungen der Fruchtfolge auf die nützlichen Mikroorganismen des Bodens zu beurteilen (NFP 68-Projekte BODENBAKTERIEN UND NEMATODEN).

#### 4.4 Die entscheidende Wahl des Anbausystems

Die Anbausysteme (Glossar, S. 86) variieren je nach Klima, Bodenbeschaffenheit und Kulturen in der Fruchtfolge und kombinieren die Produktionsfaktoren auf unterschiedliche Weise. Sie können auch von den Zielen abhängig sein, die sich der Landwirt bezüglich Produktion, Bodenschutz oder langfristiger Bewahrung gewisser Funktionen gesetzt hat. Ihre Auswirkungen auf die Bodenqualität sind unterschiedlich. Im Projekt BODENVERBESSERENDE ANBAUSYSTEME wurden rund um die Standorte Changins und Reckenholz zwei Netzwerke mit je 30 Ackerflächen gebildet, auf denen Winterweizen angebaut wird. Die ausgewählten Parzellen zeichnen sich dadurch aus, dass die Landwirte ganz bewusst auf die Qualität ihrer Böden achten; ausserdem sind sie repräsentativ für drei Kategorien von Anbausystemen: konventionelle Landwirtschaft (Pflügen; ökologischer Leistungsnachweis, öLN; in der Regel mit Viehhaltung), biologischen Landbau (verschiedene Methoden der Bodenbearbeitung) und Direktsaat (öLN). Das Ziel bestand darin, zu untersuchen, inwiefern und nach welchen Kriterien diese unterschiedlichen Anbausysteme tatsächlich zum Schutz des Bodens beitragen können und welches ihre charakteristischen Funktionen sind. Die ersten Ergebnisse zeigen ähnliche Erträge für die konventionelle Bewirtschaftung und die Direktsaat sowie geringere Erträge für die biologische Landwirtschaft. Hingegen waren die Kohlenstoffeinträge über die Wurzeln der Pflanzen und die Rhizodeposition insgesamt höher bei Parzellen, die biologisch bewirtschaftet wurden, als bei solchen mit konventionellem Anbau oder Direktsaat. Feststellungen aus der Praxis bezüglich der physikalischen Eigenschaften dieser Böden bestätigen im Allgemeinen

die Beobachtungen aus Langzeitversuchen, in denen die Auswirkungen der Bodenbearbeitung und von organischen Einträgen verglichen werden (Dichte, Festigkeit, Durchlässigkeit, Makroaggregate). Die biologischen Eigenschaften weisen bei der Direktsaat und im biologischen Landbau einige Ähnlichkeiten auf (mikrobielle, bakterielle und pilzliche Biomasse). In Parzellen, auf denen biologischer Landbau betrieben wurde, waren die Wurzeln stärker von Mykorrhizapilzen besiedelt als bei anderen Anbausystemen. Diese Ergebnisse, die noch bestätigt werden müssen, zeigen, dass ein Landwirt durch die Wahl des Anbausystems die Bodeneigenschaften tatsächlich stark beeinflussen kann.

Bodenorganismen leisten beispielsweise durch die symbiotische Bindung von Stickstoff (N) und die Mykorrhizierung einen direkten Beitrag zur Ernährung der Pflanzen. Ausserdem spielen sie eine wesentliche Rolle bei der Zersetzung von OBS und erhöhen damit die Nährstoffverfügbarkeit im Boden. Sie leisten auch einen indirekten Beitrag, indem sie die Bodenstruktur und die Zirkulation von Luft und Wasser verbessern. Diese Funktionen sind insofern wichtig, als sie grundlegend für die Bodenfruchtbarkeit sind. Werden sie zum richtigen Zeitpunkt mobilisiert und wird die Freisetzung von Nährstoffen auf die Bedürfnisse der Kultur abgestimmt, helfen sie mit, den Einsatz von Düngemitteln zu beschränken. Heute beruht die Düngung grossteils auf Düngemitteln aus nicht erneuerbaren Quellen. Diese ergänzen die Nährstoffe aus der Mineralisierung von OBS, die manchmal nicht in ausreichender Menge vorhanden sind, oder die zuweilen fehlenden organischen Einträge. Die Düngemittel kompensieren auch den Austrag von Nährstoffen durch die Kulturpflanzen, aber auch Verluste von Nährstoffen an die Umwelt (Luft, Gewässer). Die Publikation «Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz» (GRUD) fasst alle Elemente zusammen, die zu einem gezielten Umgang mit der Pflanzenernährung beitragen<sup>64</sup>. Dazu gehören die Charakterisierung des Bodens, die Bedürfnisse der Pflanzen und die Durchführung der Düngung. Letztere war Gegenstand neuer Entwicklungen, die die Wirkung der Pflanzenernährung auf die Qualität der Produkte berücksichtigen. Sie bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen zur Beziehung zwischen Boden- und Nahrungsmittelqualität. Im Gegensatz dazu wurde der Rolle der Bodenorganismen in der Publikation «Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz» (GRUD) bis anhin noch kein Kapitel gewidmet, obwohl die

neuen Erkenntnisse über das Bodenleben die Praxis beeinflussen dürften. Es besteht ein grosser Wissensbedarf bezüglich der Frage, inwiefern und auf welche Weise ein lebendiger Boden die Bodenfruchtbarkeit verbessern kann. Angesichts des leichten Zugangs zu Düngemitteln dürfte der tatsächliche Beitrag der Bodenorganismen zur Pflanzenernährung insgesamt allerdings bescheiden bleiben.

Im Folgenden geht die TS<sub>1</sub> auf die arbuskulären Mykorrhizapilze (AM) und die Gründünger ein. Mykorrhizapilze sind Organismen, die Nährstoffe zu den Pflanzen transportieren können. Obwohl diese Fähigkeit seit langem bekannt ist, findet sie im Ackerbau noch nicht gebührend Beachtung und wird kaum oder gar nicht genutzt. Gründünger werden zwar häufig eingesetzt, ihr Potenzial zur Unterstützung der Pflanzenernährung bedarf aber weiterer Erforschung. Es braucht also mehr Wissen, um genauer definieren zu können, wie diese beiden Organismen zu stärkeren und effizienteren Akteuren in der Pflanzenversorgung werden können.

### 5.1 Mykorrhiza: Teamwork

#### a) Beschreibung und Funktionen arbuskulärer Mykorrhizapilze

Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AM) sind sehr verbreitete Mikroorganismen, die in Symbiose mit den meisten Pflanzen, einschliesslich der Kulturpflanzen, leben<sup>65</sup>. Rund 80 Prozent der Landpflanzen sind Wirte dieser Pilze, die in den Zellen der Pflanzenwurzeln mikroskopisch feine, baumförmige Strukturen bilden (Abb. 12). In diesen Strukturen (Arbuskeln) tauschen die beiden Partner Stoffe aus: Die Wirtspflanze liefert den Pilzen bis zu 20 Prozent der Kohlenhydrate, die sie benötigen, aus der Photosynthese, die grundlegend sind für das Überleben der AM. Letzte-



re versorgen die Pflanze mit Nährstoffen. Mykorrhizapilze bilden im Erdreich ein sehr dichtes und weit verzweigtes Hyphennetz, dank dem sie einfach Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen können, die sie für die Wirtspflanze verfügbar machen. Diese Symbiose ist besonders wichtig für die Aufnahme von Phosphor, aber auch von Stickstoff, Kalium oder Zink, vor allem in Fällen, in denen deren Verfügbarkeit im Boden begrenzt ist. Für die Wirtspflanze ergeben sich weitere Vorteile, besonders eine bessere Wasseraufnahme durch das Wurzelsystem. Die Hyphen der Mykorrhizapilze können nicht nur die Kontaktfläche zwischen Boden und Pflanzenwurzeln erheblich vergrössern; sie sind auch in der Lage, in Bodenporen vorzudringen, die für Pflanzen nicht erreichbar sind, und das dort vorhandene Wasser aufzunehmen. Diese Fähigkeit vermindert die Anfälligkeit der Pflanzen auf «Wasserstress»<sup>66</sup>. Zahlreiche Studien belegen zudem eine bessere Resistenz gegen bestimmte Krankheitserreger

wie Fusarium, Phytophthora oder Pythium, da AM Abwehrmechanismen der Wirtspflanze aktivieren<sup>67</sup>. All diese Vorzüge können dazu beitragen, die Produktivität der Pflanzen zu verbessern.

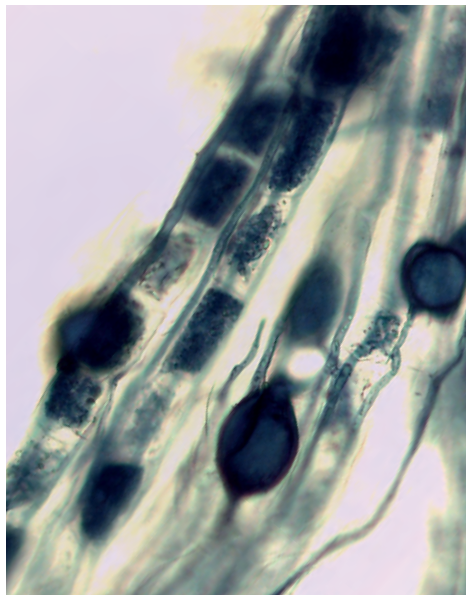
AM wirken sich auch positiv auf die Umwelt aus. Das Hyphennetz trägt zur Stabilisierung der Bodenstruktur bei, erhöht den Schutz vor Erosion und sorgt für eine bessere Speicherung von Wasser und Nährstoffen<sup>68</sup>. Ein Feldversuch hat zudem gezeigt, dass AM auch Nährstoffverluste durch Auswaschung reduzieren können<sup>69</sup>. In einem Topfversuch wurde nachgewiesen, dass diese Pilze die Emission von Distickstoffoxid – einem der wichtigsten Treibhausgase – senken können, indem sie die Stickstoffakkumulation durch die Pflanzen verbessern und die Zusammensetzung der denitrifizierenden Bakteriengemeinschaften verändern<sup>70</sup>.

#### b) Einflussfaktoren für das Vorkommen und die Vielfalt arbuskulärer Mykorrhizapilze

Es existiert eine grosse Vielfalt von AM. Sie ist in der Regel in Wiesen grösser als im Ackerland<sup>72</sup>. In der Schweiz sind Mykorrhizagemeinschaften, die natürlicherweise in den bewirtschafteten Böden vorhanden sind, im Allgemeinen gut entwickelt und diversifiziert. Das NFP 68-Projekt MYKORRHI-ZA hat auf sieben Ackerflächen oder Dauersperrwiesen im Kanton Aargau 53 verschiedene Arten von AM identifiziert<sup>73</sup>. Die Ackerflächen wurden entweder konventionell mit dem Pflug oder biologisch mit reduzierter Bodenbearbeitung bewirtschaftet; vier dieser Parzellen gehören zum Langzeitversuch mit reduzierter Bodenbearbeitung in Frick AG (Anhang 1, S. 73). Die Zahl der beobachteten Arten übersteigt in gewissen Fällen bei weitem die in der Literatur für ähnliche Klimata genannten typischen Werte<sup>74-76</sup>. Dies lässt sich zum Teil durch die Bodeneigenschaften erklären, ist aber

**Abbildung 12**  
Arbuskuläre Mykorrhizapilze,  
die eine Kleewurzel besiedeln<sup>71</sup>.

Foto: Chantal Herzog, Agroscope



auch auf die angewendeten landwirtschaftlichen Methoden – vielfältige Fruchtfolge, einschliesslich Zwischenbegrünung, Beschränkung der vegetationsfreien Bodenflächen, Einsatz von Hofdünger – zurückzuführen.

Das NFP 68-Projekt MYKORRHIZA untersuchte den Einfluss der Bodenbearbeitung und Düngung auf das Vorkommen (Abundanz) und die Vielfalt der AM-Gemeinschaften in biologischen Landbausystemen. Es hat gezeigt, dass die reduzierte Bodenbearbeitung die Abundanz der AM in den Oberflächenschichten positiv beeinflusst<sup>73</sup>. Gepflügte Parzellen wiesen eine tiefere Zahl von Sporen auf als minimal bearbeitete Parzellen. Bei Letzteren wurde ein vergleichbares Niveau beobachtet wie bei Grünland. Zudem verringerte das Pflügen auch leicht die Vielfalt der AM, jedoch weniger stark als ihre Abundanz. Der Rückgang der Anzahl und der Vielfalt von AM im Zusammenhang mit intensiver Bodenbearbeitung ist in der Literatur umfassend dokumentiert<sup>73,76,77</sup>. Er lässt sich erklären durch die regelmässige Zerstörung des Hyphenetzes der Pilze, das essenziell ist für die Nährstoffaufnahme der Pilze aus dem Boden<sup>78</sup>. Die intensive Bodenbearbeitung fördert somit Mykorrhiza-Arten, die die Pflanzenwurzeln rasch besiedeln können, während langsamere Arten darunter leiden.

Das NFP 68-Projekt MYKORRHIZA testete auch den Einfluss von zwei Arten organischem Dünger. Dabei zeigten sich geringe Unterschiede: In mit Mist und Gülle gedüngten Parzellen waren die Vielfalt und die Abundanz von AM leicht höher als in Parzellen, auf denen nur Gülle ausgetragen wurde<sup>73</sup>. Der Einfluss der Düngung auf die Mykorrhizagemeinschaften ist grundsätzlich ausgeprägter, wenn sich die getesteten Dünger qualitativ (organisch/mineralisch) und quantitativ unterscheiden.

Eine starke Düngung verringert die Abundanz der AM, weil die Pflanzen die Bodennährstoffe bevorzugt direkt aufnehmen<sup>79</sup>. In organisch gedüngten Parzellen wurde ebenfalls eine vielfältigere Gemeinschaft nachgewiesen<sup>79</sup>. Es wird vermutet, dass gewisse Mykorrhiza-Arten, die nur bei einer sehr geringen Düngung auftauchen, in Bewirtschaftungssystemen, bei denen nur wenige Hilfsstoffe zum Einsatz kommen (Low-Input-Systeme), eine entscheidende Rolle spielen und ihr Verschwinden bei stärkerer Düngung gewisse ökosystemische Funktionen beeinflussen könnte.

Zahlreiche andere Faktoren können die Abundanz und die Vielfalt der AM ebenfalls beeinflussen. Eine zentrale Rolle spielt der Fruchtwechsel, weil nicht alle Pflanzen Wirte für diese Pilze sind. Eine Fruchtfolge, in der häufig Pflanzen angebaut werden, die keine Symbiose mit Mykorrhiza eingehen – beispielsweise Raps –, könnte zu einer Verminderung der Pilzgemeinschaft und ihrer Vielfalt führen und die Vorteile der Symbiose schwächen<sup>80</sup>. Vorteilhaft für die Abundanz von AM hingegen wären Kunstwiesen mit Leguminosen und Gräsern oder die Einführung von Zwischenkulturen in der Fruchtfolge.

### c) Beimpfung mit arbuskulären Mykorrhizapilzen

Im NFP 68-Projekt MYKORRHIZA wurde getestet, ob es möglich ist, die Leistungen der bereits im Boden vorhandenen AM zu verstärken, indem durch Beimpfung andere Mykorrhiza-Arten eingebracht werden. In einer ersten Phase wurde ein Gewächshausexperiment durchgeführt, um zu verifizieren, inwieweit sich die eingebrachten Pilze etablieren und die Produktivität der Pflanzen verbessern können. Die Beimpfung von acht Schweizer Feldeböden mit einem weit verbreiteten und gut an eine intensive Bewirtschaftung angepassten

Stamm hat ergeben, dass sich die Pilze unabhängig von den Bodeneigenschaften zuverlässig etablieren konnten<sup>81</sup>. Hingegen war die Wirkung bezüglich der Produktivität wenig ausgeprägt. Liess sich bei Klee durch die Beimpfung bei fünf von acht getesteten Böden eine Ertragssteigerung erzielen, zeigte sich bei Weidelgras die gegenteilige Wirkung: Hier verzeichneten alle untersuchten Böden einen Ertragsverlust. Dieses Ergebnis bestätigt bisherige Erkenntnisse zur Existenz funktionaler Pflanzengruppen, die unterschiedlich auf die Beimpfung reagieren<sup>82</sup>. Ob die Beimpfung hinsichtlich der Besiedlung durch die eingebrachten Pilze und des Ziels, die Biomasse der Kultur zu steigern, erfolgreich ist, wurde bisher in der Regel mit dem Phosphorgehalt der Böden in Verbindung gebracht, wobei ein geringerer Gehalt günstiger ist<sup>83</sup>. Die Studie des NFP 68-Projekts MYKORRHIZA hat jedoch gezeigt, dass der Erfolg einer Beimpfung nicht mit der Verfügbarkeit an Nährstoffen im Boden zusammenhängt, sondern andere Faktoren wie die ursprüngliche Abundanz der AM oder die Zusammensetzung der Pilzgemeinschaft entscheidend sein dürften<sup>81</sup>.

---

### Fazit – arbuskuläre Mykorrhiza

- Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AM) spielen eine essenzielle Rolle für die Aufnahme von Nährstoffen und Wasser durch die Pflanzen; dies insbesondere, wenn deren Verfügbarkeit im Boden beschränkt ist.
  - AM können vorteilhaft für die Umwelt sein: Verminderung des Erosionsrisikos, der Nährstoffverluste durch Auswaschung und Reduktion der Treibhausgasemissionen.
  - Eine minimale Bodenbearbeitung und eine gezielte organische Düngung sind zu bevorzugen, um die AM-Gemeinschaft zu fördern und ihre Präsenz zu nutzen.
  - Durch eine Beimpfung mit AM lässt sich gegenwärtig weder die Produktivität der Kulturen erhöhen, noch lassen sich andere Ökosystemleistungen verbessern.
- 

Die Beimpfung im Feldversuch beeinflusste die Besiedlung der Wurzeln durch AM, den Ertrag und den Nährstoffgehalt von Mais aber nicht. Die zu erwartenden Vorteile einer Beimpfung sind somit ziemlich begrenzt, was daran liegen dürfte, dass die Pilzgemeinschaften in der Schweiz dank günstiger landwirtschaftlicher Praktiken bereits relativ gut entwickelt sind.

Gegenwärtig arbeitet das Team des NFP 68-Projekts MYKORRHIZA an der Entwicklung eines neuen Impfverfahrens, das auf der Identifizierung lokal vorhandener Arten und Bodeneigenschaften beruht. Dieses Verfahren geht vom Grundsatz aus, dass eine gezielte, den örtlichen Bedingungen angepasste Beimpfung effizienter ist als das Einbringen einheitlicher AM und die Produktivität der Pflanzen auf diese Weise verbessert werden könnte.

### 5.2 Von nitratbindenden Zwischenkulturen zum Gründünger

Zwischenkulturen spielen eine wesentliche Rolle für den Bodenschutz (Kap. 4.2, S. 30). Von ihnen dürfen zahlreiche weitere Ökosystemleistungen erwartet werden. So leisten sie insbesondere einen umfassenden Beitrag zur Fruchtbarkeit des Bodens, etwa durch Anreicherung von Bodennährstoffen, symbiotische Stickstofffixierung oder Lösung von Nährstoffen, die im Boden in schwer verfügbarer Form enthalten sind. Das NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG befasste sich speziell mit den ersten beiden Aspekten.

#### a) Anreicherung von Nährstoffen

Zwischenkulturen nehmen im Boden verfügbare Nährstoffe auf, die von der letzten Kultur übrig geblieben oder aus der Mineralisierung organischer Substanzen hervorgegangen sind. Sie begrenzen dadurch Nährstoffverluste durch Auswaschung und

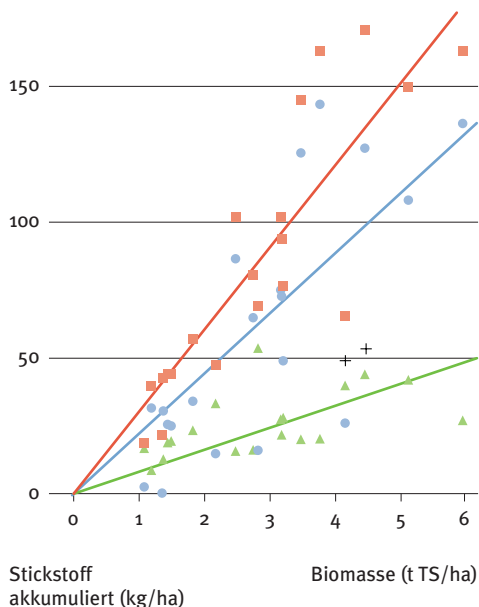
Auslaugung. Eine Meta-Analyse hat gezeigt, dass die Nitratauswaschung mit einer Zwischenkultur ohne Leguminosen um durchschnittlich 70 Prozent und mit einer Zwischenkultur mit Leguminosen um 40 Prozent gegenüber einer Schwarzbrache vermindert werden kann<sup>84</sup>. Die von den Pflanzen aufgenommenen Nährstoffmengen variieren erheblich je nach Art und Wachstum der Pflanze sowie der Menge an im Boden verfügbaren Nährstoffen. Sandhafer und weisser Senf sind seit langem dafür bekannt, dass sie grosse Mengen an mineralischem Stickstoff (N) binden können. Ein Screening im NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG von zwanzig Arten, fünfzehn davon Nichtleguminosen, unter nichtlimitierenden Bedingungen (Bodenbearbeitung vor Aussaat der Zwischenkultur, Vorkultur Luzerne) ergab, dass Sonnenblumen, Winterrettich, Niger oder auch Phazelia nach drei Monaten Vegetationszeit über 125 kg/ha N binden können und somit noch besser abschneiden als Sandhafer und weisser Senf<sup>58</sup>. Zwischenkulturen können auch grosse Mengen anderer Nährstoffe aufnehmen: Winterrettich und Phazelia beispielsweise können in drei Monaten über 30 kg/ha Phosphor (P) und Sonnenblumen und Niger über 250 kg/ha Kalium (K) aufnehmen. Allerdings variiert die Aufnahmefähigkeit je nach Art stark. Ausgehend von den Blatt- und Wurzeigenschaften der zwanzig im Projekt untersuchten Arten wurden fünf Strategien der Nährstoffaufnahme definiert; drei davon ermöglichten eine starke Aufnahme aller Nährstoffe unter nichtlimitierenden Bedingungen<sup>58</sup>. Diese drei Strategien basieren auf einer hohen Produktion von oberirdischer und unterirdischer Biomasse und dichten Geweben (Sonnenblumen) oder auf feinen, langen Wurzelstrukturen und hohen Nährstoffkonzentrationen (Phazelia). Die dritte Strategie (brauner Senf) nutzt Elemente der

beiden ersten Strategien. Unter den günstigen Studienbedingungen verlief die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen am wenigsten effizient bei einem grossen Wurzeldurchmesser und dichtem Gewebe (Hirse) oder aber bei einer geringen oberirdischen und unterirdischen Biomasse und einer hohen N- und P-Konzentration in der Pflanze (Leguminosen). Diese beiden Strategien dürften allerdings unter limitierenderen Bedingungen geeigneter sein. Insbesondere die Leguminosen sollten leistungsfähiger sein als die anderen Arten, wenn N beschränkt verfügbar ist. Tatsächlich wurde auf einem Standort nachgewiesen, dass sich von sechs Arten (fünf Nichtleguminosen und Erbse) unter limitierenden Bedingungen (Direktsaat, Vorkultur Weizen) nur Erbsen ausreichend entwickeln konnten, um die erwarteten Leistungen einer Zwischenkultur zu erbringen.

**b) Stickstofffixierung durch Leguminosen**  
Leguminosen führen nicht nur zu einer Nährstoffanreicherung im Boden, sondern besitzen auch die Fähigkeit zur symbiotischen N-Fixierung. Ein im Rahmen des NFP 68-Projekts GRÜNDÜNGUNG an zwei Standorten in der Schweiz durchgeführter Vergleich von 19 Leguminosearten hat gezeigt, dass die Gesamtmenge des in drei Monaten akkumulierten Stickstoffs je nach Art erheblich variiert und von 16 kg/ha für Kichererbsen bis über 180 kg/ha für Ackerbohnen reicht (Abb. 13)<sup>85</sup>. Der Anteil aus der symbiotischen Fixierung schwankte ebenfalls je nach Art stark und erreichte über 80 Prozent der gesamten in den Pflanzen gebundenen Mengen bei Ackerbohnen, Ungarischer Wicke, Zottelwicke, Weissklee und Saat-Platterbsen. Bei diesen Arten stammten über 100 kg/ha N aus der symbiotischen Fixierung. Neben der unterschiedlichen Fixierungskapazität der Arten wurde auch nachgewiesen, dass die Menge des im Boden verfügbaren minera-

**Abbildung 13**  
 Von den Pflanzen gebundener Stickstoff (N) in Funktion der Leguminosenbiomasse<sup>85</sup>.

- Menge an Gesamtstickstoff
- Stickstoffmenge, die aus der Luft stammt
- ▲ Stickstoffmenge, die aus dem Boden absorbiert wurde
- + Stickstoffmengen, die durch Phazelia und Sommerhafer akkumuliert werden



lischen N die symbiotische Fixierung erheblich beeinflusst. Eine grosse Verfügbarkeit von mineralischem N vermindert die N-Fixierung<sup>85</sup>.

Zahlreiche Studien zeigen, dass die Menge an verfügbarem N für die Folgekultur zunimmt<sup>86</sup>. Angesichts der steigenden Kosten für mineralische Dünger zeigen Landwirtinnen und Landwirte ein besonderes Interesse an diesen «Gründüngern».

#### c) Akkumulation von Nährstoffen in den Wurzeln

Studien, die die Fähigkeit von Zwischenkulturen zur Nährstoffaufnahme untersuchen, messen in der Regel die in den oberirdischen Teilen akkumulierten Nährstoffe. Nur sehr wenige Untersuchungen konzentrierten sich auf die in den Wurzeln angereicherten Nährstoffe, da sich solche Daten nur schwer erheben lassen. Eine im NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG vorgenommene Schätzung veranschlagt die gebundenen Nährstoffmengen bei günstigen

Wachstumsbedingungen in drei Monaten für Winterrettich auf 65 kg/ha N, 20 kg/ha P und 149 kg/ha K<sup>58</sup>. Diese Mengen sind bei anderen Arten zwar weniger gross – durchschnittlich 23 kg/ha N, 3 kg/ha P und 10 kg/ha K bei den 19 untersuchten Arten –, aber nicht vernachlässigbar, weshalb sie in die Berechnung der Düngung für die Folgekultur einbezogen werden müssen.

#### d) Bedeutung des Zeitpunkts der Zerstörung der Zwischenkulturen

Im Gegensatz zu den meisten mineralischen Düngemitteln werden Nährstoffe, die durch Zwischenkulturen gebunden werden, nach und nach freigesetzt. Um sie zu nutzen und allfällige Verluste in die Umwelt zu verhindern, muss die Mineralisierung mit den Bedürfnissen der nachfolgenden Kultur übereinstimmen. Dabei kann das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C/N-Verhältnis) als Indikator für die Geschwindigkeit und den Grad der Mineralisierung verwendet werden<sup>87</sup>. Ein Wert von weniger als 26 ist in der Regel günstig für die Mineralisierung, während darüber eine Immobilisierung des Stickstoffs im Boden beobachtet wurde. Das Screening von zwanzig Arten hat gezeigt, dass dieses Verhältnis mit dem zunehmenden Wachstum der Pflanzen signifikant erhöht wird<sup>58</sup>. Während die Mehrheit der getesteten Hülsenfrüchtler (Fabaceae) C/N-Verhältnisse aufwiesen, die günstig sind für eine rasche Mineralisierung, überstieg dieser Wert bei gewissen Arten wie etwa Buchweizen oder weissem Senf nach dreimonatigem Wachstum die Grenze von 26 bei weitem. Für diese Arten wird eine raschere Zerstörung der Kultur empfohlen, um einen nachfolgenden «Stickstoffhunger» zu vermeiden. Normalerweise ist dazu der Zeitpunkt des Blütenstadiums ein guter Kompromiss zwischen der Menge an akkumulierten Nährstoffen und einem für die Mineralisierung günstigen C/N-Verhältnis.

