

Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)

Bodeninformationen, Methoden und Instrumente für eine nachhaltige Nutzung
der Ressource Boden

Armin Keller Julia Franzen Paul Knüsel Andreas Papritz Martin Zürrer

Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)

Bodeninformationen, Methoden und Instrumente für eine nachhaltige
Nutzung der Ressource Boden

Thematische Synthese TS4 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68)

Vorwort

Wer gewissenhaft, effizient und nachhaltig handeln will, braucht Informationen über den betreffenden Sachverhalt und darüber, wie sich Massnahmen auswirken. Dies ist beim Boden nicht anders als in den Umweltbereichen Wasser, Luft oder Klima oder in der Wirtschaft. Bei der Erhebung von Bodeninformationen stellen sich allerdings spezielle Herausforderungen: Für die Zustandsbeschreibung des Bodens bedarf es einer erheblichen Anzahl physikalischer, chemischer und biologischer Parameter, die sich in erster Linie aus Bodenproben gewinnen lassen. Aufgrund der Heterogenität des Bodens konnten bisher nur schwer Aussagen über ein grösseres Gebiet gemacht werden. Genau dies erlauben aber moderne digitale Kartierungsmethoden, die Forschende des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) auf der Basis von Entwicklungen, wie sie im Ausland bereits zur Anwendung kommen, für die Schweiz aufbereitet haben. Sie bedürfen jedoch der Eichung durch konventionelle Bodenerhebungen und sind mit methodenbedingten Ungenauigkeiten behaftet. Allerdings wird die Präzision der konventionellen Methoden überschätzt, führt doch der Faktor Mensch bei verschiedenen Aspekten der Erhebungen ebenfalls zu Abweichungen. Es ist das Verdienst der Autoren der vorliegenden thematischen Synthese TS4 «Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)» des NFP 68, die beiden methodischen Ansätze zu einem Konzept zusammengeführt zu haben, das es erlaubt, die grosse Lücke bei den Bodeninformationen in der Schweiz in einem absehbaren Zeithorizont und in den Bedürfnissen angepasster Genauigkeit zu schliessen. Wie die Autoren in Fallstudien zeigen, ist die Datenerhebung dabei keineswegs «l'art pour l'art», sondern erzeugt einen erheblichen Mehrwert in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft, ob bei der Trinkwassergewinnung, in der Landwirtschaft oder beim Schutz vor Naturgefahren. Dieser Mehrwert fällt dabei um ein Mehrfaches höher aus als die mit der Erhebung der Bodeninformationen verbundenen Kosten. Die Bodeninformationen stellen somit die essenzielle Grundlage für eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden dar und sind mithin ein Gewinn für alle.

Prof. Dr. Emmanuel Frossard

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort → 5

Inhaltsverzeichnis → 6

Zusammenfassung → 8

Kernbotschaften → 10

1 Bodeninformationen und Instrumente im Wertschöpfungszyklus → 15

- 1.1 Verborgene Werte → 15
- 1.2 Der Boden, seine Funktionen und Ökosystemleistungen → 16
- 1.3 Bodeninformationen zur Nutzung und zum Schutz der Ressource Boden → 18
- 1.4 Defizite bei der Ernährungssicherheit → 18
- 1.5 Unzureichende Fruchtfolgeflächen → 18
- 1.6 Der Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen → 19
- 1.7 Vollzugsnotstand im Bodenschutz → 21

2 Stand und Lücken bei Bodeninformationen und bei der Bewertung von Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen → 22

- 2.1 Nachfrage nach Bodeninformationen und Instrumenten → 22
- 2.2 Arbeitsschritte einer Bodenkartierung → 34
- 2.3 Stand der Bodenkartierung in der Schweiz → 37
- 2.4 Datenmanagement und Bodeninformationssystem → 42
- 2.5 Stand in der EU → 46
- 2.6 Bewertung von Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen → 51
- 2.7 Bodenkartierung als Grundlage für die Ausscheidung von Fruchtfolgeflächen → 59
- 2.8 Instrumente für den Bodenschutz → 61
- 2.9 Fazit → 67

3 Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH) → 68

- 3.1 Ziele und Umfang → 68
- 3.2 Minimalset an zu erhebenden Bodeninformationen → 69

- 3.3 Bodenkartierung der Zukunft → 70
- 3.4 Vorranggebiete und Kartierungsmassstab → 77
- 3.5 Etappierung → 79
- 3.6 Informationsplattform → 80
- 3.7 Fazit → 81

4 Bodeninformations-Plattform (BIP-CH) – eine Investition mit Rendite → 82

- 4.1 Annäherung an eine Kosten-Nutzen-Rechnung → 82
- 4.2 Beispiele für den Mehrwert von Bodeninformationen → 83
- 4.3 Zwei Beispiele für Reparaturkosten → 88
- 4.4 Fazit → 89

5 Handlungsempfehlungen → 90

Anhang → 93

- A1 Auswahl parlamentarischer Vorstösse → 93
 - Bodeninformationssysteme → 95
 - Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) → 98
 - Die Forschungsprojekte des NFP 68 → 100
- A2 Abbildungsverzeichnis → 104
 - Tabellenverzeichnis → 105
 - Glossar → 106
 - Abkürzungsverzeichnis → 109
 - Literatur → 110
 - Dank → 122

Impressum → 123

Zusammenfassung

Angesichts des Mangels an Bodeninformationen und der Bedürfnisse der verschiedenen Politik- und Umweltbereiche besteht Bedarf für ein flächendeckendes, integrales Bodeninformationssystem (BIS) in Verbindung mit Serviceleistungen, Beratung und Wissenstransfer. Die thematische Synthese 4 (TS4) des NFP 68 «Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)» skizziert eine Vision, mit welchen Inhalten dieses BIS ausgestattet werden soll und welche Bedingungen für dessen Aufbau erfüllt sein müssen. Sie beleuchtet technische Weiterentwicklungen der Bodenkartierung und weist den Weg für die nächsten Schritte zur BIP-CH. Der Aufbau einer BIP-CH ist dabei als Generationenwerk für eine nachhaltige Nutzung des Bodens und für die Erfassung der Multifunktionalität der Ressource Boden zu verstehen. Die TS4 zeigt Sinn und Zweck der BIP-CH auf und diskutiert die bestimmenden Kostenfaktoren für deren Aufbau und Betrieb. Dem Investitionsaufwand für eine landesweite Bodenkartierung wird der Mehrwert für Wissenschaft, Gesetzgeber, Landwirtschaft und Praxis gegenübergestellt.

Der Boden erfüllt zahlreiche ökologische und ökonomische Funktionen und ist für Mensch und Umwelt von grundlegender Bedeutung. Böden sind und funktionieren vielschichtig. Ihre ökologische und gesellschaftliche Bedeutung ist aber oft nicht unmittelbar fassbar. Insbesondere die Rolle des Bodens als zentralen Mediums für die Nahrungsmittelproduktion, als biologisch aktiver Schnittstelle zwischen Geosphäre, Atmosphäre, Biosphäre sowie Hydrosphäre und Erbringers zahlreicher Ökosystemleistungen (ösl) ist direkt kaum wahrnehmbar.

Bodeninformationen beschreiben den Aufbau und die Eigenschaften der Böden in einem vertikalen Profil, ihre Qualität und Nutzungseignung und somit die Vielfältigkeit der Böden. Fundierte und flächendeckende Informationen zur Verteilung und zu den Eigenschaften von Böden sind für Bund, Kantone und Gemeinden unerlässlich, um die Nutzungsansprüche zur Sicherung der ösl des Bodens effizient steuern zu können. Spezifische Anwendungskarten sind für eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden unter anderem für die Akteurinnen und Akteure in der Wald- und Landwirtschaft, der Raumentwicklung sowie im Rahmen des kantonalen Vollzugs des Bodenschutzes essenziell. In der Schweiz fehlen jedoch flächendeckende Bodeninformationen. Nur wenige Kantone haben diese Lücke bereits geschlossen. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum der Boden in vielen Politikbereichen und Entscheidungen zumeist kaum oder gar nicht berücksichtigt wird.

Bodeninformationen – Teil einer nachhaltigen Bodenpolitik

Die vorliegende TS4 stellt den Kreislauf von Bodeninformationen dar: Der Bedarf der verschiedensten Akteurinnen und Akteure und Politikbereiche danach wird aufgezeigt. Um den Kreislauf in Gang zu halten, müssen Normen und Erhebungsmethoden der Bodenkartierung definiert und weiterentwickelt werden. Zudem müssen das Datenmanagement in einem Bodeninformationssystem sowie Instrumente zur Auswertung und Beurteilung nutzerorientierter Fragestellungen vorhanden sein. Die Hauptidee der TS4 lautet: Es braucht eine Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH), die die umfangreichen Bedürfnisse einer nachhaltigen Nutzung und zum Schutz des Bodens in den einzelnen Politik- und Vollzugsbereichen künftig unterstützen kann. Dazu wurden die Ergebnisse mehrerer NFP 68-Projekte ausgewertet, aber auch weitere nationale und internationale Aktivitäten und Studien berücksichtigt.

Die TS4 zeigt auf, wie die derzeit grossen Wissenslücken über Art, Umfang und Qualität der Böden in der Schweiz langfristig geschlossen werden können. Sie skizziert mögliche Wege und Handlungsfelder, wie eine BIP-CH aufgebaut werden kann, die die notwendigen Planungsgrundlagen für eine langfristige und nachhaltige Nutzung der Ressource Boden sicherstellt. Im Zentrum der TS4 stehen der Nutzen von Bodeninformationen, methodische Vorgehensweisen für eine landesweite Bodenkartierung sowie Instrumente, mit denen sich Gefährdungen des Bodens erkennen und vermeiden lassen und die dazu dienen, die Bodennutzung nachhaltiger zu steuern, mit dem Ziel die essenziellen Bodenfunktionen zu erhalten. Der Mehrwert einer BIP-CH wird anhand von zehn ausgewählten Fallbeispielen aufgezeigt.

Struktur der thematischen Synthese

Die TS4 vermittelt einen Überblick, mit welchen wissenschaftlichen Instrumentarien und Methoden fehlende Bodeninformationen möglichst effizient, zielgerichtet und flächendeckend erhoben und für die vielen Nutzungsinteressen verfügbar gemacht werden können. Die Kernbotschaften fassen die wichtigsten Erkenntnisse der TS4 in Handlungsempfehlungen zusammen. Kapitel 1 zeigt die Bedeutung von Bodeninformationen für die Gesellschaft auf und ordnet sie in den Zyklus des politischen Handelns ein. Kapitel 2 erläutert die Elemente des Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen und stellt sie in Beziehung zu den relevanten Nutzerinteressen. Der Stand der Bodenkartierung in der Schweiz wird ebenso dargestellt wie das verfügbare Instrumentarium zur Beurteilung von Gefährdungen des Bodens und von Bodenfunktionen. Kapitel 3 skizziert das Zielsystem für die BIP-CH und erläutert – basierend auf der Analyse der Lücken und Engpässe im aktuellen Wertschöpfungszyklus – einen Vorschlag zu seinem Aufbau. Im Sinne einer Annäherung zeigt Kapitel 4 die Kosten und den Nutzen einer landesweiten, flächendeckenden Bodenkartierung als Grundlage der BIP-CH auf. Kapitel 5 fasst die Handlungsfelder und die Massnahmen in den Bereichen Wissenschaft, Politik und Verwaltung zusammen. Die eingangs formulierten Kernbotschaften leiten sich daraus ab.

Kernbotschaften

Die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden ist auf flächendeckende und fundierte Bodeninformationen angewiesen, die in der Schweiz aktuell zu grossen Teilen nicht erhoben sind. Der Boden als zentrale Schnittstelle der Ökosysteme tangiert viele Politikbereiche wie Ernährungssicherheit, Raumplanung, Klima-, Hochwasser- und Bodenschutz, Land- und Forstwirtschaft sowie Biodiversität. Es besteht erwiesenermassen hoher Bedarf an Bodeninformationen, mit denen die Nutzungsansprüche gesteuert und nachhaltig sichergestellt werden können. Bodeninformationen bilden deshalb die Grundlage für eine effiziente und ressourcengerechte nationale Bodenpolitik. Die vorliegende thematische Synthese 4 (TS4) schlägt eine Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH) vor als Drehscheibe für Bodeninformationen und daraus abgeleitete Produkte wie Anwendungskarten. Sie soll die umfangreichen und vielfältigen Informationsbedürfnisse der unterschiedlichen Bedarfsgruppen abdecken und kann dadurch einen Mehrwert generieren.

Um die Wissenslücken über Art, Umfang und Qualität der Böden in der Schweiz langfristig zu schliessen, formuliert die TS4 vier Kernbotschaften für den Aufbau und Unterhalt einer BIP-CH. Diese basieren auf den Ergebnissen von NFP 68-Forschungsprojekten sowie nationalen und internationalen Aktivitäten und Studien. Die TS4 ist eng verknüpft mit der TS3, «Bodenagenda für die Raumplanung», und der TS5, «Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik», des NFP 68.

Kernbotschaft I

Eine landesweite Bodenkartierung ist eine lohnende Investition. Es sind die Präferenzen für prioritär zu kartierende Gebiete und Etappen zu bestimmen.

Für eine nachhaltige Nutzung der Böden in der Schweiz ist es notwendig, mittels einer flächendeckenden Bodenkartierung die Bodeneigenschaften und die Qualität der Böden in ihrer Tiefe zu erheben. Die BIP-CH will zwar alle Nutzerbedürfnisse abdecken; dennoch soll ein politischer Entscheidungsprozess vorab bestimmen, welche Gebiete und Nutzungen prioritär zu kartieren sind und in welcher Etappierung vorzugehen ist. Dabei soll auf jene Aspekte Rücksicht genommen werden, die für die nachhaltige Nutzung und den Schutz der Böden am wichtigsten sind; dies betrifft beispielsweise siedlungsnah, für die Landwirtschaft hochwertige Fruchtfolgefleichen (FFF). Die TS4 liefert vertiefte Hinweise zu wesentlichen Auswahlkriterien.

Gegenwärtig ist die Methodik der Bodenkartierung primär auf die landwirtschaftliche Produktion und die landwirtschaftlichen Nutzflächen (LN) ausgerichtet. Die Bestandsplanung der Waldwirtschaft kann sich zudem auf eine Kartierungsanleitung für Waldböden abstützen. Damit auch die Multifunktionalität der Böden erfasst wird, zu der unter anderem Regulierungs- und Lebensraumfunktionen (Biodiversität) gehören, ist es angezeigt, die Ansprüche und den Bedarf an Bodeninformationen neu zu definieren. Der dazu notwendige Abklärungsprozess berücksichtigt neu alle direkten und indirekten Nutzerbedürfnisse. Der politische Prozess erlaubt abzuwägen, welche funktionalen und räumlichen Prioritäten bei der Erhebung der Bodeninformationen gesetzt werden. Die TS4 zeigt dazu den konkreten Bedarf an Bodeninformationen auf.

Zentrales Element für den Aufbau einer BIP-CH ist eine landesweite Bodenkartierung. Die Kosten dafür belaufen sich auf schätzungsweise 15 bis 25 Millionen Franken pro Jahr. Je nach den Präferenzen hinsichtlich der zu kartierenden Gebiete und Nutzungen ist eine solche Investition über zwei bis drei Jahrzehnte zu tätigen. Angesichts des Nutzens für verschiedene Politikbereiche wie Nahrungsmittelproduktion, Raumplanung, Land- und Waldwirtschaft sowie Klima- und Umweltschutz erweisen sich jährliche Kosten, die dem Neubau von 60 bis 100 Metern Nationalstrasse entsprechen, als lohnenswerte Investition. Die TS4 zeigt den Nutzen flächendeckender Bodeninformationen anhand vereinfachter ökonomischer Bewertungen auf: Jeder Franken, der für die Erhebung von Bodeninformationen investiert wird, generiert einen Mehrwert im Bereich von 2 bis 13 Franken (Durchschnitt: 6 Franken). Diese Schätzungen beruhen auf sehr konservativen Annahmen; der effektive Mehrwert kann weitaus höher liegen. Die BIP-CH ist ein Vorsorgeinstrument, das nicht umsonst zu haben ist, aber günstiger ausfällt als eine spätere Schadensbewältigung.

Die Kostenschätzung für eine landesweite Bodenkartierung ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Bodenkartierungen können künftig effizienter durchgeführt werden. Entscheidend sind dafür eine Reihe von Rahmenbedingungen, beispielsweise der Aufbau einer gemeinsam genutzten Infrastruktur und die Grösse der zu kartierenden Gebiete (Skalierungseffekte). Eine Kartierung grösserer Gebiete als bisher, technische Weiterentwicklungen von Erhebungs- und Analysemethoden sowie der Einsatz geophysikalischer Messmethoden und von Nah- und Fernerkundungsmethoden ermöglichen Kosteneinsparungen. Einmal erhobene Bodeninformationen zeichnen sich durch einen langen Nutzungshorizont aus; im Gegensatz zu anderen Bereichen der Umweltbeobachtung (z.B. Luft und Wasser) bleiben einmal erhobene Bodeninformationen bis auf wenige Ausnahmen über Jahrzehnte aussagekräftig.

Kernbotschaft II

In Fallstudien neue Technologien erproben – parallel zu laufenden Bodenkartierungen

Die BIP-CH verlangt nach einem Standard zur Bodenbeschreibung, der auf nationaler Ebene nach neuestem Wissensstand einzuführen ist. Dieser Standard muss den Bedürfnissen der Nutzenden gerecht werden und international vergleichbar sein. Die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) hat dazu einen Vorschlag erarbeitet. Des Weiteren ist die Kartieranleitung für Landwirtschafts- und Waldböden zu aktualisieren. Die aktuelle Version ist mehr als zwei Jahrzehnte alt und stammt aus der Zeit vor der Entwicklung digitaler Techniken. Methoden für die Nah- und Fernerkundung, für geophysikalische Messungen oder die Prozessierung von Umwelt- und Geodaten können die Bodenkartierung gezielt ergänzen. Es ist ausserdem zu prüfen, ob Fahrzeuge, die über integrierte Bohreinrichtungen verfügen, sowie Proxy-Analysemethoden für Bodeneigenschaften die Feld- und Laborarbeiten erleichtern. Mittels Fallstudien ist diesbezüglich die Praxistauglichkeit neuester Methoden zu erproben. Im Sinne der Effizienzsteigerung gilt es zudem eine landesweite Infrastruktur für die Logistik von Bodenproben, für die Probenaufbereitung und eine zentrale Archivierung von Bodenproben aufzubauen. Neue spektroskopische Methoden zur Analyse von Bodeneigenschaften im Feld und Labor, wie sie im Ausland bereits angewendet werden, erlauben kostengünstige Messungen von Bodeneigenschaften.

Kernbotschaft III

Harmonisierte Bodeninformationen und daraus abgeleitete Produkte zur Verfügung stellen: Informationsplattform und Datendrehscheibe aufbauen.

Die BIP-CH stellt eine Informations- und Serviceplattform für Bodeninformationen dar. Zentrales Element für das Datenmanagement und die Zusammenführung der Bodendaten bildet ein Bodeninformationssystem. Um ein solches zu schaffen, kann auf Bestehendem aufgebaut werden. Vor allem das Bodeninformationssystem NABODAT hat sich in den letzten Jahren als leistungsfähiges und praxistaugliches Instrument für die Zusammenführung und Nutzung von Bodendaten erwiesen; allerdings sind sie bisher nicht allen Akteurinnen und Akteuren zugänglich. Der dauerhafte Betrieb und die Weiterentwicklung dieses Systems sind sicherzustellen. Die TS4 empfiehlt, für die Nutzenden von Bodeninformationen eine Plattform zu schaffen, die es ihnen erlaubt, die verfügbaren Bodeninformationen und die essenziellen Meta-Informationen abzurufen, und die ihnen für fachliche Fragen zur Verfügung steht. Künftig sollen Bodendaten zwischen Akteurinnen und Akteuren nach einem einheitlichen Standard schnell und effizient ausgetauscht und zur Verfügung gestellt werden können. Der Abbau von Zugangsbarrieren und die freie Verfügbarkeit sind wichtige Voraussetzungen für eine breite Nutzung der Bodeninformationen durch Bund, Kantone und Gemeinden sowie durch die Öffentlichkeit und die Forschung. Die BIP-CH soll dies gewährleisten.

Die BIP-CH ist aber nicht nur als Informations- und Wissensplattform zu verstehen, sondern auch als zentrale Servicestelle für alle an einer nachhaltigen Bodenpolitik interessierten Akteurinnen und Akteure. Fachkoordination, Wissenstransfer und Beratung sind demzufolge wichtige Funktionen, die die zentral zu koordinierende BIP-CH anbieten will. Eine zentral eingerichtete Servicestelle ist in anderen Umweltbereichen längst üblich, beispielsweise bei der Landesgeologie. Analog dazu wird der Aufbau einer «Fachstelle für Landespedologie» empfohlen, die die BIP-CH aufbaut und betreut. Auch diese soll subsidiär wirken: Das Bundesparlament hat 2014 einen Vorstoss zum Aufbau einer «zentralen und unabhängigen Verwaltungs- und Koordinationsstelle für Bodeninformationen» (nationales Kompetenzzentrum Boden; Motion 12.4230 Müller-Altermatt) gutgeheissen. In Vorbereitung ist zudem die Nationale Bodenstrategie des Bundes, die zum Ziel hat, dass die qualitativen und quantitativen Aspekte des Bodens in Entscheidungen über Bodennutzung, Versiegelung oder anderweitigen Bodenverbrauch einfließen.