Zahlreiche Schädlinge und Krankheitserreger können die Ernteerträge schmälern. Schätzungen zufolge vermindern sämtliche schädlichen Organismen das Ertragspotenzial der wichtigsten Kulturpflanzen um 30 bis 40 Prozent<sup>88</sup>. Mit Pflanzenschutzmitteln (PSM) kann der Einfluss von Krankheiten und Schädlingen begrenzt und die landwirtschaftliche Produktion deutlich erhöht werden. Ihr Einsatz ist aber von zahlreichen negativen Auswirkungen begleitet (Resistenz, [Öko-]Toxizität), deren Beurteilung nach wie vor lückenhaft ist. Dies gilt umso mehr für ein so komplexes Milieu wie den Boden. Zudem können gewisse Organismen lange im Boden verbleiben und bewirken, dass Parzellen während mehrerer Jahre – etwa bei Befall mit Sclerotinia, Drahtwürmern, Viren, Erdmandelgras – oder gar Jahrzehnte – bei Wurzelfäule von Erbsen (*Aphanomyces*) und Rübenzystennematoden – nicht bewirtschaftet werden können.

Eine Alternative zu synthetischen PSM verspricht man sich von der Verwendung nützlicher Bodenorganismen. Einige von ihnen tragen direkt zum Schutz der Pflanzen bei, indem sie die Schädlingspopulationen durch Konkurrenz, Antibiose oder Parasitismus kontrollieren oder die Abwehrmechanismen der Pflanzen aktivieren. Diese Fähigkeit zur Bekämpfung spezifischer Schädlinge macht sie besonders interessant für einen Einsatz als Biokontrollagenten. Es gibt zwei Arten von Biokontrolle: die biologische Bekämpfung durch Erhaltung und jene durch Augmentation (externe Zugabe) regulierender Organismen.

#### Biologische Bekämpfung durch Erhaltung

Die biologische Bekämpfung durch Erhaltung beruht auf Bodenbedingungen, die nützliche Mikroorganismen begünstigen oder die starke Vermehrung schädlicher Organismen verhindern. Diese Art

der Biokontrolle zielt darauf ab, jeglichen Einsatz von PSM – auch den biologischen – zu vermeiden. Gewisse Organismen sind als lokal vorhandene (endemische) Wirkstoffe bekannt, die eine wirksame biologische Schädlingsbekämpfung erlauben, sofern sie in ausreichender Menge verfügbar sind. Allerdings handelt es sich dabei im Wesentlichen um oberirdische Organismen wie Marienkäfer oder Raummilben. Aufgrund der Vielzahl der Bodenorganismen ist es schwierig zu beurteilen, welche von ihnen zu einem gesünderen Boden beitragen, der den Kulturpflanzen zugutekommt. Auch lässt sich das Ausmass ihres Beitrags nur schwer bewerten. Eine Bestandesaufnahme der wichtigsten Bodenorganismen, die an der Biokontrolle beteiligt sind, fehlt bis anhin. Deshalb konzentriert sich die biologische Bekämpfung durch Erhaltung auf landwirtschaftliche Praktiken wie lange und diversifizierte Fruchtfolgen und das Ausbringen von Hofdünger, die die Vielfalt der Bodenorganismen und die biologische Aktivität des Bodens im Allgemeinen begünstigen.

#### Biologische Bekämpfung durch Augmentation

Sind nicht genügend regulierende Organismen im Boden vorhanden, kann eine Erhöhung ihrer Zahl ins Auge gefasst werden. In diesem Fall spricht man von einer biologischen Kontrolle durch Augmentation. Sie beruht in der Regel auf der Identifizierung des Zielorganismus, der kontrolliert werden soll, und der entsprechenden Mittel zur Bekämpfung. Einige Produkte mit solchen Organismen sind im Handel erhältlich. Das Ziel besteht darin, das Problem bodenbürtiger Krankheiten und Schädlinge auf eine akzeptablere und schonendere Weise zu lösen als mit belastenden chemischen Desinfektionsmassnahmen. Die biologische Bekämpfung durch Augmentation birgt indessen die Gefahr, dass das Gleichgewicht zwischen

verschiedenen Bodenorganismen verändert wird und die Populationen nützlicher Organismen geschädigt werden.

Zwei NFP 68-Projekte befassten sich mit zwei unterschiedlichen Bodenorganismen: entomopathogenen Nematoden (Projekt NEMATODEN) und Pseudomonas-Bakterien (Projekt BODENBAKTERIEN). Beide Projekte dienten dazu, das Wissen über diese Nützlingle zu verbessern und zu untersuchen, inwiefern gewisse Anbaumethoden günstig sind für ihre Entwicklung (biologische Bekämpfung durch Erhaltung). Zudem wurde in diesen Projekten die Wirksamkeit einer biologischen Bekämpfung durch Augmentation untersucht und eine neue Anwendungsmethode entwickelt.

### 6.1 Nematoden gegen Insekten

Entomopathogene Nematoden sind mikroskopisch kleine Spulwürmer (Abb. 14), die im Boden leben und eine grosse Vielfalt von Insekten parasitieren. Entomopa-

thogene Nematoden der Familien Steinernematidae und Heterorhabditidae leben in Symbiose mit pathogenen Bakterien der Gattung *Photorhabdus* und *Xenorhabdus*. Dank dieser Verbindung können gewisse Insekten, die den Kulturpflanzen schaden, innerhalb von zwei bis drei Tagen getötet werden (Kasten, S. 42).

#### a) Entomopathogene Nematoden in der Schweiz

Über die Faktoren, die die Präsenz entomopathogener Nematoden in Schweizer Böden beeinflussen, und die Effizienz dieser Organismen zur Bekämpfung bodenbürtiger Schadinsekten war bis vor kurzem wenig bekannt. Die Untersuchung von je zwanzig natürlichen Böden (Wälder und Naturwiesen) und landwirtschaftlich bewirtschafteten Feldern in der ganzen Schweiz im Rahmen des NFP 68-Projekts NEMATODEN zeigte, dass entomopathogene Nematoden in einem natürlichen Umfeld zahlreicher – etwa viermal häufiger – vorkommen als in landwirtschaftlichen Böden. Die sehr geringe Zahl von Nematoden, die derzeit auf Ackerflächen – unabhängig von den landwirtschaftlichen Praktiken – beobachtet wird, reicht für eine effiziente Kontrolle der bodenbürtigen Schadinsekten nicht aus<sup>89,91</sup>. So waren die entomopathogenen Nematoden bei Fehlen eines spezifischen Schädlings nur für etwa 5 Prozent der Mortalität von Insektenlarven verantwortlich<sup>89,91</sup>. Grund dafür sind in erster Linie diversifizierte Fruchtfolgen: Sie reduzieren die Anzahl der Wirtsinsekten, die für die Reproduktion der entomopathogenen Nematoden entscheidend sind. Hinzu kommen die zahlreichen Störungen des Bodens im Ackerbau, die den Aufbau einer stabilen Nematoden-Population im Vergleich zu nichtbebauten Flächen einschränken. Ein starker Druck durch natürliche Räuber wie etwa nematophage Pilze ist ebenfalls verantwortlich für die

Abbildung 14  
Entomopathogene Nematoden.

Foto: Geoffrey Jaffuel und Neil Villard,  
Universität Neuchâtel.



geringe Zahl von entomopathogenen Nematoden in den landwirtschaftlichen Böden der Schweiz. Schliesslich werden die entomopathogenen Nematoden bei der Suche nach Wirtsinsekten auch stark von detritivoren Nematoden konkurrenziert, denn die meisten Wirtsinsekten enthalten eine Mischung von entomopathogenen und detritivoren Nematoden<sup>89</sup>. Detritivore Nematoden können die Insekten nicht selbst töten, profitieren aber von den Insekten, die die entomopathogenen Nematoden getötet haben, und schränken deren

Vermehrung ein<sup>91</sup>. Die Studien haben aber auch ergeben, dass detritivore Nematoden weder die parasitäre Aktivität noch die Dauer des Entwicklungszyklus von entomopathogenen Nematoden beeinflussen.

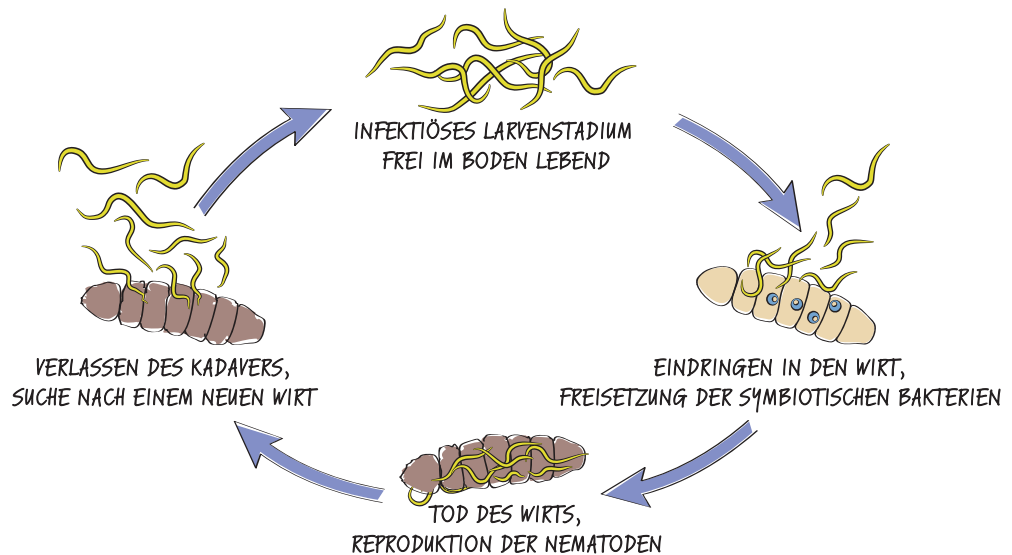
b) Einfluss der landwirtschaftlichen Praktiken  
Das NFP 68-Projekt NEMATODEN untersuchte auch den Einfluss der verschiedenen landwirtschaftlichen Praktiken (Bodenbearbeitung, Fruchtfolge oder Anbau von Zwischenkulturen) und Anbausysteme (konventionell, biologisch oder biodynamisch)

### Lebenszyklus entomopathogener Nematoden

Entomopathogene Nematoden leben in Symbiose mit Bakterien. Im infektiösen Larvenstadium leben die juvenilen Nematoden frei im Boden und suchen aktiv nach Wirtsinsekten. Sind sie in diese eingedrungen, setzen sie die symbiotischen Bakterien in die Körperflüssigkeit der Insekten (Hämolymphe) frei. Die Bakterien vermehren sich und produzieren Toxine, die innerhalb von zwei bis drei Tagen zum Tod des Insekts führen. Die Bakterien sondern auch andere, bis anhin unbekannte Substanzen ab, die den Kadaver vor Angriffen aassfressender Organismen (Würmer, Springschwänze) schützen. Sie ermöglichen auf diese Weise, dass sich die entomopathogenen Nematoden ernähren und fortpflanzen können, bis die Ressourcen vollständig erschöpft sind. Je nach verfügbaren Ressourcen können in einem toten Wirtsinsekt zwei bis drei Generationen von Nematoden zusammenleben. Mehrere tausend infektiöse Jungnematoden verlassen schliesslich den Kadaver und machen sich im Boden auf die Suche nach neuen Wirten.

Abbildung 15  
Lebenszyklus von entomopathogenen Nematoden.

Illustration: Nadja Stadelmann





auf die Abundanz der entomopathogenen Nematoden. Es zeigte sich, dass die meisten Faktoren weder die Anzahl noch die Aktivität der infektiösen Jungnematoden beeinflussen (Tab. 4)<sup>89,90,91</sup>. Einzig die Jahreszeit beeinflusste die Population der entomopathogenen Nematoden signifikant, wobei die Zahl der infektiösen Jungnematoden bei Herbstbeginn höher

war als im Frühjahr<sup>89</sup>. Diese Studien legen den Schluss nahe, dass die Zahl der entomopathogenen Nematoden zu klein ist, um allfällige Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praktiken identifizieren zu können. Es dürfte zudem schwierig sein, in den landwirtschaftlichen Böden ein günstiges Umfeld für die Entwicklung von nativen entomopathogenen Nematoden-

**Tabelle 4**

Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praktiken auf das Vorkommen entomopathogener Nematoden sowie das Vorkommen und die Aktivität von Pseudomonas-Bakterien, untersucht in Schweizer Langzeitversuchen oder in jährlichen Versuchen.

NFP 68-Projekte NEMATODEN und BODENBAKTERIEN

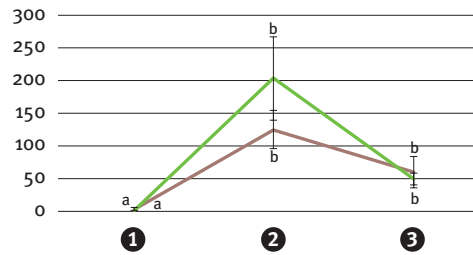
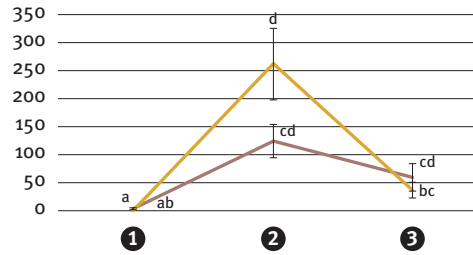
– nichtuntersuchte Faktoren.  
DAPG: 2,4-Diacetylphloroglucinol  
PHZ: Phenazine  
PRN: Pyrolnitrine

Untersuchter Faktor	Verwendeter Langzeitversuch (Anhang 1)	Vorkommen (Abundanz) entomopathogener Nematoden	Menge an sekundären Stoffwechselprodukten (DAPG, PRN und PHZ), die von Pseudomonas-Bakterien produziert wurden	Aktivität der Pseudomonas-Bakterien: Resistenz gegenüber Auflaufkrankheit (Pythium, P) und Schwarzbeinigkeit (Gaeumannomyces, G)
<b>Jahreszeit</b>		Herbst > Frühling	–	–
<b>Kulturpflanze</b>		Weizen > Mais und Wiesen	–	–
<b>N-Düngungsdosis</b>	DOK-Versuch	Keine Auswirkung	–	–
<b>Bodenbearbeitung</b>	P29C	Keine Auswirkung	–	–
<b>Fruchtfolge vs. Weizenmonokultur</b>	P20	Keine Auswirkung	–	–
<b>Zwischenkultur</b>		Keine Auswirkung	–	–
<b>Produktionssystem</b>	DOK-Versuch	Keine Auswirkung	DAPG: Dünger > kein Dünger PRN: organischer und mineralischer Dünger, rein mineralischer Dünger > lischer Dünger > kein Dünger PHZ: rein mineralischer Dünger, organischer und mineralischer Dünger > organischer Dünger	P: keine Auswirkung G: organischer und mineralischer Dünger > nur mineralischer oder nur organischer Dünger oder ohne Dünger
<b>Produktionssystem</b>	FAST	–	DAPG: konventionell, ohne Pflügen > biologisch, ohne Pflügen PRN und PHZ: keine Auswirkung	P: biologisch, ohne Pflügen > konventionell, mit und ohne Pflügen G: keine Auswirkung

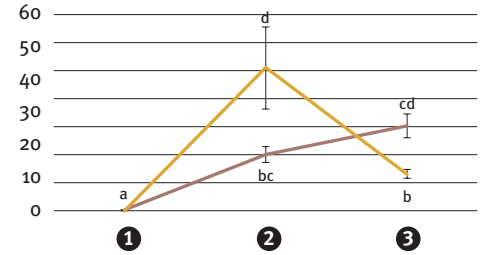
**Abbildung 16**  
Einfluss von Zwischenkulturen (Erbsen und Senf) auf das Vorkommen entomopathogener Nematoden nach Zeitraum und erhöhter Art<sup>90</sup>.

y-Achse: Anzahl der infektiösen Juvenilen/100 g trockener Boden

- ① November (kurz vor der Zugabe der EPN)
- ② Dezember
- ③ März
- Senf
- Bare Erde
- Erbse
- Bare Erde



**Zugabe von *H. bacteriophora***



**Zugabe von *S. feltiae***

Populationen zu schaffen, die eine wirksame Bekämpfung der Bodenschädlinge ermöglichen würden.

c) **Zugabe entomopathogener Nematoden**  
Aufgrund der geringen Präsenz entomopathogener Nematoden in Schweizer Böden und der Schwierigkeiten, die Entwicklung nativer Populationen zu fördern, scheint die Strategie der Augmentation (externe Zugabe von Nematoden) sinnvoller zu sein als jene der Erhaltung. Gegenwärtig sind mehrere Produkte mit entomopathogenen Nematoden zur Bekämpfung von Schädlingen wie Maulwurfsgrillen und Werren (*Carponem*), Larven der Dickmaulrüssler (*Meginem-Pro-Nematoden*) oder auch Trauermückenlarven (*Traunem*) im Handel. Wegen ihres hohen Preises werden diese Produkte hauptsächlich im Gemüsebau eingesetzt. Das NFP 68-Projekt NEMATODEN hat gezeigt, dass durch die Zugabe von zwei Arten, die natürlicherweise bereits im Boden vorhanden sind, die Zahl der infektiösen Jungnematoden zu

Winterbeginn (einen Monat nach der Zugabe) signifikant erhöht werden konnte. Sie wurden im Winter zwar stark dezimiert, blieben aber dennoch erhalten. Ihre Aktivität – das heisst ihre Fähigkeit, Insekten zu töten – hing nicht von ihrer Anzahl ab und variierte je nach Art<sup>91</sup>. Nur bei einer der beiden Arten konnte durch Zugabe infektiöser juveniler Nematoden eine höhere Aktivität festgestellt werden. Welche Art vermehrt wird, ist für die Biokontrolle also besonders wichtig. Bei der suppressivsten Art wurde die stärkste Aktivität Ende Winter gemessen, obwohl die Zahl der infektiösen Jungnematoden zu diesem Zeitpunkt bereits stark gesunken war. Das lässt vermuten, dass die entomopathogenen Nematoden, die den Winter überleben, hoch infektiös waren (Abb. 16).

Das NFP 68-Projekt NEMATODEN hat auch untersucht, wie Zwischenkulturen das Überdauern (Persistenz) zugegebener entomopathogener Nematoden-Populationen beeinflussen. Es wurde davon ausgegangen,

---

## Fazit – entomopathogene Nematoden

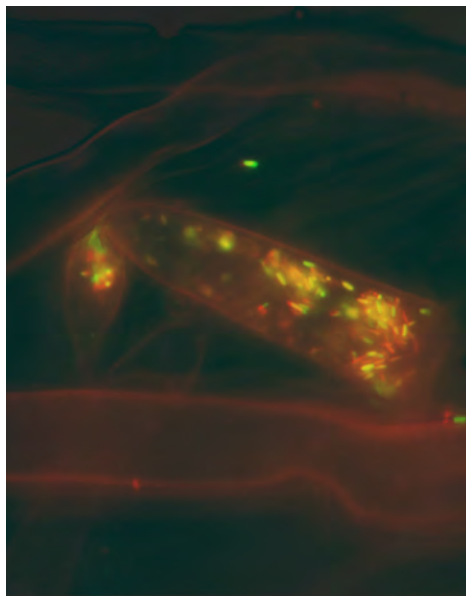
- Bei einem starken Schädlingsbefall reichen die in den landwirtschaftlichen Böden der Schweiz vorhandenen entomopathogenen Nematoden-Populationen nicht aus, um als Bio-kontrollagzien zu wirken.
  - Aufgrund der hohen Kosten von Produkten mit entomopathogenen Nematoden bleibt eine Strategie der Augmentation auf Kulturen mit einem hohen Mehrwert (Gemüsebau) und/oder zur Bekämpfung eines starken Schädlingsbefalls beschränkt.
  - Die Entwicklung nativer Populationen scheint durch keine landwirtschaftliche Praktik begünstigt zu werden.
- 

dass Zwischenkulturen die Persistenz potenziell erhöhen könnten, da sie im Winter einen besseren Bodenschutz gewährleisten. Dies wurde insofern bestätigt, als die Zahl der infektiösen juvenilen Nematoden zu Beginn des Winters (einen Monat nach der Zugabe) durch eine Zwischenkultur (Erbsen oder Senf) erhöht werden konnte, jedoch nicht bis Ende des Winters (Abb. 16)<sup>91</sup>. Die Minustemperaturen

**Abbildung 17**  
Mit *Pseudomonas protegens* (CHAO) besiedelte Weizenwurzeln.

Foto: Christoph Keel,  
Universität Lausanne

Die Bakterien wurden eingefärbt, um die Bildung (Expression) jener antimikrobiellen Gene zu beobachten, die für die Biosynthese von 2,4-Diacetylphloroglucinol (DAPG), Cyanwasserstoff und HCN (grün) notwendig sind.



verminderten die Zahl der entomopathogenen Nematoden stark. In den bedeckten Parzellen wurden gleich viele oder gar weniger infektiöse Jungnematoden gezählt als auf brachliegenden Kontrollflächen. Die Zwischenkulturen hatten somit einen sehr beschränkten Effekt auf die Persistenz der erhöhten Populationen.

## 6.2 Bakterien mit vielfältigen Waffen

Bakterien der Gattung *Pseudomonas* sind allgegenwärtig und in landwirtschaftlichen Böden weit verbreitet (Abb.17). Bestimmte Arten wie *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas protegens* oder *Pseudomonas chlororaphis* unterhalten wechselseitige Beziehungen mit Pflanzen. Sie sind fähig, über Konkurrenzmechanismen oder die Produktion von Antagonisten das Pflanzenwachstum anzuregen und die Pflanzen vor Angriffen gewisser Krankheitserreger und bodenbürtiger Schädlinge zu schützen<sup>93,94</sup>. *Pseudomonas*-Bakterien besiedeln das Wurzelsystem von Pflanzen sehr schnell und halten dort eine dichte Population aufrecht. Sie sind in den Nischen der Rhizosphäre für Krankheitserreger eine starke Konkurrenz im Kampf um Makro- und Mikronährstoffe<sup>95</sup>. Gewisse Arten können auch systemische Resistenzmechanismen in den Pflanzen auslösen<sup>96-98</sup>. Der wichtigste Mechanismus zur Kontrolle von Krankheitserregern und Schädlingen ist jedoch die Antibiose, die auf der Produktion von Antagonisten beruht.

### a) Bekämpfung von Krankheiten und Schädlingen durch Antibiose

*Pseudomonas*-Bakterien, die Stoffwechselprodukte wie 2,4-Diacetylphloroglucinol (DAPG), Phenazine (PHZ), Pyrrolnitrin (PRN) oder Cyanwasserstoff (HCN) erzeugen können, wurden oft mit der Fähigkeit von Böden in Verbindung gebracht, das Auftreten einer oder mehrerer Pilzkrank-

heiten trotz der Präsenz von Krankheitserregern und empfindlichen Wirtspflanzen zu unterdrücken oder einzuschränken (suppressive Böden). So kann auf gewissen Böden bei Weizenmonokulturen eine schrittweise Abnahme der Symptome von Schwarzbeinigkeit (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritica*) beobachtet werden<sup>100</sup>. In solchen Böden spielt *Pseudomonas fluorescens*, das DAPG erzeugt, nachweislich eine zentrale Rolle bei der natürlichen Bekämpfung dieser Krankheit<sup>101</sup>. Ebenso wurde *Pseudomonas fluorescens* in der Rhizosphäre von Tabak in Schweizer Böden isoliert, die natürlicherweise resistent sind gegen die durch *Thielaviopsis basicola* verursachte Schwarzfäule<sup>102</sup>. *Pseudomonas*-Bakterien wirken aber nicht nur gegen Pilze. Sie könnten auch zur effizienten Bekämpfung gewisser Nematoden wie *Meloidogyne incognita* eingesetzt werden, die für Wurzelgallen verantwortlich sind<sup>103</sup>. Gewisse von den *Pseudomonas*-Bakterien produzierte Substanzen – HCN und verschiedene Arten von zyklischen Lipopeptiden – haben zudem eine insektizide Wirkung, etwa auf Larven von Wachsmotten *Galleria mellonella* (NFP 68-Projekt BODENBAKTERIEN)<sup>104</sup>.

#### b) Resistenz der Böden gegen bodenbürtige Krankheitserreger und Abundanz von *Pseudomonas*-Bakterien

Um die praktische Bedeutung der Erkenntnisse über *Pseudomonas* besser einschätzen zu können, wurde im NFP 68-Projekt BODENBAKTERIEN die Resistenz von zehn landwirtschaftlichen Flächen in der Schweiz auf zwei Krankheitserreger getestet: *Gaeumannomyces graminis* var. *tritica*, der Schwarzbeinigkeit verursacht, und *Pythium ultimum*, der verantwortlich ist für die Auflaufkrankheit<sup>105</sup>. Dabei zeigte sich, dass die Resistenz je nach Krankheitserreger und Boden erheblich schwankt. Während einige Böden resistent waren gegen *P. ultimum*,

reagierten sie gleichzeitig höchst anfällig auf *G. graminis* und umgekehrt. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Regulierungsfähigkeit der Böden variabel und für jeden Krankheitserreger spezifisch ist, aber zweifellos von zahlreichen biotischen und abiotischen Faktoren abhängt. Es zeigte sich auch, dass die Abundanz der Bakterien, die DAPG produzieren, viel höher, aber auch unterschiedlicher ist als jene von Bakterien, die PRN oder PHZ produzieren<sup>105</sup>. Zudem schwankte die Bildung (Expression) von Genen zur Biosynthese von DAPG und PHZ je nach Boden. Da die Resistenz der Böden gegenüber *P. ultimum* und *G. graminis* hingegen nicht direkt mit der Abundanz der *Pseudomonas*-Bakterien in Verbindung gebracht werden konnte, ist darauf zu schliessen, dass die Abundanz von *Pseudomonas*-Bakterien in den untersuchten Böden für ihre Resistenz gegenüber den beiden Krankheitserregern eine untergeordnete Rolle spielt. Möglicherweise lässt sich dies damit erklären, dass nur die Population von DAPG produzierenden *Pseudomonas*-Bakterien eine bestimmte Besiedlungsdichte erreichte, die eine wirksame Bekämpfung von Krankheitserregern ermöglichte und auf  $10^5$  koloniebildende Einheiten pro Gramm Wurzeln festgelegt wurde<sup>93,101</sup>. Zwar wird dieser Richtwert zurzeit nicht angewendet, aber er könnte zur Beurteilung des Kontrollpotenzials von *Pseudomonas*-Bakterien herangezogen werden.

#### c) Einfluss der Bodeneigenschaften

Die Unterschiede bezüglich der Abundanz von *Pseudomonas*-Bakterien, der Expression antimikrobieller Gene und der Resistenz gegen *P. ultimum* und *G. graminis* lassen sich durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der im NFP 68-Projekt BODENBAKTERIEN untersuchten Böden kaum erklären<sup>105</sup>. Die Abundanz von Bakterien, die DAPG synthetisieren, beispiels-

## Neue Inokulations- methode

Mehrere Projekte des NFP 68 haben den Nutzen gewisser Organismen (entomopathogene Nematoden, Pseudomonas-Bakterien, Mykorrhizapilze) zur Schädlingsbekämpfung und Pflanzenernährung aufgezeigt. Das Problem besteht gegenwärtig darin, dass es keine Möglichkeit gibt, diese Organismen kostengünstig einzubringen. Das NFP 68-Projekt BIOLOGISCHE SCHÄDLINGSBEKÄMPFUNG hat deshalb die Entwicklung einer Methode zum Ziel, bei der die Organismen in Alginat-Kügelchen eingekapselt werden (Abb. 18, S. 48). Geplant ist zudem die Integration von Substanzen, die die Nematoden in eine Art Schlafzustand versetzen und damit ihre Haltbarkeit (Persistenz) verlängern. Andere Verbindungen sollen die schädlichen Organismen anziehen und sie zum Fressen der Kügelchen animieren. Die ersten Laborversuche verliefen sehr positiv und müssen in Feldversuchen noch bestätigt werden.

weise wurde durch einen hohen Gehalt an Ton, Nitraten und Kalium signifikant gefördert und war in Lehmböden vermindert. Unter den untersuchten Eigenschaften korrelierte einzig der Nitratgehalt positiv mit der Resistenz gegen *P. ultimum*. Es ist daher schwierig zu ermitteln, inwiefern die Nitrate die Resistenz der Böden beeinflusst haben, sei dies durch einen negativen Einfluss auf die Krankheitserreger, eine Multiplikation der nützlichen Bakterien, eine Stimulierung des Pflanzenwachstums oder eine Resistenzbildung von Pflanzen gegen Krankheitserreger.

d) Einfluss der landwirtschaftlichen Praktiken  
Das NFP 68-Projekt BODENBAKTERIEN analysierte auch, inwiefern gewisse landwirtschaftliche Praktiken gefördert werden können, um *P. ultimum* und *G. graminis* auf natürliche Weise zu bekämpfen. In drei Langzeitversuchen wurde nachgewiesen, dass die landwirtschaftlichen Praktiken die Abundanz von Pseudomonas-Bakterien und die Resistenz der Böden gegen diese beiden Krankheitserreger erheblich beeinflussen können (Tab. 4, S. 43). Die mit einem Verzicht auf das Pflügen kombinierte organo-mineralische Düngung begünstigte die Entwicklung der Pseudomonas-Populationen, insbesondere derjenigen, die DAPG synthetisieren können. Hinsichtlich der Resistenz der Böden gegen Krankheiten wirkten sich die Anbautechniken je

nach Krankheitserreger unterschiedlich aus. Wurde in biologisch bewirtschafteten Böden die Resistenz gegen *P. ultimum* verbessert, konnte bei einer konventionellen Bewirtschaftungsmethode (organo-mineralischer Dünger) eine tendenziell höhere Resistenz gegen *G. graminis* beobachtet werden. Diese Ergebnisse müssen durch weitere Versuche bestätigt werden. Sie deuten jedoch darauf hin, dass die landwirtschaftlichen Praktiken einen Einfluss auf die Resistenz des Bodens haben, es aber noch nicht möglich ist, bestimmte Anbaumassnahmen vorzuschlagen, die diese Resistenz fördern. Ausserdem stellt sich bei gewissen Arbeiten die Frage, ob eher Nützlinge gefördert oder Schädlinge bekämpft werden sollen. Pflügen beispielsweise ermöglicht eine Bekämpfung von Fusarien-Pilzen (NFP 69-Projekt SICHERES GETREIDE), hat aber einen negativen Einfluss auf Pseudomonas-Bakterien.

e) Biologische Bekämpfung von Krankheiten und Schädlingen mit Pseudomonas-Bakterien  
Pseudomonas-Bakterien besitzen Eigenschaften – Geschwindigkeit der Besiedlung, Produktion von Antagonisten –, dank deren sie als Biokontrollorganismen besonders geeignet sind. Derzeit sind mehrere Produkte mit Pseudomonaden zur Bekämpfung bestimmter Krankheitserreger im Handel (beispielsweise Pseudomonas

chlororaphis), die zur Behandlung von Saatgut verwendet werden und Pilzparasiten bekämpfen, die unter anderem Blatt- und Spelzenbräune (*Septoria nodorum*) oder Weizensteinbrand (*Tilletia caries*) verursachen. Eine Mischung verschiedener Arten von Pseudomonaden schützt Kartoffeln vor Silberschorf (*Helminthosporium*

---

### Fazit – Pseudomonas

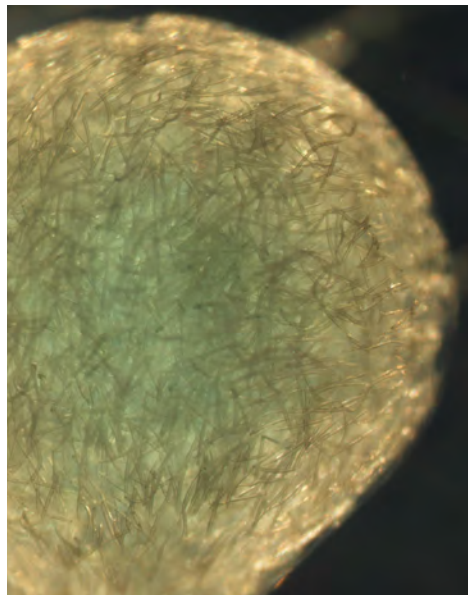
- Pseudomonas-Bakterien sind in Schweizer Böden weit verbreitet.
- Die landwirtschaftlichen Praktiken (Bodenbearbeitung, Düngung) haben einen erheblichen Einfluss auf die Abundanz der Pseudomonaden und die Resistenz der Böden gegenüber gewissen Krankheitserregern. Aufgrund der Forschungen konnte jedoch nicht definiert werden, welche Art von Praktiken für eine Förderung der natürlichen Kontrolle von Schädlingen und Krankheitserregern zu bevorzugen ist.
- Die ersten Ergebnisse einer Beimpfung mit Pseudomonas-Bakterien haben ein Pflanzenschutzpotenzial aufgezeigt, wobei aber bezüglich einer Stimulierung des Pflanzenwachstums nur geringe Vorteile zu erwarten sind.

---

#### Abbildung 18

Alginate-Kügelchen mit entomopathogenen Nematoden und Pseudomonas-Bakterien.

Foto: Jinwon Kim,  
Universität Neuchâtel



solani), Stängelnassfäule (*Erwinia*), Kartoffelmehltau (*Phytophthora*) und der Wurzeltöterkrankheit (*Rhizoctonia*). Im Unterschied zu anderen Bakterien wie dem *Bacillus thuringiensis* werden Pseudomonas-Bakterien derzeit aber nicht zur biologischen Bekämpfung von Frassinsekten eingesetzt. Um dieses Potenzial auszuloten, wurde im NFP 68-Projekt **BODENBAKTERIEN** untersucht, inwiefern unterschiedliche Pseudomonas-Stämme Frassinsekten wie Larven der Maulwurfsgrille oder des Maiswurzelbohrers kontrollieren können. Die Topfversuche haben gezeigt, dass eine wirksame Bekämpfung der Schädlinge mit Pseudomonaden möglich ist. In der kombinierten Anwendung mit entomopathogenen Nematoden wurde eine synergistische Wirkung beobachtet und eine höhere Mortalität nachgewiesen, als wenn diese Organismen einzeln eingesetzt werden.

Im Feldversuch wurde Weizen bei der Aussaat mit verschiedenen Pseudomonas-Stämmen (*Pseudomonas protegens*, *Pseudomonas chlororaphis* und *Pseudomonas* sp. *Proradix*) behandelt. Dadurch war es möglich, Schäden an der Bestockung aufgrund eines massiven Fritfliegenbefalls zu begrenzen, die Überlebensfähigkeit des Weizens zu verbessern und eine grössere Pflanzendichte zu bewahren. Fehlte dieser spezifische Schädling, wurde jedoch keine andere positive Wirkung beobachtet.

Der Umgang mit landwirtschaftlichen Böden muss sich auf festgelegte Beurteilungskriterien abstützen können. Diese müssen den Zielsetzungen der Beurteilung und den Systemen angepasst sein, in denen sie eingesetzt werden (Praktikabilität, erzielt Ergebnis, Kosten). Je nach Zielsetzung geht es darum, Eigenschaften, Verfahren oder Funktionen zu beurteilen, die einen Zustand oder eine Entwicklung des Bodens charakterisieren. Nachfolgend werden wissenschaftliche Methoden vorgestellt, die im Rahmen des NFP 68 entwickelt oder am Rande der Projekte getestet wurden. Präsentiert werden zudem einige Instrumente, die der Praxis relativ einfach zugänglich sind und die Dienstleistungen von Laboratorien ergänzen.

## 7.1 Diagnose

### 7.1.1 Bodenstruktur und andere physikalische Eigenschaften des Bodens

#### a) «Terranimo»

«Terranimo» ([www.terranimo.ch](http://www.terranimo.ch)) ist ein Simulationsmodell für Landwirtinnen und Landwirte, mit dem das Bodenverdichtungsrisiko durch den Einsatz landwirtschaftlicher Fahrzeuge einfach und rasch beurteilt werden kann. Das Modell geht vom Prinzip aus, dass der Druck, den die landwirtschaftlichen Maschinen auf den Boden ausüben, durch die Bodenfestigkeit kompensiert wird. Ist die Festigkeit höher als der Bodendruck, ist das Risiko einer Bodenverdichtung gering. Übersteigt der ausgeübte Druck hingegen die Bodenfestigkeit, besteht eine erhebliche Verdichtungsgefahr. Fahrten auf der entsprechenden Parzelle sind in diesem Fall zu vermeiden. «Terranimo» basiert auf vier Parametern: Radlast, Reifendruck, Feuchtigkeitsgehalt (Saugspannung) und Tongehalt des Bodens. Die Radlast und der Reifendruck entsprechen dem Druck, der auf den

Boden ausgeübt wird und in der Form eines Nomogramms beschrieben werden kann (Abb. 19a, S. 50)<sup>109</sup>. Die Bodenfestigkeit wird ihrerseits durch die Saugspannung und den Tongehalt des Bodens bestimmt (Abb. 19b, S. 50). Diese Druck- und Festigkeitswerte werden auf ein Entscheidungsdiagramm übertragen, das drei Stufen der Verdichtungsgefährdung definiert – keine, beträchtliche oder grosse Gefährdung (Abb. 20, S. 50). Eine komplexere Version, «Terranimo expert», erlaubt Expertinnen und Experten eine umfassende Analyse des Verdichtungsrisikos bei spezifischen Bedingungen.

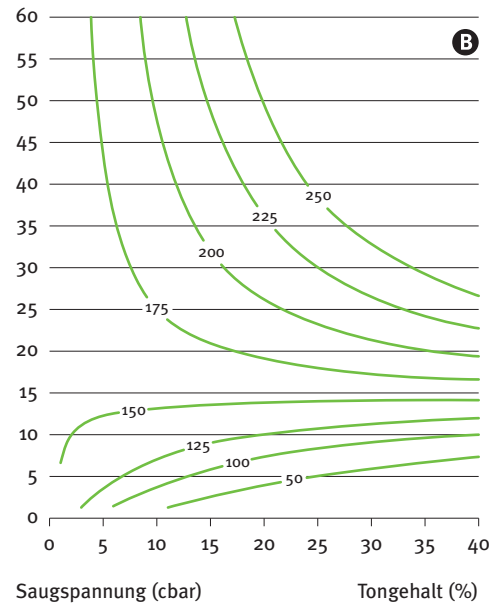
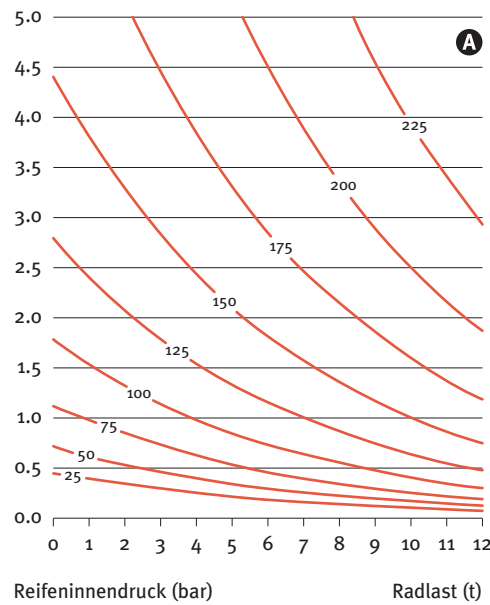
#### b) Spatenprobe

Die Spatenprobe ist eine schon länger verwendete Methode, mit der die Struktur und Fruchtbarkeit des Bodens aufgrund verschiedener Kriterien wie Schichtung, Farbe, Geruch, Durchwurzelung oder Art der Aggregate beurteilt wird. Für die Anwendung in der Praxis stehen erläuternde Videos der Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern<sup>107</sup> und des Forschungsinstituts für biologischen Landbau (FiBL)<sup>108</sup> zur Verfügung. Eine Broschüre von Agridea beschreibt die einzelnen Etappen der Spatenprobe im Detail<sup>109</sup>. Die Spatenprobe liefert ein Bodenprofil im Kleinformat und hat damit den Vorteil, dass sie sofort ausgewertet werden kann. Die Methode ist sehr einfach in der Anwendung und kann daher an mehreren Stellen durchgeführt werden, um der Heterogenität der Parzellen Rechnung zu tragen. Die Spatenprobe lässt sich das ganze Jahr über einsetzen und erlaubt es beispielsweise, Probleme in Zonen zu erkennen, in denen das Pflanzenwachstum eingeschränkt ist, oder die langfristigen Wirkungen bestimmter Anbaupraktiken zu beobachten. Allerdings ermöglicht die Spatenprobe lediglich eine punktuelle Beurteilung. Sie ist zudem teilweise dem Ermessen desjenigen unterworfen, der den

**Abbildung 19**  
 Bodendruck und Bodenfestigkeit  
 in Abhängigkeit der Belastung  
 beziehungsweise der Bodeneigen-  
 schaften.

Quelle: www.terranimoch

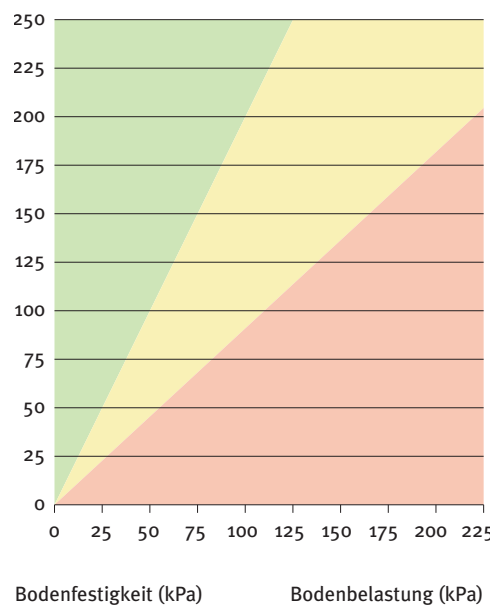
- A** Bodendruck in 35 cm Tiefe und  
 in Abhängigkeit von Radlast  
 und Reifendruck
- B** Bodenfestigkeit in Abhängig-  
 keit des Tongehalts und der  
 Saugspannung



**Abbildung 20**  
 Entscheidungsdiagramm von  
 «Terranimo»®, das die Beziehung  
 zwischen Bodendruck und Boden-  
 festigkeit aufzeigt und die Verdich-  
 tungsgefährdung in drei Stufen  
 einteilt.

Quelle: www.terranimoch

- keine Gefährdung
- erhebliche Gefährdung
- grosse Gefährdung



Test durchführt. Trotz ihrer Einfachheit ist diese Methode aber zeitaufwendig, insbesondere bei der erstmaligen Durchführung und wenn Proben – wie empfohlen – mehrfach entnommen werden sollen. Bei steinig, trockenen oder stark verdichteten Böden ist eine Spatenprobe zudem nicht möglich. Diese Methode eignet sich für Landwirtinnen und Landwirte, wobei für die Umsetzung eine fachliche Anleitung (Broschüre oder Video) notwendig ist. Die Spatenprobe gibt Auskunft über den physikalischen Zustand des Bodens und ermöglicht es, allfällige Probleme zu erkennen (Verdichtung, Luftmangel). Dank dieser Beobachtungen können Landwirtinnen und Landwirte geeignete Massnahmen (Einsatz von Maschinen, organische Düngung, Änderungen der Fruchtfolge) ergreifen.

c) Visuelle Beurteilung der Bodenstruktur (Vess)  
 Die Vess-Methode («Visual Evaluation of Soil Structure»)<sup>110</sup> ist ein einfacheres



und schnelleres Verfahren als die Spatenprobe, weil es sich auf die Qualität der Bodenaggregate und die Porosität konzentriert. Die strukturelle Beschaffenheit des Bodens wird nach einem System benotet – von 1 für einen bröckeligen Boden bis 5 für einen sehr kompakten Boden –, indem Bodenproben mit Bildern auf einer Karte verglichen werden. Diese Methode lässt sich relativ einfach in der Praxis anwenden. Die *vess*-Methode, bei der die Bodenprobe anhand einer speziellen Karte benotet wird, richtet sich ebenfalls an Landwirtinnen und Landwirte. Wie die Spatenprobe erlaubt sie die Beurteilung des strukturellen Zustands des Bodens und eine Anpassung der Anbaumethoden, falls Probleme erkannt werden.

Die *vess*-Methode wurde weiterentwickelt, damit sie im Labor für kleine Proben wie Bodenbohrkerne angewendet werden kann (*Corevess*)<sup>111</sup>. Dabei mussten aufgrund der geringen Probengrösse zwei Beurteilungsparameter gestrichen werden. Beibehalten wurden drei Kriterien: Bildung von Bruchstücken/Aggregaten, Form der Aggregate und sichtbare Porosität. Wie bei der *vess*-Methode werden die Proben mit 1 bis 5 benotet. Der *Corevess*-Test kann bei zahlreichen Proben vorgenommen werden und unterliegt weniger dem Ermessen der Person, die in durchführt. Die Ergebnisse verschiedener Proben lassen sich zudem vergleichen, da die Probenfeuchtigkeit vor der Benotung standardisiert wird. Deshalb entspricht die visuelle Beurteilung nach der *Corevess*-Methode sehr eng der Beurteilung der physikalischen Eigenschaften des Bodens im Labor. Allerdings erfordert die *Corevess*-Methode, die zwischen Feld- und Laboruntersuchung einzuordnen ist, mehr Material (Vakuumpumpe) als die *vess*-Methode und erlaubt keine sofortige Beurteilung der Struktur (Aufbereitungszeit). Um die Umsetzung der *vess*-Methode zu

erleichtern, hat die Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (Hepia) eine kostenlose App<sup>112</sup> entwickelt. Sie enthält eine umfassende Fotodatenbank mit Beiträgen aus zahlreichen Ländern. Diese Methode eignet sich für das Monitoring einer grossen Anzahl von Parzellen durch Forschende oder Beraterinnen und Berater. Sie ermöglicht einen Vergleich der Auswirkungen verschiedener Praktiken auf die Bodenstruktur und damit eine optimale Beratung der Landwirtinnen und Landwirte hinsichtlich der besten Bewirtschaftungspraxis.

#### d) Vereinfachter Infiltrometer-Versuch von Beer Kan

Mit dem Beer-Kan-Test<sup>113</sup> kann die Wirkung der Makroporen auf die Infiltrationszeit von Wasser in den Boden beurteilt werden. Bei diesem Versuch wird ein bestimmtes Wasservolumen bei feuchten Bedingungen – aber ohne überschüssiges Wasser auf der Oberfläche – in einen im Boden versenkten Zylinder geleert und die Zeit gemessen, bis das Wasser vom Boden aufgenommen wird. Der Versuch eignet sich für die Praxis, da er sich einfach durchführen lässt und keine besonderen Materialien erfordert<sup>113</sup>. Ausserdem lassen sich die Ergebnisse, die in grafischer Form präsentiert werden, einfach interpretieren. Um der Heterogenität des Bodens Rechnung zu tragen, muss der Versuch allerdings mehrmals (6- bis 10-mal) wiederholt werden, was entsprechend lange dauert. Die Ergebnisse können zudem verzerrt sein, wenn Fauna oder Pilze vorhanden sind, die Makroporen verursachen. Ausserdem lässt sich der Test nur auf einer ebenen Fläche und bei feuchten Bodenbedingungen durchführen. Die Ergebnisse können unterschiedlich sein und lassen sich nur schwer mit dem klassischen Infiltrometer-Versuch verbinden, der nicht die gleiche Porosität berücksichtigt.

Dieser Test, konzipiert für Landwirtinnen und Landwirte, ermöglicht, die Infiltrationszeit von Wasser in den Boden zu beurteilen und damit eine Verdichtung zu erkennen. Falls die Testergebnisse auf Probleme hinweisen, können die Landwirtinnen und Landwirte Massnahmen zur Regeneration der Bodenstruktur ergreifen.

#### e) Verhältnis von obs zu Ton

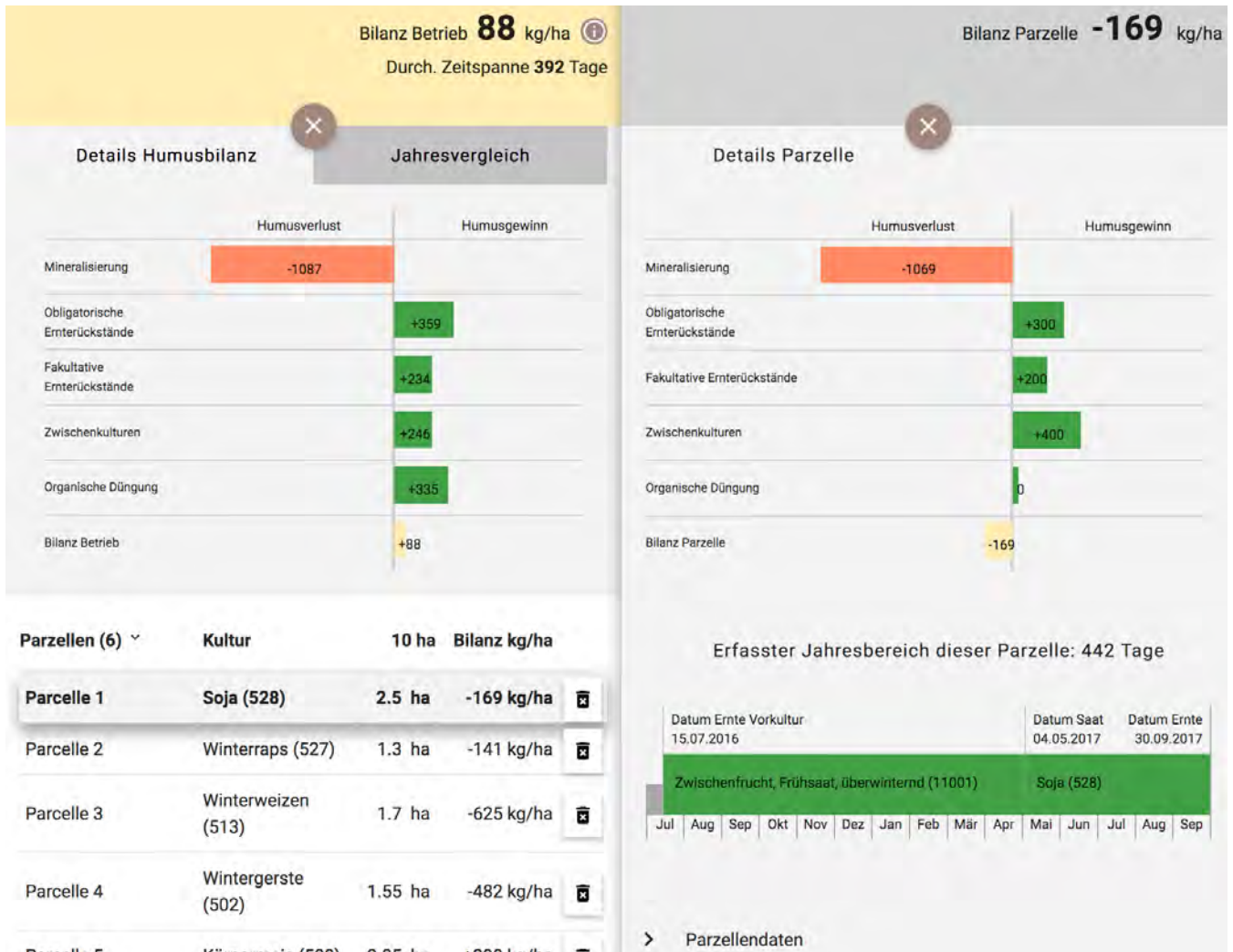
Die Spatenprobe und die *verss*-Methode liefern einen visuellen Hinweis auf die Bodenstruktur. Sie sind aber kein Ersatz für vertiefte Laboranalysen, ergänzen sie nur. Empfehlenswert ist insbesondere eine regelmässige Analyse des obs-Gehalts, beispielsweise einmal pro Fruchtfolge. Ist die obs mit Ton verbunden, schützt sie dies vor einer Zersetzung durch Mikroorganismen. Das Verhältnis von obs zu Ton ist denn auch stark mit gewissen physikalischen Bodeneigenschaften wie dem Raumgewicht korreliert<sup>114</sup>. Eine Untersuchung von 161 Schweizer Böden wies eine Beziehung zwischen diesem Verhältnis und der Qualität der Bodenstruktur nach, die mit der *Coreverss*-Methode beurteilt wurde<sup>115</sup>. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde festgelegt, dass 17 Prozent der Tonmasse mit obs verbunden sein sollten, um eine gute Bodenstruktur zu gewährleisten. Unterhalb dieses Grenzwerts wird eine schlechte Bodenstruktur beobachtet. Der Wert wird je nach Bodennutzung – Ackerbau, Grasland – angepasst, könnte aber auch als anzustrebender Zielwert dienen. Auf der Basis von Bodenanalysen können Landwirtinnen und Landwirte das Verhältnis obs zu Ton berechnen. Damit können sie den Zustand ihres Bodens beurteilen und einen Zielwert festlegen, der durch den Tongehalt des Bodens definiert ist. Verbesserungen können dadurch erreicht werden, dass Ernterückstände liegen gelassen, regelmässig organische Dünger zugeführt oder Zwischenkulturen angepflanzt werden.

#### f) Humusbilanz

In einem ausgewogenen System ist der obs-Gehalt relativ stabil. Allerdings liessen sich langfristige Entwicklungen beobachten, die im Zusammenhang stehen mit landwirtschaftlichen Praktiken. Regelmässige Analysen, beispielsweise einmal pro Fruchtfolge, helfen, den Humusgehalt zu beurteilen und die Düngung zu planen. Sie sind jedoch in der Regel kostspielig. Kostengünstige Methoden wie die Infrarot-Spektrometrie wurden zwar entwickelt, sind in der Praxis aber noch immer schlecht verfügbar. Anhand dieser Methoden lässt sich zudem nicht beurteilen, wie sehr die eingesetzten landwirtschaftlichen Praktiken den obs-Gehalt beeinflussen, was mit der obs-Bilanz möglich ist. Aufbauend auf der Berechnungsmethode von Neyroud<sup>116</sup> hat Agroscope einen «Humusbilanz-Rechner»<sup>117</sup> entwickelt. Landwirtinnen und Landwirte können diesen kostenlos nutzen und so abschätzen, ob die Bewirtschaftung den Humusgehalt erhalten oder fördern kann oder ob ein Risiko für Humusverlust besteht. Die Daten stehen auch den Forschenden zur Verfügung, die die Entwicklung des Humusgehalts der Böden kartieren.

Bei dieser Humusbilanzierungsmethode wird die Zufuhr von organischer Substanz durch Ernterückstände, Zwischenkulturen und organische Dünger mit dem obs-Verlust durch Abbau verglichen. Die Berechnung erfolgt pro Parzelle und Betrieb für sämtliche Ackerflächen (einschliesslich Kunstwiesen). Das Ergebnis wird grafisch dargestellt und zeigt den Einfluss der verschiedenen Bewirtschaftungspraktiken auf den Humusverlust oder -gewinn (Abb. 21).

Der Humusbilanz-Rechner interpretiert das Ergebnis bezüglich der Auswirkungen auf den Boden und listet empfohlene Mass-



**Abbildung 21**  
Humusbilanz-Rechner von Agroscope.

Links: Humusbilanz des Betriebs, berechnet anhand der Bilanzen pro Parzelle.

Rechts: Notwendige Parameter zur Berechnung der Humusbilanz.

nahmen anhand von sechs Klassen auf (Tab. 5, S. 54). Da für die Berechnung der Humusbilanz der aktuelle obs-Gehalt nicht berücksichtigt wird, ist bei der Interpretation absoluter Bilanzergebnisse Vorsicht geboten.