Kernbotschaft IV

Den Wissenstransfer stärken: Instrumente für die nachhaltige Nutzung und den vorsorglichen Schutz entwickeln.

Trotz aller Bemühungen für eine nachhaltige Nutzung gefährden Erosion, Verdichtung, Humusverlust, Versauerung und Schadstoffe das Leistungsvermögen der Ressource Boden. In mehreren Projekten des NFP 68 wurden Instrumente entwickelt, die zu ihrem Schutz beitragen. Für eine regionale oder gar landesweite Anwendung dieser Instrumente fehlen aber in der Regel die erforderlichen Bodendaten. Beispielsweise benötigt das Instrument TERRANIMO Angaben zum Ton- und Wassergehalt in Böden, um das Bodenverdichtungsrisiko beim Einsatz landwirtschaftlicher Fahrzeuge zu berechnen. Künftig müssen die Instrumente zum Schutz des Bodens einheitlich und grossflächig angewendet werden. Anwendungskarten etwa, die Informationen zur Verdichtungsempfindlich-

keit, zum Erosionsrisiko oder zu Nährstoffverlusten enthalten, können die nachhaltige Nutzung der Böden unterstützen. Zudem ist ein Set an Bodenindikatoren festzulegen, mit Hilfe dessen Politik und Verwaltung günstige Rahmenbedingungen für die Steuerung einer nachhaltigen Nutzung der Böden schaffen können.

Das Instrument der Bodenfunktionsbewertung, mit dem das Leistungsvermögen der Böden ausgewiesen wird, dient primär als Vorsorgeinstrument und eignet sich vor allem als Verbindung zur Raumplanung. Bodenfunktionskarten erlauben, die Bodenqualität in der dritten Dimension für standortspezifische Interessen- und Nutzungsabwägungen angemessen zu berücksichtigen und die Multifunktionalität der Böden aufzuzeigen. Bewertete Bodenfunktionskarten bieten sich an, um den Wert des Bodens und seinen Beitrag zu Ökosystemleistungen (öSL) nachvollziehbar zu vermitteln. Im NFP 68 wurde ein erster Methodenkatalog für zehn Bodenfunktionen entwickelt; mittelfristig sollte ein nationaler Katalog mit weiteren relevanten und praxiserprobten Bewertungsmethoden erstellt werden.

Eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Bodenpolitik ist auf ein hohes Engagement der Politik und ein wachsendes öffentliches Bewusstsein angewiesen. Die natürliche Ressource Boden ist ein begrenzt verfügbares Gut und faktisch nicht erneuerbar. Daher soll die BIP-CH auch für die Kommunikation zwischen Fachleuten und Laien über Themen wie Bodendaten, Bodenqualität, Bodenfunktionen, Vorsorgeprinzip und Bodenschutz dienen.

Bodeninformationen und Instrumente im Wertschöpfungszyklus

1.1 Verborgene Werte

Der Boden leistet im Verborgenen unerlässliche Dienste von hohem Nutzen: So beläuft sich der Gegenwert für die Filtration von Trinkwasser in einer Hektare Boden auf mehr als 100 Franken pro Jahr (Kapitel 4). Für die Speicherung von Treibhausgasen in derselben Bodenfläche wären gemäss europäischem CO₂-Emissionshandel über 1000 Franken zu bezahlen. Und der Ertrag aus der Produktion von Karotten oder Biofleisch kann bei über 10 000 Franken pro Jahr und Hektare liegen. Auch wenn es sich dabei um Schätzwerte handelt, lässt sich damit der ökonomische Nutzen des Bodens für die Nahrungsmittelproduktion, als Klimaspeicher oder für die Wasserversorgung grob quantifizieren. Jedes Jahr können Kosten für die Trinkwasseraufbereitung von rund 7 bis 10 Millionen Franken eingespart werden. Dafür sind aber Planungsgrundlagen zur Filterfunktion des Bodens vorauszusetzen, die gezielt dazu beitragen, den übermässigen Eintrag von Nähr- und Schadstoffen an ungeeigneten Standorten zu reduzieren.

Anhand dieser Beträge lässt sich auch ohne wissenschaftlich geschulten Blick erkennen, wie die Eigenschaften der Böden qualitativ zu beurteilen sind: Den Wert intakten Bodens legt die Gesellschaft primär nach Massgabe der Nahrungsmittelproduktion und der Ernährungssicherheit fest. Böden speichern, filtern und transformieren aber auch unterschiedlichste Substanzen wie Wasser und Nährstoffe. Ebenfalls unersetzlich ist der Boden als Genpool für die biologische Vielfalt: In einer Handvoll Erde leben mehr Organismen als Menschen auf dem Planeten; zwei Drittel aller Arten leben verborgen unter der Erdoberfläche. Gleichzeitig hordet der Boden den zweitgrössten globalen Kohlendioxid-(CO₂-)Vorrat, übertroffen lediglich von den Ozeanen. Der Boden kann die unterschiedlichen Produktions-, Speicher- und Filterfunktionen aber nur erfüllen, wenn das Bodenleben intakt, die Humusschicht gesund und die Nutzung nachhaltig ist. Das Leistungsvermögen des Bodens bestimmt, wie gut die jeweilige Anforderung sowie der ökologische oder gesellschaftliche Zweck erfüllt

Abbildung 1

Bodenprofile von Ackerbaustandorten, Grasland- und Waldböden: Böden sind sehr vielfältig im Aufbau und in ihren Eigenschaften sehr heterogen; daher eignen sie sich für unterschiedliche Nutzungen.

Fotos: R. Brändli, U. Zihlmann, Agroscope; A. Chervet, LANAT Bern; L. Walthert, S. Zimmermann, WSL



Urdinkel auf saurer Braunerde



Sonnenblumen auf Fluvisol



Wiese auf staunasser Kalkbraunerde



Ahorn-Eschenwald auf grundnassem Gley

werden können. Diese ökologischen Bodenfunktionen sind als bisher selbstverständlicher Service einer intakten Umwelt zunehmend gefährdet.

Wie die Bewertungsbeispiele der TS4 (Kap. 4) aufzeigen, erbringt der Boden hohen gesellschaftlichen Nutzen und erfüllt vielfältige ökologische und funktionale Ansprüche. Die Krux liegt darin, dass sein Nutzen erst dann wirklich erkannt wird, wenn Bodeneigenschaften beeinträchtigt sind und die natürliche Funktionsweise näherungsweise mit technischen Mitteln zu kompensieren ist. Doch Boden ist über Jahrtausende entstanden und lässt sich weder technisch (wieder)herstellen noch aus dem Ausland importieren. Den Boden nachhaltig zu nutzen, bedeutet daher vor allem Vorsorge und Prävention. Entstandene Schäden und spätere Schutzmassnahmen verursachen in der Regel weitaus höhere Kosten als vorsorgliche Massnahmen.

1.2 Der Boden, seine Funktionen und Ökosystemleistungen

Boden ist ein Gemisch aus festem organischem und anorganischem Material wie Ton, Schluff, Sand, Steinen und Humus, durch das Wasser und gasförmige Substanzen zirkulieren können. Vor allem das Porensystem des Bodens erlaubt einen ständigen Austausch mit Wasser, Gasen, Stoffen und Bodenorganismen innerhalb des Bodens und mit der Atmosphäre. Im Porensystem wird der Stoffhaushalt des Bodens im Wesentlichen reguliert und das Leben im Boden ermöglicht.

Böden entwickeln sich über Jahrtausende, wobei die Umweltbedingungen und die Nutzung durch den Menschen zu einer grossen räumlichen Variation bei Aufbau, Wasserhaushalt, Gründigkeit, Boden-

eigenschaften und anderen Bodenkennwerten geführt haben. Das Bodengemisch ist daher von einer immensen Vielfalt und enthält eine grosse Anzahl an Lebewesen¹. Anders als die stetig durchmischten und dadurch relativ homogenen Umweltmedien wie Wasser und Luft können sich die für den Boden typischen Profile (Bodenaufbau und Bodeneigenschaften über die Tiefe) selbst über kurze Distanzen voneinander unterscheiden. Die Qualität der Böden und deren Vermögen, die verschiedenen Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen (ösl) zu erfüllen, können sich folglich kleinräumig ändern. Für eine standortgerechte und nachhaltige Nutzung sind deshalb fundierte räumliche Informationen über die Bodenbeschaffenheit notwendig.

Mit der BIP-CH wird im Prinzip eine Optimierung der gesetzlichen Umweltvorsorge angestrebt. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich das Vollzugssystem vor allem auf die Reduktion der Gefährdungen des Bodens konzentriert, etwa durch die Verminderung und Vermeidung von Bodenerosion, Bodenverdichtung und Schadstoffeinträgen. Künftig soll jedoch zusätzlich die Multifunktionalität der Ressource Boden im Fokus stehen. Dazu gilt es die unterschiedlichen räumlichen Nutzungen mit der Erhaltung der Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen (ösl) des Bodens in Einklang zu bringen.

Sowohl die Bodenfunktionen als auch die ösl sind neuartige Konzepte, die dazu dienen, die Fachdisziplinen und Politikbereiche in ihrem Verständnis für den Boden besser zu vernetzen, seinen gesellschaftlichen Mehrwert zu veranschaulichen² und dadurch den Bodenschutz integral zu verbessern. Die ösl leiten sich unter anderem aus der Bewertung und Quantifizierung der Bodenfunktionen ab³ und stellen

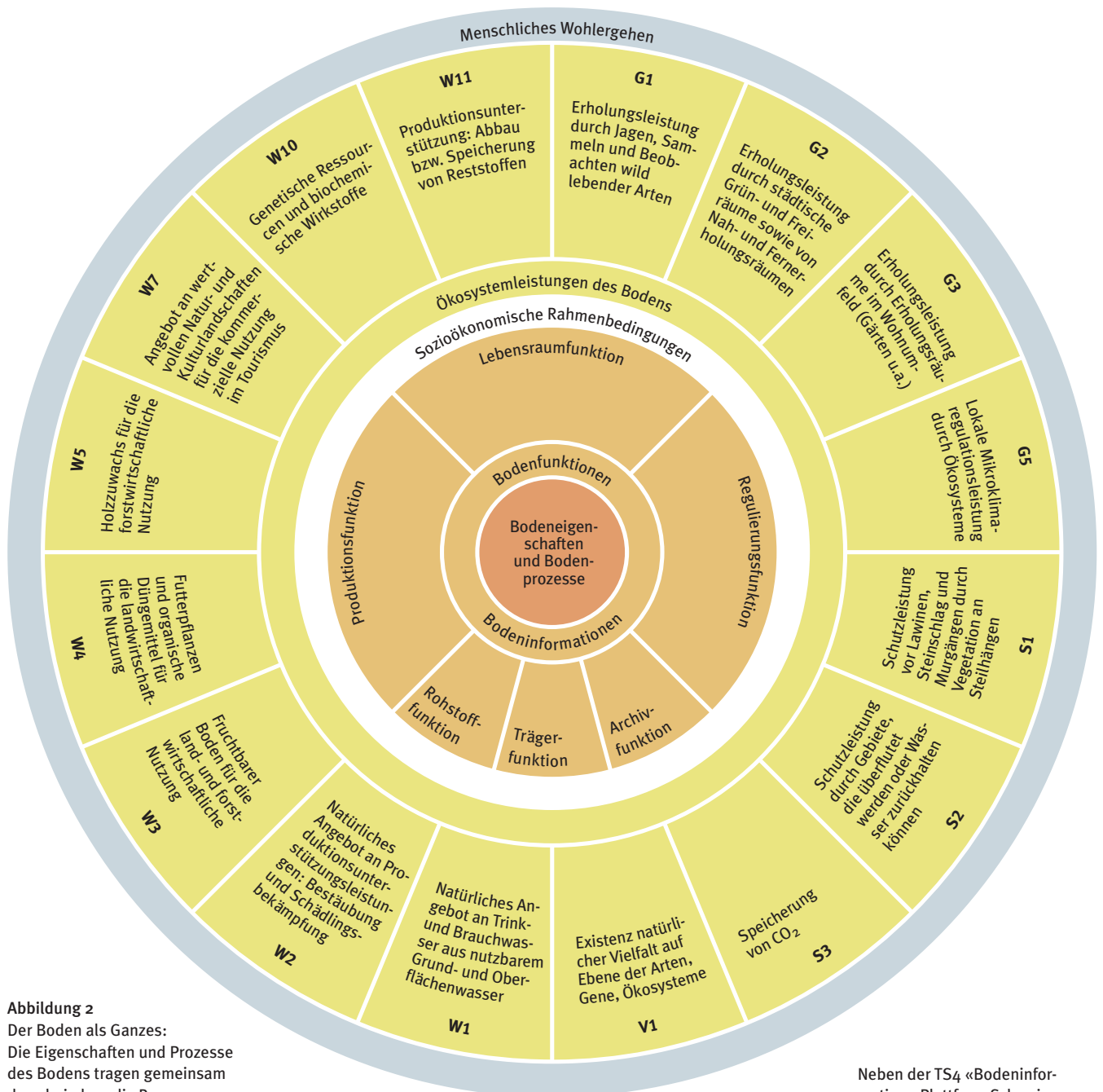


Abbildung 2
 Der Boden als Ganzes:
 Die Eigenschaften und Prozesse des Bodens tragen gemeinsam dazu bei, dass die Ressource Boden die relevanten Funktionen und Leistungen für die Gesellschaft und das Ökosystem erbringen kann.

Neben der TS4 «Bodeninformations-Plattform Schweiz» bedient sich auch die TS3 «Bodenagenda für die Raumplanung» dieser Einteilung von Bodenfunktionen und ösL.

daher diejenigen Leistungen des Bodens dar, die für die Gesellschaft zentral sind. Der Entwurf der Bodenstrategie des Bundes⁴ nennt sechs Bodenfunktionen (Abb. 2, S. 17), die es zu schützen gilt und direkt oder indirekt zu insgesamt 16 öSL beitragen⁵.

1.3 Bodeninformationen zur Nutzung und zum Schutz der Ressource Boden

Standortspezifische Aussagen über die Qualität und die öSL der Böden sind nur möglich, wenn Bodeninformationen in einem angemessenen räumlichen Raster verfügbar sind. Dazu gehören im Feld erhobene Eigenschaften und Kennwerte wie Humus- und Tongehalt, Bodenaufbau, Gründigkeit, Skelettgehalt, Aggregatstruktur, Porenvolumen und Wasserhaushalt. Diese Bodeninformationen ermöglichen eine Bewertung der Multifunktionalität der Böden, die dadurch in verschiedenen Politikbereichen einfacher berücksichtigt werden kann. So lässt sich etwa für die Raumplanung erkennen, auf welchen Böden auf eine Überbauung zu verzichten ist und wie die Entwicklung von Siedlung und Infrastruktur ressourcenschonend zu koordinieren ist. Tatsächlich wird die Bodenqualität im raumplanerischen Vollzug erst teilweise berücksichtigt. Aber auch die Landwirtschaft ist auf Zusatzwissen angewiesen: Anhand von Bodeninformationen lassen sich Art und Intensität der Bodenbewirtschaftung beispielsweise in Bezug auf den Einsatz von Maschinen, Pestiziden oder Hof- und Mineraldüngern standortgerecht auf eine nachhaltige Nutzung ausrichten.

1.4 Defizite bei der Ernährungssicherheit

90 Prozent der Nahrungsmittel stammen direkt oder indirekt aus dem Boden. Das Leistungsvermögen der Böden für die Le-

bensmittelproduktion misst sich an der Bodenfruchtbarkeit, die sich anhand von Bodeninformationen erfassen lässt und durch eine nachhaltige und umweltverträgliche Nutzung sicherzustellen ist. Die Nahrungsmittelproduktion und die Ressource Boden stehen in der Schweiz jedoch quantitativ unter Druck: Der Versorgungsgrad in der Schweiz ist niedriger als im europäischen und weltweiten Durchschnitt (Abb. 3, S. 19). Pro Kopf stehen lediglich rund 350 Quadratmeter Ackerland beziehungsweise insgesamt rund 1300 Quadratmeter landwirtschaftliches Kulturland zur Verfügung⁶, deutlich weniger als in anderen europäischen Ländern. Als Folge des Bevölkerungswachstums und der Siedlungsentwicklung nimmt in der Schweiz die pro Person verfügbare Fläche an Kulturland laufend ab⁷, und auch global steht pro Person immer weniger Landwirtschaftsland zur Verfügung^{8,9}.

Räumliche Nutzungskonflikte treten aber nicht nur regional, sondern auch global auf. International nimmt der Kampf um Landrechte derzeit zu. Im Jahr 2016 wurden rund 500 Fälle aus 78 Ländern registriert, in denen private Investoren oder staatliche Institutionen ausländisches Kulturland erworben oder gepachtet haben (NFP 68-Projekte LAND GRABBING und LANDNUTZUNGSENTSCHEIDE). Die dabei gehandelte Fläche umfasst 30 Millionen Hektaren Landwirtschaftsland¹⁰.

1.5 Unzureichende Fruchtfolgeflächen

Für eine existenzsichernde Ernährung sind in der Schweiz rund 400 000 bis 555 000 Hektaren fruchtbare Ackerböden erforderlich¹¹. Diese Fläche entspricht in etwa dem Mindestumfang von rund 440 000 Hektaren, der im «Sachplan Fruchtfolgeflächen des Bundes» (SP FFF) festgesetzt und über auf die Kantone verteilte Kon-

tingente zu schützen ist. Die geschützte Fläche entspricht damit einer Ackerfläche von rund 700 Quadratmetern pro Person. Verschiedene Studien zeigen allerdings, dass in Westeuropa zur Ernährung einer Person eine landwirtschaftliche Fläche von 1400 bis 2100 Quadratmetern notwendig ist. In der Schweiz beansprucht eine Person aufgrund ihrer Ernährungsgewohnheiten rund 1800 Quadratmeter landwirtschaftliches Kulturland¹², also fast dreimal so viel, wie durch den SP FFF geschützt ist.

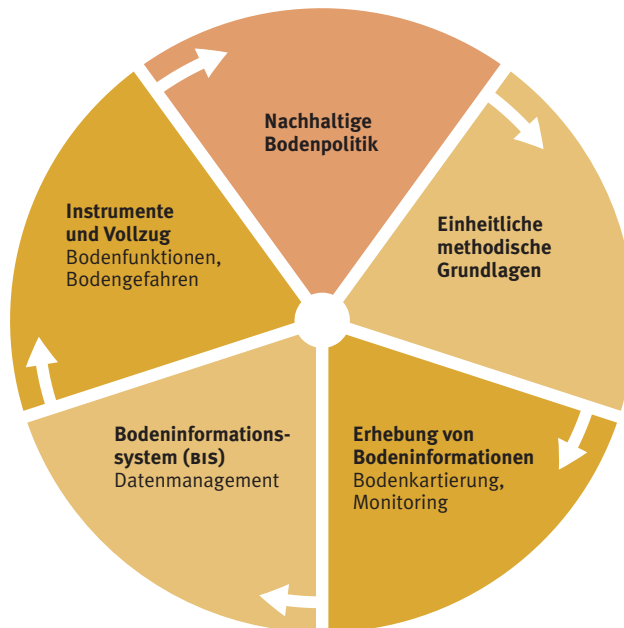
Somit ist absehbar, dass für die Ernährungssicherung in der Schweiz alle noch verfügbaren fruchtbaren Böden unverzichtbar sind. Der Umgang mit der Ressource Boden ist daher nachhaltiger zu gestalten und das Defizit an nutzungsspezifischen Bodeninformationen zu beheben. Auf Bundesebene scheint der Handlungsbedarf erkannt. Das Bundesamt für Land-

wirtschaft (BLW) stellt in einem Bericht zum Kulturlandverlust fest, dass die fruchtbaren Böden für die kommenden Generationen zu erhalten und nachhaltig zu nutzen sind⁶. Der Bericht weist gleichzeitig auf fehlende «bodenkundliche Grundlagen» hin, die zur Bestimmung der Bodenqualitäten erforderlich sind. Wissenslücken und eine mangelhafte Abdeckung mit qualitativen Bodendaten erwähnt auch das Diskussionspapier zur Land- und Ernährungswirtschaft 2025 des BLW¹³.

1.6 Der Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen

Die Ernährungssicherung und eine nachhaltige Bodenpolitik setzen voraus, dass die verschiedenen Nutzungsansprüche gesteuert und politisch angemessen beurteilt werden können. Weitere wichtige Politik- und Vorsorgebereiche wie Klima- und Hochwasserschutz, Wasserversor-

Abbildung 3
Bodeninformationen als Teil des Wertschöpfungszyklus einer nachhaltigen Bodenpolitik. Erst in einem geschlossenen Zyklus können die Bodeninformationen für politische Entscheide in Wert gesetzt werden.



gung, Waldwirtschaft und Biodiversität haben einen engen, unmittelbaren Bezug zur Ressource Boden. Nur mit flächendeckenden standortspezifischen Informationen über die Bodeneigenschaften und deren Veränderung im Laufe der Zeit lassen sich diese öffentlichen Aufgaben effizient und zielgerichtet bewältigen.