In den Nachbarländern der Schweiz werden andere Humusbilanzierungsmethoden eingesetzt. In Deutschland ist die Humusbilanzierungsmethode der Vereinigung der

deutschen landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) am weitesten verbreitet<sup>118</sup>. Diese berechnet den Humusbedarf der angebauten Kulturen für die Mineralisierung von Nährstoffen und vergleicht ihn mit der Humuszufuhr durch Ernterückstände und organische Düngung. In Frankreich hilft die Methode SIMÉOS-AMG<sup>119</sup>, die Wirkungen der Zufuhr von Ernterückständen, der Bodenbearbeitung, des Anbaus von Zwischen-

**Tabelle 5**  
 Beurteilungsschema der Humusbilanz-Ergebnisse, die mit dem Humusbilanz-Rechner von Agroscope berechnet wurden.

www.humusbilanz.ch

Humusbilanzergebnis (kg/ha)	Beurteilung	Folgen	Empfohlene Massnahmen
Geringer als -400	sehr tief	Humusverlust ist zu erwarten; damit besteht eine ernsthafte Gefahr für Bodenqualität und Bodenfunktionen, insbesondere auch für die Stabilität der Bodenstruktur.	Unbedingt humusfördernde Massnahmen einführen bzw. verbessern! Anpassung der Fruchtfolge, vermehrt organische Dünger einsetzen, Zwischenkulturen, konservierende Bodenbearbeitung.
Zwischen -400 und -200	tief	Erhöhtes Risiko von Humusverlust; damit besteht die Gefahr von ungünstigen Auswirkungen auf Bodenqualität und Bodenfunktionen.	Humusfördernde Massnahmen verbessern: Anpassung der Fruchtfolge, vermehrt organische Dünger einsetzen, Zwischenkulturen (konservierende Bodenbearbeitung).
Zwischen -200 und 200	ausgeglichen	Die Humusversorgung sollte für die Erhaltung des Humusgehalts ausreichend sein.	Falls negativ: Verbesserungen bei humusfördernden Massnahmen prüfen. Ansonsten: Bewirtschaftung beibehalten, humusfördernde Massnahmen weiterhin beachten.
Grösser als +200 bis +400	hoch	Eine Zunahme des Humusgehalts und eine Stabilisierung auf einem höheren Niveau sind zu erwarten; damit sind günstige Wirkungen auf Bodenqualität und Bodenfunktionen zu erwarten.	Bewirtschaftung beibehalten.
Grösser als +400 bis +800	sehr hoch	Eine Zunahme des Humusgehalts und eine Stabilisierung auf einem höheren Niveau sind zu erwarten; damit sind günstige Wirkungen auf Bodenqualität und Bodenfunktionen zu erwarten.	Bewirtschaftung beibehalten; Massnahmen zur Reduktion des Risikos für Nährstoffauswaschung beachten: Düngung mengenmässig und zeitlich möglichst nahe am zu erwartenden Entzug durch Pflanzen, Brache in Herbst und Winter vermeiden.
Grösser als 800	kritisch	Bei extrem hohem Humusbilanzergebnis werden Humusgehalt und Bodenqualität zwar gefördert. Die grossen Mengen an zugeführten organischen Substanzen führen aber gleichzeitig zu einem hohen Mineralisierungspotenzial und damit zu einem hohen Risiko für Nährstoffauswaschung.	Unbedingt Massnahmen gegen Nährstoffauswaschung ergreifen, insbesondere Düngung mengenmässig und zeitlich möglichst nahe am zu erwartenden Entzug durch Pflanzen, Brache im Herbst und Winter vermeiden, ebenso intensive, tiefgreifende Bodenbearbeitung.

kulturen oder die Fruchtfolge zu beurteilen. Ausgehend von einfachen Informationen (Tongehalt, Anbau von Zwischenkulturen) ermöglichen es diese Methoden, den Einfluss landwirtschaftlicher Praktiken auf den *obs*-Gehalt rasch zu bestimmen. Für eine präzisere Abschätzung der langfristigen Entwicklung, etwa für Forschungszwecke, sind allerdings komplexere Modelle erforderlich, beispielsweise RothC<sup>120</sup>, DayCent (verwendet im *FACCE-JPI*-Projekt *CLIMATE CAFE*) oder Stics (verwendet im *NFP 68*-Projekt *GRÜNDÜNGUNG*). Bei diesen Modellen sind jedoch deutlich mehr Informationen zum Standort und zur Art des Betriebs notwendig als bei den einfachen Humusbilanzierungsmethoden.

### 7.1.2 Fähigkeit der Böden, die Pflanzen mit Nährstoffen zu versorgen

Zur Beurteilung der Fähigkeit der Böden, wichtige Nährstoffe für die Pflanzenernährung zu speichern und freizusetzen, werden im Wesentlichen Bodenanalysen

im Labor verwendet. Die Analyse der Kationenaustauschkapazität (*KAK*) gibt Aufschluss über die Fähigkeit des Bodens, spezifische Elemente zu binden ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Mit der Analyse der Bodennährstoffe kann sowohl die Gesamtmenge an Nährstoffen als auch die Menge abgeschätzt werden, die für die Pflanzen direkt verfügbar ist. Diese Schätzungen sind zu berücksichtigen, wenn ein Düngungsplan erstellt wird, der die Bedürfnisse der Kultur abdeckt und die Gefahr eines Eintrags von Dünger in die Umwelt begrenzt. Die «Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz» (*GRUD 2017*)<sup>64</sup> enthalten Tabellen zu allen wichtigen Nährstoffen, die es erlauben, die Nährstoffversorgung des Bodens anhand der Analyseergebnisse zu beurteilen, sowie Angaben zur Düngungsbemessung für die wichtigsten Schweizer Kulturen (Ackerbau, Futterbau und Spezialkulturen), die auf Forschungsergebnissen basieren.

Auch Feldbeobachtungen können Hinweise auf den Zustand der chemischen Bodenfruchtbarkeit geben. Dabei lassen sich Symptome für einen Nährstoffmangel oder -überschuss in den Kulturen, aber auch Bioindikator-Pflanzen beobachten, die auf einen spezifischen Zustand hindeuten. Einfache Tests wie die Messung des pH-Werts des Bodens mit Teststreifen oder einem pH-Meter oder die Beurteilung der Kalkmenge mit Säure sind im Feld ebenfalls möglich.

### 7.1.3 Bodenbiologie

#### a) Teebeutel-Test

Die Aktivität der Bodenorganismen lässt sich gesamthaft beurteilen, indem die Abbaugeschwindigkeit der organischen Substanz beobachtet wird, von der sie sich ernähren. Eine der Methoden zur Messung

**Abbildung 22**  
Sliptest für die visuelle und vergleichende Beurteilung der biologischen Aktivität des Bodens.

Foto: Max Fuchs (oben),  
Vincent Tauxe (unten)



**Abbildung 23**  
Köderstreifentest.

Foto: Alexandra Schröder, Agroscope

links:  
PVC-Stäbchen für den Köderstreifentest  
rechts:  
im Boden eingesteckte Stäbchen



dieser Geschwindigkeit besteht darin, einen abgewogenen Beutel mit totem Pflanzenmaterial im Boden zu vergraben und diesen nach einer gewissen Zeit erneut zu wägen. Der Gewichtsverlust entspricht der Menge der abgebauten Substanz. Diese Methode wurde mit Teebeuteln standardisiert («Tea bag test»)<sup>121</sup>. Die einfache Durchführbarkeit und die geringen Kosten machen ihn für ein breites Publikum anwendbar. Allerdings nimmt dieser Test rund 90 Tage in Anspruch und muss sorgfältig durchgeführt werden (Bestimmung der Bereiche, wo die Teebeutel vergraben werden, präzises Wägen der Teebeutel). Die Standardisierung der Methode erlaubt aber auch einen Vergleich von Ergebnissen aus aller Welt, denn sie können den Forschenden online<sup>122</sup> zur Verfügung gestellt werden und tragen damit zur Weiterentwicklung des Wissens über den Abbau von OBS bei.

Zur Durchführung dieses Tests können auch andere Quellen von organischer Substanz verwendet werden. So wurde nach

dem gleichen Prinzip ein mit Streu gefüllter Nylonsack, der sogenannte LEVA-bag<sup>123</sup>, entwickelt. Er hat den Vorteil, dass er größer ist und das Wägen leichter fällt. Hingegen muss er länger (rund vier Monate) vergraben bleiben.

Für die visuelle und vergleichende Beurteilung der biologischen Aktivität des Bodens hat der kanadische Rat für Bodenschutz (Conseil canadien de conservation des sols, CCCS) eine Methode vorgeschlagen, die Baumwollslips als Quelle der organischen Substanz verwendet (Abb. 22, S. 55)<sup>124</sup>.

#### b) Köderstreifentest

Der Köderstreifentest<sup>125</sup> ist eine standardisierte visuelle Beurteilung mithilfe perforierter PVC-Stäbchen, die mit Ködersubstrat gefüllt sind (Mischung aus Zellulose, Weizenkleie und Aktivkohle im Verhältnis 70 : 27 : 3, Abb. 23). Diese Stäbchen werden in den Boden gesteckt und je nach Feuchtigkeit des Bodens nach 7 bis 20 Tagen wieder entfernt. Danach wird der Anteil des gefressenen Köders (leere Löcher) geschätzt. Der Test geht von der Annahme aus, dass der nicht mehr im Stäbchen vorhandene Köder von den Bodenorganismen konsumiert wurde. Mit dieser relativ einfachen, schnellen und kostengünstigen Methode lässt sich die Abbauaktivität innerhalb einer Parzelle vergleichen oder der Einfluss verschiedener Anbautechniken beurteilen. Der Test kann über einen langen Zeitraum durchgeführt werden. Um die Veränderungen der Abbauaktivität aufgrund der klimatischen Bedingungen ebenfalls zu berücksichtigen, werden die Stäbchen nach und nach ersetzt. Ausserdem kann der Köder zur Untersuchung spezifischer Organismen angepasst werden. Die Möglichkeiten sind allerdings beschränkt, weil nur pulverförmige Stoffe verwendet werden können. Aufgrund der schwierigen Inter-

---

## Regenwurmkategorien

---

- **Epigäische Regenwürmer** sind kleine, 1 bis 5 Zentimeter lange, stark pigmentierte (dunkelrote) Würmer. Sie leben an der Oberfläche, in Streuschichten von organischem Material, das sich in Zersetzung befindet. Sie graben kaum oder nur wenig und vermehren sich rasch.
  - **Anözische Arten** sind grosse Regenwürmer (10 bis 110 cm), die in mehr oder weniger senkrechten Röhren leben und an die Oberfläche kommen, um sich von sich zersetzendem organischem Material zu ernähren. Sie pflanzen sich wenig fort, können aber ungestört mehrere Jahre leben. Anözische Arten mit rotem Kopf sind ziemlich häufig und widerstandsfähiger gegenüber landwirtschaftlichen Praktiken als anözische Schwarzkopfrege Würmer, die von einem gesunden Boden zeugen.
  - **Endogäische Arten**, die 1 bis 20 cm lang sind, haben eine helle Pigmentierung. Sie kommen nur selten an die Oberfläche und graben weit verzweigte, eher horizontale und nicht dauerhafte Röhren.
- 

pretation der Ergebnisse ist der Test für die Praxis jedoch nur von beschränkter Bedeutung. Er besitzt jedoch einen didaktischen Wert, da sich mit ihm Unterschiede aufzeigen lassen und ein gezielter Vergleich möglich ist, beispielsweise zwischen behandelten und nichtbehandelten Flächen.

### c) Beobachtung der Regenwurmpopulationen

Regenwürmer werden oft als Indikator für das Bodenleben verwendet, weil sie leichter quantifizierbar sind als andere kleinere Organismen. Regenwurmpopulationen können durch Sieben der Erde nach einem Bodenaushub quantifiziert werden. Andere Methoden bestehen darin, die Regenwürmer mit Strom oder Ködern aus dem Boden zu locken. Nach der Entnahme werden die Würmer in vier Kategorien eingeteilt: epigäische und endogäische Würmer sowie anözische Würmer mit rotem und schwarzem Kopf (Kasten). Diese leicht umsetzbare und sehr kostengünstige Methode<sup>126</sup> kann von allen durchgeführt werden. Die

Ergebnisse lassen sich über eine Online-Datenbank<sup>127</sup> bewerten. Sie bietet die Möglichkeit, die Entwicklung der Anzahl Regenwürmer mitzuverfolgen, die Ergebnisse zu vergleichen und Referenzwerte für diese Makroorganismen festzulegen. Allerdings kann die Zählung nur zwischen Januar und April durchgeführt werden, in der Periode, in der die Würmer voll aktiv sind. Für die Forschung ist zudem eine genauere Identifizierung der Arten notwendig.

### d) Abundanz und Vielfalt von Mykorrhizapilzen

Die Zusammensetzung der im Boden lebenden Mykorrhizagemeinschaften kann durch eine Analyse der Sporen unter dem Mikroskop bestimmt werden. Diese Methode ist allerdings aufwendig und erfordert grosses Fachwissen. Seit den 1990er-Jahren kommen zunehmend molekulare Instrumente zum Einsatz. Allerdings ist bei den bisher verwendeten Verfahren die Auflösung für eine Identifizierung der Pilze zu gering. Im Projekt «High-resolution community profiling of arbuscular mycorrhizal fungi» wurde deshalb eine neue Methode entwickelt, mit der verschiedene Arten identifiziert und quantifiziert werden, auch wenn sie sehr eng verwandt sind<sup>128</sup>. Sie hat den Weg freigemacht für neue Studien über den Einfluss von Produktionssystemen auf die Abundanz und Vielfalt von Mykorrhizagemeinschaften (Kapitel 5.1, S. 34). Das Verfahren scheint grundlegend zu sein für die gezielte Beimpfung mit Mykorrhizapilzen, die den örtlichen Boden- und sonstigen Bedingungen angepasst sind, und ist deshalb weiterzuentwickeln.

### e) Aktivität der entomopathogenen Nematoden

Die Aktivität entomopathogener Nematoden wird in der Regel mithilfe von Ködern (Wirtsinsekten) beurteilt. Dieses Verfahren ist jedoch nicht sehr zuverlässig, weil

die Infektionsrate je nach Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, Porosität) schwankt. Zudem ist es sehr arbeits- und zeitaufwendig. Das Projektteam des NFP 68-Projekts NEMATODEN entwickelte auf Basis molekularer Untersuchungstechniken Analysesets, mit denen in einer Bodenprobe verschiedene Arten entomopathogener Nematoden, nematodenfänger Pilze, eine Art eines ektoparasitären Bakteriums sowie detritivore Nematoden der Gattung *Acrobeloides* präzise quantifiziert werden können<sup>89</sup>. Diese Technik ist schnell, kostengünstig und zuverlässiger als die herkömmliche Methode mit Ködern<sup>129</sup>. Damit bietet sie interessante Perspektiven für eine genauere Untersuchung der Ökologie entomopathogener Nematoden. Allerdings ist sie ebenso wie die Analyse der Mykorrhizagemeinschaften gegenwärtig nur für die Forschung zugänglich.

## 7.2 Monitoring

### 7.2.1 Langzeitversuche

Langzeitversuche ermöglichen eine langfristige Beobachtung der Auswirkungen spezifischer Anbautechniken oder sogar von Produktionssystemen. In zahlreichen Ländern haben solche Versuche massgeblich dazu beigetragen, das Wissen und die Anwendung neuer Techniken ausgehend von der Entwicklung der Bodenqualität und der Ertragsleistung von Kulturpflanzen voranzubringen<sup>162</sup>. Der Aufbau und die Durchführung derartiger Versuche sind relativ teuer, doch sind sie unverzichtbar und können nicht durch jährliche Tests, neue analytische Methoden oder Modelle ersetzt werden. Ganz im Gegenteil: Langzeitversuche erlauben die Kalibrierung neuer analytischer Methoden. Gegenwärtig sind in der Schweiz fünfzehn Langzeitversuche im Gang (Anhang I), fünf davon bereits seit über 40 Jahren. Sie

konzentrieren sich im Wesentlichen auf organische und mineralische Düngemittel, die Bodenbearbeitung und die Fruchtfolge, aber auch auf Produktionssysteme. Andere Produktionsfaktoren wie der Anbau von Zwischenkulturen oder die Sortenwahl werden auch über kürzere Zeiträume untersucht.

Die Langzeitversuche waren für das NFP 68 von grosser Bedeutung und ermöglichten es, neue Erkenntnisse zum Einfluss der landwirtschaftlichen Praktiken auf die Populationen von Bodenorganismen – entomopathogene Nematoden, *Pseudomonas*-Bakterien, AM – zu gewinnen. Zudem haben sie zur Entwicklung bodenschonender Anbausysteme beigetragen (NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG, Bodenbearbeitungsversuch P29C). Das NFP 68 hat zudem die Notwendigkeit neuer zielgerichteter Dispositive aufgezeigt, die eine langfristige Überwachung ermöglichen, analog zur Versuchsanlage zur Beobachtung der Bodenstruktur in Reckenholz.

### 7.2.2 Betriebsnetzwerke

Betriebsnetzwerke sind ein weiteres grundlegendes Instrument, um den tatsächlichen Einfluss bestimmter Anbaumethoden oder Produktionssysteme nachzuvollziehen. In der Praxis tragen sie zudem zur Akzeptanz bodenschonender Techniken bei. Im Rahmen des NFP 68-Projekts BODENVERBESSERENDE ANBAUSYSTEME wurden zwei Netzwerke mit je dreissig Betrieben gebildet (Kap. 4.4, S. 33). Das Ziel bestand darin, den Beitrag verschiedener Anbausysteme zum Schutz der Bodenfunktionen zu beurteilen. Die ersten Ergebnisse belegen die Bedeutung solcher Netzwerke als Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung, aber auch für eine umfassendere Untersuchung der Kontexte und von Erkenntnissen aus der Praxis.



### 7.2.3 Informationssysteme

#### a) Bodenmessstationen

##### für Saugspannung

Die Saugspannung oder Bodenwasserspannung bezeichnet die Kraft, die der Boden auf das Wasser in den Bodenporen ausübt. Sie hängt von der Beschaffenheit des Bodens, dem *obs*-Gehalt, der Grösse der Poren und der Bodenfeuchte ab. Je feuchter der Boden ist, desto schwächer ist die Saugspannung. Eine hohe Saugspannung stabilisiert die festen Bestandteile des Bodens. Unter solchen Bedingungen ist die Tragfähigkeit des Bodens hoch und das Verdichtungsrisiko gering.

In acht Schweizer Kantonen (Solothurn, Basel-Landschaft, Genf, Zug, Freiburg, Bern, Waadt und Aargau) wurde ein Netzwerk von 38 Messstationen eingerichtet<sup>130</sup>, um die Saugspannung des Bodens, Niederschläge, Boden- und Lufttemperatur während des ganzen Jahres zu beobachten. Die Saugspannung gibt in Echtzeit Auskunft über den Feuchtigkeitszustand des Bodens und ermöglicht eine Beurteilung seiner Tragfähigkeit und damit des Verdichtungsrisikos. Die Daten des Bodenmessnetzes sind frei zugänglich und werden anhand von Parametern analysiert, die mit der Mechanisierung zusammenhängen (Radlast, Reifendruck). Sie sind ein wesentliches Entscheidungskriterium für den Einsatz von Baumaschinen.

Das Bodenmessnetz bietet für die Landwirtschaft interessante Perspektiven, weil es die Befahrbarkeit je nach Bodenfeuchtigkeit beurteilt und damit eine Senkung des Verdichtungsrisikos ermöglicht. Die Daten können auch als Entscheidungshilfe bei einem allfällig notwendigen Bewässerungseinsatz in Trockenphasen dienen. Die online verfügbaren Informationen erlauben es, die Entwicklung der Bodenfeuchte einfach

zu verfolgen, und enthalten der Bodenfeuchte entsprechende Handlungsanweisungen, um Schäden zu vermeiden. Zur besseren Risikobeurteilung können die ermittelten Saugspannungswerte zudem in einem Simulationsmodell wie «Terranimo» (Kapitel 7.1.1, S. 49) verwendet werden.

#### Erosionsrisikokarte

Für die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) der Schweiz ist eine Erosionsrisikokarte online<sup>131</sup> verfügbar. Das Risiko wurde auf der Grundlage örtlicher Parameter wie Hangneigung, Hanglänge, Niederschläge und Bodeneigenschaften modelliert und in drei farblich dargestellte Gefahrenstufen eingeteilt<sup>39</sup>. Die Karte liefert einen raschen Überblick über die Risikosituation und ist ein gutes Präventionsmittel, um geeignete langjährige Schutzmassnahmen zu erarbeiten. Allerdings wurde bei der Berechnung des Erosionsrisikos weder die Bodennutzung noch die Art der Bewirtschaftung berücksichtigt. In gewissen Fällen können die tatsächlichen Gegebenheiten deshalb stark von den Vorhersagen des Modells abweichen. So kann in Gebieten, wo gemäss Karte kein Risiko besteht, Wasser beispielsweise über Strassen oder undichte Kanalisationen von ausserhalb des Perimeters einsickern und Erosionsschäden verursachen. Umgekehrt ist es auch möglich, dass das Erosionsrisiko in als gefährdet eingestuften Zonen bereits durch Schutzmassnahmen (Wiesen, reduzierte Bodenbearbeitung) reduziert worden ist.

#### b) Nationale Bodenbeobachtung (NABO)

Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO; [www.nabo.ch](http://www.nabo.ch)) umfasst 103 über die ganze Schweiz verteilte Standorte, die repräsentativ sind für die verschiedenen Bodennutzungstypen. Seit 1985 werden an diesen Standorten alle fünf Jahre Proben entnommen und analysiert, um die langfristige Entwicklung der Schwermetallbelastung und

des Gehalts an org., Kohlenstoff und Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor und Kalium zu erfassen. Zusätzlich zur direkten Analyse wird ein Teil der Proben aus den verschiedenen Untersuchungen gelagert, um allfällige künftige Bodenanalysen zu ermöglichen. Ein Ziel von NABO besteht darin, unerwünschte Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und den Erfolg politischer Bodenschutzmassnahmen aufzuzeigen. Für den Zeitraum 1985–2004 ist in der Oberflächenschicht des Bodens keine merkliche Zunahme anorganischer Schadstoffe festzustellen<sup>132</sup>.

#### c) Das Freiburger Bodenbeobachtungsnetz (FRIBO)

Das Freiburger Bodenbeobachtungsnetz (FRIBO) wurde zwischen 1987 und 1991 aufgebaut. Sein primäres Ziel besteht darin, bodenkundliche, agronomische und umweltrelevante Informationen über die landwirtschaftlichen Böden des Kantons Freiburg zu sammeln. Die Analyse der Daten erlaubt es, die langfristige Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit zu verfolgen und natürliche sowie durch landwirtschaftliche Praktiken verursachte Veränderungen der Böden aufzuzeigen. Das Netz umfasst 250 Standorte, die in drei verschiedene Nutzungstypen eingeteilt sind: Ackerflächen, Dauerwiesen und Alpweiden. Insgesamt 37 physikalische, chemische und biologische Parameter werden alle fünf Jahre erhoben. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1987–2011<sup>133</sup> zeigen eine stabile Qualität der Böden in Bezug auf den org.-Gehalt und den pH-Wert, einen Rückgang des Gehalts an den Schwermetallen Cadmium und Zink sowie eine stabile Konzentration der Spurenelemente. In Bezug auf die Nährstoffe verringerte sich der Gehalt an kurzfristig verfügbarem Phosphor, wobei die Phosphorreserven stabil geblieben sind.

Der Anstieg des Kaliumgehalts und die Verminderung der mikrobiellen Biomasse haben gezeigt, dass Massnahmen notwendig sind.

#### d) Frühwarnsystem

Einträge von Düngemitteln (Hofdünger und mineralische Dünger) und Pflanzenschutzmitteln tragen wesentlich zur Anreicherung von Schadstoffen (Pestiziden, Kupfer, Zink, Cadmium) im Boden bei, wodurch die Bodenfunktionen verändert werden. Die Massnahmen, die die Schweizer Landwirtschaft zur Reduktion der Nährstoffüberschüsse ergriffen hat, konzentrierten sich bis anhin mehrheitlich auf die Reduktion von Phosphor. Im NFP 68-Projekt FRÜHWARNSYSTEM wurde ein regionales Instrument zur Bodenüberwachung entwickelt, das erlaubt, regional eine Bilanz der Ein- und Austräge von Nährstoffen und Spurenelementen in und aus landwirtschaftlichen Böden zu erstellen. Das Modell integriert bereits bestehende Monitoring-Instrumente und umfasst Modellkomponenten wie georeferenzierte Daten aus Landwirtschaftszählungen, Landnutzungskarten, Richtlinien für die Düngung, Boden- und Klimadaten oder sozioökonomische Faktoren. Es dient als Entscheidungshilfe für die Bodenbewirtschaftung auf betrieblicher Ebene. Mithilfe von Modellen und verschiedenen Szenarien ermöglicht dieses Bodenmonitoring zudem, nicht nachhaltige Entwicklungen in einer Region frühzeitig zu erkennen und präventive Massnahmen zu planen. Schliesslich liefert es nützliche Informationen für die Modellierung der Bodenerosion, die Humusbilanz, zur Bodenbiodiversität sowie zur Erfassung von Treibhausgasemissionen. Es wird in der thematischen Synthese TS4 «Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)»<sup>134</sup> näher erläutert.

Nachfolgend wird ein umfassenderes Bild der aktuellen Herausforderungen vermittelt und es werden einige Strategieelemente für die Zukunft skizziert. Es gilt, Lösungen für die dringendsten Probleme zu finden und Entwicklungen weiterzuverfolgen hin zu einer qualitativ hochstehenden landwirtschaftlichen Produktion, die zum einen standortgerecht ist und zum anderen die Ressource Boden in Wert setzt.

Die prioritären Ziele zur Erhaltung der Bodenqualität sind:

- Verminderung der physischen Beeinträchtigungen (Erosion, Verdichtung)
- Verminderung der chemischen Beeinträchtigungen
- Erhaltung von Bedingungen, die die Entwicklung eines lebendigen Bodens, vielfältige Bodenorganismen, einen ausgewogenen Nährstoff- und Kohlenstoffzyklus und eine hohe Regenerationsfähigkeit und damit Resilienz des Bodens ermöglichen

Mittel und Massnahmen, diese Ziele zu erreichen, lassen sich aus den Vorschlägen im Rahmen der NFP 68-Projekte ableiten und den prospektiven Überlegungen, die sich in den Gesprächen mit den Akteuren der Forschungsprojekte und der Leitungsgruppe des NFP 68 sowie der Begleitgruppe dieser thematischen Synthese herauskristallisiert haben. Die nachfolgend ausgeführten Themen und Vorschläge wurden von der Autorin und den Autoren bis zu einem gewissen Grad nach subjektiven Kriterien ausgewählt. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### 8.1 Aktuelle Entwicklungen in der Landwirtschaft

Die Probleme, mit denen sich die Landwirtschaft heute konfrontiert sieht, haben ihre Wurzeln in der jüngeren Agrargeschichte. Im Zuge der Industrialisierung

im 19. Jahrhundert und insbesondere nach der Versorgungskrise des Ersten Weltkrieges hatte sich die Schweizer Landwirtschaft zum Ziel gesetzt, die Erträge zu maximieren, um die Ernährung der Bevölkerung sicherzustellen. 1940 führte der «Plan Wahlen», der die Selbstversorgung des Landes sichern sollte, zu einer massiven Ausweitung der Ackerfläche. Der wirtschaftliche Aufschwung in der Nachkriegszeit begünstigte eine intensive Landwirtschaft und erhöhte deren Produktionskapazität massiv. 1971 rief derselbe Friedrich T. Wahlen zur «lebensnotwendigen Umkehr aus dem heutigen Wirtschaftswachstums- und Produktivitätsfetischismus» auf. Er argumentierte, dass es «eine obere Grenze der Produktionsintensität geben [muss], die im Interesse einer langfristigen Erhaltung gesunder Produktionsgrundlagen nicht überschritten werden darf»<sup>136</sup>. Damals publizierten die damaligen Bundesämter für Raumplanung, für Landwirtschaft und für Forstwesen die Bodeneignungs- und Klimakarten<sup>131</sup>. Zwanzig Jahre später setzte die integrierte Produktion (IP) dem Streben nach immer höherer Produktivität Grenzen.

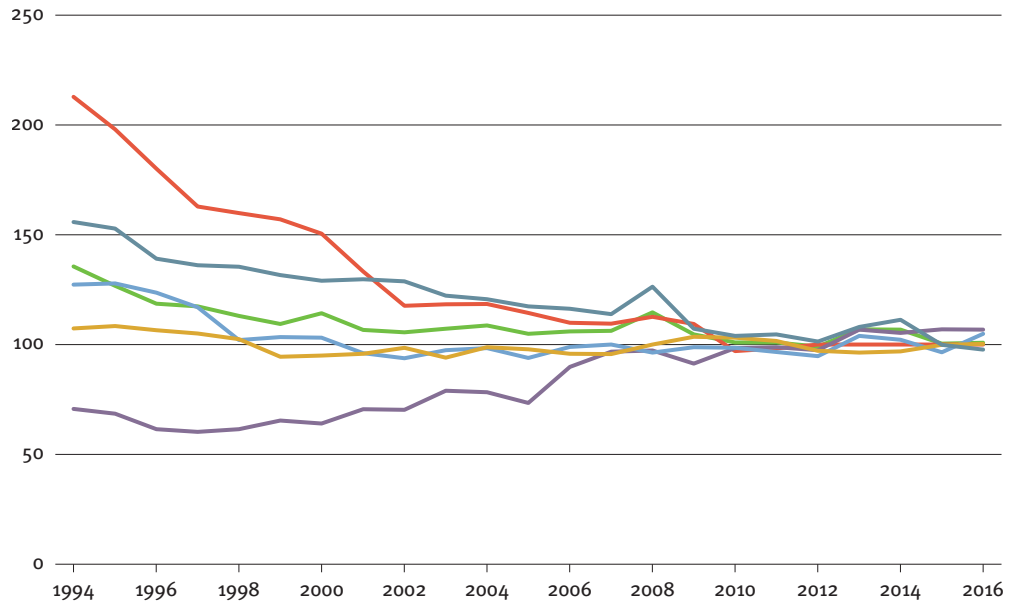
Heute ist die Landwirtschaft mit je nach Boden unterschiedlichen Herausforderungen konfrontiert: Verschiedene Probleme im Zusammenhang mit einer intensiven Bodennutzung sind nach wie vor ungelöst, neue Fragen im Zusammenhang mit der Bodennutzung müssen geklärt werden, und es braucht dringend Innovationen, um die Wettbewerbsfähigkeit der landwirtschaftlichen Produktion und gleichzeitig die Bodenqualität zu bewahren.

Die grössten Bedrohungen für die Bodenqualität, die in der vorliegenden TS1 analysiert wurden, betreffen die offenen Ackerflächen. Sie leisten einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung mit pflanzlichen Lebensmitteln. Auch wenn der Selbstver-

**Abbildung 24**  
 Produzentenpreisindex landwirtschaftlicher Erzeugnisse 1994–2016<sup>139</sup>.

Index Dezember 2015 = 100

- Landwirtschaftliche Erzeugnisse, total
- Getreide
- Rohmilch
- Kartoffeln
- Früchte
- Frischgemüse



**Abbildung 25**  
 Anbaufläche für Hackfrüchte in der Schweiz 2016, nach Bezirk<sup>7</sup>.

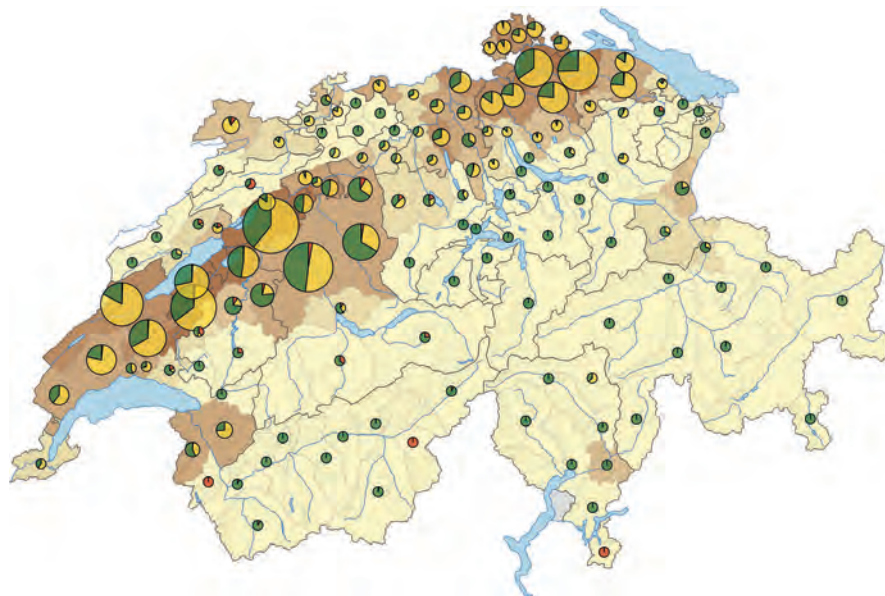
Anteil an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche, in %:

- ≥ 9,0
- 6,0 – 8,9
- 3,0 – 5,9
- 1,5 – 2,9
- 0,5 – 1,4
- < 0,5

Anbaufläche der Hackfrüchte in Hektaren:

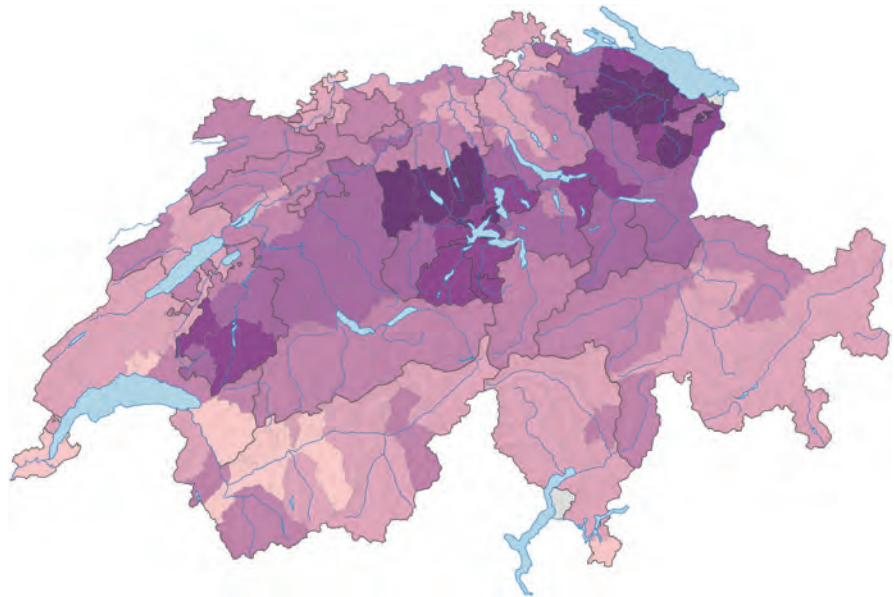
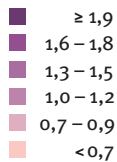
- 3124
- 1500
- 500
- ≤ 100

- Hackfrüchte:
- Futterrüben
  - Zuckerrüben
  - Kartoffeln



**Abbildung 26**  
Grossvieheinheiten pro Hektare  
in der Schweiz 2016, nach Bezirk<sup>7</sup>

Grossvieheinheiten pro ha:



sorgungsgrad aus der pflanzlichen Produktion lediglich 42 Prozent beträgt<sup>8</sup>, ist dieser Beitrag notwendig, sind die landwirtschaftlichen Flächen doch weltweit den gleichen Gefahren ausgesetzt. Die gegenwärtige Liberalisierung der Schweizer Landwirtschaft bewirkt neue Spannungsfelder: Neuausrichtung der Märkte, Globalisierung, Preisdruck, Druck auf die Böden. So ist der Produzentenpreisindex im Ackerbaubereich im Vergleich zu den anderen Produktionssektoren in den letzten zwanzig Jahren besonders markant gesunken (Abb. 24). Diese Entwicklung führte zur weiteren Rationalisierung und Spezialisierung der Arbeit, zur Vergrösserung der Betriebe und damit zu einer zunehmenden Vereinheitlichung der landwirtschaftlichen Systeme und Flächen. Kulturpflanzen, die gewisse Anforderungen an die Bodeneigenschaften stellen, werden heute vorwiegend in den Ebenen des Schweizer Mittellandes angebaut. Dies gilt insbesondere für Hackfrüchte (Abb. 25). In den nachgelagerten Sektoren werden die Strukturen (Sam-

melzentren, Mühlen, Schlachthöfe, Verarbeitungsanlagen) rationalisiert. Die Komplementarität zwischen Pflanzen- und Tierproduktion führt zu unterschiedlichen Viehbeständen im Talgebiet und einer Konzentration in bestimmten Gegenden (Abb. 26).

Die Risiken für den Boden werden heute teilweise durch die Agrarpolitik – unter anderem dank des ökologischen Leistungsnachweises (öLN) –, aber auch durch die noch immer familiären Strukturen der Bauernbetriebe kontrolliert, die weiterhin standortgerecht bewirtschaftet werden. Die fortschreitende Rationalisierung der Produktion und der landwirtschaftlichen Strukturen, einschliesslich der Verwertung, verlangt jedoch erhöhte Aufmerksamkeit.

## 8.2 Erhaltung der Bodenqualität

Aufgrund der verfügbaren Bodenbearbeitungsmittel und der potenziellen Nutzungsintensität sind die Böden heute wahrscheinlich so starken Stressfaktoren ausgesetzt wie nie zuvor. Landwirtschaftliche Maschinen, Pflanzenschutzmittel und Dünger sind Faktoren des Fortschritts, stellen aber auch eine Gefährdung für die Bodenfunktionen dar. Sie gehören zu den wichtigsten Ursachen für die Verdichtung, den ovs-Verlust, die Erosion, die schwindende biologische Vielfalt und chemische Schäden. Das wachsende Wissen und der technologische Fortschritt ermöglichen jedoch die Entwicklung von Anbausystemen, die Rücksicht nehmen auf den Boden und seine Funktionen. Die Entwicklung einer Landwirtschaft, die neue Informations- und Kommunikationstechnologien nutzt (Smart Farming), kann die Lösung verschiedener Probleme unterstützen. Das Auftauchen neuer Bedrohungen wie der Bodenverdichtung zeugt von neuen landwirtschaftlichen Tendenzen, widerspiegelt aber auch ein neues Wissen, das vermehrt aufgegriffen und ins landwirtschaftliche Wissenssystem integriert werden muss.

### 8.2.1 Verminderung von Bodenschäden

Damit Bodenschutzmassnahmen effizient sind und bei den betroffenen Kreisen auf Verständnis stossen, müssen die Bodenschutzmassnahmen verhältnismässig sein. Das zunehmende Gewicht der Maschinen erhöht die Gefahr von äusserst gravierenden oder gar irreversiblen physischen Schäden, insbesondere hinsichtlich der Verdichtung der tiefen Bodenschichten und gewisser Formen der Erosion. Prioritär muss festgelegt werden, inwiefern Gewicht, Bodendruck und die Bedingungen für einen Einsatz von Ma-

schinen angesichts der drohenden irreversiblen Schäden gesteuert werden können. Denkbar ist ein ähnliches Vorgehen wie bei der Baustellenkontrolle, die den Einsatz schwerer Baumaschinen je nach Bodenfeuchte regelt. Auf gewissen Ackerflächen zeugt der ovs-Verlust auch von einem unausgewogenen Anbausystem, das die Gefahr in sich birgt, die Bodenstruktur mittelfristig zu verschlechtern. Die schwindende Biodiversität der Böden ist zahlenmässig zwar noch kaum erfasst<sup>44</sup>. Massnahmen zur Erhaltung und Verbesserung eines günstigen Milieus für Bodenorganismen und damit die Förderung eines lebendigen Bodens haben aber gezeigt, dass bezüglich der Inwertsetzung des Bodens durch die Landwirtschaft Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Es ist sinnvoll, allgemeine Ziele zu setzen, um Schäden durch Schadstoffe und insbesondere Pflanzenschutzmittel, aber auch durch Nährstoffungleichgewichte bei spezialisierten Betrieben als Folge des Imports von Kraftfutter, zu begrenzen.

Die Tatsache, dass Schäden durch Erosion oder Schadstoffbelastungen trotz eines ausreichenden gesetzlichen Rahmens weiterhin auftreten, zeugt von Interessenabwägungen, bei denen zwingende Kriterien wie Rentabilität oder Marktzugang und sich verändernde Faktoren wie Wetterbedingungen, Arbeitsbelastung und Marktsituation ebenso wie Schwierigkeiten bei der Anwendung der bestehenden Instrumente eine entscheidende Rolle spielen.

Insgesamt führen die Spezialisierung der landwirtschaftlichen Bereiche und ihre regionale Konzentration dazu, dass immer mehr Kulturen angebaut werden, die den Boden stark beanspruchen, und aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mehr Risiken eingegangen werden. Zur Erhaltung der Bodenqualität muss aber bei den Fruchtfolgen

der Wechsel zwischen anspruchsvollen und regenerativen Kulturen bewahrt werden. Der technische Ablauf muss zudem die Abstimmung zwischen der Vegetationsdauer der Kulturen und den Boden- und Klimabedingungen gewährleisten. Die Wirtschaftlichkeit der Kulturen erfordert insbesondere eine frühe Aussaat und eine späte Ernte, sodass die Bewirtschaftung oft unter zu nassen Bedingungen erfolgt und ausserdem eine Reihe zusätzlicher Massnahmen (Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz) erfordert.

Die Richtlinien der Labels, nach denen die Produzenten ihre Erzeugnisse herstellen und vermarkten, berücksichtigen die Bodenqualität teilweise. IP-Suisse<sup>137</sup> erinnert daran, dass ein gesunder Boden die Grundlage eines erfolgreichen Pflanzenbaus bildet. Deshalb gibt die Vereinigung spezielle Richtlinien für jede Produktion heraus, die Anforderungen bezüglich Parzellenauswahl, Fruchtfolge, Düngung und Pflanzenschutzmassnahmen umfassen. Bio Suisse<sup>138</sup> vertritt den Grundsatz, dass ein gesunder Boden die Voraussetzung ist für gesunde Pflanzen, gesunde Tiere und damit auch gesunde Nahrungsmittel. Die empfohlenen Massnahmen betreffen vor allem eine gezielte Humuswirtschaft mit einer Kompensation der Abbauverluste – mindestens 20 Prozent Grünfläche in der Fruchtfolge – und ein Verbot von jeglichem Kunstdünger. Da die Produzentinnen und Produzenten die Richtlinien selber erarbeiten, entsprechen sie auch ihren Prioritäten und werden umgesetzt. Ihre Weiterentwicklung muss sich der Herausforderung stellen, die neuen Problematiken im Zusammenhang mit Bodenschäden einzubeziehen. Es ist sinnvoll, Beteiligungsmodelle wie IP-Suisse und Bio Suisse vermehrt in die Produktions- und Verarbeitungsketten einzubeziehen, da sie deren Nachhaltigkeit gewährleisten.

Eine Verteilung und Streuung der Risiken innerhalb der verschiedenen landwirtschaftlichen Sektoren und zwischen ihnen bedingt innovative Lösungen. Dabei geht es darum, Preisunterschiede zwischen rentablen und regenerativen Kulturen zu kompensieren, die bisher vor allem die Landwirtinnen und Landwirte getragen haben. Eine Erweiterung des Versicherungsschutzes klimabedingter Risiken auf Bodenbearbeitungsrisiken könnte zum Schutz des Bodens beitragen, indem gewisse Bewirtschaftungsausfälle übernommen würden.

### 8.2.2 Entwicklung von Anbausystemen unter Berücksichtigung der Bodenfunktionen

Die Projekte des NFP 68 haben die Bedeutung gewisser Bodenorganismen deutlich gemacht und Möglichkeiten aufgezeigt, wie gewisse Risiken verhindert und positive Funktionen im Zusammenhang mit Bodenorganismen mobilisiert werden können.

Ein lebendiger Boden kann die Grundbedingungen für das Pflanzenwachstum und die Regenerationsfähigkeit (Resilienz) gewährleisten, dank deren die Bodenfunktionen nach schädlichen Auswirkungen von Kulturen und deren Bewirtschaftung wiederhergestellt werden können. Die aktuellen Herausforderungen bestehen darin, einen genügenden obs-Gehalt auf Ackerbaubetrieben sicherzustellen, trotz der mehrfachen landwirtschaftlichen Interventionen eine günstige Bodenstruktur zu erhalten und (öko)toxische Schadstoffe zu beseitigen.

Die TS1 hat die Relevanz abgestimmter, kohärenter Anbausysteme – Fruchtfolge, einschliesslich Grünland und Leguminosen, reduzierter Bodenbearbeitung, Biokontrolle – sowie innovativer Methoden – konservierende Landwirtschaft, Hilfspflan-

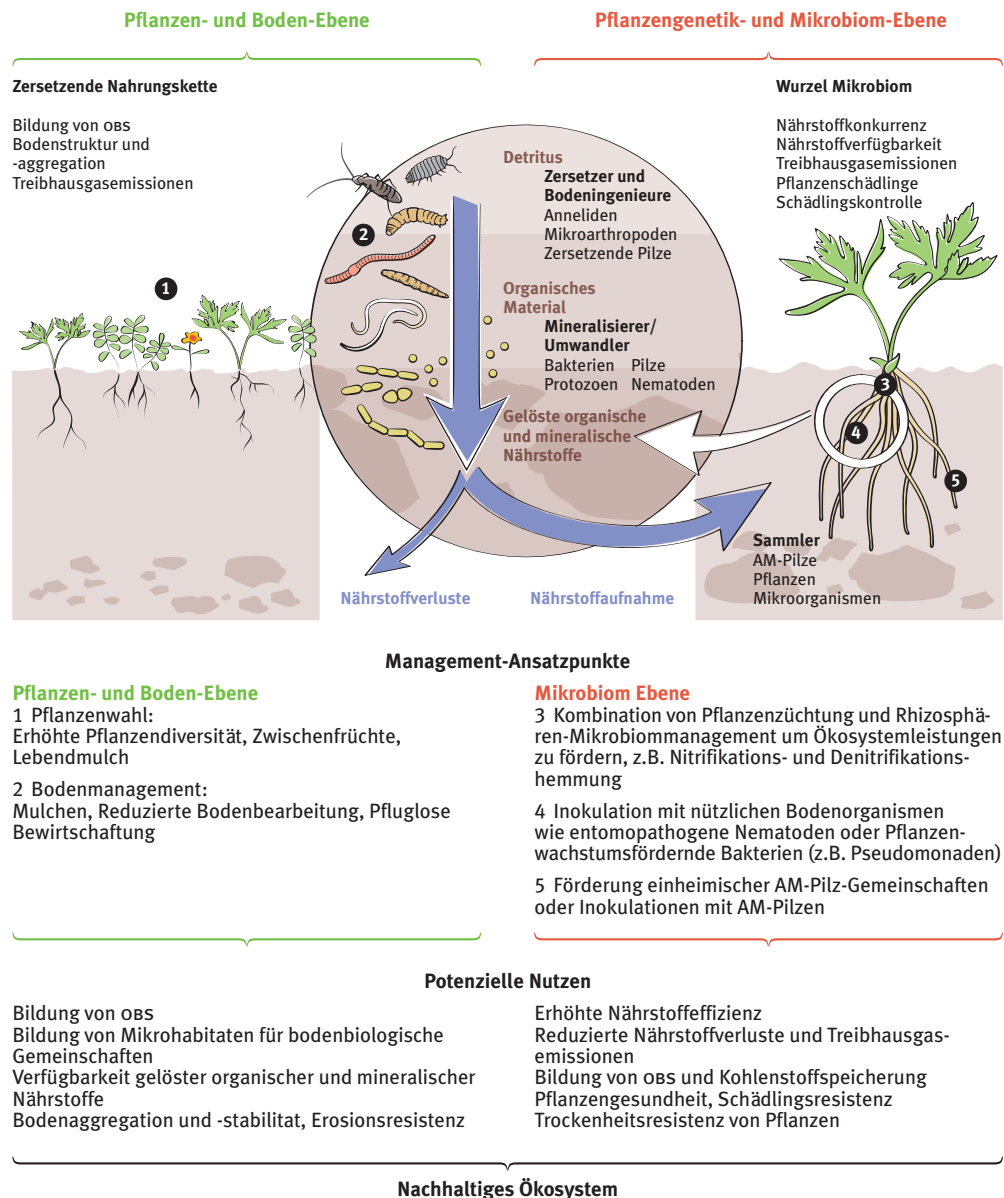
zen oder -organismen – für den Bodenschutz und vor allem für die Mobilisierung von Bodenfunktionen aufgezeigt, die direkt der landwirtschaftlichen Produktion dienen. Die Bodenfunktionen können mit Landmanagementstrategien am besten

genutzt werden. Sie sind deshalb auf verschiedenen Ebenen des Boden-Pflanzen-Systems anzuwenden<sup>70</sup>. Abb. 27 zeigt die Ebenen des Systems und einige Handlungsfelder, dank deren die Vorteile eines solchen Managements zum Tragen kom-

**Abbildung 27**  
Zusammenfassung verschiedener Ansätze für das lokale Ökosystem-Management aus der Perspektive der Bodenökologie.

Illustration: Nadja Stadelmann, nach<sup>70</sup>

Zu den Ansatzpunkten gehören Ernte-, Boden- und Mikrobiom-Management. Die Zahlen zeigen potenzielle Ansatzpunkte für das Ökosystem-Management<sup>70</sup>.





men. Die Förderung der biologischen Aktivität und Vielfalt stärkt die Bodenfunktionen und bildet die Grundlage dafür, dass nachteilige Auswirkungen verhindert und allfällige Schäden dank der Regenerationsfähigkeit des Bodens bewältigt werden können. Gemäss dieser Strategie soll die Produktivitätssteigerung nämlich auf natürlichen Prozessen basieren, die einen Teil des Einsatzes von Maschinen und Hilfsstoffe ersetzen; letztlich soll die ökologische Effizienz des Systems zu einer erhöhten Produktion führen. Um die Entwicklung derartiger neuer Ideen zu fördern, muss der wirtschaftliche und rechtliche Rahmen sie ermöglichen und Innovation unterstützen.

### 8.3 Rahmenbedingungen

Das NFP 68 hat die Erhaltung und Verbesserung der Bodenqualität ins Zentrum seiner Projekte gestellt. In einer strategischen Vision für die Landwirtschaft geht es in Zukunft nicht nur um die quantitative Sicherung von Ackerland, sondern auch um die Erhaltung oder Wiederherstellung seiner Qualität. In diesem Zusammenhang sind gewisse Anpassungen der Rahmenbedingungen erforderlich.

#### 8.3.1 Information und Massnahmen

Problemlösungen für die Verdichtung, den *obs*-Verlust, die Erosion und die schwindende biologische Vielfalt können auf verschiedenen Ebenen gesucht werden. In der Regel erfolgt die Lösungssuche auf der Ebene der Parzelle oder des Betriebs, unabhängig davon, ob dieser einen integrierten oder biologischen Landbau betreibt. Letztlich sind aber Bemühungen innerhalb einer Branche und bis zur Ebene der Konsumentinnen und Konsumenten notwendig. Für die Landwirtin oder den Landwirt bestimmt die Betriebsstrategie die (jähr-

lichen) Massnahmen auf der Parzelle. Informationen über die Parzelle ermöglichen eine Anpassung der (mehrjährigen) Betriebsstrategie. Damit die Landwirtinnen und Landwirte optimal handeln können, müssen künftig Lösungen auf der sinnvollsten Ebene formuliert werden. Zudem müssen sich Zielsetzungen und Massnahmen auf die gleiche funktionale Ebene beziehen.

Die Bedeutung kohärenten Handelns auf den massgeblichen räumlichen, zeitlichen, planerischen und massnahmenbezogenen Ebenen ist besonders gross, wenn es um die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit geht. Die für den öLN massgebenden Nährstoffkreisläufe werden durch das Instrument der «Suisse-Bilanz»<sup>139</sup> auf betrieblicher Ebene bilanziert und anhand von Bodenanalysen auch auf Parzellenebene beurteilt. Diese Vermischung der Ebenen erlaubt weder eine Steuerung der Nährstoffversorgung der Pflanzen noch der Bodenfruchtbarkeit, noch der Nährstoffkreisläufe. Dazu braucht es eine langfristige parzellenspezifische Düngeplanung. Ebenso bedarf es einer Abstimmung zwischen den Zielsetzungen der Analysen und der Wahl der jeweiligen Methoden: Bestimmung von Humus und Ton durch Laboranalyse oder Einschätzung, Verfahren zur Extraktion von leicht verfügbarem Phosphor oder von Phosphorreserven<sup>64</sup>.

Zur Bestimmung der Bodenfruchtbarkeit müssen heute weitere Indikatoren wie Humus, biologische Aktivität und Bodenbedeckung sowie das Anbausystem (phyto-sanitäre Indikatoren) berücksichtigt werden. Die Projekte des NFP 68 haben nicht nur neue Erkenntnisse und Technologien vorgestellt, dank deren die Diagnose, Beratung und Einleitung von Massnahmen umfassend gestärkt werden können, sondern auch die bestehenden Verbindungen

zwischen den verschiedenen Tätigkeitsbereichen (Produktion, Ökologie, Raumplanung) aufgezeigt. Diese Instrumente ermöglichen zudem einen selbständigeren Umgang der Landwirtinnen und Landwirte mit den Herausforderungen. Heute gehört es zu ihrem Alltag, sich per Mobiltelefon online über die Wetterbedingungen zu informieren. Dasselbe sollte für die wichtigsten Bodenparameter und die Anbau Risiken gelten. Mit diesem Ziel könnten die in Papierform vorliegenden Dokumente nach dem Beispiel von «Terranimo» weiterentwickelt werden (Kap. 7.1.1, S. 49).

### 8.3.2 Landwirtschaftliches Wissenssystem

Komplexe Herausforderungen, wie sie sich beim Boden stellen, erfordern die Zusammenarbeit und breite Vernetzung aller Beteiligten, damit die Kräfte gebündelt und die Synergien konzentriert werden können. Nur ein landwirtschaftliches Wissenssystem, das flexibel und vernetzt arbeitet, kann auf die manchmal widersprüchlichen Erwartungen der verschiedenen Interessengruppen eingehen<sup>140</sup>. Es geht darum, die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Boden verständlich zu machen und die daraus resultierenden Anforderungen für alle umsetzbar zu gestalten. Ebenso bedarf es eines kontinuierlichen Informationstransfers zwischen den Entwicklungstreibern – Forschung, Bildung, Wissensmultiplikatoren – und den Serviceanbietern (Laboratorien, Produktlieferanten), aber auch eines Wissenstransfers aus der Praxis und zwischen Akteuren der verschiedenen Produktionsketten. Schliesslich ist auch ein fachbereichsübergreifender Wissensaustausch zwischen Bodenkunde, Pflanzenkunde und Phytopathologie notwendig. In dieser Hinsicht können wissenschaftliche Gesellschaften wie die Schweizerische Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (SGPW), die Boden-

kundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) oder die Schweizerische Gesellschaft für Phytomedizin (SGP) eine wichtige Rolle spielen. Schliesslich ist auch die Rollenteilung und Koordination zwischen den staatlichen Ämtern und Stellen, die für Landwirtschaft, Bodenschutz und Raumplanung zuständig sind, von Bedeutung. Bei der Erarbeitung jeder neuen Politik ist eine Interessenabwägung vorzunehmen und ein Ansatz zur Umsetzung festzulegen mit dem Ziel, negative Folgen zu minimieren, die Zielsetzungen der verschiedenen Interessensbereiche anzugleichen und vor allem eine effiziente Umsetzung durch die Landwirtinnen und Landwirte sicherzustellen.

In allen Belangen, die den Boden betreffen, ist eine langfristig ausgerichtete Forschung und Politik absolut grundlegend. Dies beweisen die fast drei Jahrzehnte, die zwischen dem NFP 22 und dem NFP 68 vergangen sind, und die Tatsache, dass zahlreiche Projekte des NFP 68 auf Langzeitversuche und Beobachtungsnetze zurückgegriffen haben. Die Projekte haben gezeigt, dass diese Instrumente ermöglichen, sowohl auf langfristige Herausforderungen (Entwicklung) als auch die aktuelle Situation (Übergangszustand) zu reagieren, und einen Ausblick auf die Probleme der Zukunft bieten. Diese Beobachtungen sind auch insofern unverzichtbar, als sich die Auswirkungen anbaubezogener Massnahmen nur über längere Zeit zeigen und Fruchtfolgen oft mehr als fünf Jahre umfassen. Entsprechende Versuchsanlagen und Monitoringeinrichtungen verlangen hohe und anhaltende Investitionen. Zudem können sich das Umfeld, die Motivationen, Zielsetzungen und methodischen Ansätze stark verändern. Deshalb kommt Überlegungen über die Zweckmässigkeit der Strategie der Experimente entscheidende Bedeutung zu. Dies gilt umso mehr, als die Schweiz europaweit über besonders langjährige

Versuche verfügt<sup>141</sup>. In den vergangenen Jahren wurden mehrere dieser Langzeitversuche eingestellt. Notwendig sind deshalb eine Neuzeuweisung der Ressourcen und eine langfristige Konsolidierung der bestehenden und der neuen Versuchsanlagen.