Bodeninformationen werden mithilfe von Bodenkartierungen erhoben. Diese erfolgen in der Regel einmalig und liefern Daten zur Qualität der Böden in der Tiefe (vertikale Bodenprofile und Bohrungen) sowie weitere wichtige Kennwerte, die zur nachhaltigen Bodennutzung erforderlich sind. Bodeninformationen umfassen aber auch Daten, die von spezifischen Untersuchungskampagnen (z.B. durch Erhebung der Nährstoff- oder Schadstoffgehalte) und von Bodenmessnetzen stammen. Für die Mehrheit der landwirtschaftlichen Böden fehlen in der Schweiz allerdings ausreichende Datengrundlagen. Bisher ist nur rund ein Drittel der Kulturlandflächen bodenkundlich kartiert (Kap. 2.3). Zudem wurden die meisten bisherigen Kartierungen vor Jahr-

zehnten durchgeführt, sodass ein Teil der Bodeninformationen, etwa zum Humusgehalt oder Wasserhaushalt, nicht mehr aussagekräftig sind. Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern ist die Schweiz deshalb mangelhaft mit Bodeninformationen ausgestattet. Die Bodeninformationen besitzen jedoch als Teil eines geschlossenen Wertschöpfungszyklus und als elementarer Baustein einer nachhaltigen Bodenpolitik auch langfristig einen hohen gesellschaftlichen Nutzen (Abb. 3, S. 19).

Ausgangspunkt des Wertschöpfungszyklus sind gemeinsame methodische Grundlagen: Die Erhebungsmethodik, die Bodenklassifikation und die Analyse von Bodeneigenschaften sind bei national koordinierten oder regionalen Zustandserhebungen nach einheitlichen Normen und Referenzen durchzuführen. Mangels einheitlicher methodischer Grundlagen ist dies gegenwärtig in der Schweiz nicht der Fall. Einheitlich erhobene räumlich-zeitliche Bodeninformationen sind Bestandteil eines kantonalen und nationalen Bodeninformationssystems (BIS),

Abbildung 4
Teilaspekte des Bodeninformation-Wertschöpfungszyklus, die aufeinander abgestimmt sein müssen.



das dazu dient, sie unterschiedlichen Nutzern für weitere Auswertungen, Anwendungen und Interpretationen zur Verfügung zu stellen. Ein bis ist die Datendreh-scheibe für einen standardisierten und effizienten Austausch von Bodeninformationen und gewährleistet deren Qualität und Vergleichbarkeit. Insgesamt gesehen sind viele Teilaspekte in einen Wertschöpfungszyklus zu integrieren (Abb. 4, S. 20), die aufeinander abgestimmt werden müssen, damit daraus ein für die Politik und den Vollzug wertvoller Zyklus entstehen kann.

Der Vollzug des Umweltrechts ist in den meisten Sachbereichen föderalistisch organisiert und Sache der Kantone. Beim Bodenschutz sind die Kantone vor allem für Massnahmen zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der Böden verantwortlich. Zur Wahrnehmung dieser Aufgaben verfügen derzeit nur wenige Kantone über ausreichende Bodeninformationen. Erst wenn solche flächendeckend zusammen mit themenspezifischen Grundlagenkarten zur Verfügung stehen, kann der Wertschöpfungszyklus geschlossen werden.

Unerlässlich sind Hilfsmittel, die die Harmonisierung, das Management und den Transfer der Bodendaten ermöglichen. Die Datendreh-scheibe wird so zum Kernstück des Wertschöpfungszyklus, die sowohl dem Vollzug als auch spezifischen Anwendungen wie Umweltmodellierungen und Bewertungen dient. Im Endeffekt lassen sich damit Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Bodenpolitik abgeben. Der Zyklus setzt sich erneut in Gang, sobald Bedarf an zusätzlichen oder vertiefenden Bodeninformationen vorliegt. Er fördert auf diese Weise das Wechselspiel zwischen Informationsangebot und -nachfrage und verbessert zudem das Verständnis und die Kommunikation für die

politischen Entscheidungsprozesse in der Bodenpolitik (TS5 des NFP 68 «Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik»⁷).

1.7 Vollzugsnotstand im Bodenschutz

Gemäss einer umfassenden Analyse des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) zu den Vollzugsdefiziten im Umweltbereich hat sich der Bereich «Boden» unter 19 untersuchten Bereichen als jener mit dem grössten Vollzugsdefizit erwiesen¹⁴. 15 Kantone gaben an, den im Gesetz vorgesehenen Aufgaben betreffend Bodenschutz nicht oder nur teilweise nachkommen zu können.

Als Hauptgründe für diesen Vollzugsnotstand wurden das Fehlen von Ressourcen (Wissen, Finanzen, Personal) und der Widerstand von Interessengruppen und Politik identifiziert. Die Ressourcen bei den kantonalen Bodenschutzfachstellen sind sehr begrenzt; mancherorts stehen weniger als 50 Stellenprozente zur Verfügung, um den Aufgaben im Bodenschutz nachzukommen¹⁵. Auch beim Bund, insbesondere beim BAFU, sind die personellen Ressourcen für den Themenbereich «Boden» im Vergleich zu anderen Umweltthemen sehr begrenzt. Schliesslich führt die BAFU-Studie fehlende Instrumente für den Vollzug und Mängel in der Organisation als Gründe für das Vollzugsdefizit an. Letzteres betrifft insbesondere das Thema «Boden»¹⁶. Als Querschnittsthema erfordert dieses im kantonalen Vollzug besondere Anstrengungen, um die Schnittstellen zu definieren und die Koordination zu gewährleisten. Einige Kantone haben deshalb Plattformen für den Austausch zwischen den Amtsstellen etabliert. Im Kanton Bern ist die Fachstelle Boden für die ämterübergreifende Koordination und die damit verbundenen Vollzugsaufgaben verantwortlich¹⁷.

Stand und Lücken bei Bodeninformation und bei der Bewertung von Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen

2.1 Nachfrage nach Bodeninformationen und Instrumenten

Der Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen verdeutlicht, dass ein breites Spektrum von Nutzungsinteressen und Schutzbedürfnissen auf zuverlässige Bodeninformationen angewiesen ist und durch die Verwendung der Bodeninformationen für bodenpolitische Entscheidungen ein grosser Mehrwert erwächst¹⁸. Für eine sachgerechte Interessenabwägung gilt grundsätzlich: Nutzungskonflikte lassen sich vermeiden und negative Folgen reduzieren, wenn die erforderlichen qualitativen und quantitativen Informationen verfügbar sind.

Tabelle 1 (S. 23) zeigt die wichtigsten Themengebiete, in denen Bodeninformationen erhoben werden. Die Vielfalt der Erhebungsanlässe und -methoden verdeutlicht, dass Bodendaten gemäss unterschiedlichsten Interessen erhoben werden. Entsprechend vielfältig gestalten sich die jeweilige Probenahme und -auf-

bereitung, die Auswahl der untersuchten Bodeneigenschaften, die Messmethoden und der Messumfang. Fehlen Standards für die Erhebung der Bodeninformationen, sind Auswertungen über verschiedene Erhebungen hinweg nur bedingt oder gar nicht möglich.

Verschiedene Studien haben die Vielfalt der Bedürfnisse und Interessen von potenziellen Nutzern, Bodenfachstellen sowie Vertreterinnen und Vertretern dieser Nutzergruppen erfasst^{20–22}. Eine Umfrage unter den Verantwortlichen der NFP 68-Forschungsprojekte ermittelte ergänzend die Bedürfnisse nach Bodeninformationen und den Mehrwert flächendeckender Datensätze. Tabelle 2 (S. 24) vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Bedarfsgruppen, die flächendeckende Bodeninformationen wünschen.

Der spezifische Bedarf an Bodeninformationen kann zwischen den Nachfragenden und den Bodenwissenschaften ausgehandelt werden. Ersteren ist oft unklar, inwiefern bodenkundliche Informationen zur Lösung ihrer Probleme beitragen können und welche anwenderorientierten Karten verfügbar sind oder selber generiert werden können. Die Befragungen von Bedarfsgruppen haben deutlich gemacht, dass weniger die eigentlichen Basisdaten einer Bodenkartierung nachgefragt werden; von hauptsächlichem Interesse sind vielmehr daraus abgeleitete, für die Anwendung interdisziplinär aufbereitete, verständliche Kartenwerke, beispielsweise Themenkarten zum Wasserspeichervermögen der erfassten Böden oder zur landwirtschaftlichen Nutzungseignung, oder Risikokarten, die die Verdichtungsempfindlichkeit wiedergeben (Tab. 2)²⁰. Zu diesen – teilweise neuartigen – anwenderorientierten Informationsprodukten gehören auch Karten, die

Bodeninformationen bezeichnen die Gesamtheit an Bodendaten, Kenngrössen, Kartenwerken und weiteren Informationsprodukten, die zur Erfassung, Auswertung und Interpretation räumlich-zeitlicher Eigenschaften von Böden dienen.

Bodendaten sind direkt messbare oder schätzbare Eigenschaften von Böden (z.B. Tongehalt), die für die Beschreibung von Bodeneigenschaften entweder direkt benutzt werden können oder zu abgeleiteten Bodenkennwerten aggregiert werden müssen¹.

Bodenkennwerte bezeichnen zumeist abgeleitete Parameter zur Beschreibung von Bodeneigenschaften (z.B. pflanzennutzbare Gründigkeit).

Bodeneigenschaften bezeichnen die Beschaffenheit des Bodens. Sie werden in der Regel über Bodenkennwerte beschrieben. Beispiele sind die Lagerungsdichte oder die Wasserdurchlässigkeit. Bodeneigenschaften geben Hinweise darauf, wie bestimmte Prozesse im Boden ablaufen. So weist die Durchlässigkeit darauf hin, wie schnell Wasser durch den Boden sickern kann¹.

Tabelle 1
Themengebiete, in denen Bodeninformationen erhoben werden (beispielhaft, nicht abschliessend).

Themengebiet	Bodeninformationen (Auswahl)
Bodenkartierung	Erhebung bodenkundlicher Grundlagendaten, Flächendaten, Messdaten für Bodeneigenschaften im Labor, Profildaten, thematische Karten
Bodenuntersuchung	Erhebung bestimmter chemischer, physikalischer oder biologischer Bodeneigenschaften für eine räumliche Einheit, beispielsweise im Rahmen einer Schadstoffuntersuchung gemäss VBBo ¹⁹
Bodenschätzung	Bewertung der Ertragsfähigkeit und damit Schätzung des Wertes (Bodenbonität) landwirtschaftlicher Grundstücke
Monitoring	wiederholte Erhebung von Bodeneigenschaften an ausgewählten Beobachtungsstandorten zur Ermittlung zeitlicher Änderungen von Bodeneigenschaften
Forschung	spezifische Erhebung von Bodeneigenschaften (z.B. Nährstoff- oder Humusgehalte für Kulturen) und Modellierung von Bodenprozessen in Feldversuchen
Landwirtschaftliche Beratung	Erhebung von Bodeneigenschaften und Nährstoffkonzentrationen von landwirtschaftlich genutzten Parzellen
Altlasten	lokale Schadstoffuntersuchungen auf Parzellen
Bodenkundliche Gutachten	Gutachten, beispielsweise für Melioration, Sanierung von Schiessplätzen, Kompensation, UVP-Untersuchungen

die jeweils bewerteten Bodenfunktionen für die raumplanerische Interessenabwägung abbilden (Kap. 2.6).

Von zentraler Bedeutung ist der Dialog zwischen den Bedarfsgruppen und den bodenkundlichen Fachpersonen. Dadurch lässt sich der Bedarf an Bodeninformationen abschätzen, und Angebot und Nachfrage an aussagekräftigen Anwendungskarten können besser aufeinander abgestimmt werden. Für Karten zu Naturgefahren und für den Hochwasserschutz sind beispielsweise eine ganze Reihe von Auswertungen und abgeleiteten Bodenkennwerten denkbar. In diesem Sinne ist ein Bodenkartierungsprojekt mit der Fertigstellung der Bodenkarte nicht beendet, sondern bildet die Basis dafür, die Bodeninformationen aufzubereiten und aktiv auch fachfremden Bedarfsgruppen verfügbar zu machen.

Um die nachhaltige Nutzung des Bodens zu unterstützen, bedarf es daher einer übergeordneten Servicestelle, die den Dialog mit den verschiedenen Bedarfsgruppen führt. Im Fachbereich Geologie beispielsweise betreibt das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) die Landesgeologie als Kompetenzzentrum des Bundes, das geologische Daten erhebt, analysiert, lagert, bereitstellt und daraus wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Bedarfsgruppen ableitet. Auch in anderen Fachdisziplinen bestehen Plattformen für den zentralen Informations- und Datenaustausch, zum Beispiel im Themenbereich Klima (Center for Climate Systems Modeling, c2sm), Naturgefahren (Nationale Plattform Naturgefahren, PLANAT) oder Biodiversität (Schweizer Informationssystem Biodiversität, sib). Eine derartige Servicestelle existiert für den Bereich Boden bisher nicht.

Nutzungsinteressen	Informationsbedarf, Fragestellungen (Bsp.) in Bezug auf Bodeninformationen
Gesellschaft	Ernährungssicherheit
Landwirtschaft	Umsetzung Umweltziele Landwirtschaft (UZL), nachhaltige Bewirtschaftung der Böden, Düngung, Bodenbearbeitung, Wahl der Kulturen, standortangepasster Einsatz von Hilfsstoffen, Direktzahlungssystem und ökologischer Leistungsnachweis (ÖLN), Umsetzung Grundlagen der Düngung (GRUD)
Raumplanung	Erhaltung der fruchtbaren Ackerböden, einheitliche Planungsgrundlagen für den SP FFF, Berücksichtigung der Bodenqualität in der Raumplanung, Landschaftsentwicklungskonzepte (LEK)
Bodenschutzvollzug	Schutz des Bodens gemäss VBBo ¹⁸ : Vermeidung von Bodenbelastungen, Bodenüberwachung, Bodenfeuchtemessnetz, Kompensation von FFF, Verwertungspflicht für Bodenaushub beim Bauen, Bodenschutz beim Bauen, Deponien und Auffüllungen, Rekultivierungen, Meliorationen, anthropogene Böden
Naturschutz/ Biodiversität	Ausscheidung von Flächen für den Naturschutz und von Pufferzonen, Erhaltung vielfältiger Flora und Fauna
Gewässerschutz/ Trinkwasserversorgung	Schutz Grundwasser: Ausweisung von Flächen und Einzugsgebieten mit Böden, die Nähr- und Schadstoffe genügend filtern und abbauen
Klimaschutz- Treibhausgasinventar	Boden als Senke und Quelle für Kohlenstoff und klimawirksame Gase, Reportingpflichten gemäss Kyoto-Protokoll, Massnahmen im Bereich der Forstwirtschaft und der Landnutzung (LULUCF: Land Use, Land-Use Change and Forestry)
Naturgefahren/ Hochwasserschutz	Ausscheidung von Gefahrenzonen bezüglich Hochwasser, Rutschungen, Murgängen u.a., Infiltration von Wasser in Böden, Erhaltung natürlicher Mulden, Vermeiden von Rutschungen
Waldwirtschaft	Baumartenwahl, Bestandsplanung, waldbauliche Massnahmen, Schutz vor Bodenbelastungen wie Verdichtung oder Versauerung
Meliorationen und Drainagen	Optimierung der Produktionsfunktion von Böden: Wasserhaushalt und Bodenstruktur verbessern, Wiederherstellung und Unterhalt Drainagesysteme, Kulturtechnik, Landumlegung und Bonitierung
Hydrologie	Wasserhaushalt: Boden im Kontext Niederschlag, Schnee und Gletscher, Verdunstung, Fliessgewässer und Seen, Grundwasser, Bodenwasserhaushalt und Modellierung Abflussprozesse, hydrologische Messnetze
Wasserbau	Renaturierung der Gewässer, Schutz vor Überschwemmungen, Rückhaltebecken für Starkregenereignisse, Staudämme und Klimawandel, Bewässerung von Kulturen in der Landwirtschaft
Wissenschaft und Forschung, Bodenkunde	Boden als Schnittstelle im Ökosystem, zum Beispiel Stoffhaushalt in der Umwelt, Modelle für das System Umwelt, Prognosemodelle, Landnutzungsmodelle, bodenkundliches Wissen
Archäologie	Archiv der Kulturgeschichte: Erhaltung von Fundstätten, Erkenntnisse zu historischen Gegebenheiten und Fundstücken
Umweltbeobachtung	Monitoring, Umweltberichterstattung, internationale Zusammenarbeit, Bodendaten, Bodeninformationssystem, Informationsportal, Nachhaltigkeitsindikatoren, Öffentlichkeitsarbeit

Tabelle 2
Nutzungsinteressen, Bedarfsgruppen und ausgewählte Fragestellungen betreffend Bodeninformationen.

Zusammenfassend aus²⁰⁻²²;
Umfrage bei NFP 68-Projekten,
eigene Recherchen.

Beispielhafte Informationsprodukte und Themenkarten	Primäre Bedarfsgruppen
Karte zu landwirtschaftlicher Nutzungseignung der Böden (NEK), zu Wasserspeichervermögen, Gründigkeit, für Bewässerung	– Vollzug/Verwaltung: Bundesamt für Raumplanung (ARE), kantonale Fachstellen für Raumplanung und Landwirtschaft
Wasserspeichervermögen, Bodenwassergehalt, Risikokarten bezüglich Erosion und Verdichtung, Nährstoffgehalte und -auswaschung, Risiko Pestizidaustrag in Gewässer, Karten zu Filterung und Abbau von Nähr- und Schadstoffen, Risikokarten zum diffusen Austrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer	– Vollzug/Verwaltung: BLW, BAFU, kantonale Landwirtschafts- und Gewässerschutzämter – Privatwirtschaft und Praxis: landwirtschaftliche Beratungsstellen und Branchenverbände, Landwirte – Wissenschaft: Universitäten, Fachhochschulen, Forschungsanstalten und -institutionen
Karte der Nutzungseignungsklassen (NEK) für kantonalen Richtplan und Nutzungsplanung	– Vollzug/Verwaltung: ARE, kantonale Fachstellen für Raumplanung, Gemeinden
Bodenkarten, Karten zu NEK, anthropogenen und degradierten Böden, Bodenbelastungen sowie Risikokarten und Anwendungskarten für nachhaltige Nutzung	– Vollzug/Verwaltung: BLW, BAFU, kantonale Fachstellen für Landwirtschaft, Bodenschutz und Naturschutz
Karte mit Trocken- und Nassstandorten, Karte der organischen, flachgründigen oder nährstoffarmen Böden	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Naturschutzfachstellen – Praxis/Privatwirtschaft: Umweltverbände, Planungsbüros – Forschung/Wissenschaft: Universitäten, Forschungsanstalten/-institutionen
Karten zu Regulierungsfunktionen der Böden und zum Risiko von Austrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, BLW, kantonale Gewässerschutzämter – Privatwirtschaft/Praxis: Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (svgw), Ingenieur- und Planungsbüros
Karten zu Kohlenstoffgehalten und -vorräten in Böden, Karte organischer Böden	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, BLW – Praxis/Privatwirtschaft: Branchenverbände, Ingenieurbüros – Wissenschaft: Universitäten, Forschungsanstalten und -institutionen
Karten zu Gründigkeit, Bodentextur, Infiltrationsrate, Wasserspeichervermögen der Böden, Bodenwassergehalt	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Fachstellen Wasserbau, Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) – Praxis/Privatwirtschaft: Ingenieur- und Planungsbüros – Forschung/Wissenschaft: Universitäten, Forschungsanstalten/-institutionen
Karten zu Gründigkeit, Nährstoff- und Wasserspeichervermögen, Bodenwassergehalt, Humusformen, Tiefe der Kalkgrenze	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Forstämter – Privatwirtschaft und Praxis: Schweiz. Forstverein, Verband Forstunternehmer – Wissenschaft: Universitäten, Forschungsanstalten und -institutionen, Landesforstinventar (LFI)
Karten zu Wasserhaushaltsgruppen, Bodentextur, Bodenaggregat, Bodenwassergehalt, Porenvolumen, Gründigkeit, Skelettgehalt	– Vollzug/Verwaltung: BLW, BAFU, kantonale Fachstellen, Gemeinden – Privatwirtschaft und Praxis: Flurgenossenschaften, Landwirte, landwirtschaftliche Branchenverbände
Karten zu Infiltrationsrate, Wassergehalt und Wasserspeichervermögen der Böden	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Fachstellen, Gewässerschutzämter – Praxis/Privatwirtschaft: svgw, Ingenieur- und Planungsbüros
Karten zu Bodenqualität, Nutzungseignung, Bodentextur, Wasserinfiltration und Wasserspeichervermögen	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Fachstellen – Privatwirtschaft/Praxis: Ingenieur- und Planungsbüros – Wissenschaft: Universitäten
Karten zu Bodeneigenschaften für Klimamodelle oder Modelle für diffuse Gewässerbelastung	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Fachstellen – Praxis/Privatwirtschaft: Ingenieur- und Planungsbüros – Forschung/Wissenschaft: Universitäten, Fachhochschulen, Forschungsanstalten und -institutionen
Karte zu Fundstätten	– Vollzug/Verwaltung: kantonale Fachstellen, Meldestellen – Praxis/Privatwirtschaft: Öffentlichkeit – Forschung/Wissenschaft: universitäre Forschungsinstitutionen
Status- und Trendindikatoren zur Bodenqualität, öffentlich verfügbarer Datensatz zu Bodeneigenschaften	– Vollzug/Verwaltung: BAFU, kantonale Bodenschutzfachstellen – Praxis/Privatwirtschaft: Umweltverbände, Öffentlichkeit

Bedarfsgruppengerechtes Aufbereiten von Bodeninformationen

Bodeninformationen müssen thematisch aufbereitet und unter fachfremden Bedarfsgruppen aktiv verbreitet werden. Nur wenn die Akteurinnen und Akteure wissen, welche thematischen Auswertungen aus den erhobenen Bodeninformationen generiert werden können, ist mit grösserer Sensibilisierung und einer höheren Nachfrage nach Bodeninformationen zu rechnen. Fehlt in der Ausbildung die Vermittlung von Bodenwissen oder die Praxiserfahrung zu bodenrelevanten Themen, ist damit zu rechnen, dass Anwendungskarten auch dann kaum Eingang in die Berufspraxis von Ingenieuren, Architekten und Bauherren finden, wenn sie verfügbar wären. Um eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden in der praktischen Umsetzung sicherzustellen, genügt es demnach nicht, Bodeninformationen aufzubereiten. Vielmehr sind auch eine Vermittlung und ein aktiver Transfer des verfügbaren Wissens zu den Bedarfsgruppen erforderlich.