Um die wissenschaftliche Forschung und Innovation zu bereichern und die Entwicklung einer integrierten, ökologisch intensiven Landwirtschaft voranzutreiben, gilt es auch das Wissen aus der Praxis gezielt zu nutzen<sup>5</sup>. Dieser Aspekt hat insofern Priorität, als Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Boden vorausschauende Planung und gezieltes Handeln erfordern. Mit der Schrumpfung der Zahl der Betriebe, aber auch unter dem Eindruck des gesellschaftlichen Einflusses auf die Entwicklung der Landwirtschaft (über Volksinitiativen), wächst die Bedeutung gewisser Praxisakteure. Die Betriebsleitenden werden zu Schlüsselfiguren bei der Anpassung der Produktionssysteme und der Umsetzung jeder neuen Politik. Gewisse Pionierlandwirtinnen und -landwirte spielen eine treibende Rolle bei der Verbreitung neuer Kenntnisse und Techniken und der Begleitung ihrer Kolleginnen und Kollegen. Die Schweizerische Gesellschaft für bodenschonende Landwirtschaft (swiss NOTILL) hat gezeigt, dass die Vertreterinnen und Vertreter der Praxis eine bestimmte Strategie der Bodennutzung übernehmen können, um auf Herausforderungen vor allem im Zusammenhang mit einer nachhaltigen viehlosen Betriebsführung zu reagieren. Insbesondere komplexe Aufgaben lassen sich nur durch eine Bündelung der Ressourcen bewältigen. Dazu gehört die Schaffung und Förderung neuer Arbeitsformen wie Betriebsgemeinschaften oder Arbeitskreisen<sup>142</sup>. Eine offizielle Anerkennung der wichtigen Rolle gewisser Akteure und Organisationen, eine finanzielle Unterstützung ihrer Leistungen und ihr

Einbezug in die Erarbeitung politischer Strategien sind Instrumente, um ihre Massnahmen und Aktivitäten für eine vermehrte Berücksichtigung der Bodenqualität in der Produktion zu stärken. Mit dieser Strategie liesse sich auch die Beschränkung der Mittel für die technische Beratung kompensieren. Die Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft ist insgesamt wohl direkt abhängig vom bodenkundlichen Wissen.

### 8.3.3 Boden und Ernährung

Die verfügbaren Bodenflächen sind nach wie vor der wichtigste Faktor, um die für den derzeitigen Versorgungsgrad erforderliche Produktionsmenge zu sichern<sup>14</sup>. Künftig muss die Bodenqualität ein fester Bestandteil jeder landwirtschaftlichen, agrarökonomischen, aber auch raumplanerischen Überlegung sein. Hinzu kommt, dass der Qualität der landwirtschaftlichen Produkte in der gesamten Nahrungskette und von Seiten der Konsumentinnen und Konsumenten grössere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Paradoxe Weise wird der Rolle des Bodens in einigen Segmenten der Nahrungsmittelproduktion keine Beachtung mehr zuteil. So muss die Herkunft von frischem Gemüse und Beeren aus dem Hors-sol-Anbau seit 2017 nicht mehr deklariert werden, obwohl beispielsweise zwei Drittel der Tomaten im Gewächshaus bodenunabhängig (hors-sol) angebaut werden<sup>143</sup>. Der Bau von Gewächshäusern nimmt auf der Landwirtschaftsfläche im Talgebiet immer grösseren Raum ein. Diese Entwicklung stellt aber die Bedeutung des Bodens für die Produktion und die Qualität der Lebensmittel ebenso in Frage wie Erwartungen der Konsumentinnen und Konsumenten bezüglich der Verbindungen zwischen dem Boden und ihrer Nahrung.

**Das Nationale Forschungsprogramm  
«Gesunde Ernährung  
und nachhaltige Lebensmittelproduktion»  
(NFP 69)**

Das Nationale Forschungsprogramm «Gesunde Ernährung und nachhaltige Lebensmittelproduktion» (NFP 69) untersucht, wie in der Schweiz eine gesunde Ernährung gefördert werden kann und wie qualitativ hochwertige und sichere Lebensmittel bei möglichst effizientem Ressourceneinsatz und geringer Umweltbelastung erzeugt werden können.

In einigen Projekten werden die Arbeiten des NFP 68 insofern weitergeführt, als sie die landwirtschaftliche Produktion in den Untersuchungsbereich integriert haben.

Das NFP 69-Projekt METALLBELASTUNG will die wichtigsten Schwermetallquellen identifizieren mit dem Ziel, die Belastung der Böden durch Cadmium, Kupfer, Zink und Uran zu vermindern, die insbesondere durch die Zufuhr künstlicher Düngemittel und Hofdünger in den Boden gelangen.

Das Ziel des NFP 69-Projekts SICHERES GETREIDE besteht darin, das Risiko von Mykotoxin-Belastungen durch neue Weizen-, Hafer- und Gerstensorten mit erhöhtem Gehalt an gesundheitsfördernden Inhaltsstoffen zu verringern. Dazu werden unter anderem die Umwelt- und landwirtschaftlichen Faktoren analysiert, die mit dem Boden im Zusammenhang stehen.

Das NFP 69-Projekt GESUNDE SCHWEINE zielt darauf ab, den Einsatz von Antibiotika in der ganzen Schweinefleischproduktion zu vermindern und die Auswirkungen der Fleischproduktion auf die Umwelt zu reduzieren. Es liefert wichtige Hinweise zur Nutzung von Tierexkrementen in der Landwirtschaft und zur Bedeutung von Antibiotikaresistenz-Genen in Schweizer Böden (NFP 68-Projekt ANTIBIOTIKARESISTENZ).

Das NFP 69-Projekt NAHRUNGSMITTELVERLUSTE analysiert die Kartoffelverluste entlang der gesamten Verarbeitungskette. Einerseits erhöhen die Schäden durch den Drahtwurm – einen Bodenschädling – den Anteil der Kartoffeln, die nicht für den menschlichen Verzehr verkauft werden können, und andererseits lehnen die Konsumentinnen und Konsumenten eine Behandlung mit Insektiziden ab. Neue biologische Pflanzenschutzlösungen im Zusammenhang mit dem NFP 68-Projekt BODENBAKTERIEN könnten dabei für den Schutz der Kartoffelknollen von Bedeutung sein.

In der jüngsten Aktualisierung der Düngungsempfehlungen wurde ein Schwerpunkt auf die Möglichkeit gelegt, die entscheidenden Qualitätsparameter der Verwertung und Vermarktung landwirtschaftlicher Produkte zu steuern<sup>64</sup>. Eine Vertiefung dieser Erkenntnisse hat weiterhin Priorität. Die primäre Qualität von Nahrungsmitteln hängt von Bodenfunktionen wie der Regulierung von Wasser, Nährstoffen, Schwermetallen oder Belastungen des Bodens ab. Zudem sind die Wechselwirkungen zwischen Boden und Pflanze bei extensiven Produktionssystemen verantwort-

lich für die sekundären Stoffwechselprodukte in den Pflanzen, die für die Ernährung der Menschen interessant sind<sup>144</sup>.

Im Jahre 2014 gaben die Schweizer Haushalte 5,8 Prozent ihres Budgets für Lebensmittel aus<sup>135</sup>. Dieser minimale Anteil steht im Gegensatz zum Preisdruck, den die Landwirtinnen und Landwirte spüren, und zu den Risiken einer Beeinträchtigung der Bodenqualität. Die hohen Erwartungen der Produktionsketten und der Konsumentinnen und Konsumenten bieten die Möglichkeit, die Rolle des Bodens in der

Lebensmittelproduktion ebenso zu präzisieren wie die Kosten für seinen Schutz und einen fairen Preis für Lebensmittel.

#### 8.3.4 Hebel für eine neue Landwirtschaftspolitik unter Berücksichtigung der Bodenqualität

Die Landwirtschaft agiert innerhalb des Rahmens, der ihr durch Gesetze oder Anreize vorgegeben wird, und gemäss den Richtlinien der Branchen und Labels. Diese Bedingungen definieren die breit erläuterten prioritären Herausforderungen. Es bieten sich zahlreiche Hebel, darunter die Direktzahlungen, als wirksames Instrument der Agrarpolitik.

Jede zielgerichtete Politik muss sich auf die jeweiligen Gegebenheiten abstützen können. Seit der Einführung des öLN haben sich die Herausforderungen teilweise verändert. Es ist deshalb sinnvoll, die Prioritäten (Kap. 3, S. 17 ff., und Kap. 8.2, S. 64) ebenso wie die einzusetzenden Instrumente unter Berücksichtigung der Ergebnisse des NFP 68 neu zu beurteilen. Die durch die Politik vorgegebene Strategie muss den Landwirtinnen und Landwirten ermöglichen, zielgerichtet so zu handeln, dass sie die Komplexität des Systems und die Besonderheiten der Bodennutzung berücksichtigen können. Gleichzeitig muss ihnen eine gewisse Flexibilität bei der Übernahme neuen Wissens oder neuer Techniken gewährleistet bleiben. Zumindest muss es möglich sein, die Hindernisse bezüglich Technik, Regelwerk und Finanzierung der Innovation kontinuierlich und rasch aus dem Weg zu räumen. Es ist auch dafür zu sorgen, dass neue Zielsetzungen keine negativen Auswirkungen haben. Jedes komplexe System erfordert deshalb eine ausführliche Analyse (Audit). Kurz zusammengefasst: Neue Massnahmen dürfen weder simpel noch direktiv sein.

Eine Veränderung des Ansatzes der Agrarpolitik im Bereich des Bodenschutzes wäre prüfenswert, da der Rückgriff auf verordnete Massnahmen, die es zu befolgen gilt, bei so komplexen Themen wie dem Boden heikler und weniger effizient ist als an Zielvorgaben gebundene finanzielle Anreize<sup>145</sup>. Ein innovativer Ansatz, der die Bodenqualität anhand des Verhältnisses zwischen oBS, Ton und den physikalischen Funktionen des Bodens beurteilt und je nach Güte belohnt, wird als vielversprechend bewertet<sup>146</sup>. Diese Indikatoren decken zwar nicht sämtliche Funktionen ab, liefern aber Anregungen, wie die Anreiz- und Sanktionspolitik, aber natürlich auch Bildung, Schulung und Beratung, ergänzt werden könnten. Ein Belohnungssystem, also Zahlungen auf Basis der Ergebnisse, erfordert jedoch zuverlässige Indikatoren, mit denen die erwartete Erhaltung oder Verbesserung der entsprechenden Qualitätslevels auch tatsächlich objektiv beurteilt werden kann. Zudem muss die Motivation der Landwirtinnen und Landwirte erhalten bleiben.

#### 8.4 Eine hochwertige Nahrungsmittelproduktion zur Inwertsetzung der Ressource Boden

Die Schweizer Landwirtschaft ist stark von der integrierten Produktion (IP) geprägt. Diesem System ist es gelungen, den Pflanzenschutz, aus dem es ursprünglich hervorgegangen ist, und die Grundsätze einer nachhaltigen Bodennutzung in die Nahrungsmittelproduktion zu integrieren. Um zur Lösung der aktuellen Probleme beizutragen und neue Herausforderungen anzugehen, wurde in den Diskussionen rund um das NFP 68 immer wieder auf neue Begriffe und Konzepte zurückgegriffen. Diese dienten dazu, das Interesse an einer Landwirtschaft zu festigen, die Rücksicht nimmt auf den ökologischen Kontext und die

Ressource Boden aufwertet, aber auch dazu, die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung der Grundsätze der IP hervorzuheben.

Zu diesen Begriffen gehört das «Produktionspotenzial der Parzelle», das es zu berücksichtigen gilt. Er unterstreicht die Bedeutung von Bodeneignungskarten und erscheint in den Anforderungen der öLN im Zusammenhang mit der zulässigen Phosphor- und Stickstoffmenge, die nach dem Pflanzenbedarf bemessen wird (DZV; SR 910.13). Gegenwärtig sind auf Parzellenebene keine entsprechenden Informationen verfügbar.

Das zweite Konzept ist die «standortgerechte Landwirtschaft». Es taucht in verschiedenen Kontexten im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung des Bodens und dem Risiko der Verschmutzung von Gewässern auf<sup>147</sup>, ist Bestandteil der Klimastrategie Landwirtschaft<sup>148</sup> und dient unter anderem zur Begründung der Bodenkartierung und als Vision in zahlreichen Positionspapieren von Branchenverbänden und NGO zur Entwicklung der Schweizer Landwirtschaft. Ursprünglich beschrieb es die Entwicklung kleinbäuerlicher Betriebe in den Tropen, die dazu dienen sollten, unter «Low-external-input»-Bedingungen eine hohe und nachhaltige Produktivität am betreffenden Standort zu erreichen und dabei gleichzeitig ein ausgewogenes Ökosystem zu erhalten oder wie-

derherzustellen<sup>149</sup>. Eine präzisere Definition würde es ermöglichen, die Hintergründe dieses Konzepts hin zu einer standortgerechten Landwirtschaft besser darzulegen.

Als drittes Konzept kommt die «ökologisch intensive Landwirtschaft» hinzu. Es bezieht sich auf den Kontext des NFP 68, das der Bodenqualität und der Förderung der Bodenfunktionen gewidmet ist. Die FAO beschreibt die ökologische Intensivierung als stark wissenschaftsbasierten Prozess, der eine optimale Steuerung der ökologischen Funktionen und der Biodiversität erfordert, damit die Leistung der landwirtschaftlichen Systeme, die Effizienz und der Lebensunterhalt der Landwirte verbessert werden können<sup>4</sup>. In der Schweiz ist dieses Konzept nach wie vor vage. Die Auseinandersetzung mit ihm hat vor allem gezeigt, dass der Produktionswert der Landwirtschaft trotz abnehmender Landreserven und unter Minimierung negativer Umweltauswirkungen gesteigert werden muss<sup>150</sup>. Die Projekte des NFP 68 haben allerdings die Chancen dieses Konzepts verdeutlicht. Sie gilt es zu nutzen, um die Erkenntnisse fruchtbar zu machen und Fortschritte in der landwirtschaftlichen Produktion zu erzielen. All diese Massnahmen müssen es ermöglichen, den Einsatz der Produktionsmittel und deren negative Auswirkungen zu beschränken. Sie erfordern jedoch technische Innovationen, Offenheit für neue Ideen und Entwicklungen und entsprechende Rahmenbedingungen.

# Anhang

## Anhang 1

Inventar der in der Schweiz durchgeführten Langzeitversuche

Name Ort verantwortliche Stelle	Beginn	Anzahl Verfahren	Kultur	Verfahren	
<b>Bodenbearbeitung</b>					
<b>P29C</b> Changins VD Agroscope	1969	4	Ackerbau	4 Anbauverfahren: 1 Pflug (20–25 cm) 2 Grubber (20–25 cm), seit 2007 Direktsaat 3 Kultivator (10–15 cm) 4 Bodenfräse (5–8 cm)	31
<b>Oberacker</b> Zollikofen BE Inforama Rütti	1994	12	Ackerbau	2 Anbauverfahren: <b>P</b> Pflug <b>DS</b> Direktsaat  6 durchgehende Parzellen: Silomais            Ackerbohnen Eiweisserbsen    Wintergerste Winterweizen     Zuckerrüben	47,51
<b>Düngung</b>					
<b>ZOFE</b> Reckenholz ZH Agroscope	1949	12	Ackerbau	12 Verfahren mit unterschiedlicher Düngemittelart und Dosierung: <b>Null</b> keine Düngung  4 Verfahren mit mineralischem Dünger <b>NoP2K2:</b> keine Düngung mit N; P und K gemäss Normen <b>N1P1K1:</b> 1/2 Normdosierung N, P und K <b>N1P2K2:</b> 1/2 Normdosierung N; P und K gemäss Normen <b>N2P2K2Mg:</b> N, P, K und Mg gemäss Normen  3 Verfahren mit organischem Dünger Mist Klärschlamm Kompost  4 Verfahren mit organischem und mineralischem Dünger Mist, P und K gemäss Normen Klärschlamm, P und K gemäss Normen Kompost, P und K gemäss Normen Torf, P und K gemäss Normen	34

## Anhang 1

<b>Eggenalp BE</b> <b>KALI AG</b> <b>INFORAMA Berner Oberland</b>	1956	8	Grünland	8 Verfahren mit mineralischem und organischem Dünger: <b>1</b> NPK <b>5</b> keine Düngung <b>2</b> Gülle <b>6</b> NP <b>3</b> N <b>7</b> PK <b>4</b> P + Gülle <b>8</b> PK + Gülle	
<b>P11</b> <b>Changins VD</b> <b>Agroscope</b>	1963	24	Ackerbau	3 Verfahren mit organischem Dünger <b>FYM</b> Mist <b>RES</b> Ernterückstände <b>MIN</b> keine organische Düngung  2 Unterverfahren, Dosis mineralisierter N: <b>1</b> suboptimal <b>2</b> optimal	151
<b>P24A</b> <b>Changins VD</b> <b>Agroscope</b>	1976	24	Ackerbau	6 Verfahren mit organischem Dünger <b>1</b> keine organische Düngung <b>2</b> Gründüngung alle 2 Jahre <b>3</b> Stroh und Ernterückstände <b>4</b> 35 t Mist alle 3 Jahre <b>5</b> 70 t Mist alle 3 Jahre <b>6</b> 60 m <sup>3</sup> Gülle alle 3 Jahre  4 Unterverfahren, Dosis mineralisierter N: <b>A</b> Null <b>B</b> Korrigierte Norm – 40 <b>C</b> Norm <b>D</b> Korrigierte Norm + 40	32
<b>Rümlang ZH</b> <b>Agroscope</b>	1989	6	Ackerbau	6 Verfahren mit P, K, Mg und Ca: <b>1</b> Null <b>2</b> 1/3 Normen P und K, 1/2 Norm Mg und 10 t CaO/Jahr <b>3</b> 2/3 Normen P und K, Mg gemäss Norm und 20 t CaO/Jahr <b>4</b> P und K gemäss Normen, 3/2 Norm Mg und 40 t CaO/Jahr <b>5</b> 4/3 Normen P und K, Mg Null und 20 t CaO/2 Jahre <b>6</b> 5/3 Normen P und K, Mg Null und 40 t CaO/2 Jahre	152
<b>Reckenholz ZH</b> <b>Agroscope</b>	1989	6	Ackerbau	6 Verfahren mit P, K, Mg und Ca: <b>1</b> Null <b>2</b> 1/3 Normen P und K, 1/2 Norm Mg und 10 t CaO/Jahr <b>3</b> 2/3 Normen P und K, Mg gemäss Norm und 20 t CaO/Jahr <b>4</b> P und K gemäss Normen, 3/2 Norm Mg und 40 t CaO/Jahr	152



				<p>5 <math>\frac{4}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 20 t CaO/2 Jahre</p> <p>6 <math>\frac{5}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 40 t CaO/2 Jahre</p>	
<p>Ellighausen TG Agroscope</p>	1989	6	Ackerbau	<p>6 Verfahren mit P, K, Mg und Ca:</p> <p>1 Null</p> <p>2 <math>\frac{1}{3}</math> Normen P und K, <math>\frac{1}{2}</math> Norm Mg und 10 t CaO/Jahr</p> <p>3 <math>\frac{2}{3}</math> Normen P und K, Mg gemäss Norm und 20 t CaO/Jahr</p> <p>4 P und K gemäss Normen, <math>\frac{3}{2}</math> Norm Mg und 40 t CaO/Jahr</p> <p>5 <math>\frac{4}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 20 t CaO/2 Jahre</p> <p>6 <math>\frac{5}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 40 t CaO/2 Jahre</p>	152
<p>Oensingen AG Agroscope</p>	1989	6	Ackerbau	<p>6 Verfahren mit P, K, Mg und Ca:</p> <p>1 Null</p> <p>2 <math>\frac{1}{3}</math> Normen P und K, <math>\frac{1}{2}</math> Norm Mg und 10 t CaO/Jahr</p> <p>3 <math>\frac{2}{3}</math> Normen P und K, Mg gemäss Norm und 20 t CaO/Jahr</p> <p>4 P und K gemäss Normen, <math>\frac{3}{2}</math> Norm Mg und 40 t CaO/Jahr</p> <p>5 <math>\frac{4}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 20 t CaO/2 Jahre</p> <p>6 <math>\frac{5}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 40 t CaO/2 Jahre</p>	152
<p>Cadenazzo TI Agroscope</p>	1989	6	Ackerbau	<p>6 Verfahren mit P, K, Mg und Ca:</p> <p>1 Null</p> <p>2 <math>\frac{1}{3}</math> Normen P und K, <math>\frac{1}{2}</math> Norm Mg und 10 t CaO/Jahr</p> <p>3 <math>\frac{2}{3}</math> Normen P und K, Mg gemäss Norm und 20 t CaO/Jahr</p> <p>4 P und K gemäss Normen, <math>\frac{3}{2}</math> Norm Mg und 40 t CaO/Jahr</p> <p>5 <math>\frac{4}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 20 t CaO/2 Jahre</p> <p>6 <math>\frac{5}{3}</math> Normen P und K, Mg Null und 40 t CaO/2 Jahre</p>	152
<p>Vaz Muldain GR Agroscope</p>	1989	4	Grünland	<p>4 Verfahren mit P und K:</p> <p>1 Null</p> <p>2 <math>\frac{1}{2}</math> Normen</p> <p>3 gemäss Normen</p> <p>4 <math>\frac{3}{2}</math> Normen</p>	152

## Anhang 1

Düngung, Bodenbearbeitung					
<b>Frick BS</b> Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)	2002	8	Ackerbau	2 Verfahren mit Einsatz von biologisch-dynamischen Präparaten: Mit Einsatz    Ohne Einsatz  2 Unterverfahren Bodenbearbeitung: Pflügen        Grubber  2 Unterverfahren Düngung: Kompost        Gülle	153
Mähen und Düngung					
<b>Bremgarten SO</b> Arbeitsgemein- schaft zur Förde- rung des Futter- baus (AGFF)	1982	8	Grünland	2 Verfahren Schnitthäufigkeit: 2 Schnitte/Jahr    3 Schnitte/Jahr  4 Unterverfahren Düngung: Keine P und K gemäss Normen N, P und K gemäss Normen 2/1 Norm N, P und K gemäss Normen	154
<b>La Rosière VS</b> KALI AG Amt für Viehwirt- schaft (AVW), Kanton Wallis	1984	10	Grünland	2 Verfahren Schnitthäufigkeit: 2 Schnitte/Jahr    3 Schnitte/Jahr  5 Unterverfahren Düngung: Keine N gemäss Norm N und P gemäss Normen P und K gemäss Normen N, P und K gemäss Normen	155
Produktionssystem					
<b>dok-Versuch</b> Therwil BS Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) und Agroscope	1978	8	Ackerbau	Düngung 6 Verfahren Düngungstyp <b>D</b> biologisch-dynamisch <b>O</b> organisch-biologisch <b>C</b> konventionell <b>M</b> mineralisch <b>N</b> keine  2 Unterverfahren N-Menge (Verfahren D, O und C): <b>1</b> 0,7 DGVE/ha <b>2</b> 1,4 DGVE/ha	156

				<p>Unkrautbekämpfung: Mechanisch (Verfahren D, O und N) Mechanisch und chemisch (Verfahren C und M)</p> <p>Krankheitsbekämpfung: Präventive Massnahmen (Verfahren D, O und N) Chemischer Schutz nach Richtwerten (Verfahren C und M)</p> <p>Schädlingsbekämpfung: Pflanzenextrakte, Antagonisten (Verfahren D, O und N) Chemischer Schutz nach Richtwerten (Verfahren C und M)</p> <p>Andere Besonderheiten: Biologisch-dynamische Präparate (D und N) Halmverkürzer (Verfahren C und M)</p>	
<b>Anbausystem, Bodenbearbeitung, Zwischenbegrünung</b>					
<p><b>FAST</b> <b>Reckenholz ZH</b> <b>Agroscope</b></p>	2009	16	Ackerbau	<p>4 Produktionssysteme: <b>C-IT</b> konventionell, Pflug <b>C-NL</b> konventionell, Direktsaat <b>O-IT</b> biologisch, Pflug <b>O-NL</b> biologisch, Direktsaat</p> <p>4 Unterverfahren Zwischenbegrünung <b>C</b> Kontrolle (Brache) <b>L</b> Leguminosen <b>NL</b> Nicht Leguminosen <b>M</b> Mischung</p>	157
<b>Fruchtfolge, Bodenbearbeitung</b>					
<p><b>P20</b> <b>Changins VD</b> <b>Agroscope</b></p>	1967	4	Ackerbau	<p>2 Verfahren: <b>M</b> Monokultur <b>R</b> Fruchtfolge</p> <p>2 Unterverfahren Bodenbearbeitung: <b>P</b> Pflug <b>TCS</b> vereinfachte Bodenbearbeitung</p>	158,159

**Das Nationale Forschungsprogramm  
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden»  
(NFP 68)**

Die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) leisten wissenschaftlich fundierte Beiträge zur Lösung dringender Probleme von nationaler Bedeutung. Der Schweizerische Nationalfonds (SNF) führt sie im Auftrag des Bundesrats durch.

Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) legt Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung des Bodens in der Schweiz vor. Dabei werden sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Leistungen des Bodens berücksichtigt. Das Konzept der Ökosystemleistungen erlaubt es, die Bodenfunktionen und ihren Beitrag an das menschliche Wohlbefinden in Wert zu setzen. Das NFP 68 verfolgt drei Hauptziele: i) verbessertes Wissen über Bodensysteme bereitstellen; ii) Instrumente zur Bewertung der Ressource Boden entwickeln; iii) Strategien zur nachhaltigen Nutzung von Boden erarbeiten.

**Auswahl und Dauer der Forschungsprojekte**

Das NFP 68 verfügte über einen Finanzrahmen von 13 Millionen Franken. Die Forschung dauerte, unterteilt in zwei Phasen, von 2013 bis 2017. Die Projekte wurden aus einer Vielzahl von Vorschlägen vor dem Hintergrund des Schweizer Kontexts nach Kriterien der wissenschaftlichen Qualität sowie der Relevanz für das NFP 68 ausgewählt. Nach einem zweistufigen Auswahlverfahren mit internationaler Begutachtung bewilligte der SNF für die Forschungsphase 1 (2013–2015) 19 Projekte. Zwei weitere Projekte wurden im Rahmen einer Zweitausschreibung gefördert. Für die Forschungsphase 2 (2016–2017) lancierte der SNF ergänzend vier weiterführende Projekte. Insgesamt wurden im NFP 68 also 25 Forschungsprojekte durchgeführt. Zusätzlich standen dem NFP 68 und dem NFP 69 «Gesunde Ernährung und nachhaltige Lebensmittelproduktion» 4 Millionen Franken für die Förderung von Forschungsprojekten im Rahmen der Ausschreibungen der European Joint Programming Initiatives «Agriculture, Food Security and Climate Change» (FACCE-JPI) und «A Healthy Diet for a Healthy Life» (HDHL-JPI) zur Verfügung. Dadurch konnten weitere zwölf Projekte mit Bezug zum NFP 68 und mit internationaler Ausstrahlung finanziert werden ([www.nfp68.ch](http://www.nfp68.ch) → Projekte).

Mangels eingereichter Gesuche von genügend hoher Qualität umfasst das NFP 68 keine Forschungsprojekte zu Fragen des Bodeneigentums und der rechtlichen Rahmenbedingungen sowie zur ökonomischen und sozialen Valorisierung der Ökosystemleistungen, die der Boden erbringt.

**Stetiger Austausch**

Das NFP 68 legte grossen Wert auf einen offenen und transparenten Austausch innerhalb des Programms sowie mit Vertreterinnen und Vertretern der Anspruchsgruppen. Dazu trafen sich die Forschenden zu drei programminternen Konferenzen. Des Weiteren beteiligten sich Forschende sowie Mitglieder der Leitungsgruppe regelmässig an Veranstaltungen mit Praxispartnern und traten an öffentlichen Symposien auf. Im Vordergrund stand dabei das Finden einer gemeinsamen Sprache von Fachpersonen aus Wissenschaft und Praxis in den für das NFP 68 zentralen Themen «Umwelt», «Landwirtschaft» und «Raumplanung».

### Breit abgestützter Begleitprozess für die thematischen Synthesen

Als Auftakt zur Synthesebildung diskutierte das NFP 68 Anfang 2016 die vorläufigen Projektergebnisse in drei Stakeholder-Workshops mit Fachpersonen aus Bundes- und Kantonsverwaltungen, Wirtschafts- und Umweltverbänden sowie der Privatwirtschaft. Die Workshops lieferten wichtige Inputs für die Konzeption und Ausgestaltung der thematischen Synthesen des NFP 68, die zum Ziel haben, die wissenschaftlichen Ergebnisse zielgruppenorientiert in einen übergeordneten Kontext zu bringen und spezifische Instrumente, Konzepte und Strategien für die Praxis und die Verwaltung zu entwickeln. Sie sollen damit einen zentralen Beitrag zur Erreichung der Programmziele leisten.

Abgestützt auf die Inputs dieser Workshops und im Austausch mit den Forschenden beschloss die Leitungsgruppe des NFP 68 im Herbst 2016 die Lancierung von fünf thematischen Synthesen.

Die Verantwortlichen für die thematischen Synthesen legten ihre Konzepte und Entwürfe in jeweils zwei bis drei partizipativen Workshops den Mitgliedern der Begleitgruppen vor. Ziel war es, die Entwürfe kritisch zu diskutieren und Lücken zu füllen. Es lag in der Verantwortung der Autorinnen und Autoren der thematischen Synthesen, diese Inputs zu gewichten und zu entscheiden, welche Aspekte für die weiteren Arbeiten berücksichtigt werden können. Die thematischen Synthesen des NFP 68 wurden schliesslich von der Leitungsgruppe des NFP 68 genehmigt.

## Die Forschungsprojekte des NFP 68

\* Projekte mit einem Beitrag zu dieser thematischen Synthese.

### Forschungsphase 1

---

- A ANFÄLLIGKEITSINDIKATOREN: Indikatoren für die Störungsanfälligkeit von Bodenkohlenstoff (Eglinton T.)
- \* ANTIBIOTIKARESISTENZ: Die Rolle der Bodenbewirtschaftung für Antibiotikaresistenzen (Duffy B., Smits T.)
- B \* BODENBAKTERIEN: Gesunde Böden dank Bodenbakterien (Maurhofer Bringolf M., Keel C.)
- BODENKARTEN: Kartierung von Bodeneigenschaften zur Beurteilung von Bodenfunktionen auf regionaler Skala (Papritz A.J., Baltensweiler A., Keller A., Presler J., Schaepman M.E., Walthert L., Zimmermann S.)
- BODENSTABILITÄT: Bodenstabilität und Naturgefahren: Vom Wissen zum Handeln (Graf F., Bebi P., Frei M., Rickli C., Rixen C., Springman S.M.)
- \* BODENVERDICHUNG: Regeneration verdichteter Böden (Keller T., Or D., Schymanski S., Walter A., Weisskopf P.)
- ENTSCHEIDUNGSPLATTFORM: Entscheidungsplattform für eine nachhaltige Bodennutzung (Grêt-Regamey A., Diggelmann H., Huber R., Keller A., Kübler D., Siegrist D., Zimmermann S.)
- F FRÜHWARNSYSTEM: Regionales Boden-Monitoring-Tool für nachhaltige Stoffkreisläufe auf landwirtschaftlich genutzten Böden (Keller A., Mann S., Schaepman M.E., Schulin R.)
- G \* GRÜNDÜNGUNG: Mit Gründüngung und konservierenden Anbausystemen die Umwelt schonen (Streit B., Charles R., Walter A.)
- K KOHLENSTOFFDYNAMIK: Einfluss des Klima- und Landnutzungswandels auf den Bodenkohlenstoff in Schweizer Böden (Abiven S., Niklaus P.A.)
- \* KOHLENSTOFFEINTRAG: Bodenkohlenstoffeintrag durch Kulturpflanzen (Mayer J., Abiven S., Hund A., Leifeld J.)
- L LACHGAS: Auswirkungen der Bodennutzung auf lachgasproduzierende und -abbauende Bodenmikroorganismen (Gattinger A., Mäder P., Thonar C.)
- LAND GRABBING: Land Grabbing mit Schweizer Beteiligung (Rist S., Cottier T., Mann S.)

LASTENAUSGLEICH: Nachhaltiges Bodenmanagement durch den Ausgleich wirtschaftlicher und ökologischer Mehr- und Minderwerte (Nahrath S., Gmünder M., Grêt-Regamey A., Joerin F., Pflieger G.)

M MOORBÖDEN: Nachhaltige Bewirtschaftung organischer Böden (Leifeld J., Engel S., Müller M.)

MULTIKRITERIELLE KOMPENSATION: Berücksichtigung der Bodenqualität in Kompensationsmechanismen der Raumplanung (Joerin F., Boivin P., Ruegg J.)

\* MYKORRHIZA: Wiederherstellung von Bodenfunktionen mit Hilfe arbuskulärer Mykorrhiza (Van der Heijden M., Oehl F., Wagg C.)

N \* NEMATODEN: Einsatz von Fadenwürmern im Kampf gegen schädliche Bodeninsekten (Turlings T., Mascher F.)

POLITIKINSTRUMENTE: Politikinstrumente für ein nachhaltiges Boden- und Landnutzungsmanagement (Walter F., Grêt-Regamey A., Sager F., Vatter A.)

W WALDBÖDEN: Kohlenstoffvorräte in Schweizer Waldböden (Hagedorn F., Gimmi U., Thürig E., Walthert L.)

ZERSIEDELUNG: Siedlungsentwicklung steuern – Bodenverbrauch verringern (Kienast F., Hersperger A.M., Schulz T., Seidl I.)

## Forschungsphase 2

---

B \* BIOLOGISCHE SCHÄDLINGSBEKÄMPFUNG: Fadenwürmer und Bodenbakterien gegen schädliche Bodenorganismen (Turlings T., Keel C., Maurhofer Bringolf M.)

\* BODENVERBESSERENDE ANBAUSYSTEME: Innovationszentren für bodenverbessernde Anbausysteme (Charles R., Keller T., Mayer J., Six J., Van der Heijden M.)

L LANDNUTZUNGSENTSCHIEDUNG: Bessere Steuerung transnationaler Landkäufe (Rist S., Mann S., Messerli P.)

LANDNUTZUNGSMODELL: Modell für die Landnutzung im Schweizer Mittelland (Keller A., Schaepman M.E., Schulin R.)

## Anhang 1

### FACCE-JPI

---

Projektteams im Rahmen der Joint Programming Initiative «Agriculture, Food Security and Climate Change» (FACCE-JPI) sind aus Wissenschaftlern von mindestens drei Partnerländern zusammengestellt. Der Einfachheit halber werden nur die Projektleitenden aus der Schweiz aufgeführt.

- A AFGROLAND: Dynamik des Ernährungssystems in Afrika (Messerli P.)
- B BASIL: Biodiversität in Landwirtschaftssystemen (Olschewski R., Frey B., Gessler A., Hagedorn F., Seidl I.)
- C CLIMATE-CAFE: Klimaanpassungsfähigkeit landwirtschaftlicher Systeme in Europa (Six J., Charles R.)  
  
COMET-GLOBAL: Treibhausgas-Buchhaltung (Six J.)
- D DEVIL: Ernährungssicherheit bei begrenzten Landressourcen (Buchmann N.)
- E ECO-SERVE: Nachhaltige Bereitstellung vielfältiger Ökosystemleistungen in Agrarlandschaften (Mäder P., Gattinger A.)
- G GREEN RICE: Ressourcenschonende Reisproduktion (Six J.)
- M MAGNET: Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft (Leifeld J.)  
  
MODELS4PASTURES: Lachgas aus der Landwirtschaft (Merbold L., Buchmann N.)
- P PROMESSING: Förderung von Ökosystemleistungen in Rebbergen Zentraleuropas (Bacher S.)
- S STACCATO: Ökosystemleistungen in landwirtschaftlich genutzten Landschaften (Zimmermann N., Kienast F.)
- T TALE: Multifunktionale Landwirtschaft in Europa (Holzkämper A., Charles R.)

### Thematische Synthesen

---

Thematische Synthese TS1: Boden und Nahrungsmittelproduktion (Charles R., Wendling M., Burgos S.)

Thematische Synthese TS2: Boden und Umwelt (Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A.)



Thematische Synthese TS3: Eine Bodenagenda für die Raumplanung (Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S.)

Thematische Synthese TS4: Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH) (Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz J.A., Zürrer M.)

Thematische Synthese TS5: Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik (Walter F., Hänni E.)

#### Fokusstudien

---

- B BODENINDIKATOREN: Bodenindikatoren für eine nachhaltige Raumplanung (Grêt-Regamey A., Bühlmann L.)
- BODENINFORMATIONSSYSTEME: Bodeninformationssysteme und (digitale) Bodenkartierung (Papritz A.J., Burgos S., Carizzoni M., Keller A., Wegmann F.)
- L LANDWIRTSCHAFTLICHER BODENMARKT: Landwirtschaftlicher Bodenmarkt im Brennpunkt von Regionen mit Siedlungserweiterung (Giuliani G., Flury C.)
- T TREIBHAUSGASBILANZ: Treibhausgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden in der Schweiz (Gattinger A., Bretschger D., Schellenberger A.)

## Anhang 2

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Wichtigste Faktoren, die zur Entwicklung der regionalen landwirtschaftlichen Aktivitäten und Anbautechniken beigetragen haben	13
Abbildung 2	Die vier wichtigsten Gefährdungen des Bodens, die in dieser Studie berücksichtigt wurden	17
Abbildung 3	Porosität bei nichtverdichtetem und verdichtetem Boden	19
Abbildung 4	Schematische Darstellung des Wurzelsystems von Triticale und Soja in nichtverdichteten und verdichteten Böden	21
Abbildung 5	Wurzelwachstum in Richtung einer künstlich erzeugten Makropore	22
Abbildung 6	Tausendfüssler als Humusbildner	26
Abbildung 7	Entwicklung des obs-Gehalts im P29C-Versuch in Changins VD 1970–2016 nach Bodenbearbeitung und Bodentyp	29
Abbildung 8	Verteilung des obs-Gehalts im P29C-Versuch in Changins VD 2015 nach Tiefe, Art der Bodenbearbeitung und Bodentyp	29
Abbildung 9	Dynamik des Bodenbedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Zeit seit der Saat für eine Auswahl von sechs Arten	30
Abbildung 10	Winterrettich nach drei Monaten Wachstum	31
Abbildung 11	Anteil der Biomasse der Begleitflora an der Biomasse der Zwischenkultur	32
Abbildung 12	Arbuskuläre Mykorrhizapilze, die eine Kleewurzel besiedeln	35
Abbildung 13	Von den Pflanzen gebundener Stickstoff (N) in Funktion der Leguminosenbiomasse	39
Abbildung 14	Entomopathogene Nematoden	41
Abbildung 15	Lebenszyklus von entomopathogenen Nematoden	42
Abbildung 16	Einfluss von Zwischenkulturen (Erbsen und Senf) auf das Vorkommen von entomopathogenen Nematoden nach Zeitraum und erhöhter Art	44
Abbildung 17	Mit <i>Pseudomonas protegens</i> (CHAO) besiedelte Weizenwurzeln	45
Abbildung 18	Alginat-Kügelchen mit entomopathogenen Nematoden und <i>Pseudomonas</i> -Bakterien	48
Abbildung 19	Bodendruck und Bodenfestigkeit in Abhängigkeit der Belastung beziehungsweise der Bodeneigenschaften	50
Abbildung 20	Entscheidungsdiagramm von «Terranimo»	50
Abbildung 21	Humusbilanz-Rechner von Agroscope	53
Abbildung 22	Sliptest für die visuelle und vergleichende Beurteilung der biologischen Aktivität des Bodens	55
Abbildung 23	Köderstreifentest	56
Abbildung 24	Produzentenpreisindex landwirtschaftlicher Erzeugnisse 1994–2016	62
Abbildung 25	Anbaufläche für Hackfrüchte in der Schweiz 2016, nach Bezirk	62
Abbildung 26	Grossvieheinheiten pro Hektare in der Schweiz 2016, nach Bezirk	63
Abbildung 27	Zusammenfassung verschiedener Ansätze für das lokale Ökosystem-Management aus der Perspektive der Bodenökologie	66

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwicklung der Landwirtschaft von 1990 bis 2015	14
Tabelle 2	Regenwurm-Biomasse in nichtverdichtetem und verdichtetem Boden zwei Monate nach der Verdichtung	20
Tabelle 3	obs-Entwicklung in Schweizer Langzeitversuchen	24
Tabelle 4	Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praktiken auf das Vorkommen entomopathogener Nematoden sowie das Vorkommen und die Aktivität von Pseudomonas-Bakterien	43
Tabelle 5	Beurteilungsschema der Humusbilanz-Ergebnisse, die mit dem Humusbilanz-Rechner von Agroscope berechnet wurden	54

## Glossar

### A **Abundanz**

Vorkommen von Individuen einer Art in absoluter Hinsicht oder im Sinne der Populationsdichte in einem bestimmten Lebensraum.

### **Anbausystem**

Gesamtheit aller technischen Verfahren, die auf identische Weise auf landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen umgesetzt werden. Jedes Anbausystem wird definiert durch die Art der Kulturen und ihre Reihenfolge sowie durch die technischen Abläufe, die bei diesen verschiedenen Kulturen angewendet werden, einschliesslich der Sortenwahl<sup>160</sup>.

### **Antibiose**

Interaktion zwischen Organismen, die Auswirkungen auf einige von ihnen hat. Dieser Mechanismus kann auf Substanzen beruhen, die in die Umwelt abgegeben werden (Antibiotika).

### B **Biokontrolle**

auch biologische Bekämpfung, Bezeichnung für die Nutzung von Lebewesen (Biota) zur Reduzierung anderer Lebewesen. Unterschieden wird zwischen der biologischen Bekämpfung durch Erhaltung von günstigen Bedingungen für Nützlinge und durch Augmentierung, bei der Organismen zugeführt werden.<sup>161</sup>

### **Bodenerosion**

Abtragung von Boden durch Wind und Wasser

### **Bodenfruchtbarkeit**

Ausdruck für alle das Pflanzenwachstum beziehungsweise die Biomasseproduktion beeinflussenden mineralogischen, physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften und Prozesse.

*Boden gilt gemäss Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) als fruchtbar, wenn:*

*a. die biologisch aktive Lebensgemeinschaft, die Bodenstruktur, der Bodenaufbau und die Mächtigkeit für seinen Standort typisch sind und er eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist;*

*b. natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden;*

*c. die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden;*

*d. Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden.*

### **Bodenfunktionen**

Leistungen des Bodens, die sich aus den Bodeneigenschaften und den im Boden ablaufenden Prozessen ergeben und die Böden für den Naturhaushalt und für die menschliche Gesellschaft erfüllen. Bodenfunktionen sind im Gegensatz zu Ökosystemleistungen (†)

Funktionen, die ein Boden erfüllt ohne direkte Verknüpfung zum Wert des Bodens für das menschliche Wohlbefinden. Unterschieden werden gemäss Deutschem Bundes-Bodenschutzgesetz<sup>174</sup>:

Natürliche Funktionen

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

Archivfunktion

- Archiv der Natur- und Kulturgeschichte

Nutzungsfunktionen

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

**Bodennutzung**

Gemäss schweizerischer Arealstatistik sozioökonomische Nutzung des Areals und damit eigentlich Landnutzung (†).

[www.bfs.ch → Arealstatistik Schweiz → Nomenklatur]

**Bodenqualität**

Leistungsvermögen der Böden, ihre Bodenfunktionen in Ökosystemen zu erfüllen<sup>12,164</sup>.

**Bodenregeneration**

Wiederherstellung der Bodenfunktionen nach Veränderungen oder Schädigungen durch klimatische oder zivilisatorische Einflüsse.

**E Erosion**

Bodenerosion (†)

**Expression**

Bezeichnung für den Vorgang, bei dem genetische Information zum Ausdruck kommt und biochemische Prozesse auslöst.

**Extensive Landwirtschaft**

vgl. intensive Landwirtschaft (†)

**I Integrierte Produktion**

landbauliches Produktionssystem für Lebensmittel und andere hochwertige Produkte, das natürliche Mittel und Mechanismen nutzt, um den Einsatz umweltbelastender Betriebsmittel zu vermeiden, und eine langfristig gangbare Landwirtschaft gewährleistet<sup>165</sup>.

### **Intensive Landwirtschaft**

Häufig verwendete Bezeichnung für eine landwirtschaftliche Bewirtschaftungsform, die sich – im Gegensatz zur extensiven Landwirtschaft – dadurch auszeichnet, dass durch Anwendung hochentwickelter, anspruchsvoller Agrartechnik, insbesondere durch hohen Dünger- und Hilfsstoffeinsatz, möglichst hohe Erträge pro Flächeneinheit und/oder Tier erzielt werden. Es existiert keine definierte Grenze für den Übergang von extensiver zu intensiver Landwirtschaft. Entsprechend unterschiedlich ist die Verwendung der Begriffe. Was in der Schweiz als intensive Landwirtschaft betrachtet wird, liegt im europäischen Vergleich auf einem tiefen Bewirtschaftungsniveau.

[Lexikon der Geographie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001, ergänzt]

### **L Landnutzung**

Reihe von Aktivitäten, um ein Gut oder mehrere Güter oder Dienste zu produzieren, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Boden stehen, also dessen Ressourcen nutzen oder sich auf den Boden auswirken. Eine bestimmte Form der Landnutzung oder -bewirtschaftung kann auf einer oder mehreren Flächen erfolgen; auf einer Fläche können auch unterschiedliche Nutzungsarten vorkommen.

Landnutzung ist nicht zu verwechseln mit den Begriffen Bodennutzung (†)/Bodenbedeckung, wie sie die Arealstatistik verwendet.

[Übersetzt und ergänzt nach: wocat, Glossary <https://www.wocat.net/en/sitefunctions/glossary.html>, Zugriff: 15.3.2017]

### **O Ökologischer Leistungsnachweis**

Grundanforderung für den Bezug von landwirtschaftlichen Direktzahlungen gemäss Direktzahlungsverordnung (Art. 11 ff. DZV; SR 910.13).

### **Ökosystemleistungen (ösl)**

Leistungen, die Menschen von Ökosystemen beziehen, beziehungsweise Aspekte des Ökosystems, die – aktiv oder passiv – genutzt werden, um menschliches Wohlergehen zu erzeugen. Das Konzept der ösl fördert die Anerkennung des Wertes des Bodens für das menschliche Wohlergehen und die Berücksichtigung von Boden in Entscheidungsprozessen<sup>13</sup>. Im Gegensatz dazu sind Bodenfunktionen Funktionen, die ein Boden erfüllt ohne direkte Verknüpfung zum Wert des Bodens für das menschliche Wohlergehen.

### **P Produktionssystem**

Gesamtheit der auf Ebene eines Betriebes eingesetzten Anbausysteme (†). Der Begriff bezieht sich insbesondere auf die Strategien zur Bewältigung dieser Vielschichtigkeit, die von den örtlichen Produktionsbedingungen, aber auch vom wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Kontext abhängig ist (integrierte Produktion †).

### **S Stickstofffixierung**

Biochemischer Prozess, durch den Bodenorganismen aus elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>) pflanzenverfügbare Stickstoffverbindungen herstellen. Die darauf aufbauende Symbiose zwischen Bodenbakterien und Leguminosen ist eine der zentralen Bodenfunktionen.

## Abkürzungsverzeichnis

LWG	Landwirtschaftsgesetz
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
DZV	Direktzahlungsverordnung
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
PSM	Pflanzenschutzmittel
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens
VDLUFA	Vereinigung der deutschen landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten

## Namen von Tier- und Pflanzenarten

Sand-Hafer	<i>Avena strigosa</i>
Ackerbohne	<i>Vicia faba</i>
Weisser Senf	<i>Sinapis alba</i>
Brauner Senf	<i>Brassica juncea</i>
Ramtillkraut	<i>Guizotia abyssinica</i>
Fritfliege	<i>Oscinella frit</i>
Rainfarn-Phazalie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>
Erbse	<i>Pisum sativum</i>
Daikon	<i>Raphanus sativus longipinnatus</i>
Echter Buchweizen	<i>Fagopyrum esculentum</i>
Sudangras	<i>Sorghum sudanense</i>
Sonnenblume	<i>Helianthus annuus</i>
Weissklee	<i>Trifolium repens</i>
Ungarische Wicke	<i>Vicia Pannonica</i>
Zottige Wicke	<i>Vicia villosa</i>

## Literatur

- 1 Häberli R., Lüscher C., Chastonay B., Wyss C. (1991): Boden-Kultur: Vorschläge für eine haushälterische Nutzung des Bodens in der Schweiz: Schlussbericht des Nationalen Forschungsprogrammes (NFP) 22 «Nutzung des Bodens in der Schweiz». Zürich: vdf.
- 2 Baggiolini M. (1990): Production intégrée en Suisse. I. Aperçu historique de la « production agricole intégrée ». In: Bulletin de la société entomologique suisse 63, 493–500.
- 3 Griffon M. (2013): Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ? Hrsg.: Quae, Versailles.
- 4 Pandey S., Rai M., Reeves T.G., Collette L. (2011): Save and Grow: A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rom.
- 5 Doré T., Makowski D., Malézieux E., Munier-Jolain N., Tchamitchian M., Tittone P. (2011): Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. In: European Journal of Agronomy 34, 197–210. doi:10.1016/j.eja.2011.02.006
- 6 Mazoyer M., Roudart L. (2002): Histoire des agricultures du monde du néolithique à la crise contemporaine. Points.
- 7 Bundesamt für Statistik (BFS) (2017): Landwirtschaftliche Strukturerhebung 2016, Medienmitteilung, 11.05.2017, Neuchâtel.
- 8 Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2017): Agrarbericht 2017. www.agrarbericht.ch
- 9 Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014): Agrarbericht 2014. www.agrarbericht.ch
- 10 Della Peruta R., Keller A. (2016): A regional modelling tool to assess the risk of accumulation of nutrients, trace metals and pesticides in agricultural soils (iMSoil). In: BGS-Bulletin 37.
- 11 Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2013): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug 1313, Hrsg.: BAFU, Bern.
- 12 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997): Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). In: Soil Science Society of America Journal 61, 4–10. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- 13 Grêt-Regamey A., Drobnik T., Greiner L., Keller A., Papritz A. (2016): Soils and their contribution to ecosystem services, Faktenblatt des NFP 68. www.nfp68.ch
- 14 Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S. (2018): Eine Bodenagenda für die Raumplanung. Thematische Synthese TS<sub>3</sub> des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- 15 Presler J., Carizzoni M., Widmer D. (2013): Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone.
- 16 Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A., Or D. (2017): Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. In: Vadose Zone Journal 16, vzj2016.11.0118. doi:10.2136/vzj2016.11.0118
- 17 da Silva P.A., Kay B.D., Perfect E. (1994): Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. In: Soil Science Society of America Journal 58, 1775–1781. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x
- 18 Dexter A.R. (1987): Mechanics of root growth. In: Plant Soil 98, 303–312. doi:10.1007/BF02378351
- 19 Zhang W., Ricketts, T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M. (2007): Ecosystem services and dis-services to agriculture. In: Ecological Economics 64, 253–260. doi: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024
- 20 Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. (2014): Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. In: ISME Journal 8, 226–244. doi:10.1038/ismej.2013.141
- 21 Colombi T., Walter A. (2016): Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. In: Functional Plant Biology 43, 114–128. doi:10.1071/FP15194



- 22 Culley J.L.B., Dow B.K., Presant E.W., MacLean A.J. (1982): Recovery of Productivity of Ontario Soils Disturbed by an Oil Pipeline Installation. In: *Canadian Journal of Soil Science* 62, 267–279. doi:10.4141/cjss82-031
- 23 Håkansson I., Reeder R.C. (1994): Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. In: *Soil and Tillage Research* 29, 277–304. doi:10.1016/0167-1987(94)90065-5
- 24 Berisso F.E., Schjønning P., Keller T., Lamandé M., Etana A., de Jonge L.W., Iversen B.V., Arvidsson J., Forkman J. (2012): Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. In: *Soil and Tillage Research* 122, 42–51. doi:10.1016/j.still.2012.02.005
- 25 Besson A., Séger M., Giot G., Cousin I. (2013): Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. In: *Geoderma* 204, 130–139. doi:10.1016/j.geoderma.2013.04.010
- 26 Peng X., Horn R. (2008): Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 936–944. doi:10.1002/jpln.200700084
- 27 Colombi T., Braun S., Keller T., Walter A. (2017): Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. In: *Science of the Total Environment* 574, 1283–1293.
- 28 Ruiz S., Or D., Schymanski S.J. (2015): Soil Penetration by Earthworms and Plant Roots – Mechanical Energetics of Bioturbation of Compacted Soils. In: *PLOS ONE* 10, e0128914. doi:10.1371/journal.pone.0128914
- 29 Webb R.H. (2002): Recovery of severely compacted soils in the Mojave Desert, California, USA. In: *Arid Land Research and Management* 16, 15. doi:10.1080/153249802760284829
- 30 Håkansson I., Voorhees W.B., Elonen P., Raghavan G.S.V., Lowery B., Van Wijk A.L.M., Rasmussen K., Riley H. (1987): Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. In: *Soil and Tillage Research* 10, 259–268. doi:10.1016/0167-1987(87)90032-8
- 31 Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Sinaj S., Charles R. (2017): Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. In: *Soil and Tillage Research* 174, 120–129. doi:10.1016/j.still.2017.07.002
- 32 Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. (2012): Langfristige Wirkung von organischen Düngern auf die Bodeneigenschaften. In: *Agrarforschung Schweiz* 3(3), 148–155.
- 33 Fliessbach A., Oberholzer H.R., Gunst L., Mäder P. (2007): Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 273–284. doi:10.1016/j.agee.2006.05.022
- 34 Oberholzer H.R., Leifeld J., Mayer J. (2014): Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 696–704. doi:10.1002/jpln.201300385
- 35 Programme de maintien de la fertilité des sols du canton de Vaud. [www.prometerre.ch/sols](http://www.prometerre.ch/sols)
- 36 Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. (2011): Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141, 184–192. doi:10.1016/j.agee.2011.02.029
- 37 Ghafoor A., Poeplau C., Kätterer T. (2017): Fate of straw- and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. In: *Biology and Fertility of Soils* 53, 257–267. doi:10.1007/s00374-016-1168-7
- 38 Prasuhn V., Liniger H.P., Hurni H., Friedli S. (2007): Bodenerosions-Gefährdungskarte der Schweiz. In: *Agrarforschung Schweiz* 14 (3), 120–127.
- 39 Gisler S., Liniger H.P., Prasuhn V. (2011): Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2). In: *Agrarforschung Schweiz* 2 (4), 148–155.
- 40 Gattlen N., Klaus G., Litsios G. (2017): Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016. *Umwelt-Zustand* 1630. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- 41 Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014): Belowground biodiversity and ecosystem functioning. In: *Nature* 515, 505–511. doi:10.1038/nature13855
- 42 Bundesamt für Umwelt (BAFU; Hrsg.) (2016): *Der Boden lebt. Einblick ins Verborgene.* Postkartenserie. *Umwelt Diverses* 1095, BAFU, Bern.