Dies ist insofern wichtig, als der Austausch zwischen den Fachleuten der Bodenwissenschaften und jenen anderer Disziplinen oft unter Übersetzungs- und Interpretationsproblemen leidet²¹. Die Bodenwissenschaften stehen diesbezüglich auch in einer Bringschuld. Es mangelt an verständlichen Übersetzungen und Informationskatalogen (Metadatenkataloge) für breite Bedarfsgruppen.

Bodenpolitische Aktivitäten des Bundes

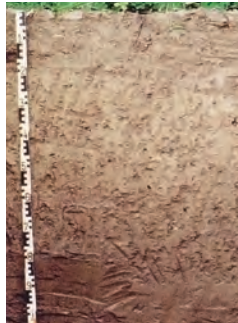
Auch die politische Entscheidungsebene ist Teil des Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen, wobei gerade auf dieser Ebene in den letzten Jahren der Bedarf gestiegen ist. Zahlreiche Strategien, parlamentarische Vorstösse, Volksinitiativen und Gesetzesänderungen sind

auf politischer Ebene mit einem direkten und indirekten Bezug zu flächendeckenden Bodeninformationen diskutiert worden. Zwar steht der Boden oft nicht im Zentrum der politischen Vorhaben, die sich auf nationaler und kantonaler Ebene mit Kulturlandverlust, Erhalt der FFF oder Hochwasserschutz befassen, aber er steht aufgrund seiner Multifunktionalität dennoch im Fokus. Die Notwendigkeit, auf flächendeckende Bodeninformationen zugreifen zu können, ist evident. Eine Gesamtübersicht über die bodenrelevanten politischen Aktivitäten enthält die TS5 des NFP 68 «Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik».

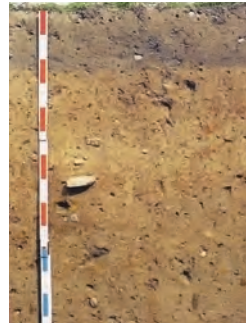
Ernährungssicherheit, Schutz des Kulturlands und der FFF sind ein wichtiges Thema auf der aktuellen politischen Agenda. Angesichts der internationalen Bestrebungen zur Ernährungssicherung werden Erhalt und Schutz des inländischen Kulturlands an Bedeutung gewinnen⁶. Im Zuge der deutlichen Annahme der Volksinitiative zur Ernährungssicherheit im September 2017 wird Artikel 104a der Bundesverfassung (BV) geändert. Der neue Verfassungsartikel nennt fünf Themengebiete, von denen zwei die nachhaltige Nutzung und den vorsorglichen Schutz landwirtschaftlicher Böden ansprechen: die Sicherung der Grundlagen für die landwirtschaftliche Produktion, insbesondere des Kulturlands, und eine standortangepasste und ressourceneffiziente Lebensmittelproduktion (Art. 104a. Abs. a und b BV; Abb. 5, S. 27). Unter «Kulturland» werden die von der Landwirtschaft bewirtschafteten Böden und Flächen verstanden; die Botschaft des Bundesrates erwähnt unter anderem die «landwirtschaftlich produktivsten Flächen»²³.

Die «Umweltziele Landwirtschaft» (UZL)²⁴ konkretisieren den Handlungsbedarf und

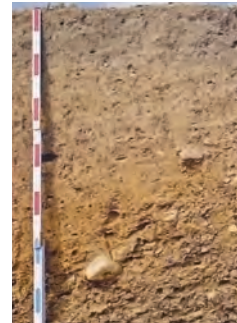
Für alle Kulturen geeignete Böden



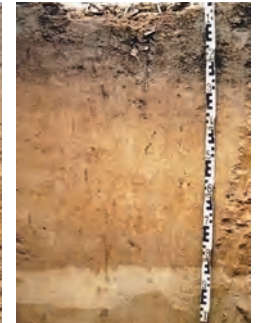
Alluviale Kalkbrennerde
Boden auf schluffreichen Ablagerungen im ehemaligen Überschwemmungsbereich von Flüssen



Braunerde
Boden auf Grundmoräne in schwach welligem Moränengebiet



Parabraunerde
Boden auf Kies in einer Talebene



Braunerde
Boden auf Löss (nacheiszeitliche Windsedimente) an einem schwach geneigten Hang

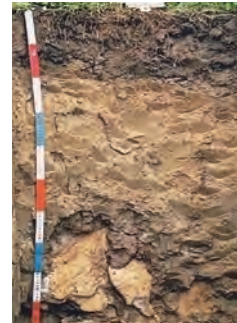
Nur mässig für Ackerbau geeignete Böden



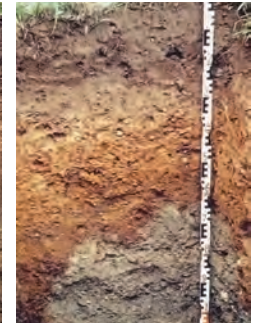
Fluvisol
Boden auf sandreichen Ablagerungen im ehemaligen Überschwemmungsbereich von Flüssen



Regosol
Boden auf Moränenkuppe



Braunerde
Boden auf Kalkstein im Jura



Parabraunerde
Boden auf Kies in einer Talebene

Schlecht oder gar nicht für Ackerbau geeignete Böden

Abbildung 5

Für die Produktion von Nahrungsmitteln geeignete und nicht geeignete Bodentypen. Böden liefern über 90 Prozent der Nahrungsmittel und sind sehr variabel in ihren Eigenschaften. Die Eignung der Böden für die landwirtschaftliche Produktion lässt sich anhand von Bodeninformationen ermitteln²⁶.

Quelle: U. Zihlmann, Agroscope



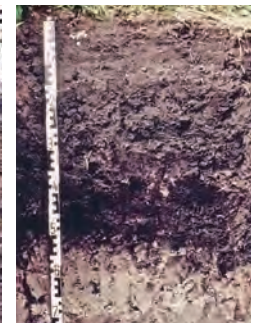
Pseudogley
Boden auf Mergel-Terrasse im Jura



Pseudogley
Boden auf Seetonablagerung in Talebene (ehemaliger Seegrund)



Buntogley
Drainierter Boden auf Schwemmlern in Talmulde



Moor
Drainierter Boden aus Torf auf undurchlässiger Senke

Bodenfruchtbarkeit und nachhaltiges Ernährungssystem

Die Foresight-Studie 2015 der ETH Zürich²⁵ zur «Forschung für ein nachhaltiges Schweizer Ernährungssystem» fasst die globalen Entwicklungen und Trends sowie die grössten Herausforderungen für das globale Ernährungssystem der kommenden zwanzig bis dreissig Jahre zusammen. Zudem identifiziert die Studie die wichtigsten globalen Forschungsfragen punkto hoher Ernährungssicherheit, hoher Umweltqualität und gesellschaftlichen Wohlstands. Die Themen «Bodengesundheit» und «Bodenfruchtbarkeit in landwirtschaftlichen Produktionssystemen» führen die Liste der Top-Ten-Themen an, gefolgt von Themen wie «Antibiotikaresistenz» und «Energieeffizienz in der Lebensmittel-Wertschöpfungskette». Einer der wichtigsten Forschungsbereiche ist laut Studie die «effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen wie Land, Boden, Wasser, Nährstoffe und Biodiversität auf allen Ebenen (Ökosysteme, Arten, genetische Ressourcen), aber auch zu ihrem Schutz, ihrer Wiederverwertung und Wiederherstellung».

formulieren Vorgaben bezüglich Schadstoffeintrag (Schwermetalle), Erosion und Bodenverdichtung. Auch der Erhalt der Bodenbiodiversität soll künftig ein eigenes Schutzziel darstellen²⁴. Allerdings sind weitere relevante Gefahren für den Boden wie Humusverlust oder der Eintrag persistenter organischer Schadstoffe (z.B. Pestizide, Tierarzneimittel) in den UZL bisher ebenfalls nicht berücksichtigt. Wie die Bilanz der UZL zeigt, ist der Bedarf an flächendeckenden Bodeninformationen jedoch äusserst hoch. Im Zeitraum 2008 bis 2016 wurden die Schadstoff-, Verdichtungs- und Erosionsziele entweder verfehlt, oder es ist aufgrund mangelnder Informationen keine Aussage dazu möglich²³. Zu erwarten ist, dass der Informationsbedarf für die Politikbereiche «Ernährungssicherheit» und «Landwirtschaft» in der Gesetzgebung, im Vollzug und in der Praxis künftig steigen wird.

Politikbereich «Schutz der Gewässer»:

Böden als Filter und Puffer

Die regionalen Wasserversorger sind daran interessiert, der Bevölkerung sauberes Trinkwasser ohne grossen Aufbereitungs-

aufwand zur Verfügung zu stellen. Grundwasserschutzgebiete schützen deshalb Böden, die Grund- und Sickerwasser natürlich und kostenlos filtern (Abb. 6, S. 29). Eine Hektare Boden kann pro Jahr über eine Million Liter Grundwasser neu bilden. Damit eine solche Filter-, Speicher- und Abbauwirkung erreicht wird, müssen diese Böden allerdings sehr leistungsfähig sein. Nähr- und Schadstoffe wie Stickstoff (N) können über den Hofdünger in Böden eingebracht werden. Tiefgründige, aufnahmefähige Böden halten diese Stoffe zurück und versorgen damit die Kulturpflanzen. Das Sickerwasser bleibt dadurch weitgehend frei von Verunreinigungen und Bakterien, die dem Menschen schaden können.

Auch in diesem Bereich steigt der umweltpolitische Handlungsbedarf. Zu oft finden sich Nitrat und Pestizide im Grundwasser und in Oberflächengewässern²⁷⁻²⁹. Das Auswaschen und Abschwemmen von Nähr- und Schadstoffen (z.B. Herbiziden) aus Böden in Gewässer ist Gegenstand zahlreicher Mess- und Analyseprojekte des Bundes (Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität, NAWA, bzw. Nationale Grundwasserbeobachtung, NAQUA). Um das Risiko von Schadstoffeinträgen besser zu erfassen, fehlen jedoch flächendeckende Informationen zu den standortspezifischen Bodeneigenschaften³⁰. Sie würden es erlauben, Böden mit reduzierter Regulierungsleistung für Nähr- und Schadstoffe auszuweisen und auf dieser Basis mit einer standortgerechten landwirtschaftlichen Bewirtschaftung die Stoffausträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer zu vermindern.

Das Gewässerschutzgesetz sieht mit den Gewässerschutzprogrammen Massnahmen in der Landwirtschaft vor, um die Abschwemmung und Auswaschung von

Stoffen in ober- und unterirdische Gewässer zu verhindern. Bisher wurden mehrheitlich Programme zur Reduktion der Nitratbelastung des Trinkwassers initiiert (Stand 2017: 31 Projekte). Der Eintrag von Pflanzenschutzmitteln hat bisher zwei Projekte ausgelöst. Im Gegensatz zur Vielzahl von Untersuchungen zu Pestizidvorkommen in Gewässern existieren kaum Untersuchungen, die den Boden als Puffer, Filter und Abbaumedium für Pestizide behandeln³¹. Für eine integrale, effiziente und wirksame Lösung der bestehenden Probleme im Gewässerschutz rund um Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel sind Informationen über die Regulierungsfunktion der Böden aber essenziell.

Politikbereich «Naturgefahren und Hochwasserschutz»: Böden als Wasserspeicher

Die Vorsorge im Hochwasserschutz beginnt bei der Erhaltung natürlicher Wasserspeicher. Je nach Tiefgründigkeit kann

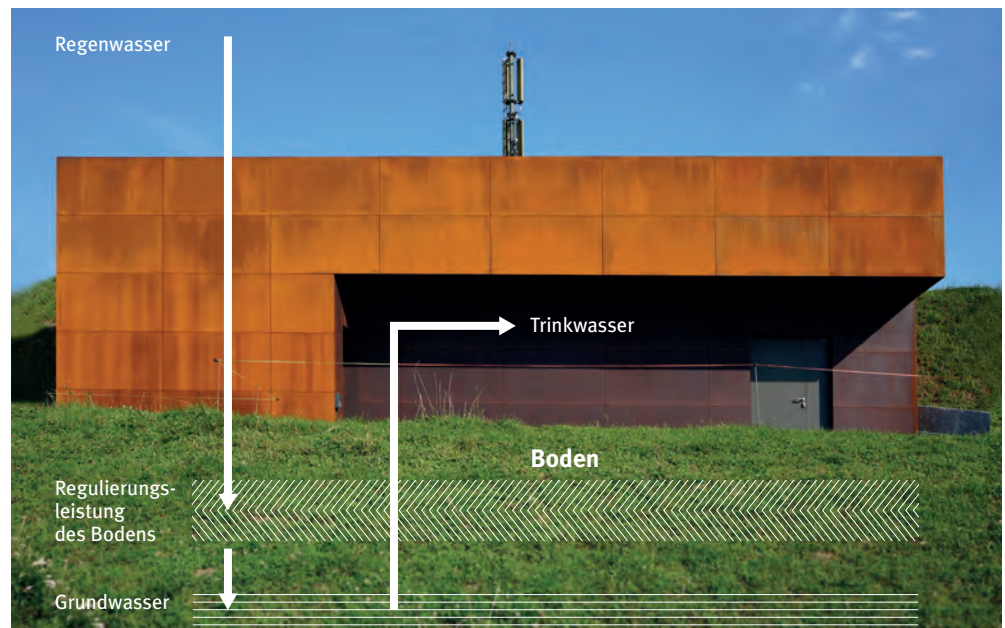
ein Quadratmeter Boden mehr als 300 Liter Wasser speichern. Ein gut strukturierter Boden ist in der Lage, während eines Starkregenereignisses in kurzer Zeit sehr viel Wasser aufzunehmen (Infiltration) und für eine bestimmte Zeit zurückzuhalten (Retention). Um Hochwasserereignisse detailliert einzuschätzen und die Schutzmassnahmen zu verbessern, kann die Bodenwissenschaft Prognosemodelle zum Wasserhaushalt der Böden sowie hydrologisch relevante Kenngrössen wie die Durchlässigkeit liefern. Bisher fliessen solche Informationen kaum in Modelle zur Einschätzung von Hochwasserrisiken ein.

Politikbereich «Klimawandel»: Böden als Kohlenstoffspeicher

Böden sind nach den Ozeanen der zweitgrösste globale Treibhausgasspeicher. Sie enthalten doppelt so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre und ungefähr fünfmal so viel wie die oberirdische Biomasse.

Abbildung 6
Filterleistung von Böden. Tiefgründige und gut strukturierte Böden halten Nähr- und Schadstoffe zurück und sorgen dadurch für sauberes Trinkwasser aus dem Grundwasser.

Quelle: A. Keller, Agroscope



In seiner Strategie zur Anpassung an den Klimawandel betont der Schweizer Bundesrat, wie bedeutend die Wasserrückhalte- und -speicherfähigkeit des Bodens ist^{32, 33}. Derweil rechnet die «Klimastrategie Landwirtschaft» des BLW³⁴ mit klimabedingten Änderungen in der Bodenbewirtschaftung, unter anderem in Bezug auf Fruchtfolge, Kulturwahl und Bewässerung.

Nicht nur der Kohlenstoffgehalt der organischen Bodensubstanz (OBS, Humus; TS2 des NFP 68 «Boden und Umwelt»), auch das Wasserspeichervermögen des Bodens spielt klimatisch also eine wichtige Rolle. Die Bodenfeuchtigkeit beeinflusst das regionale Wetter- und Klimasystem sogar entscheidend. Im Treibhausgasinventar (THG-Inventar) der Schweiz, das in die jährliche internationale Berichterstattung («National Inventory Report» zuhause des Weltklimarats, IPCC) Eingang findet, werden landesweite Bodeninformationen zum Humusgehalt und Kohlenstoffvorrat von Landwirtschafts- und Waldböden im Bereich «Landnutzungswandel» (Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF) erfasst.

Politikbereich «Biodiversität»:

Vielfältiges Leben im Boden

Biologische Vielfalt ist eine für die Natur unverzichtbare Ressource. Schätzungen zufolge leben auf einer Hektare gesunden Bodens mehrere Milliarden Mikroorganismen mit einem Lebendgewicht bis zu 15 Tonnen³⁵. Dieser Reichtum wird in der landwirtschaftlichen Praxis zunehmend anerkannt – als natürlicher Produktionsfaktor ebenso wie als Teil des ökologischen Ausgleichs. Unzählige Bodenorganismen (Bodenfauna; Abb. 7, S. 31)) gewährleisten die Stoffumwandlung im Boden; aus abgestorbener Biomasse entstehen Nährstoffe für neues Wachstum. Die «Strategie

Biodiversität Schweiz»³⁶ und der entsprechende Aktionsplan³⁷ streben die langfristige Erhaltung des vielfältigen Lebens auch im Boden an. Bodenkartierungen können dazu gezielt an ökologisch besonders wertvollen Standorten, zum Beispiel Feuchtstandorten oder Trockenwiesen, Informationen zur Lebensraumfunktion der Böden und zu ihrer Biodiversität sowie Angaben zur naturnahen Weiterentwicklung von Biotopflächen liefern.

Politikbereich «Wald»: Im Boden verwurzelt

Die Waldfläche, die rund einen Drittel der Schweiz ausmacht, ist gesetzlich geschützt. Auch die Anforderungen an die funktionale Vielfalt (Nutzung, Schutz und Erholung) sind im Waldgesetz präzise definiert. Eine funktional optimierte Waldbewirtschaftung umfasst demnach die standortgerechte Baumartenwahl ebenso wie den Aufbau eines langfristig stabilen, ertragreichen Waldbestands. Informationen zum Wasser- und Nährstoffhaushalt, zur Gründigkeit und zum Filter- und Puffervermögen der Waldböden sind dabei wichtige Planungsgrundlagen. Auch die Bewirtschaftung, Pflege und nachhaltige Nutzung der Wälder muss Bodeninformationen berücksichtigen, damit unter anderem das Risiko von Verdichtungen beim Einsatz schwerer Erntemaschinen eingeschätzt werden kann. Im Weiteren führen hohe Stickstoffemissionen zu einer Versauerung der Waldböden. Allerdings fehlen auch in diesem Bereich Bodeninformationen weitgehend: Bisher wurden nur wenige Waldareale kartiert (Kap. 2.3, S. 37). Die Bodenprofile, die die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) an über 2000 Standorten erhoben hat, erlauben punktuelle Aussagen. Das Wissensmanko betrifft aber auch methodische Fragen: Die Kartierungsanleitung für Waldböden ist seit zwei Jahrzehnten nicht mehr aktualisiert worden.

**Politikbereich «vorsorglicher Bodenschutz»:
Gefährdungen vermeiden und vermindern**

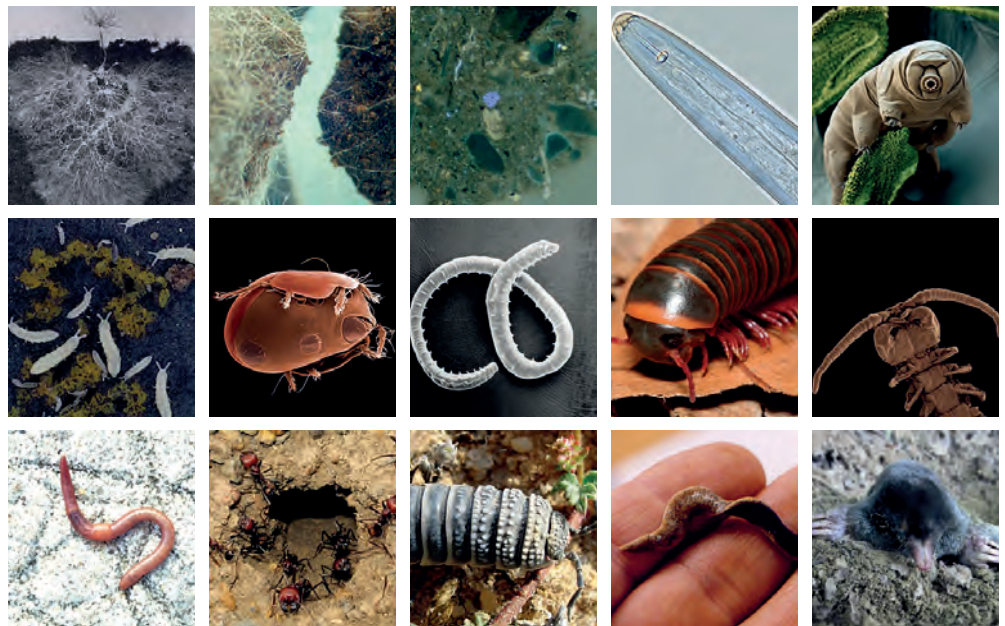
Der vorsorgliche Bodenschutz umfasst alle direkten und indirekten Massnahmen, die die natürlichen Funktionen des Bodens in ihrer Gesamtheit und auf lange Sicht bewahren sollen¹. Bund und Kantone haben Leitbilder und Konzepte zum Bodenschutz verfasst, die vor allem auf den Schutz des Bodens vor bestimmten Gefahren abzielen, aber auch vielfältige Aufgaben aufgreifen, die den Boden bei raumplanerischen Vorhaben (z.B. Baugesuche, Kompensation von FFF, Meliorationen), in der Bau- und Abfallwirtschaft (z.B. Verwertungspflicht von Bodenaushub, Deponien, Auffüllungen und anthropogene Böden) oder in Bezug auf eine Schadstoffbelastung (z.B. Verdachtsflächen, Altlasten, Schiessplätze, Familiengärten) betreffen. Die umfangreiche Berichterstattung der kantonalen Bodenschutzfachstellen^{17, 39 – 42} sowie die sehr

informativen Webseiten der Fachstellen (Konferenz der Vorsteher der Umweltämter, www.kvu.ch) zeugen von der Vielfalt der bodenrelevanten Themen im kantonalen Vollzug. Die Massnahmen des Bodenschutzes tangieren aber verschiedene Rechts- und Vollzugsbereiche und führen oft zu Überschneidungen und Widersprüchen¹⁴. Die Vielzahl der Regelungen stellt nicht nur für die Bodenakteurinnen und -akteure eine Herausforderung dar, sondern auch für den kantonalen Vollzug.

Nicht nur im Siedlungsgebiet, auch im offenen Landschaftsraum verändern menschliche Tätigkeiten die Böden in Aufbau, Struktur und Mächtigkeit. Viele Böden können ihre Funktionen nicht mehr in gleicher Masse erfüllen wie im natürlichen Ausgangszustand. Bei der Qualitätssicherung im Umgang mit Bodenaushub, Rekultivierungen oder bei der Kulturlandaufwertung zur Kompen-

Abbildung 7

Beispiele von Bodenlebewesen. Die grösste Biodiversität findet sich im Boden: Die Bodenfauna ist der Motor für den Stoffkreislauf im Boden³⁸. In einer Hand voll Erde leben etwa 7,5 bis 8 Milliarden Lebewesen – ebenso viele wie Menschen auf dem Planeten Erde.



sation von FFF besteht steigender Informationsbedarf: Es gilt die Lage und den Umfang anthropogen beeinflusster Böden zu bestimmen (Abb. 8, S. 32).

In den Kantonen ist der Bodenschutz organisatorisch auf unterschiedliche Bereiche wie Landwirtschaft, Tiefbau, Energie oder Umwelt aufgeteilt. Zudem verfügen die meisten Kantone ebenso wie das Bundesamt für Umwelt und das Bundesamt für Landwirtschaft im Vergleich zu anderen Umweltbereichen über geringe personelle Ressourcen. Teilweise sind sie sogar unzureichend, um den vielen Anforderungen an das Querschnittsthema überhaupt gerecht zu werden¹⁴. Der Vollzugsnotstand im Bodenschutz beim Bund und in den Kantonen werden in Kapitel 1.7 und 2.9 (S. 21 und S. 67) näher ausgeführt. Worum sich die Kantone unter anderem aktiv und erkennbar bemühen, ist die Berichterstattung und Aufbereitung von Bodeninformationen. Mehrere Kantone haben mittlerweile Informationssysteme im Rahmen der kantonalen GIS-Struktur aufgebaut, in denen die vorhandenen kantonalen Bodeninformatio-

nen verfügbar sind, oder sie unterhalten eigene, themenspezifische Fachinformationssysteme. Die Kapitel 2.2 und 2.3 (S. 34 und S. 37) gehen näher auf den dennoch heterogenen Stand, den Umfang und die Qualität an Bodeninformationen auf kantonaler Ebene ein.

Der vorsorgliche Bodenschutz ist auch auf der Ebene des Bundes ein aktuelles Thema. Das BAFU erarbeitet in Zusammenarbeit mit dem BLW, dem ARE, der SWISSSTOPO, dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) und dem Bundesamt für Energie (BFE) sowie den Kantonen eine Bodenstrategie⁴. Im Zentrum steht dabei die Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Bodenfunktionen. Übergeordnetes Ziel ist eine gesamtfunktionale Betrachtung, die die qualitativen und quantitativen Aspekte des Bodens in Entscheidungen über die Bodennutzung oder den Bodenverbrauch miteinbeziehen soll. Hinsichtlich der Bodeninformationen wurden darin folgende Handlungsfelder formuliert: Normen und Standards, Erhebung von Bodeninformationen, Datenmanagement sowie Auswertung und Interpretation.

Abbildung 8

Ausschnitt aus der Hinweiskarte für anthropogene Böden im Kanton Zürich. Die roten Kreise geben vermutete Standorte wieder, an denen Böden durch menschliche Eingriffe in Struktur, Aufbau oder Mächtigkeit gegenüber ihrem natürlichen Ausgangszustand wesentlich verändert wurden⁴³.

Quelle: www.maps.zh.ch



Die Bodenstrategie des Bundes wurde als Synergiemassnahme in den «Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz»³⁷ integriert und ist eng mit dem parlamentarischen Vorstoss für ein nationales Kompetenzzentrum Boden (Motion 12.4230 Müller-Altermatt) verknüpft, der «den Aufbau eines nationalen Bodenkompetenzzentrums fordert, das sowohl quantitative als auch qualitative Bodeninformationen verwaltet und Standards zur Datenerhebung und zur Interpretation verbindlich festsetzt und aktualisiert». Die TS4 geht gezielt auf diese Inhalte ein.

Andere Politikbereiche

Der Boden spielt in vielen weiteren Bereichen wie der Verkehrsplanung eine wichtige Rolle. Einen Überblick liefert die TS5 des NFP 68 «Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik»⁷. Bodeninformationen sind zudem für weitere Strategien des Bundes relevant, beispielsweise für die «Strategie Nachhaltige Entwicklung Bund»⁴⁴, die «Strategie Sicherheit vor Naturgefahren»⁴⁵ und die «Strategie Biodiversität Schweiz» (SBS)³⁷.

Bedarf an Bodeninformationen im Vergleich zum Standard-Datensatz nach der FAL+-Kartierungsmethode

Tabelle 3 (S. 34) stellt den Bedarf an Daten zu Bodeneigenschaften und abgeleiteten Kenngrössen dem derzeitigen Standard-Datensatz gegenüber, wie er aktuell durch die Bodenkartierung nach den geltenden Anleitungen der FAL+-Methode (d.h. FAL⁴⁶ und kantonale Erweiterungen²⁰) erhoben wird. Die am häufigsten nachgefragten Bodendaten sind im gegenwärtigen Standard-Datensatz einer Bodenkartierung enthalten. Lücken bestehen vor allem bezüglich physikalischer Bodeneigenschaften (Lagerungsdichte, Porenvolumen, Wassergehalt) sowie der Angaben zum Nährstoffgehalt. Flächendeckende

Angaben zu diesen Bodeneigenschaften und bodenbiologische Parameter wurden vermehrt von NFP 68-Forschungsprojekten nachgefragt.

Wichtige Bodeneigenschaften wie Ton-, Schluff-, Humus- und Skelettgehalt werden im Rahmen der Bodenkartierung geschätzt. Vor allem aus Kostengründen werden in der Regel nur an ausgewählten Standorten Bodenproben von Horizonten entnommen und im Labor nach Referenzmethoden analysiert. Der Standard-Datensatz einer Bodenkarte, die nach der FAL+-Methode erhoben wurde, enthält in der Fläche Angaben zu den Bodeneigenschaften für Ober- und Unterboden. Die Abgrenzung zwischen Ober- und Unterboden hängt aber vom Bodenaufbau ab und ist keine konstante Tiefenangabe. Die Bedarfsgruppen fragen jedoch vor allem Bodeneigenschaften für definierte Tiefen und Bodenschichten nach. Aus diesem Grunde schlägt die konzeptionelle Studie für ein Informationssystem betreffend den Wasserhaushalt im Boden⁵⁰ vor, das Zweischichtenmodell zu überdenken und allenfalls zu ergänzen (Kap. 3, S. 68). Mit neueren spektroskopischen Messmethoden sind zudem für Feldarbeiten und im Labor über das ganze Bodenprofil hinweg kontinuierliche Analysen bestimmter Bodeneigenschaften möglich^{48, 49}.

Weitere wichtige Informationen, die mit Bodendaten zusammenhängen, sind Standorteigenschaften wie Hangneigung, Hangform, Klima, Nutzung und Bewirtschaftung. Angaben dieser Art kann der Bodenkartierer zwar vor Ort erfassen, sind aber vorzugsweise aus bestehenden GIS-Grundlagenkarten wie Höhenmodellen oder Nah- und Fernerkundungsdaten abzuleiten.

Tabelle 3

Bedarf an Bodeninformationen auf Stufe Bodeneigenschaften und Bodenkennwerte.

(Standortattribute im FAL+-Standard-Datensatz wie Koordinaten, Nutzungstyp oder Geländeform sind nicht berücksichtigt; OB/UB: Ober- und Unterboden.)

Zusammenfassend aus^{22, 50}. Umfrage bei NFP 68-Projekten und ergänzende Recherchen.

Bodeneigenschaften		Bodenkennwerte und taxonomische Grössen	
häufig genannt	weniger häufig genannt	häufig genannt	weniger häufig genannt
Im Standard-Datensatz FAL+-Kartierungsmethode enthalten			
Tongehalt OB/UB	Gefügegrösse und	Wasserhaushaltsgruppe	Kalkgrenze
Schluffgehalt OB/UB	-form OB/UB	(inkl. Vernässungsart	Bodenpunktzahl
Kalkgehaltsklasse OB/UB	Farbe	und -grad)	
pH OB/UB	Humusform	Bodentyp	
Humusgehalt OB		Boden-Untertypen	
Körnungsklasse OB/UB		(z.B. Vernässung)	
Skelettklasse OB/UB		Mächtigkeiten der	
		Bodenhorizonte, unter-	
		suchte Profiltiefe	
Weitere (nicht im Standard-Datensatz enthalten)			
Raumgewicht (effektive Lagerungsdichte)	Anorganische Schadstoffgehalte (Schwermetalle)	Nutzbare Feldkapazität (gesättigte)	Anthropogene Einflüsse und Verdichtungen
Porenvolumen (Fein-, Mittel- und Grobporen)	Organische Schadstoffgehalte (Pflanzenschutzmittel, Antibiotika)	Hydraulische Leitfähigkeit	Luftkapazität
Nährstoffgehalte (N, P, K)	Bodenbiologie (mikrobielle Biomasse, Diversität)	Infiltration oberste Bodenschicht	Mächtigkeiten der organischen Böden
Kationenaustauschkapazität und Basensättigung		Gründigkeit pro Horizont	
Wassergehalt bzw. Saugspannung		Information, ob drainiert/nicht drainiert	
		Durchwurzelbarkeit bzw. tiefe Pflanzenwurzeln	

Die meisten Bedarfsgruppen benötigen einen hohen räumlichen Detaillierungsgrad der Bodeninformationen, um die Verhältnisse möglichst auf Parzellenebene wiedergeben zu können. Dies bedeutet, dass viele – insbesondere für das Schweizer Mittelland – einen Kartenmassstab von 1:5000 oder grösser wünschen²². Für die Berggebiete, Voralpen, Sömmerungsgebiete und Teile des Juras sind auch mittelmassstäbige Karten (1:25 000) zielführend. Der grosse Bedarf an hochaufgelösten, zuverlässigen, parzellenscharfen Bodeninformationen hängt vor allem auch damit zusammen, dass Boden immer auch Eigentum darstellt – ob privat oder öffentlich. Eigentumsrelevante Entscheide sind sorgfältig und auf einer soliden Basis zu treffen. Parzellenscharfe Bodeninforma-

tionen in hoher und einheitlicher Qualität sind deshalb unerlässlich.

2.2 Arbeitsschritte einer Bodenkartierung

Der folgende Abriss einer Bodenkartierung zeigt den gegenwärtigen Stand als Grundlage für weitere Überlegungen zur Weiterentwicklung der Methode (Kapitel 3). Die Ursprünge der Bodenkartierung in der Schweiz basieren auf Arbeiten zu Beginn des letzten Jahrhunderts⁴⁷. Die Methodik wird meist länderspezifisch weiterentwickelt, damit neue Erhebungstechnologien integriert oder die erhobenen Bodendaten den differenzierten Nutzungsansprüchen gerecht werden können⁵¹. Die Kartierungsanleitung beschreibt das systematische Vor-

Tabelle 4
Arbeitschritte bei der Erhebung von Bodeninformationen für eine Bodenkartierung nach^{46, 54}.

I. Projektvorbereitung	
Zielsetzung	Projektformulierung, Auswahl des Kartierungsgebiets und -massstabs
Grundlagen erarbeiten	Beschaffung und Aufbereitung verfügbarer Informationen und Karten (zu Geologie, Klima, Vegetation, Höhenmodell, Landnutzung usw.), Fernerkundungsdaten und Luftbilder, Literatur und weiterer Quellen
Konzeptkarte erstellen	Begutachtung vor Ort, Stichproben, Hypothesen zur Verbreitung der Bodentypen
II. Feldarbeiten	
Bodenprofile, Bohrungen, Schürfgruben	Wahl der Profilstandorte, Aufnahme des Bodenprofils, Probenahme für Laboranalysen
Laboranalysen	Laboranalysen ausgewählter Bodeneigenschaften, Archivierung von Bodenproben
Kartierung	Abgrenzung von Bodeneinheiten im Feld, Arbeitslegende (Bodenform, Haupt- und Begleitbodenformen, Tiefenstufen, Besonderheiten)
Manuskriptbodenkarte (Feldkarte)	Erster Entwurf der Bodenkarte, Abgrenzung von Kartierungseinheiten
III. Produkte	
Bodenkarte	Überarbeitung und Korrektur der Feldkarte, allenfalls durch iteratives Vorgehen in Arbeitsschritt II, Erstellung der digitalen und der gedruckten Bodenkarte
Auswertungen	Erstellen von Auswertungen der Bodenkarte für spezifische Fragestellungen und Nutzungsprofile
Bodendaten	Bereitstellung der digitalen Bodendaten, die zur Bodenkarte gehören, auf einer Datenplattform

gehen einer Bodenkartierung so weit wie möglich^{46, 52, 54}. Mit der Kartierungsanleitung verbunden ist das Regelwerk zur Klassifikation der Böden⁵³, mit deren Hilfe Böden anhand der Profil- und Standortmerkmale systematisch und standortspezifisch identifiziert werden. Die Klassierung erlaubt vergleichende und bewertende Erhebungen.

Die Bodenkartierung kann als eine Inventur verstanden werden, die die räumliche Verbreitung der Bodeneigenschaften, Bodentypen und der Bodenqualität sowohl in der Fläche als auch in der Tiefe erfasst. Bodenkundliche Erhebungen

können in unterschiedlichen räumlichen Skalen aber jeweils nach einheitlichen Standards erfolgen. Die Bodenkartierung ist auf Erfahrungswerte der beteiligten Fachpersonen angewiesen⁵⁰. Trotz standardisiertem Klassifikationssystem stellen die Vielfältigkeit der Böden und ihr heterogener Aufbau die Fachwelt regelmässig vor grosse Herausforderungen.

Eine Bodenkartierung erfolgt grundsätzlich nach heutigem Standard gemäss den in Tabelle 4 (S. 35) beschriebenen Arbeitsschritten. Die Feldarbeiten stellen dabei den Schwerpunkt dar. Sie umfassen die Aufnahme der Bodenprofile, wofür der

Boden an definierten Standorten senkrecht durch alle Horizonte (Ober- und Unterboden) bis zum geologischen Ausgangsmaterial aufgeschlossen wird. Die sichtbaren Merkmale entlang des Profils werden skizzenmässig aufgezeichnet und die einzelnen Bodenhorizonte gegeneinander abgegrenzt: Für jeden Horizont werden die sichtbaren Bodenmerkmale und die im Feld einschätzbaren Bodeneigenschaften auf einem eigenständigen Formblatt erfasst (Abb. 9, S. 36).

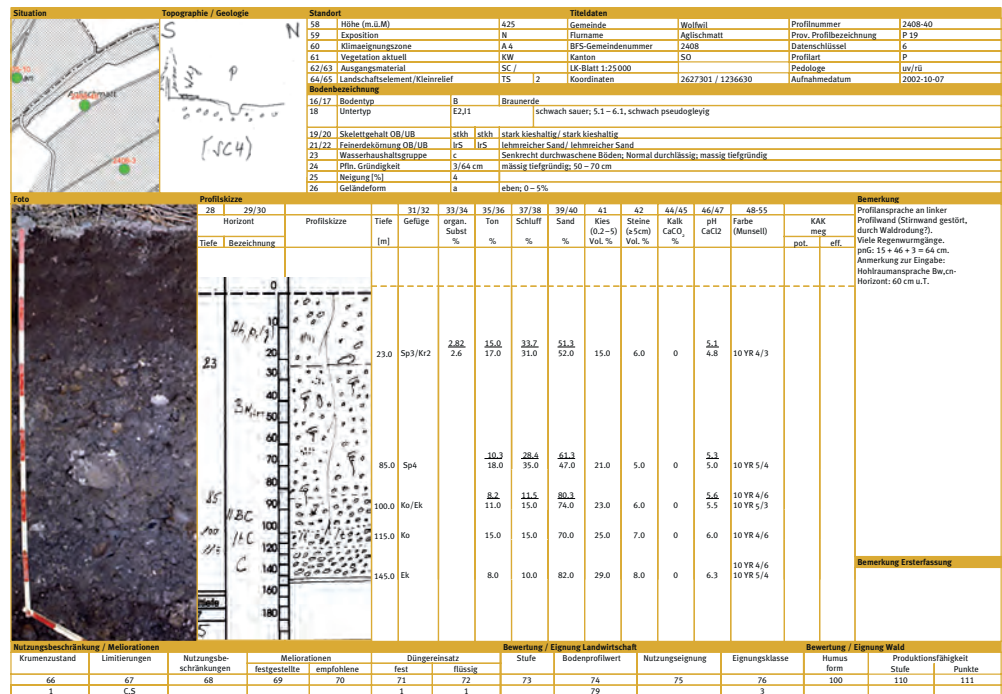
Eine Bodenkartierung kann unterschiedliche Datenqualitäten und Informationsprodukte liefern. Aus einer einzelnen Bodenbohrung oder einem einzelnen Bodenprofil ergeben sich Punktdaten. Flächendaten geben Bodeneigenschaften in Form von Polygonen oder Rasterdaten wieder. Aus einer Bodenkartierung resultieren nebst der Bodenkarte als zentralem

Element einer Kartierung eine Vielzahl weiterer (Neben-)Produkte: Grundlagenkarten und Konzeptkarten, Formblätter der Profilaufnahmen (Profilskizzen und Fotos der Bodenprofile), Bohrprotokolle, Labordaten (Ergebnisse der Analyse von Bodenproben), Auswertungskarten (z.B. Risikokarten für Bodenerosion oder Bodenverdichtung, landwirtschaftliche Eignung, Wasserhaushalt der Böden; Abb. 10, S. 37), Begleitberichte und Dokumentationen sowie der Datensatz zu allen Punkt- und Flächendaten inklusive Dokumentation der Datenstruktur.

Die digitale Modellierung von Bodeneigenschaften und die Bewertung von Bodenfunktionen sind in internationalen Forschungskreisen eine etablierte Methode. Mit dem NFP 68-Projekt **BODENKARTEN** wurde ein derartiger Ansatz für zwei Schweizer Gebiete, für die bereits Profil-

Abbildung 9
Erhebungsblatt einer Bodenkartierung. Mit einer Profilsprache werden der Bodenaufbau und wichtige Bodeneigenschaften und Kennwerte erfasst. Wichtige Grundlegendaten für die Beurteilung einer nachhaltigen Nutzung⁵⁵.

Quelle: Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Abteilung Boden



daten vorlagen, umgesetzt (Abb. 11, S. 38). Das Projektteam entwickelte dazu ein Werkzeug, das aus zahlreichen Geo- und Umweltdaten ein einfaches Vorhersagemodell für Bodeneigenschaften liefert und das komplexe Beziehungen zwischen Bodeneigenschaften und Umweltdaten herstellen kann. Dieser Ansatz erlaubt eine einfache Interpretation der modellierten Beziehungen zwischen Bodeneigenschaften und Standortfaktoren^{56–58}.

Im NFP 68-Projekt BODENKARTEN wurden für zwei Fallstudiengebiete fünf bereits etablierte Modellansätze aus dem Gebiet der Geostatistik und der maschinellen Lerntechnik geprüft. Die Vorhersageergebnisse der sechs Methoden unterschieden sich meist wenig. Die auf Entscheidungsbäumen basierende Lerntechnik (Random Forest) zeitigte insgesamt am häufigsten die beste Vorhersage. Ausserdem ist diese Methode relativ leicht anzuwenden, und es lassen sich mit ihr Karten zur Genauigkeit der vorhergesagten Bodeneigenschaften erstellen⁵⁶.