- 43 Moore J.C., Berlow E.L., Coleman D.C., de Ruiter P.C., Dong Q., Hasting, A., Johnson N.C., McCann K.S., Melville K., Morin P.J., Nadelhoffer K., Rosemond A.D., Post D.M., Sabo J.L., Scow K.M., Vanni M.J., Wall D.H. (2004): Detritus, trophic dynamics and biodiversity. In: *Ecology Letters* 7, 584–600. doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00606.x
- 44 Udikovic-Kolic N., Wichmann F., Broderick N.A., Handelsman J. (2014): Bloom of resident antibiotic-resistant bacteria in soil following manure fertilization. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, 15202–15207. doi: 10.1073/pnas.1409836111
- 45 Gomez-Sanz E., Jaenicke S., Wittwer R., Goesmann A., Van der Heijden M.G.A., Duffy B., Smits T.H.M. (2016): Poster SGM/SSM annual meeting, Bern.
- 46 Palm C., Blanco-Canqui H., DeClerck F., Gatere L., Grace P. (2014): Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187, 87–105. doi:10.1016/j.agee.2013.10.010
- 47 Martínez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Etana A., Stettler M., Forkman J., Keller T. (2016a): Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. In: *Soil and Tillage Research* 163, 141–151. doi:10.1016/j.still.2016.05.021
- 48 Pittelkow C.M., Liang X., Linquist B.A., van Groenigen K.J., Lee J., Lundy M.E., van Gestel N., Six J., Venterea R.T., van Kessel C. (2015): Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. In: *Nature* 517, 365–368. doi:10.1038/nature13809
- 49 Derpsch R., Franzluebbers A.J., Duiker S.W., Reicosky D.C., Koeller K., Friedrich T., Sturny W.G., Sá J.C.M., Weiss K. (2014): Why do we need to standardize no-tillage research? In: *Soil and Tillage Research* 137, 16–22. doi:10.1016/j.still.2013.10.002
- 50 Luo Z., Wang E., Sun O.J. (2010): Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. In: *Agriculture Ecosystems & Environment* 139, 224–231. doi:10.1016/j.agee.2010.08.006
- 51 Martínez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Rek J., Keller T. (2016b): Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. In: *Soil and Tillage Research*: 163, 130–140. doi:10.1016/j.still.2016.05.020
- 52 Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. (2012): No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. In: *Soil and Tillage Research* 118, 66–87. doi:10.1016/j.still.2011.10.015
- 53 Valboa G., Lagomarsino A., Brandi G., Agnelli A.E., Simoncini S., Papini R., Vignozzi N., Pellegrini S. (2015): Long-term variations in soil organic matter under different tillage intensities. In: *Soil and Tillage Research* 154, 126–135.
- 54 Franzluebbers A.J. (2002): Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. In: *Soil and Tillage Research* 66, 95–106. doi:10.1016/S0167-1987(02)00018-1
- 55 Quinton J.N., Edwards G.M., Morgan R.P.C. (1997): The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion: results from a rainfall simulation study in south east Spain. In: *Soil Use and Management* 13, 143–148. doi:10.1111/j.1475-2743.1997.tb00575.x
- 56 Gebhard C.-A., Büchi L., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R. (2013): Beurteilung von Leguminosen als Gründüngungspflanzen: Stickstoff und Begleitflora. In: *Agrarforschung Schweiz* 4, 384–393.
- 57 Yu Y., Loiskandl W., Kaul H.-P., Himmelbauer M., Wei W., Chen L., Bodner G. (2016): Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. In: *Journal of Hydrology* 538, 667–676. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.04.060
- 58 Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A., Charles R. (2016): Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. In: *Plant and Soil* 409, 419–434. doi:10.1007/s11104-016-2974-2
- 59 Weil R., Kremen A. (2007): Thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87, 551–557. doi:10.1002/jsfa.2742
- 60 Chen G., Weil R.R. (2010): Penetration of cover crop roots through compacted soils. In: *Plant and Soil* 331, 31–43. doi:10.1007/s11104-009-0223-7
- 61 Wendling M., Büchi L., Amossé C., Jeangros B., Walter A., Charles R. (2017): Specific interactions leading to transgressive overyielding in cover crop mixtures. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 241, 88–99. doi:10.1016/j.agee.2017.03.003
- 62 Tribouillois H., Cohan J.-P., Justes E. (2016): Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. In: *Plant and Soil* 401, 347–364. doi:10.1007/s11104-015-2734-8

- 63 Charles R., Amossé C., Cholley E., Frei P., Mascher F. (2015): How far can we simplify cereal based crop rotation: results from a long-term experiment in Switzerland. In: *Aspects of Applied Biology* 128, 43–48.
- 64 Sinaj S., Richner W. (2017): Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). In: *Agrarforschung Schweiz – Spezialpublikation*.
- 65 Smith S.E., Read D. (2008): *Mycorrhizal Symbiosis*, third. ed. Academic Press, London.
- 66 Augé R.M., Stodola A.J.W., Tims J.E., Saxton A.M. (2001): Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. In: *Plant and Soil* 230, 87–97. doi:10.1023/A:1004891210871
- 67 Whipps J.M. (2004): Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. In: *Canadian Journal of Botany* 82, 1198–1227.
- 68 Rillig M.C., Mummey D.L. (2006): Mycorrhizas and soil structure. In: *New Phytologist* 171, 41–53. doi:10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x
- 69 van der Heijden M.G.A. (2010): Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems. In: *Ecology* 91, 1163–1171. doi:10.1890/09-0336.1
- 70 Bender S.F., Wagg C., van der Heijden M.G., 2016. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. In: *Trends Ecol Evol.* 31, 440–452. doi: 10.1016/j.tree.2016.02.016
- 71 van der Heijden M.G.A., Martin F.M., Selosse M.-A., Sanders I.R. (2015): Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. In: *New Phytologist* 205, 1406–1423. doi: 10.1111/nph.13288
- 72 Verbruggen E., Rölting W.F.M., Gamper H.A., Kowalchuk G.A., Verhoef H.A., van der Heijden M.G.A. (2010): Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils. In: *New Phytologist* 186, 968–979. doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03230.x
- 73 Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M.G.A., Oehl F. (2015): Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *Soil Biology and Biochemistry* 84, 38–52. doi:10.1016/j.soilbio.2015.02.005
- 74 Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., Sanders I.R., Frossard E. (2002): Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. In: *Mycorrhiza* 12, 225–234. doi:10.1007/s00572-002-0163-z
- 75 Maurer C., Rüdy M., Chervet A., Sturny W., Flisch R., Oehl F. (2014): Diversität arbuskulärer Mycorrhizapilze in Ackerkulturen bei Direktsaat und Pflug. In: *Agrarforschung Schweiz* 5, 398–405.
- 76 Wetzel K., Silva G., Matczinski U., Oehl F., Fester T. (2014): Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungal communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP. In: *Soil Biology and Biochemistry* 72, 88–96. doi:10.1016/j.soilbio.2014.01.033
- 77 Brito I., Goss M.J., de Carvalho M., Chatagnier O., van Tuinen D. (2012): Impact of tillage system on arbuscular mycorrhiza fungal communities in the soil under Mediterranean conditions. In: *Soil and Tillage Research* 121, 63–67. doi:10.1016/j.still.2012.01.012
- 78 Kabir Z. (2005): Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. In: *Canadian Journal of Botany* 85, 23–29.
- 79 Oehl F., Sieverding E., Mäder P., Dubois D., Ineichen K., Boller T., Wiemken A. (2004): Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *Oecologia* 138, 574–583. doi:10.1007/s00442-003-1458-2
- 80 Mathimaran N., Ruh R., Vulliod P., Frossard E., Jansa J. (2005): *Glomus intraradices* dominates arbuscular mycorrhizal communities in a heavy textured agricultural soil. In: *Mycorrhiza* 16, 61–66. doi:10.1007/s00572-005-0014-9
- 81 Köhl L., Lukaszewicz C.E., van der Heijden M.G.A. (2016): Establishment and effectiveness of inoculated arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. In: *Plant, Cell & Environment* 39, 136–146. doi:10.1111/pce.12600
- 82 Hoeksema J.D., Chaudhary V.B., Gehring C.A., Johnson N.C., Karst J., Koide R.T., Pringle A., Zabinski C., Bever J.D., Moore J.C., Wilson G.W.T., Klironomos J.N., Umbanhowar J. (2010): A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi. In: *Ecology Letters* 13, 394–407. doi:10.1111/j.1461-0248.2009.01430.x
- 83 Marschner H., Dell B. (1994): Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. In: *Plant and Soil* 159, 89–102. doi:10.1007/BF0000098
- 84 Tonitto C., David M.B., Drinkwater L.E. (2006): Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 58–72. doi:10.1016/j.agee.2005.07.003

- 85 Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R. (2015): Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. In: *Plant and Soil* 393, 163–175. doi:10.1007/s11104-015-2476-7
- 86 Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S. (2003): Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. In: *Advances in Agronomy* 79, 227–302. doi:10.1016/S0065-2113(02)79005-6
- 87 Justes E., Mary B., Nicolardot B. (2009): Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. In: *Plant and Soil* 325, 171–185. doi:10.1007/s11104-009-9966-4
- 88 Oerke E.-C. (2006): Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31–43. doi:10.1017/S0021859605005708
- 89 Campos-Herrera R., Jaffuel G., Chiriboga X., Blanco-Pérez R., Fesselet M., Půža V., Mascher F., Turlings T.C.J. (2015): Traditional and molecular detection methods reveal intense interguild competition and other multitrophic interactions associated with native entomopathogenic nematodes in Swiss tillage soils. In: *Plant and Soil* 389, 237–255. doi:10.1007/s11104-014-2358-4
- 90 Jaffuel G., Mäder P., Blanco-Perez R., Chiriboga X., Fließbach A., Turlings T.C.J., Campos-Herrera R. (2016): Prevalence and activity of entomopathogenic nematodes and their antagonists in soils that are subject to different agricultural practices. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230, 329–340. doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.009
- 91 Jaffuel G., Blanco-Pérez R., Büchi L., Mäder P., Fließbach A., Charles R., Degen T., Turlings T.C.J., Campos-Herrera R. (2017): Effects of cover crops on the overwintering success of entomopathogenic nematodes and their antagonists. In: *Applied Soil Ecology* 114, 62–73. doi:10.1016/j.apsoil.2017.02.006
- 92 Campos-Herrera R., Půža V., Jaffuel G., Blanco-Pérez R., Čepulytė-Rakauskienė R., Turlings T.C.J. (2015): Unraveling the intraguild competition between *Oscheius* spp. nematodes and entomopathogenic nematodes: Implications for their natural distribution in Swiss agricultural soils. In: *Journal of Invertebrate Pathology* 132, 216–227. doi:10.1016/j.jip.2015.10.007
- 93 Haas D., Défago G. (2005): Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. In: *Nature Reviews Microbiology* 3, 307–319. doi:10.1038/nrmicro1129
- 94 Mercado-Blanco J., Bakker P.A.H.M. (2007): Interactions between plants and beneficial *Pseudomonas* spp.: exploiting bacterial traits for crop protection. In: *Antonie Van Leeuwenhoek* 92, 367–389. doi:10.1007/s10482-007-9167-1
- 95 Lugtenberg B., Kamilova F. (2009): Plant-growth-promoting rhizobacteria. In: *Annual Review of Microbiology* 63, 541–556. doi:10.1146/annurev.micro.62.081307.162918
- 96 Kim M.S., Kim Y.C., Cho B.H. (2004): Gene expression analysis in cucumber leaves primed by root colonization with *Pseudomonas chlororaphis* O6 upon challenge-inoculation with *Corynespora cassiicola*. In: *Plant Biology* 6, 105–108. doi:10.1055/s-2004-817803
- 97 Maurhofer M., Hase C., Meuwly P., Métraux J., Défago G. (1994): Induction of systemic resistance of tobacco to Tobacco Necrosis Virus by the root-colonizing *Pseudomonas fluorescens* strain CHA0 – influence of the *gacA* gene and of pyoverdine production. In: *Phytopathology* 84, 139–146.
- 98 Pieterse C.M.J., van Pelt J.A., Verhagen B.W.M., Ton J., van Wees A.C.M., Léon-Kloosterman K.M., van Loon L.C. (2003): Induced systemic resistance by plant growth-promoting rhizobacteria. In: *Symbiosis* 35, 39–54.
- 99 Kupferschmied P., Maurhofer M., Keel C. (2013): Promise for plant pest control: root-associated pseudomonads with insecticidal activities. In: *Frontiers in Plant Science* 4, 287. doi:10.3389/fpls.2013.00287
- 100 Weller D.M., Raaijmakers J.M., Gardener B.B.M., Thomashow L.S. (2002): Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. In: *Annual Review of Phytopathology* 40, 309–348. doi:10.1146/annurev.phyto.40.030402.110010
- 101 Raaijmakers J.M., Weller D.M. (1998): Natural Plant Protection by 2,4-Diacetylphloroglucinol-Producing *Pseudomonas* spp. in Take-All Decline Soils. In: *Molecular Plant-Microbe Interactions* 11, 144–152. doi:10.1094/MPMI.1998.11.2.144
- 102 Stutz E.W., Défago G., Kern H. (1986): Naturally occurring fluorescent pseudomonads involved in suppression of black root-rot of tobacco. In: *Phytopathology* 76, 181–185.
- 103 Singh P., Siddiqui Z.A. (2010): Biocontrol of root-knot nematode *Meloidogyne incognita* by the isolates of *Pseudomonas* on tomato. In: *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 43, 1423–1434. doi:10.1080/03235400802536857

- 104 Flury P, Vesga P, Péchy-Tarr M., Aellen N., Dennert F, Hofer N., Kupferschmied K.P., Kupferschmied P, Metla Z., Ma Z., Siegfried S., de Weert S, Bloemberg G., Höfte M., Keel C.J., Maurhofer M. (2017) : Antimicrobial and Insecticidal: Cyclic Lipopeptides and Hydrogen Cyanide Produced by Plant-Beneficial *Pseudomonas* Strains CHA0, CMR12a, and PCL1391 Contribute to Insect Killing. In: *Frontiers in Microbiology* 8, 100. doi:10.3389/fmicb.2017.00100
- 105 Imperiali N., Denner F., Schneide J., Laessl T., Velatt C., Fessele M., Wyle M., Mascher F., Mavrod O., Mavrod D., Maurhofer M., Keel C. (2017): Relationships between Root Pathogen Resistance, Abundance and Expression of *Pseudomonas* Antimicrobial Genes, and Soil Properties in Representative Swiss Agricultural Soils. In: *Frontiers in Plant Science* 8, 427. doi:10.3389/fpls.2017.00427
- 106 Schjønning P, Lamandé M., Keller T., Pedersen J., Stettler M. (2012): Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. In: *Soil Use and Management* 28, 378–393. doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x
- 107 Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern: <https://www.youtube.com/watch?v=qd62cjF-HMzo>
- 108 Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL): <http://www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/boden/allgemein/spatenprobe-film.html>
- 109 Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U., Weisskopf P. (2001): Bodenbeurteilung im Feld. Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau (LbL).
- 110 Ball B.C., Batey T., Munkholm L.J. (2007): Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. In: *Soil Use and Management* 23, 329–337. doi:10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x
- 111 Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P. (2017): To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? In: *Soil and Tillage Research* 173, 24–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>
- 112 <https://github.com/MichaelPolla/vess/raw/master/builds/android.apk>
- 113 <http://www.itab.asso.fr/programmes/solab.php>
- 114 Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyż E.A., Jolivet C., Duval O. (2008): Complexed organic matter controls soil physical properties. In: *Geoderma* 144, 620–627. doi:10.1016/j.geoderma.2008.01.022
- 115 Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Baveye P.C., Boivin P. (2017): Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? In: *Geoderma* 302, 14–21. doi:10.1016/j.geoderma.2017.04.021
- 116 Neyroud J., Supcik P., Magnollay F. (1997): La part du sol dans la production intégrée – 1. Gestion de la matière organique et bilan humique. *Revue Suisse d'Agriculture* 29, 45–51.
- 117 Oberholzer H.-R., Weisskopf P.: [www.humusbilanz.ch](http://www.humusbilanz.ch). Agroscope.
- 118 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. In: Vereinigung der deutschen landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA): Standpunkt. [https://www.humusbilanz.ch/download/vdlufa\\_2014\\_Humusbilanzierung.pdf](https://www.humusbilanz.ch/download/vdlufa_2014_Humusbilanzierung.pdf)
- 119 [www.simeos-amg.org](http://www.simeos-amg.org)
- 120 Coleman K., Jenkinson D.S. (1996): RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models – Using Existing Long-Term Datasets*, Nato ASI Subseries, I. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 237–246.
- 121 Keuskamp J.A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M. (2013): Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. In: *Methods in Ecology and Evolution* 4, 1070–1075. doi:10.1111/2041-210X.12097
- 122 <http://www.teatime4science.org/data/submit-one-data-point>
- 123 École supérieure d'agriculture d'Angers: <http://www.groupe-esa.com/wp-content/uploads/2017/09/fiche-indicateur-levabag.pdf>
- 124 [www.soilcc.ca/soilweek/2017/Soil-Your-Undies-Protocol.pdf](http://www.soilcc.ca/soilweek/2017/Soil-Your-Undies-Protocol.pdf)
- 125 Kratz W. (1998): The Bait-Lamina Test General Aspects, Applications and Perspectives. In: *Environmental Science and Pollution Research* 55, 94–96. <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/>
- 126 Observatoire Participatif des Vers de Terre: [https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT\\_accueil.php](https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php)
- 128 Schlaeppi K., Bender S.F., Mascher F., Russo G., Patrignani A., Camenzind T., Hempel S., Rillig M.C., van der Heijden M.G.A. (2016): High-resolution community profiling of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *New Phytologist* 212, 780–791. doi:10.1111/nph.14070

- 129 Campos-Herrera R., Johnson E.G., El-Borai F.E., Stuart R.J., Graham J.H., Duncan L.W. (2011): Long-term stability of entomopathogenic nematode spatial patterns in soil as measured by sentinel insects and real-time PCR assays. In: *Annals of Applied Biology* 158, 55–68. doi:10.1111/j.1744-7348.2010.00433.x
- 130 www.bodenmessnetz.ch
- 131 https://map.geo.admin.ch
- 132 Meuli R.G., Schwab P., Wächter D., Ammann S. (2014): Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2004, Umwelt-Zustand UZ-1409, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- 133 Rossier N., von Niederhäusern A., Bongard L. (2012): FRIBO – Réseau fribourgeois d’observation des sols 1997–2011. Institut agricole de l’État de Fribourg IAG, Posieux.
- 134 Keller A., Franzen J., Knüsel P., Zürcher M., Papritz A. (2018): Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH). Thematische Synthese TS4 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- 135 Bundesamt für Statistik (BFS) (2017): Statistisches Lexikon der Schweiz 2017. Neuchâtel.
- 136 Bellini E. (2015): Boden und Bauen. Stand der Technik und Praktiken. Umwelt-Wissen 1508, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- 137 IP-Suisse (2016): Directives pour l’ensemble de l’exploitation. Exigences de base pour tous les programmes du label IP-SUISSE. <https://www.ipsuisse.ch/cms/ModanFileHandler.axd?DateiGUID=0c76e9f6-6756-46ae-893b-e1d836229159>
- 138 Bio Suisse (2018): Cahier des charges pour la production, la transformation et le commerce de produits bourgeon. [https://www.bio-suisse.ch/media/VundH/Regelwerk/2018/FR/rl\\_2018\\_1.1\\_f\\_gesamt\\_01.02.2018.pdf](https://www.bio-suisse.ch/media/VundH/Regelwerk/2018/FR/rl_2018_1.1_f_gesamt_01.02.2018.pdf)
- 139 Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Agridea (2017): Wegleitung Suisse-Bilanz.
- 140 Buess A., Gantner U., Lötscher M., Stöckli A., Tschumi M (2011): Le système de connaissances agricoles en Suisse. In: *Recherche Agronomique* 2, 484–489.
- 141 Lechenet M., Deytieux V., Antichi D., Aubertot J.-N., Bärberi P., Bertrand M., Cellier V., Charles R., Colnenne-David C., Dachbrodt-Saaydeh S., Debaeke P., Doré T., Farcy P., Fernandez-Quintanilla C., Grandeau G., Hawes C., Jouy L., Justes E., Kierzek R., Kudsk P., Lamichhane J.R., Lescourret F., Mazzoncini M., Melander B., Messéan A., Moonen A.C., Newton A.C., Nolot J.M., Panozzo S., Retaureau P., Sattin M., Schwarz J., Toqué C., Vasileiadis V.P., Munier-Jolain N. (2017): Diversity of methodologies to experiment integrated pest management in arable cropping systems: analysis and reflections based on a European network. In: *European Journal of Agronomy* 83, 86–99.
- 142 Häller B., Pfister M., Zbinden K., Lehmann R. (2017): REDES – Ressourceneffizienz im Dienste der Ernährungssicherheit. Bericht zum Projektabschluss und zur methodischen Begleitung des Pilotprojektes «REDES-Arbeitskreis». Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFU), Zollikofen.
- 143 Konsumentenforum (KF), Verband des Schweizer Früchte- und Gemüsehandels (SWISSCOFEL), Schweizer Obstverband (SOV), Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP) (2016): Privatrechtliche Vereinbarung über die Deklaration von frischem Gemüse und frischen Beeren aus der Gewächshaus- und Hors-sol-Produktion wird aufgelöst. Medienmitteilung vom 08.11.2016, Bern.
- 144 Barański M., Srednicka-Tober D., Volakakis N., Seal C., Sanderson R., Stewart G.B., Benbrook C., Biavati B., Markellou E., Giotis C., Gromadzka-Ostrowska J., Rembiakowska E., Skwarło-Sonta K., Tahvonen R., Janovska D., Niggli U., Nicot P., Leifer C. (2014): Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses. In: *British Journal of Nutrition* 112, 794–811.
- 145 Burton R.J.F., Schwarz G. (2013): Result-oriented agri-environmental schemes in Europe and their potential for promoting behavioural change. In: *Land Use Policy* 30, 628–641.
- 146 Boivin P. (2017): Rémunérer la qualité du sol agricole. Utopie ou nouveau paradigme pour concilier agriculture et fonctions environnementales ? In: *Agronomie, écologie et innovation TCS* 93, 12–15.
- 147 Stamm C., Doppler T., Prasuhn V., Singer H. (2012): Standortgerechte Landwirtschaft bezüglich der Auswirkung von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen auf Oberflächengewässer. Projektschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Eawag, Dübendorf.
- 148 Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2011): Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. BLW, Bern.

- 149 Kotschi J., Adelhelm R. (1984): Standortgerechte Landwirtschaft – zur Entwicklung  
kleinbäuerlicher Betriebe in den Tropen und Subtropen. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft  
für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn. 17–34.
- 150 Bertschinger L., Baur R., Carlen C., Frey J., Jeangros B., Kessler W., Viret O., Mayor J.-P.  
(2015): Contributions de la recherche à l'intensification écologique pour une production  
végétale durable. In: *Recherche Agronomique Suisse* 9, 408–415.
- 151 Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L., Sinaj S. (2016): Responses of soil properties  
and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional  
farming system. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 230, 116–126.  
doi:10.1016/j.agee.2016.05.032
- 152 Gallet A., Flisch R., Ryser J.-P., Frossard E., Sinaj S. (2003): Effect of phosphate fertili-  
zation on crop yield and soil phosphorus status. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil  
Science* 166, 568–578. doi:10.1002/jpln.200321081
- 153 Armengot L., Berner A., Blanco-Moreno J.M., Mäder P., Sans F.X. (2015): Long-term fea-  
sibility of reduced tillage in organic farming. In: *Agronomy for Sustainable Develop-  
ment* 35, 339–346. doi:10.1007/s13593-014-0249-y
- 154 Thomet P., Koch B. (1993) : Langfristige Auswirkungen von Düngung und Schnittregime  
auf eine Heumatte. In: *Landwirtschaft Schweiz*, Band 6 (2), 107–114.
- 155 Jeangros B. (1993): Prairies permanentes en montagne. I. Effets de la fréquence  
des coupes et de la fertilisation azotée sur la composition botanique. In: *Revue Suisse  
Agricole* 6, 345–360.
- 156 Mayer J., Gunst L., Mäder P., Samson M.-F., Carcea M., Narducci V., Thomsen I.K.,  
Dubois D. (2015): Productivity, quality and sustainability of winter wheat under  
long-term conventional and organic management in Switzerland. In: *European  
Journal of Agronomy* 65, 27–39. doi.org/10.1016/j.eja.2015.01.002
- 157 Wittwer R.A., Dorn B., Jossi W., van der Heijden M.G.A. (2017): Cover crops support  
ecological intensification of arable cropping systems. In: *Scientific Reports* 7, 41911.  
doi:10.1038/srep41911
- 158 Charles R., Cholley E., Frei P. (2011): Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Sorte und Fungi-  
zidschutz in der Getreideproduktion. In: *Agrarforschung Schweiz* 2(5), 212–219.
- 159 Charles R., Cholley E., Frei P., Mascher F. (2011). Krankheiten beim Winterweizen:  
Einfluss des Anbausystems und Auswirkungen auf den Ertrag. In: *Agrarforschung  
Schweiz* 2(6), 264–271.
- 160 Sébillotte M. (1990): Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes.  
In: *Le point sur les systèmes de culture*. INRA, Paris, 165–196.
- 161 El Titi A., Boller E.F., Gendrier J.P. (1993): Integrated Production. Principles and  
Technical Guidelines. In: *Bulletin of the International Organization for Biological  
and Integrated Control of Noxious Animals and Plants, West Palearctic Regional  
Section (IOBC/WPRS)* 16.
- 162 Peacock S., Smith B.M., Stockdale E.A., Watson C. (2015): Aspects of Applied Biology 128,  
Valuing long-term sites and experiments for agriculture and ecology. Association of  
Applied Biologists, Warwick Enterprise Park, Welles-bourne, Warwick CV35 9EF, UK.

## Impressum

### Autorenteam

Dr. Raphaël Charles, FiBL, Lausanne  
Dr. Marina Wendling, FiBL, Lausanne  
Dr. Stéphane Burgos, HAFL, Zollikofen

Erarbeitet und publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung als thematische Synthese des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68).

### Herausgeberin

Leitungsgruppe des Nationalen Forschungsprogramms  
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)

### Begleitgruppe der thematischen Synthese

Daniel Baertschi, Bio Suisse, Basel  
David Brugger, Schweizerischer Bauernverband (SBV), Bern  
Dr. Alfred Buess, Landwirtschaftlicher Forschungsrat (LFR), Bern  
Andreas Chervet, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (LANAT), Zollikofen  
Jacques Dugon, Agridea, Lausanne  
Sébastien Gassmann, Kanton Genf, Genf  
Olivia Grimm, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern  
Hansueli Gujer, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern  
Dr. Jan Lucht, Scienceindustries, Zürich  
Reto Minder, Landwirt, Swiss No-Till, Jeuss  
Dr. Claudio Screpanti, Syngenta Crop Protection, Stein  
André Zimmermann, Service de l'agriculture et de la viticulture (SAVI), Moudon  
Dr. Michael Zimmermann, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern

### Leitungsgruppe des NFP 68

Prof. Emmanuel Frossard, ETH Zürich (Präsident)  
Prof. Claire Chenu, AgroParisTech, Frankreich  
Prof. Peter de Ruiter, Universität Amsterdam, Niederlande  
Dr. Annette Freibauer, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Deutschland  
Prof. Bernd Hansjürgens, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig, Deutschland  
Prof. Lorenz Hurni, ETH Zürich

Dr. Michael Obersteiner, Internationales Institut für angewandte Systemanalyse, Österreich  
Prof. Kurt Roth, Universität Heidelberg, Deutschland

### Delegierte des Nationalen Forschungsrats

Prof. Claudia R. Binder, EPF Lausanne

### Bundesvertreter

Stephan Scheidegger, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern  
Dr. Roland von Arx, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

### Leiter Wissenstransfer/Redaktion

Urs Steiger, steiger texte konzepte beratung, Luzern

### Programm-Manager

Dr. Pascal Walther, Schweizerischer Nationalfonds (SNF), Bern

### Layout und Grafik

Kurt Brunner, Palézieux

### Korrektorat

Andreas Vonmoos, Terminus Textkorrektur, Luzern

### Übersetzung

Irene Bisang, Zürich

### Titelbild

Nils Nova, Luzern

### Druck

Engelberger Druck, Stans

Für die Forschungsergebnisse sind die jeweiligen Forschungsteams verantwortlich, für die thematischen Synthesen und die Empfehlungen die Autorinnen und Autoren sowie die Leitungsgruppe. Ihre Auffassung muss nicht notwendigerweise mit derjenigen der Mitglieder der Begleitgruppen, des Schweizerischen Nationalfonds oder der Forschungsteams übereinstimmen.



**Empfohlene Zitierweise**

Charles R., Wendling M., Burgos S. (2018): Boden und Nahrungsmittelproduktion. Thematische Synthese TS1 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.

ISBN: 978-3-907087-28-2

[www.snf.ch](http://www.snf.ch)

[www.nfp68.ch](http://www.nfp68.ch)

Bezug: Schweizerischer Nationalfonds, Bern

© 2018, Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung SNF, Bern

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des SNF unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme.

## **Nationales Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)**

Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) legt Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung des Bodens in der Schweiz vor. Dabei werden sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Leistungen des Bodens berücksichtigt. Das Konzept der Ökosystemleistungen erlaubt es, die Bodenfunktionen und ihren Beitrag an das menschliche Wohlbefinden in Wert zu setzen. Die Forschung dauerte von 2013 bis 2017. Die Ergebnisse werden in fünf thematischen Synthesen sowie in einer Gesamtsynthese zusammengeführt.

### **Thematische Synthese TS1**

Boden und Nahrungsmittelproduktion

Die Bodenqualität wird derzeit insbesondere durch Bodenverdichtung, den Verlust an organischer Bodensubstanz und Biodiversität sowie Erosion bedroht. Die thematische Synthese TS1 «Boden und Nahrungsmittelproduktion» diskutiert die Ergebnisse des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) zu diesen Herausforderungen und führt sie zur Vision einer standortgerechten, regional angepassten Landwirtschaft zusammen, die sich vermehrt auf die Bodenfunktionen abstützt und mit weniger Maschineneinsatz und weniger Hilfsstoffen arbeitet.

### **Thematische Synthese TS2**

Boden und Umwelt

### **Thematische Synthese TS3**

Eine Bodenagenda für die Raumplanung

### **Thematische Synthese TS4**

Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)

### **Thematische Synthese TS5**

Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik