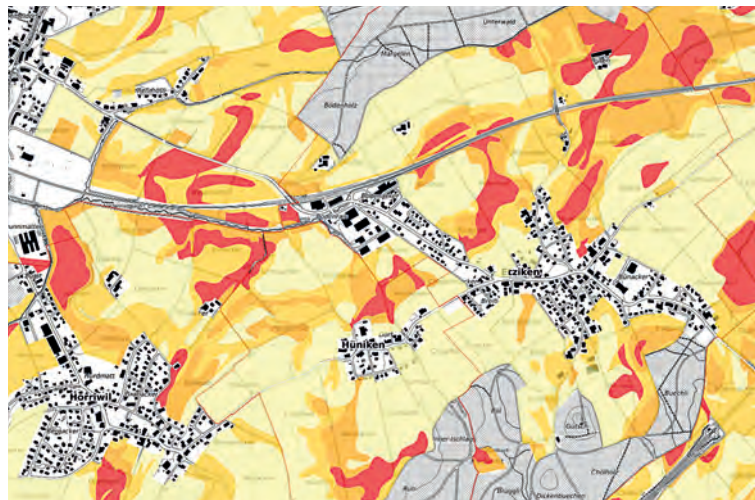
2.3 Stand der Bodenkartierung in der Schweiz

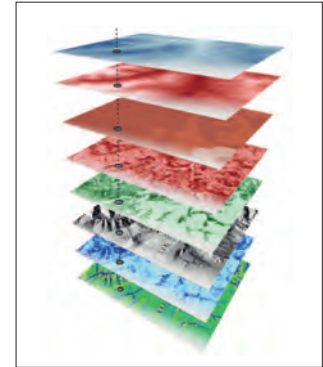
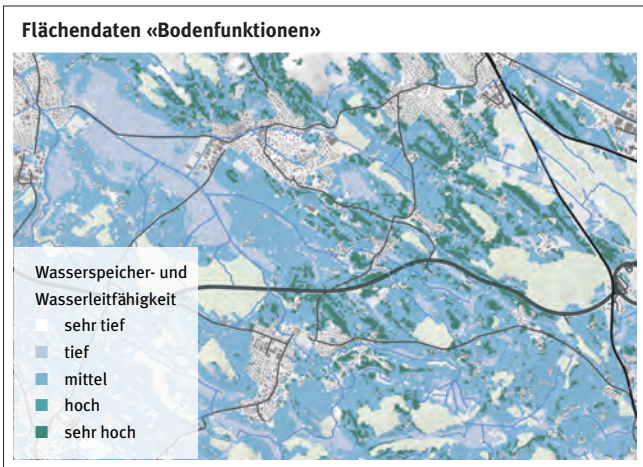
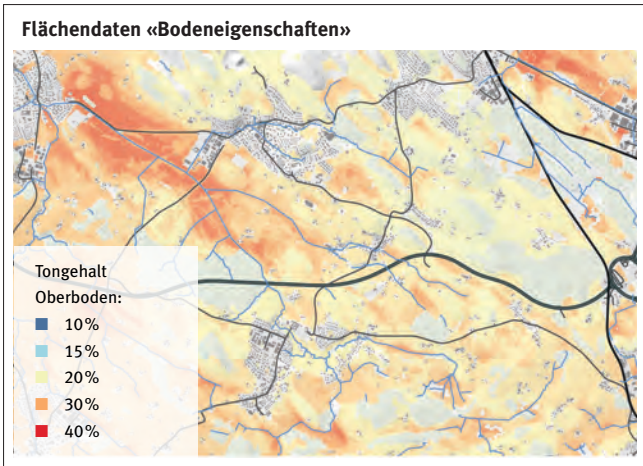
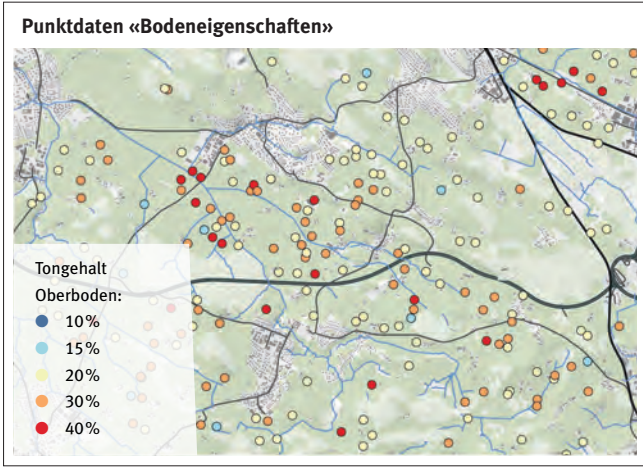
Die Gründung der Forstschule am Eidgenössischen Polytechnikum 1855 steht zu Beginn der bodenkundlichen Ausbildung in der Schweiz. 1925 entwarf Hans Jenny die erste Bodentypenkarte der Schweiz, die wenige Jahre später durch Hans Pallmann und Hermann Gessner bereinigt und 1934 in einer neuen Auflage publiziert wurde⁴⁷. An der damaligen Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau (FAP; heute Agroscope in Zürich-Reckenholz) etablierte sich Ende der 1950er-Jahre ein Nationaler Bodenkartierungsdienst, der während vier Jahrzehnten Methoden und Anleitungen zur Bodenkartierung entwickelte. Viele Bodenkartierungen entstanden im Zusammenhang mit Meliorationen im Auftrag von Gemeinden und Kantonen. Mit Abschluss der «Bodenkartierung Zürich» wurde der Nationale Bodenkartierungsdienst 1996 im Rahmen einer Reorganisation der FAP aufgegeben und die Aufgabe den Kantonen übertragen.

Abbildung 10
Beispiel für eine thematische Anwenderkarte für den Bodenschutz, die aus Bodenkarten abgeleitet wird: Verdichtungsempfindlichkeit⁵⁵.

- Empfindlichkeit Unterboden:
- wenig
 - mässig: nach Abtrocknungsphase, gut mechanisch belastbar
 - empfindlich: erhöhte Sorgfalt
 - stark: nur eingeschränkt mechanisch belastbar
 - extrem: möglichst Verzicht auf ackerbauliche Nutzung

Quelle: geoweb.so.ch/maps/isboden





Archiv-Bodendaten

Umwelt-Geodaten

Modell
Statistische Vorhersagemethode

Eigenschaften
In verschiedenen Bodentiefen

Beurteilung
Ableitungsregel

Funktionen
Karten für Produktions-, Regulierungs- und Habitatfunktionen
des Bodens als Entscheidungsgrundlage

Abbildung 11
Vorgehen bei der Erstellung von Karten für Bodeneigenschaften (für verschiedene Bodentiefen) und für Bodenfunktionen.

NFP 68-Projekt BODENKARTEN

Quelle: M. Nussbaum

Die Dokumente der damaligen Kartierungen wurden weder systematisch inventarisiert noch digital gesichert und in der Folge auch nur wenig genutzt.

Inventarisierung und Digitalisierung von Bodeninformationen

Die wertvollen Bodendaten des Nationalen Bodenkartierungsdienstes lagen lange in einem Archiv der Agroscope analog in Papierform vor. Zu Beginn der 2000er-Jahre wurde mit dem Projekt «Bodeninformation Schweiz» (BI-CH) der Grundstein für die digitale Aufarbeitung älterer Bodendaten gelegt: Es entwickelte entsprechende Werkzeuge und Übersetzungsschlüssel und initiierte die Digitalisierung und Aufarbeitung älterer Bodendaten^{59, 60}. Einige Jahre später wurde das Bodendatenarchiv an der Agroscope systematisch inventarisiert und die Digitalisierung und Aufbereitung der Bodendaten in Zusammenarbeit mit kantonalen Stellen, externen Fachleuten und der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) gestartet⁶¹.

Aus der Inventarisierung des Bodendatenarchivs der Agroscope resultierte ein grosser Datenschatz im Rahmen von rund 400 Bodenkartierungsprojekten: Für die Periode 1953 bis 1996 wurden rund 13 000 Bodenprofile, 5200 Bohrungen und etwa 26 000 Bodenhorizonte mit Analysedaten dokumentiert. Eine Inventarisierung analoger Bodendaten bedeutet aber noch nicht, dass diese digital verfügbar sind. Analoge Bodendaten aus früheren Bodenkartierungen müssen zunächst digitalisiert und anschliessend harmonisiert werden⁶².

Stand der kartierten Böden in der Schweiz

Seit der Aufhebung des Nationalen Kartierungsdienstes im Jahre 1996 fehlt eine Koordinationsstelle auf Bundesebene, so dass bis heute keine abschliessende Übersicht über die bisher kartierten Böden in der Schweiz existiert. Mit der Zusam-

menführung und Harmonisierung kantonalen Bodendaten in NABODAT (siehe unten) wurden in den letzten Jahren unter anderem umfangreiche Datensätze für Bodenprofile aus Bodenkartierungen nach NABODAT migriert. Seit 2016 ist ein erster harmonisierter nationaler Datensatz frei verfügbar⁶³. Gegenwärtig enthält der Datensatz Bodeninformationen von 16 Kantonen und über 10 000 Standorten. Mittelfristig sollen Bodendaten weiterer Kantone schrittweise hinzukommen.

Diese verschiedenen Grundlagen ermöglichen es, ein recht umfassendes Bild über den Stand der Bodenkartierung zu skizzieren. In Abbildung 12 (S. 40) sind die seit den 1950er-Jahren kartierten Gebiete dargestellt. Flächendeckende detaillierte Bodenkartierungen landwirtschaftlich genutzter Böden existieren bisher nur in wenigen Kantonen, so in Zürich, Basel-Landschaft und Zug. Grossflächige Bodenkartierungsprojekte erfolgten oder sind in Erarbeitung unter anderem in den Kantonen Aargau, Glarus, Luzern, Solothurn, St. Gallen, Waadt und Wallis. Abgesehen von den Kantonen Solothurn und Zürich wurden Waldböden jedoch bisher nur innerhalb des Projekts NABODAT 1:25 000 berücksichtigt⁶⁷.

Aktuell sind schätzungsweise bisher rund 355 000 Hektaren Landwirtschaftsland und 26 000 Hektaren Waldböden kartiert (Tab. 5, S. 41). Bisher wurde also rund ein Drittel der LN zumindest einmal bodenkundlich untersucht. Qualitativ bestehen jedoch grosse Unterschiede bei den erhobenen Bodeninformationen bezüglich Erhebungsjahr, Datenschlüssel (Version des Datenmodells, das definiert, wie die Bodeneigenschaften und Bodenkenngrossen erfasst werden), Umfang erhobener Bodeninformationen, Stand der Digitalisierung sowie Massstab der Bodenkarten.

Werden die unterschiedlichen Qualitäten der Bodendaten annäherungsweise berücksichtigt, ergibt sich ein anderes Bild: Mit Einführung des Datenschlüssels 5 Anfang der 1980er-Jahre wurden in der Klassifikation die Wasserhaushaltsgruppen eingeführt, und es wurde ein neuer Standard gesetzt, der sich vom heutigen Datenschlüssel 6.1 nur geringfügig unterscheidet⁵⁹. Ob Bodendaten aus Kartierungen vor 1980, die mit Datenschlüssel 1 bis 4 erhoben wurden, den heutigen qualitativen Ansprüchen genügen, ist sehr fraglich. Werden nur die Flächen betrachtet, die ab 1980 mindestens mit Datenschlüssel 5 kartiert wurden, sind lediglich 10 bis 15 Prozent der LN mittels Bodenkartieren erfasst. Der Stand der Bodenkartierung in der Schweiz steht somit im krassen Gegensatz zum ausgewiesenen Bedarf an Bodeninformationen.

Gegenwärtig führen einige wenige Kantone Kartierungsprojekte von beschränktem Umfang durch. Auf kantonaler Ebene erweist es sich in der Regel als sehr schwierig, Finanzmittel für eine Bodenkartierung zu erhalten, oder Vorhaben werden aufgrund der Finanzsituation vertagt oder können nur in kleinem Umfang durchgeführt werden. Jährlich werden in der Schweiz Böden im Umfang von etwa 2000 Hektaren kartiert²². Im Vergleich dazu wurden in den vergangenen Jahrzehnten jährlich rund 3000 Hektaren Boden versiegelt.

Die Bodeneignungskarte 1:200 000

Die Bodeneignungskarte 1:200 000 (BEK200) wurde in den 1970er-Jahren mit dem Ziel erarbeitet, eine überregional anwendbare Grundlage zur Verfügung zu haben. Die BEK200 ist aber keine Bodenkarte, was in der Diskussion über den Bedarf an Bodeninformationen immer wieder

Abbildung 12

Übersicht über die Bodenkartierungen seit den 1950er-Jahren in der Schweiz⁶⁷. Kartierungsprojekte einiger Gebiete, die in Tabelle 5 (S. 41) enthalten sind, sind noch nicht dargestellt.

Kartierungsprojekte:

- 1:5000 oder grösser
- 1:10 000 oder kleiner

Landwirtschaftliche Zonen- grenzen:

- Talzone
- Hügel- und Bergzone I
- Bergzone II – IV

Quelle: U. Grob, Agroscope

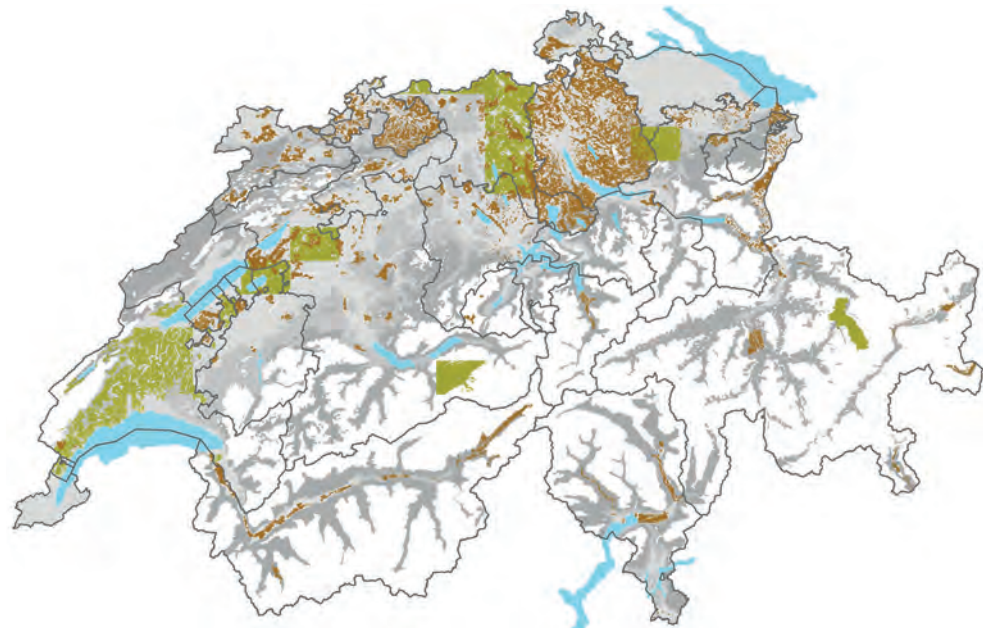


Tabelle 5
Stand der Bodenkartierung
in der Schweiz. Schätzung auf
Grundlage des Agroscope-
Bodenarchivs^{61, 67}.

Kanton	Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN)					Wald	
	Gesamt- flächen (ha)	Frucht- folge- flächen (ha)	kartierte Flächen ¹ (ha)	weitere kartierte Flächen ² (ha)	Grad der Kartierung (%)	produktiv Mittelland (ha)	kartierte Fläche (ha)
Zürich	73 681	44 400	76 043	0	100	48 887	6000
Bern	191 653	84 000	20 665	0	11	41 492	0
Luzern	76 992	27 500	8298	2158	14	14 450	0
Uri	6728	260	1286	0	19	0	0
Schwyz	24 449	2500	1133	0	5	0	0
Obwalden	7839	420	578	0	7	0	0
Nidwalden	6023	370	45	0	1	0	0
Glarus	6842	200	0	1100	16	0	0
Zug	10 628	3 000	10 980	0	100	1192	0
Freiburg	75 434	35 900	7151	0	9	17 009	0
Solothurn	31 416	16 200	5832	8168	45	6915	6000
Basel-Stadt	419	240	380	0	91	0	325
Basel-Landschaft	21 523	8000	21 355	0	99	0	19 699
Schaffhausen	15 568	8900	3605	0	23	1211	0
Appenzell AR	11 966	790	3138	0	26	0	0
Appenzell IR	7168	330	2	0	0	0	0
St. Gallen	71 609	12 500	14 092	45 106	83	11 253	0
Graubünden	55 827	6300	5988	0	11	0	0
Aargau	60 978	40 000	14 747	0	24	29 964	0
Thurgau	49 523	30 000	315	0	1	19 677	0
Tessin	14 681	3500	5835	0	40	0	0
Waadt	109 065	75 800	75 611	0	69	28 348	0
Wallis	37 844	7350	12 018	0	32	0	0
Neuenburg	31 966	6700	0	600	2	0	0
Genf	11 189	8400	0	400	4	2646	0
Jura	40 257	15 000	8573	0	21	0	0
Schweiz	1 051 265	438 560	297 669	57 532	34	223 044	26 025

¹ Stand Metadatenkatalog: Frühjahr 2017.

² bekannt, aber noch nicht im Metadatenkatalog enthalten.

zu Missverständnissen führt. Als bodenkundlicher Inhalt liegen der BEK200 Luftbildanalysen, geologische und geotechnische Karten, relativ wenige Bodenprofile und Bohrungen zugrunde⁶⁴.

Die BEK200-Kartierungseinheiten enthalten Informationen zu sechs geschätzten Bodenkennwerten in groben Klassen: Gründigkeit, Skelettgehalt, Wasserspeichervermögen, Nährstoffspeichervermögen, Wasserdurchlässigkeit und Vernäsung. Die bodenkundliche Aussagekraft dieser kleinmasstäblichen Karte ist sehr limitiert⁶⁴. Es fehlen Angaben zu wichtigen Bodeneigenschaften wie pH-Wert, Humus- oder Tongehalt. Mangels einer flächendeckenden Bodenkarte wird die BEK200 nach wie vor für viele Studien verwendet, und die Textur oder andere Bodeneigenschaften werden anhand von Annahmen geschätzt. Entsprechend gross – auch hinsichtlich des räumlichen Massstabs – sind die Unsicherheiten bei Verwendung der BEK200: Ein Polygon der BEK200 deckt durchschnittlich mehrere Quadratkilometer ab, was viel zu gross ist für die Bedürfnisse der Nutzenden von Bodeninformationen.

2.4 Datenmanagement und Bodeninformationssystem

Datenmanagement

In der Vergangenheit wurden Böden aus den oben genannten Gründen mit unterschiedlichen Erhebungsmethoden untersucht. Diese Bodendaten lassen sich in der Regel nicht ohne Weiteres zusammenführen. Das Datenmanagement umschreibt die Prozesse, diese Daten in eine Form zu bringen, die vorsorglich die Vergleichbarkeit und Interoperationalität gewährleistet und die Zusammenführung und Harmonisierung von Bodendaten aus unterschiedlichen Erhebungen und Zeitepo-

chen ermöglicht. Die Gründe für Inkonsistenzen in Datensätzen sind vielfältig. Frühere Untersuchungen verwendeten oft andere Analysemethoden, sodass Bodeneigenschaften aus verschiedenen Zeitperioden nicht immer vergleichbar sind. Manche Bodeneigenschaften wurden im Feld geschätzt, während andere im Labor gemessen wurden. Im Laufe der Zeit haben sich auch die Methoden der Bodenkartierung weiterentwickelt: Andere Datenschlüssel wurden eingesetzt, die Klassierung einzelner Bodeneigenschaften wurde geändert und zusätzliche Bodenmerkmale oder Regeln zur Ableitung von Bodenkennwerten wurden definiert. Schliesslich schränkt die Datenhaltung in unterschiedlichen Formaten die effiziente Nutzung der Bodendaten ein.

Der Transfer älterer Bodendaten in einen einheitlichen aktuellen Datenschlüssel erfordert viel Fachwissen und Kompetenzen in der Bearbeitung relationaler Datenbanken und der Programmierung von Transferregeln⁵⁹. Für diese Aufgabe stehen Transferhilfen zur Verfügung⁶⁵. In Deutschland stellt beispielsweise die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) dazu Datenbankanwendungen bereit sowie Ableitungsschlüssel für die Bestimmung des Bodentyps nach der internationalen Bodenklassifikation «World Reference Base for Soil Resources» (WRB)⁶⁵.

Im NFP 68-Projekt BODENKARTEN wurden für zwei Fallstudiengebiete in den Kantonen Bern und Zürich Bodeninformationen von 16 000 Standorten aus sieben verschiedenen Datenquellen zusammengeführt, harmonisiert und für die Modellierung verfügbar gemacht. Insgesamt wurden Messwerte und im Feld geschätzte Bodeneigenschaften von rund 36 000 Horizonten in einer Datenbank verein-

heitlich, und es wurde ein zehnstufiges Ablaufschema für die Harmonisierung von Bodendaten in der Schweiz erarbeitet⁶⁶. Beispielsweise werden in einem Arbeitsschritt die im Feld geschätzten Werte für Ton- und Schluffgehalt, Boden-pH und Humus mit den Labormessungen verglichen und korrigiert. Mit den korrigierten Schätzwerten kann der Umfang an validen Bodendaten beträchtlich erhöht werden.

Metadatenkatalog zur Bodenkartierung Schweiz

Zum Datenmanagement gehören auch die Bereitstellung und Übermittlung von Bodendaten, die Definition des Parameterumfangs und die vollständige Beschreibung der Datensätze (Meta-Information). Angesichts der Vielfalt der vorhandenen Datensätze und deren Umfangs kommt sogenannten «Metadatenkatalogen» besondere Bedeutung zu. Solche stehen bisher erst spärlich zur Verfügung.

Gegenwärtig wird für die Schweiz ein webbasierter Metadatenkatalog aufge-

baut, der eine Übersicht über die bisherigen Bodenkartierungen in der Schweiz bieten wird⁶⁷. Den Nutzenden werden die wichtigsten Meta-Informationen zu den bisher durchgeführten Bodenkartierungen, die das Jahr der Kartierung, den Datenschlüssel, den Umfang, den Stand der digitalen Aufbereitung, die Verfügbarkeit der Bodendaten und die Kontaktadresse umfassen, per Mausklick zur Verfügung gestellt. Der Metadatenkatalog stellt einen weiteren wichtigen Schritt dar, um einen besseren Überblick über die vorhandenen Bodeninformationen zu erhalten.

Bodeninformationssystem NABODAT

In der Schweiz ist seit 2012 das Nationale Bodeninformationssystem (NABODAT) als Fachapplikation für Bundesämter und Kantone in Betrieb (www.nabodat.ch). Das webbasierte Bodeninformationssystem (BIS) verwaltet sowohl die Punktdaten (z.B. Profildaten, Abb. 13, S. 43) als auch die Flächendaten (Karten). Den Kantonen steht es frei, ihre Bodendaten in NABODAT zu migrieren und in ihm zu verwalten. Das BIS bietet einen mandantenspezifischen

Abbildung 13
Ausschnitt aus dem Nationalen Bodeninformationssystem (NABODAT): Reiter für Bodeninformationen auf Stufe Bodenhorizonte^{61, 63}.

The screenshot shows the NABODAT interface for a soil profile named 'Oberfeld'. It includes a navigation menu, project details, and a table of soil horizons with their respective properties.

Horizont-Nr. (27)	Tiefe (28) [cm]	Horizontbezeichnung (29/30)	Humusgehalt (33) [%]	Kalk CaCO3 (44)	pH Hellige (46)	Bodenfarbe (48-55)
1	0 - 27	Ah ₁ (g)	2.2	kein CaCO3	0.58	10YR 4/3 (Matrix)
2	27 - 38		1.0	kein CaCO3	5.2	10YR 5/4 (Matrix)
3	38 - 49		0.5	kein CaCO3	5.8	10YR 4/4 (Matrix)
4	49 - 69		0.1	kein CaCO3	5.8	10YR 5/2 (Matrix)
5	69 - 130		0.1	kein CaCO3	6.2	10YR 5/4 (Matrix)
6	130 - 150		0.0	kein CaCO3	6.3	2.5Y 6/1 (Matrix)

schen Datenschutz, das heisst, jeder Kanton kann bestimmen, ob seine Datensätze für andere sichtbar sind. Dank einheitlicher Datenaustauschformate erleichtert NABODAT die Nutzung von Bodendaten wesentlich. Damit Bodendaten von verschiedenen Nutzenden verwendet werden, ist die Interoperationalität zentral.

Das konzeptionelle Datenmodell stellt eine Grundlage für ein BRS dar. Es definiert die Grundstruktur, den Inhalt und die Beziehungen der Datenelemente. Es soll eine transparente und eindeutige Dokumentation der Bodendaten, eine konsequente Qualitätssicherung und Harmonisierung ermöglichen und den Datenfluss zwischen verschiedenen Informationssystemen gewährleisten. Das NABODAT-Datenmodell ist in fünf Pakete aufgeteilt: Standortdaten, Erhebungsdaten, Profildaten, Flächendaten sowie ein Paket zur Stammdaten- und Benutzerverwaltung der Anwender⁶¹.

Das Datenmodell steht in direktem Bezug zum Klassifikationssystem und zur Kartierungsanleitung. Werden diese erweitert oder geändert, ist das Datenmodell anzupassen, wobei die Kohärenz mit den vorhandenen Bodendaten sicherzustellen ist. Die Weiterentwicklung der methodischen Grundlagen für die Bodenkartierung ist deshalb künftig nicht nur aus pedologischer Sicht zu betrachten, sondern auch unter Berücksichtigung der Konsequenzen für das Datenmanagement und das NABODAT-Datenmodell.

Während Bundesämter und Kantone mit NABODAT Zugang zu den Bodeninformationen haben, fehlt bisher für die Forschung und Öffentlichkeit eine Informationsplattform, um die von den Kantonen freigegebenen Bodeninformationen und Karten nutzen zu können. Der Profildatensatz aus NABODAT (Kap. 2.3, S. 37) stellt einen ersten

Schritt hin zur besseren Verfügbarkeit von Bodeninformationen dar⁶⁷.

Messnetze für die Bodenfeuchte

Verhalten sich viele Bodeneigenschaften über lange Zeit nahezu stabil, ist dies bei Eigenschaften wie dem Wassergehalt, der stark variiert, nicht der Fall. Der Wassergehalt im Boden – je nach Messmethode auch als Bodenfeuchte bezeichnet – ist eine wichtige Information für eine nachhaltige und schonende Bodennutzung in der Land- und Waldwirtschaft. Informationen zur Bodenfeuchte unterstützen die Land- und Waldwirtschaft sowie das Baugewerbe bei der schonenden Bearbeitung des Bodens und helfen, gegen Bodenverdichtungen vorzubeugen⁶⁸.

Informationen zur Bodenfeuchte dienen auch der klimatologischen Forschung, für Prognosen zum Schädlingsdruck für Kulturen oder für die Optimierung der Bewässerung⁶⁹. Aktuelle Informationen zum Wasserhaushalt der Böden sind vor allem bei der Hochwasserprognose von Nutzen⁷⁰.

In der Schweiz bestehen heute elf verschiedene Messnetze für die Bodenfeuchte (Abb. 14, S. 45) mit 108 Messstationen (Stand: Ende 2015), die meist von kantonalen Stellen betreut werden⁶⁹. Die Messdaten dieser Netze stehen meist online im Internet zur Verfügung (z.B. www.bodenmessnetz.ch). Es besteht Bedarf, die Bodenfeuchte-Messnetze weiter auszubauen und besser zu vernetzen⁶⁸. Trotz hohen Nutzens existiert für die langfristige Beobachtung der Bodenfeuchte zurzeit allerdings keine gesetzliche Grundlage.

Bodenmonitoring und weitere nationale Bodenuntersuchungen

Zeitliche Veränderungen der Bodenqualität werden im Rahmen des Bodenmo-

onitorings an wenigen, gut definierten Standorten mit zeitlich wiederholten Probenahmen untersucht. Die dabei verwendeten Methoden unterscheiden sich von jenen der Bodenkartierung, ergänzen sie aber in ihren Aussagen hinsichtlich Raum und Zeit. Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO; www.nabo.ch) verfolgt die Belastung von Böden seit Mitte der 1980er-Jahre in einem Referenzmessnetz von rund hundert über die gesamte Schweiz verteilten Standorten (Acker, Grasland, Wald). Das Referenznetz dient der Früherkennung und der Erfolgskontrolle zum Schutz des Bodens. Erfasst werden zeitliche Veränderungen von Nähr- und Schadstoffen, Kohlenstoffgehalt, biologischer Aktivität, Bodenverdichtung sowie die Versauerung von Böden⁷¹. Ergänzend dazu betreiben einige Kantone (z.B. FR, ZH, SG, GE, AG, Zentralschweizer Kantone im Verbund) ein kantonales Messnetz zur Bodenüberwachung⁷².

Im Rahmen der langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF) untersucht die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (wsl) an 18 Waldstandorten den Zustand und die Veränderungen von Bodeneigenschaften sowie Wasser- und Stoffkreisläufen⁷³. Parallel zum LWF-Programm unterstützen das BAFU und acht Kantone seit rund drei Jahrzehnten ein Messnetz von über hundert Waldstandorten (www.waldbeobachtung.ch), das vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch betrieben wird⁷⁴.

Bodenanalysen für den ökologischen Leistungsnachweis (öLN)

Für verschiedene Forschungsprojekte des NFP 68 sowie andere Bedarfsgruppen stellt der Nährstoffgehalt der Böden eine wichtige Information dar. Nährstoffanalysen von Böden bilden in der Landwirtschaft eine wertvolle Grundlage für die parzellenspezifische Düngung. Die Ver-

Abbildung 14
Übersicht Bodenfeuchte-Messnetze, Stand 2015⁶⁹.

- Bodenmessnetz NW-CH
- OstBoden & Kanton Zürich
- Kanton Bern
- Kanton Tessin
- Kanton Uri
- ZUDK (LU)
- ◆ inNET (BAFU-Pilotprojekt)
- ▼ SOMOMOUNT (Uni FR)
- ★ SwissSMEX
- ▲ WSL

Quelle: B. Huegenin-Landl, Meteotest



ordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (DZV; SR 910.13) verlangt von den Bauern im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises mindestens alle zehn Jahre Bodenuntersuchungen auf allen Parzellen. Bei rund 70 000 Landwirtschaftsbetrieben dürfte sich die Zahl der Nährstoffanalysen auf jährlich rund 50 000 bis 100 000 belaufen. Die für öLN-Bodenproben zugelassenen Labors sind verpflichtet, dem BLW die Untersuchungsergebnisse zur statistischen Auswertung zur Verfügung zu stellen. Allerdings erfolgt diese Auswertung bisher nicht standardisiert. Auch findet keine Qualitätskontrolle für das Datenmanagement statt. Viele der gelieferten Nährstoffanalysen sind daher nicht auswertbar⁷⁵. Bei einer ersten Auswertung der Phosphorversorgung in Grasland-Oberböden im Jahre 2014 (Abb. 15, S. 46) erwies sich die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten als ungenügend.

Mit wenig Aufwand könnte künftig aber ein harmonisierter Datensatz für Nährstoffanalysen erreicht werden. Notwendig wären dazu klare methodische Vorgaben zur Entnahme der Bodenproben⁷⁶, eine Georeferenzierung der Bodenproben und Vorgaben zu den Attributen, zur Struktur und zum Format der zu liefernden Datensätze.

2.5 Stand in der EU

International wurden in den letzten Jahren umfangreiche Plattformen zu Bodenkarten und Bodeninformationen aufgebaut, beispielsweise die Portale des European Soil Data Center (ESDAC), des Joint Research Center der Europäischen Kommission (JRC), des World Soil Information Service (ISRIC) sowie der Global-Soil-Partnership-Initiative (GSP) der Food and Agriculture Organization (FAO) der Vereinten Nationen. Auf nationa-

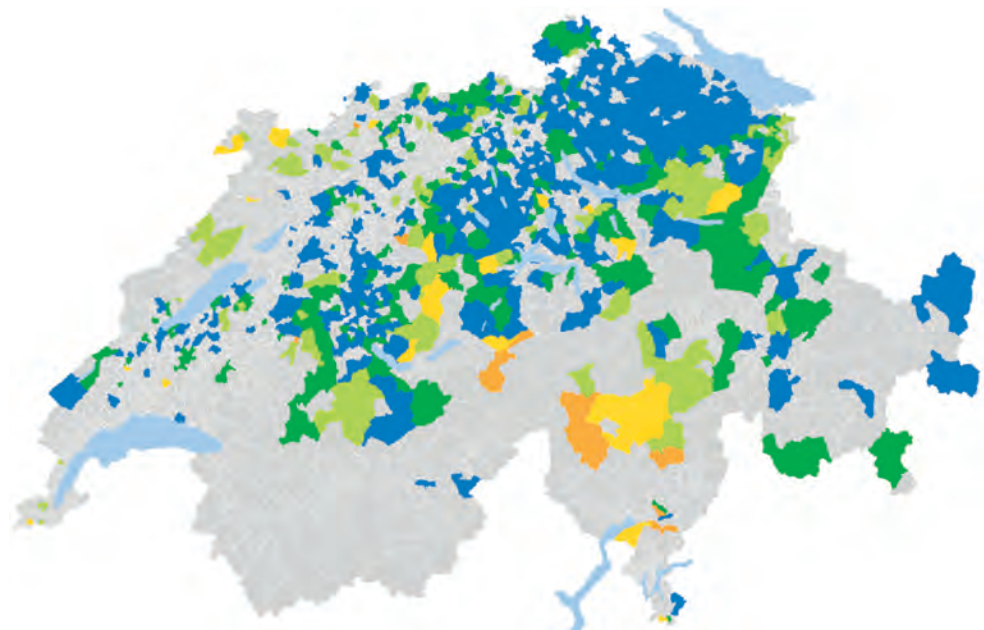
Abbildung 15

Phosphorversorgung in Grasland-Oberböden 2014. Erste Auswertung von Nährstoffanalysen landwirtschaftlich genutzter Böden, die im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises (öLN) durchgeführt werden. Bisher werden diese Bodendaten nicht systematisch zusammengeführt und die Standorte der Probenahme mit Angabe der Gemeinde ungenügend georeferenziert⁷⁵.

Futterbau CO₂-P (N = 33 779):

- sehr häufiger Mangel
- häufiger Mangel
- gelegentlicher Mangel und gelegentliche Überversorgung
- häufige Überversorgung
- sehr häufige Überversorgung

Quelle: Agrarbericht 2014



ler und regionaler Ebene existieren zudem zahlreiche Portale für Bodeninformationen, die die Nutzerbedürfnisse teilweise umfassend abdecken. Die Fokusstudie **BODENINFORMATIONSSYSTEME** des NFP 68 hatte zum Ziel, Übersicht über die verfügbaren Informationen in der EU zu schaffen.

Bodenkartierung

In Europa existieren Bodenkarten in sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad (Abb. 16, S. 49). Verfügen einige Länder nur über eine sehr grobe Übersichtskarte (Massstab 1:1 Million), liegen bei anderen sehr detaillierte Bodenkarten (Massstab 1:10 000 oder genauer) für nahezu die gesamte Landesfläche vor⁷⁷.

Die detailliertesten Bodenkarten liegen für Staaten des ehemaligen Ostblocks vor, wo hauptsächlich im Zeitraum 1950 bis 1990 Bodenkarten für die grossflächigen landwirtschaftlichen Strukturen erstellt wurden⁷⁸. Länder wie Rumänien und Kroatien beispielsweise verfügen (fast) flächendeckend über Bodenkarten mittleren Massstabs. Auch in kleineren Ländern wie Litauen wurden Detailbodenkarten (1:5000 bis 1:10 000) erstellt. Ab den frühen 1970er-Jahren wurden die Böden des damaligen Jugoslawien im Massstab 1:50 000 kartiert. Slowenien hat die Kartierung im genaueren Massstab 1:25 000 fertiggestellt. In Westeuropa führten Belgien und Österreich in den 1980er-Jahren eine flächendeckende Kartierung im Massstab 1:20 000 beziehungsweise 1:25 000 durch. Ausser in diesen Ländern sowie Deutschland und den Niederlanden, die über 1:50 000-Karten verfügen, liegen in keinen anderen Ländern flächendeckende mittel- oder grossmassstäbige Karten vor. Schweden, Norwegen und Spanien verfügen landesweit lediglich über grobe Übersichtskarten.

Ein völlig anderes Bild zeigt sich auf Stufe der Regionen (Bundesländer)⁷⁷. Praktisch alle Länder mit Karten im mittleren und kleinen Massstabsbereich verfügen regional oder für bestimmte Landnutzungen (vor allem für Agrarflächen) über genauere Karten. In Frankreich beispielsweise wurden gezielt Regionen für genauere Kartierungen ausgewählt (Massstab 1:100 000 bis 1:25 000). Auch in Deutschland verfassten einzelne Bundesländer genauere Kartenwerke, beispielsweise Nordrhein-Westfalen (1:5000) oder Bayern (1:25 000). Vor allem grössere EU-Länder haben Bodenkartierungen im mittleren Massstab für Teilregionen, aber nicht flächendeckend durchgeführt. Kleinere EU-Länder wie Dänemark, die Niederlande, Belgien oder Österreich oder Regionen (Bundesländer) mit hoher Siedlungsdichte und begrenzten Landwirtschaftsflächen haben meist die landwirtschaftlich genutzten Böden im mittleren Massstab oder genauer kartiert. Verglichen mit diesen Ländern stellt die Schweiz eine Ausnahme dar: Sie verfügt bei weitem nicht über einen vergleichbaren Informationsstand über die räumliche Verbreitung und die Eigenschaften der Böden.

Rund zwölf der betrachteten Länder haben Kartierungsaktivitäten in den letzten zehn Jahren ausgeführt oder sie dauern noch an. Häufig orientieren sich Kartierungen an einem bestimmten Nutzerbedürfnis. Die Ermittlung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung dürfte dabei in den meisten Ländern das prioritäre Ziel gewesen sein. Doch wurden auch andere Ziele verfolgt: In Finnland beispielsweise werden gezielt saure, schwefelhaltige Böden aufgenommen, da diese Umweltprobleme verursachen. Die Niederlande kartierten erneut degradierte organische Böden, um anhand aktueller

Erhebungen den fortschreitenden Abbau der organischen Substanz besser beurteilen zu können. Albanien erarbeitet seit 2003 eine Karte im Massstab 1:10 000 für die gesamte Agrarfläche.

Bodeninformationssysteme

Seit den 1990er-Jahren wurden Bodeninformationssysteme (BIS) aufgebaut und stetig weiterentwickelt (Anhang 1). Aus historischen oder organisatorischen Gründen wurden BIS oft nur für einen oder mehrere Typen von Bodeninformationen entwickelt. Sie können deshalb sehr unterschiedlich aufgebaut sein. In den meisten Ländern existieren getrennte Informationssysteme für Bodendaten aus Monitoringsystemen und Bodenkartierungen. Dies gilt in der Regel auch für Daten von Wald- und Landwirtschaftsböden. Zwei Drittel der betrachteten Länder verfügen über einen digitalen Zugriff auf Bodenkarten beziehungsweise -daten (Abb. 17, S. 49), unabhängig davon, ob Bodeninformationen flächendeckend zur Verfügung stehen. In rund 80 Prozent der Länder werden Bodendaten teilweise oder völlig kostenfrei im Geodatenportal veröffentlicht oder stehen zum Herunterladen zur Verfügung.

Der Blick auf die Nachbarländer verdeutlicht das Ausmass der Datenlücken in der Schweiz. In Deutschland erstellt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Bodenübersichtskarten und Anwendungskarten im Massstab 1:200 000 (bük200) oder kleiner und bietet mit dem «Bodenatlas Deutschland» (www.bodenatlas.de) ein wissenschaftliches Kartenwerk für den öffentlichen Informationsbedarf an. Das Fachinformationssystem «Bodenkunde» der BGR umfasst nebst Flächen- auch Labor- und Profildaten sowie eine Methodendatenbank zur Auswertung von Bodendaten ([\[bund.de\]\(http://www.bund.de\)\). Die Informationssysteme der Bundesländer stellen in der Regel Bodenkarten im Massstab 1:50 000 oder grösser zur Verfügung. Die BIS auf Ebene der Bundesländer sind zum Teil sehr umfangreich und detailliert, beispielsweise in Nordrhein-Westfalen, Bayern, Baden-Württemberg oder Niedersachsen. Das Umweltbundesamt in Deutschland hat eine Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden erstellt⁷⁹.](http://www.bgr.</p></div><div data-bbox=)

In Österreich wurde bereits Ende der 1990er-Jahre das rechnergestützte Informationssystem BORIS entwickelt (www.umweltbundesamt.at). Das Umweltbundesamt stellt Bodendaten sowohl der Bundesländer als auch des Bundes in vergleichbarer und qualitätsgeprüfter Form online zur Verfügung. Das Datenportal BORIS bietet eine individuelle Datenauswahl und -darstellung mittels WebGIS sowie verschiedene Kartenlayer und Basiskarten in unterschiedlichem Massstab an. Sowohl in Deutschland als auch in Österreich bieten auf Ebene der Bundesländer einige Portale nebst den Standardinformationen (Bodenprofile, Bodeneigenschaften und Bodenkarten) auch anwenderorientierte Karten zum Bodenschutz (z.B. Erosions- und Verdichtungsrisikokarten) oder zu Bodenfunktionen an (z.B. Karten in Bezug zur Produktions- und Regulierungsfunktion in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz).

In Frankreich baute das Institut national de la recherche agronomique (INRA) im letzten Jahrzehnt das umfangreiche Webportal für Bodeninformationen GIS SOL auf (www.gissol.fr). Es erlaubt über einen Webservice sowohl der Allgemeinheit als auch Fachexperten den Zugriff auf umfangreiche Bodendaten und -karten, auf Daten von Bodenkartierungen (Boden-

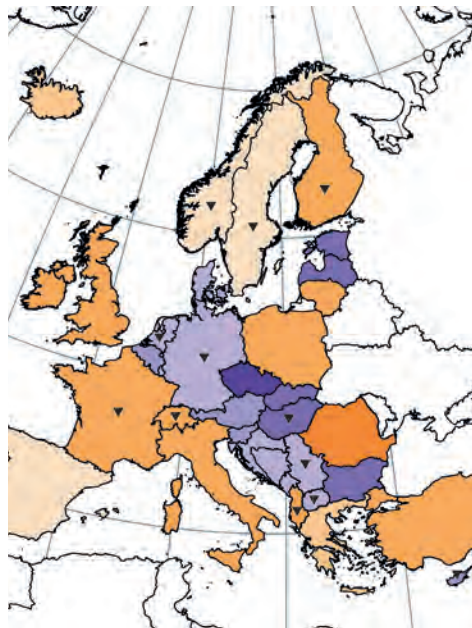
Abbildung 16
Stand der Bodenkartierung in der EU. Dargestellt ist der grösste Massstab der Bodenkarte, die landesweit vorliegt (Abdeckung mehr als 70 % der Landesfläche).

NFP 68-Fokusstudie BODENINFORMATIONSSYSTEME

Masstab nationale Bodenkarte:

- ☐ nicht erhoben
- ☐ 1 : 1 000 000
- ☐ 1 : 500 000
- ☐ 1 : 300 000 – 1 : 200 000
- ☐ 1 : 100 000
- ☐ 1 : 50 000
- ☐ 1 : 25 000 – 1:20 000
- ☐ 1 : 10 000
- ☐ 1 : 5 000

▼ Kartierungen letzte 10 Jahre



profile, Bohrungen) und auf ein Monitoring-Netzwerk mit über 2200 Standorten (Rastermessnetz). Fast alle betrachteten Länder verfolgen die Strategie, die Bodeninformationen durch erhöhte Genauigkeit oder Aktualisierungen zu verbessern, sei es mittels Aufarbeitung bestehender Archive und Modellierungsansätze oder neuer Felderhebungen. Fast alle europäischen Länder bauen zudem breit zugängliche BIS auf.

Internationale und globale Aktivitäten

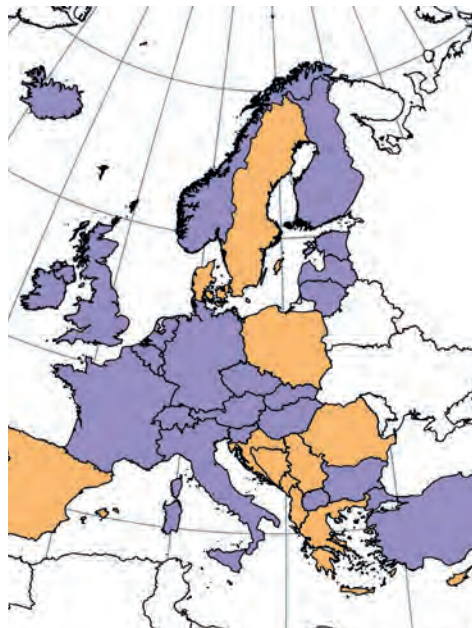
Vor dem Hintergrund der künftigen Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung und des Klimawandels bemühen sich gegenwärtig verschiedene Institutionen, die Ressource Boden und die Eigenschaften der Böden global besser zu erfassen. Das ist dringend nötig, existiert doch bisher keine globale Bodenkarte in einem aussagekräftigen Massstab. Einen entsprechenden ersten Versuch initiierte die Welternährungsorganisation (FAO) 1971⁸⁰. Schrittweise erfolgte anschliessend die Erweiterung anhand verschiedener kontinentaler Datenquellen. Das Gesamtkonzept der Global-Soil-Partnership-Initiative (GSP) der FAO (www.fao.org/global-soil-partnership) definiert die Erhebung von Bodeninformationen und die Verbesserung der Datenverfügbarkeit (Information and Data) als eines von fünf Handlungsfeldern für eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden (Abb. 19, S. 52). Im Rahmen der GSP wird der Zusammenschluss kontinentaler BIS beziehungsweise Bodendatensätze auf verschiedenen Ebenen vorangetrieben^{81, 82}. So wurde das International Network of Soil Information Institutions (INSII) als Plattform zur Koordination der nationalen BIS geschaffen und für Europa beim World Soil Information Service (ISRIC; www.isric.org) in den Niederlanden eine Infrastruktur aufgebaut. Das ISRIC bietet bereits heute

Abbildung 17
Verfügbarkeit von Bodeninformationssystemen in EU-Ländern (Kriterium: digitaler Zugriff auf Bodenkarten).

NFP 68-Fokusstudie BODENINFORMATIONSSYSTEME

Räumliches Bodeninformationssystem:

- ☐ nicht erhoben
- ☐ nicht vorhanden
- ☐ vorhanden



Exkurs Ressource Boden weltweit

Eine nachhaltige Ressourcenpolitik in der Schweiz kann nicht unabhängig von den globalen Entwicklungen betrachtet werden. Auch global ist fruchtbarer Boden ein beschränktes Gut. Ackerland ist zudem räumlich sehr ungleich verteilt. Bislang fehlt eine detaillierte globale Übersicht über die Ressource Boden^{79, 81}. Anhand von Landnutzungsinformationssystemen und Fernerkundungsdaten wird versucht, die globalen Ackerflächen zu schätzen (Abb. 18, unten). Je nach Studie fallen die Ergebnisse sehr unterschiedlich aus: Die FAO schätzt die globalen Ackerflächen auf rund 2130 Millionen Hektaren, was 13 Prozent der globalen Landfläche entspricht. Werden nur jene Flächen berücksichtigt, die ausreichend Niederschlag erhalten und nicht bewässert werden müssen, reduziert sich die verfügbare Ackerfläche («rainfed cropland») auf etwa 1400 Millionen Hektaren⁸⁹.

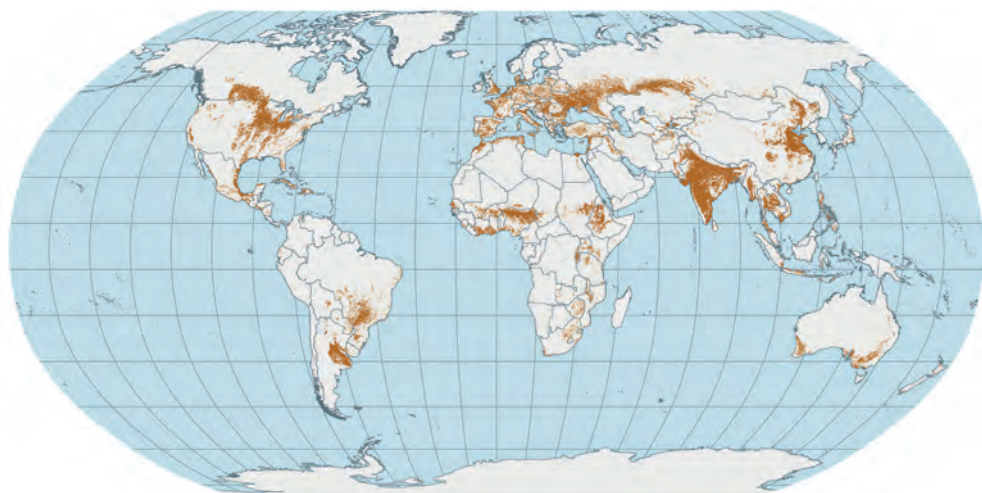
Die vorhandenen Ackerflächen sind allerdings nicht als statische Grösse zu betrachten, die zeitliche Dynamik ist sehr gross. Die FAO schätzt, dass heute rund 40 Prozent der in den 1960er-Jahren vorhandenen Ackerflächen infolge von Erosionsschäden nicht mehr bewirtschaftet werden und deshalb weltweit neue Ackerflächen gewonnen werden mussten – vor allem auf Kosten von Waldflächen und Grasland^{80, 81}. Während also weltweit stets neue Flächen für den Ackerbau nutzbar gemacht wurden, gingen gleichzeitig grosse Flächen durch Bodendegradation verloren. Künftig stehen aber nur noch begrenzt Flächen zur Verfügung, auf denen durch eine Umnutzung Ackerbau betrieben werden kann. Es ist deshalb zentral, die bestehenden Ackerflächen nachhaltig zu nutzen.

Da anhand von Fernerkundungsdaten nur bedingt auf das Ausmass der Bodendegradation geschlossen werden kann, lässt sich das Ausmass des jährlichen globalen Bodenverlustes, vor allem infolge von Erosion, Wüstenausdehnung und Versalzung, lediglich grob abschätzen. Er beläuft sich auf jährlich rund 10 Millionen Hektaren⁹⁰ allein durch Bodenerosion, eine Fläche, die dem Zehnfachen der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz entspricht.

Weltweit sind schätzungsweise mindestens 2000 Millionen Hektaren Acker- und Grasland und damit etwa 15 Prozent der Landoberfläche degradiert. Rund 300 Millionen Hektaren sind so stark geschädigt, dass sie ihre Funktionsfähigkeit verloren haben und nicht mehr genutzt werden können. Diese groben Schätzungen sind bereits über 25 Jahre alt, doch würden aktuelle Zahlen wohl keine optimistischere Perspektive bieten⁹¹.

Abbildung 18
Weltweit verfügbare Ackerböden. Weltweit verfügen die wenigsten Länder über derart fruchtbare Böden wie die Schweiz (dargestellt ist die geschätzte globale Verbreitung der Ackerflächen⁸⁹).

Quelle: Global Land Cover Share, aufbereitet von M. Nussbaum



Hinsichtlich der Fläche spielen die Böden der Schweiz im globalen Kontext faktisch keine Rolle für die Nahrungsmittelproduktion. Dennoch sind drei Folgerungen in Bezug auf die in der Schweiz vorhandenen Bodenressourcen essenziell:

1. Die fruchtbaren Ackerböden sind weltweit sehr ungleich verteilt und nur begrenzt verfügbar. Die Schweizer Böden entwickelten sich seit der letzten Eiszeit und sind mit rund 10 000 Jahren relativ jung, sehr fruchtbar und unter Berücksichtigung des herrschenden Klimas sehr wertvoll.
2. Mit lediglich 0,14 Hektaren Ackerfläche pro Kopf der Bevölkerung verfügt die Schweiz im internationalen Vergleich über sehr wenig fruchtbares Ackerland.
3. Angesichts weltweit schwindender natürlicher Ressourcen (Boden, Wasser, Biodiversität) und einer wachsenden Weltbevölkerung werden die Erhaltung dieser Ressourcen und die Produktion ausreichender Nahrungsmittel zu den grössten Herausforderungen für uns und die kommende Generation gehören. Wie die zahlreichen internationalen Landkäufe («land grabbing»; z.B. www.grain.org) und die rasant wachsenden Volumen der Anlagenfonds für Ackerland belegen, ist der globale Kampf um die besten Böden längst entbrannt.

einen Service für modellierte Daten zu Bodeneigenschaften auf Basis von weltweit rund 110 000 Bodenprofilen (siehe www.soilgrids.org)⁸³.

Eines der Hauptziele im Handlungsfeld «Information and Data» der GSP stellt die Entwicklung und Implementierung eines globalen BIS dar. Dieses soll zur Lösung von Fragen der globalen Nahrungsmittelproduktion und von Umwelt- und Ressourcenproblemen wie Klimawandel, Ernährungssicherheit oder Biodiversitätsverlust beitragen. Der bisher weitaus am meisten benutzte Bodendatensatz auf globaler Ebene ist die frei verfügbare Harmonized World Soil Database (HWSD)⁸⁴ (Anhang 2). Dieser globale Datensatz weist eine räumliche Auflösung von 1 × 1 Kilometer auf und beinhaltet Bodeneigenschaften und -typen nach der FAO-Bodensystematik. Das ISRIC baute in der Vergangenheit sein BIS auf nationalen Datensätzen – zumeist Profildaten – auf⁸⁵, mit Daten zu Bodeneigenschaften in verschiedenen Tiefenstufen in einer Auflösung von 1 × 1 Kilometer oder höherer Auflösung. Zusätzlich bietet ISRIC einen Service über eine Smartphone-

Applikation (SoilInfoApp) an. Parallel hierzu werden Anstrengungen unternommen, um eine globale Bodenkarte aufzubauen^{86, 87}. Schliesslich sind die umfangreichen Arbeiten für eine Harmonisierung und Zusammenführung von Bodendaten in Europa zu erwähnen, die durch das ESDAC am JRC koordiniert werden⁸⁸. Das ESDAC stellt umfangreiche Datensätze zu Bodenkarten, Bodenprofilen und Bodeneigenschaften zur Verfügung.

2.6 Bewertung von Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen

Vorsorgeinstrument

In Bezug auf den Bodenschutz konzentrierten sich Gesetzgebung und Vollzug in den letzten Jahrzehnten vor allem auf die Verminderung oder Vermeidung von Gefährdungen für den Boden. Zu diesem Zweck wurden – auch in mehreren NFP 68-Projekten – Instrumente zur Beurteilung (weiter)entwickelt (Kap. 2.8, S. 61). Durch die Fokussierung auf diese Gefährdungen wird Boden – beispielsweise in den Medien – eher als Problemfall denn als wertvolle Ressource dargestellt⁹².

Abbildung 19
Handlungsebenen der Global Soil Partnership (GSP). Die Bereitstellung von Bodeninformationen und der Aufbau internationaler und globaler BIS bilden eine der fünf Handlungsebenen⁸¹.



1. Bodenbewirtschaftung
2. Öffentlichkeitsarbeit
3. Forschung
4. Information und Daten
5. Harmonisierung

Im Gegensatz dazu zeichnet das Instrument der Bewertung von Bodenfunktionen primär das Vorsorgeprinzip aus. Der Schutz der Bodenfunktionen zielt darauf ab, diese möglichst in ihrer Gesamtheit (Multifunktionalität) zu erhalten und in einem bodenkundlichen Kontext in Einklang mit verschiedenen Nutzungen zu bringen. Durch die Würdigung seiner Leistungen wird er als wertvoll erfahren. In der Schweiz fehlt bisher aber ein Methoden-katalog zur Quantifizierung und Bewertung dieser Leistungen ebenso wie ein integrales Vorsorgekonzept zum nachhaltigen Umgang mit dem Boden in quantitativer Hinsicht, das den Boden und seine Multifunktionalität auch in der Raumplanung mit ihren konkurrierenden Nutzungsansprüchen berücksichtigt¹⁵.

Bodenfunktionen bezeichnen das Leistungsvermögen des Bodens im Kreislauf der Natur und in seinem funktionalen Kontext, das heisst, wie gut er eine bestimmte Aufgabe, einen Nutzen oder Zweck erfüllt oder generell potenziell erfüllen kann. Eine internationale Definition für den Begriff «Bodenfunktion» existiert bisher nicht. Die Erfüllung der verschiedenen Bodenfunktionen hängt von den Bodeneigenschaften und dem Zusammenwirken chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse ab. Die simultanen Bodenfunktionen können kausal nicht eindeutig voneinander getrennt werden. Werden diese Leistungen hinsichtlich ihres Nutzens für den Menschen betrachtet, inklusive der sozioökonomischen Randbe-

dingungen, spricht man von Ökosystemleistungen (ösl)^{93,94}. Sie stellen die direkten und indirekten Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen dar⁹⁵ und somit eine anthropozentrische Perspektive. Welchen Beitrag die Bodenfunktionen zu den ösl liefern, wurde in Studien zur Quantifizierung von ösl bisher kaum berücksichtigt³, was aber wichtig wäre, um die Leistungen des Bodens im Kontext von ösl aufzuzeigen^{2,96}.



Thematisch ist der Ansatz, die Funktionen des Bodens zu betrachten, eng verbunden mit dem Konzept der Bodenqualität^{97,98}. Es definiert das Leistungsvermögen eines Bodens, bestimmte Funktionen zu erfüllen⁹⁹. Bodenfunktionen werden auch im Kontext der Bodenfruchtbarkeit («soil fertility»), Bodengesundheit («soil health»), Sicherung der Bodenressourcen¹⁰⁰ («soil security») und der Bodenindikatoren («soil indicators») thematisiert.

Bodenfunktionen – Bodenfruchtbarkeit

Die Bodenfruchtbarkeit umfasst gemäss VBBo¹⁹ (Art. 2) nebst der Produktionsfunktion auch Lebensraum- und Regulationsfunktionen. Die Definition von Bodenfruchtbarkeit ist allerdings umstritten. Sie ist mehr als Konzept zu verstehen und mit wissenschaftlichen Methoden nur schwer fassbar. Die Bodenfruchtbarkeit beschreibt lediglich einen Teilaspekt der Multifunktionalität der Böden und könnte unter dem Begriff «Bodenqualität» subsumiert werden¹⁰¹. Auch die Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit¹⁰²

Tabelle 6
Beispiele von Bewertungskriterien für ausgewählte Bodenteilfunktionen^{3, 104}.

Bodenteilfunktion		Bewertungskriterien
Produktionsfunktion		
Landwirtschaft		Natürliche Ertragsfähigkeit ¹⁰⁹ Ausreichende Versorgung mit Nährstoffen und geeignete Bodenbedingungen für das Pflanzenwachstum ¹¹⁰ Müncheberg Soil Quality Rating ¹¹¹
Forstwirtschaft		Landwirtschaftliche Nutzungseignung ¹¹² Natürliche Ertragsfähigkeit des Bodens ¹¹³ Produktionsfähigkeit von Waldstandorten ¹¹⁴
Regulierungsfunktion		
Wasserhaushalt		Ausgleichskörper im Wasserkreislauf ¹¹⁵ Fähigkeit des Bodens zur Wasseraufnahme ¹¹⁶ Fähigkeit des Oberbodens zur Wasseraufnahme ¹¹³ Sickerwasserrate: Beitrag zur Grundwasserbildung ¹⁰⁸
Nährstoffhaushalt		Fähigkeit des Bodens zur Nährstoffabgabe an die Vegetation ¹¹³ Nährstoffversorgung (Fähigkeit des Bodens, Nährstoffe je nach Bedarf im ökologischen Kreislauf freizugeben) ¹¹⁰ Mobilisierbare Nährstoffreserven ¹¹⁰ Rückhaltevermögen des Bodens für wasserlösliche Stoffe wie Nitrat; Austauschhäufigkeit des Bodenwassers bei Feldkapazität ^{108, 116}
Filter für Anorganisches		Relative Bindungsstärke für Schwermetalle im Boden bis zu einem Meter Profiltiefe ¹¹⁶ Relative Bindungsstärke für Schwermetalle ¹¹⁷ Retentionsvermögen für Schwermetalle ¹¹⁰
Filter für Organisches		Bindung und Abbau organischer Schadstoffe ¹¹⁸ Bindung und Abbau organischer Chemikalien in Böden ¹¹⁹ Fähigkeit der Mikroorganismen, organische Schadstoffe umzuwandeln ¹¹⁰
Säurepufferung		Vorräte an austauschbaren Basen und Karbonat im Boden bis zu einem Meter Profiltiefe ¹¹⁶ Bindungsstärke des Bodens für Schadstoffe ¹¹⁵

Bodenteilfunktion		Bewertungskriterien
Lebensraumfunktion		
Pflanzen		Standortvoraussetzungen für die Entwicklung von Pflanzengesellschaften an Extremstandorten ¹¹⁶ Besondere Standorteigenschaften für die Biotopentwicklung ¹²⁰ Seltenheit von relevanten Bodenparametern und Naturnähe ¹¹⁰ Natürliche Bodenfruchtbarkeit ¹¹⁵
Bodenorganismen		Potenzial eines Lebensraums für bestimmte Bodenlebensgemeinschaften ¹²¹ Bisher keine praxistaugliche Bewertungsmethode etabliert ¹²³
Genreservoir und Biodiversität		Bisher keine praxistaugliche Bewertungsmethode etabliert ¹²³

fasst sie als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Bodenfunktionen auf. Grundsätzlich betont sie die Simultanität mehrerer Bodenfunktionen als integrale Eigenschaft eines fruchtbaren Bodens.

Das 1991 abgeschlossene Nationale Forschungsprogramm «NUTZUNG DES BODENS IN DER SCHWEIZ» (NFP 22) hat die vielfältigen Funktionen des Bodens thematisiert und als Produkt der natürlichen Gegebenheiten und Nutzungsabsichten verstanden¹⁰³. Die anthropozentrische Sichtweise, wie die Funktionen des Bodens von den Menschen zu nutzen sind, erweiterte das NFP 22 durch das Konzept einer haushälterischen Bodennutzung: «[...] das knappe und wertvolle Gut Boden in Raum und Zeit so zu bewirtschaften, dass dabei seine vielfältigen Eigenschaften und Funktionen dauerhaft gewährleistet bleiben». Das Programm definierte dazu sechs Grundsätze, unter anderem die Beachtung der Multifunktionalität des Bodens, allerdings ohne Instrumente zu entwickeln,

wie die Funktionen quantifiziert werden könnten.

Methoden zur Bewertung von Bodenfunktionen

In der Regel werden hauptsächlich folgende vier (Haupt-)Bodenfunktionen berücksichtigt:

Lebensraumfunktion: Fähigkeit des Bodens, Organismen als Lebensgrundlage zu dienen und zur Erhaltung der Vielfalt von Ökosystemen, Arten und deren genetischer Vielfalt beizutragen.

Regulierungsfunktion: Fähigkeit des Bodens, Stoff- und Energiekreisläufe zu regulieren, eine Filter-, Puffer- oder Speicherfunktion wahrzunehmen sowie Stoffe umzuwandeln.

Produktionsfunktion: Fähigkeit des Bodens, Biomasse zu produzieren (Nahrungs- und Futtermittel, Holz und Fasern).

Archivfunktion: Fähigkeit des Bodens, Informationen der Natur- und Kulturgeschichte zu bewahren.

Zwei weitere (Haupt-)Funktionen beziehen sich auf die Beschaffenheit des Untergrunds und sind hinsichtlich der Ökologie kaum relevant:

Trägerfunktion: Fähigkeit des Bodens, als Landfläche zu dienen.

Rohstofffunktion: Fähigkeit des Bodens, Rohstoffe zu lagern.

Grundsätzlich ist eine Bewertung der Bodenfunktionen auf drei Stufen möglich¹⁰⁴, die dann in weiteren Arbeitsschritten in die Quantifizierung der ösL einfließt²:

1. Vereinfachte Bewertung von Bodenfunktionen für die Raumplanung (generelles Leistungsvermögen unabhängig von der Landnutzung).
2. Semidynamische Bewertung für Fragen des Umweltschutzes (Einfluss der Landnutzung auf das Leistungsvermögen wird anhand vereinfachter Methoden eingeschätzt).

3. Dynamische Bewertung als wissenschaftliche Grundlage (Umweltprozessmodelle und Berücksichtigung von Landnutzungsveränderungen).

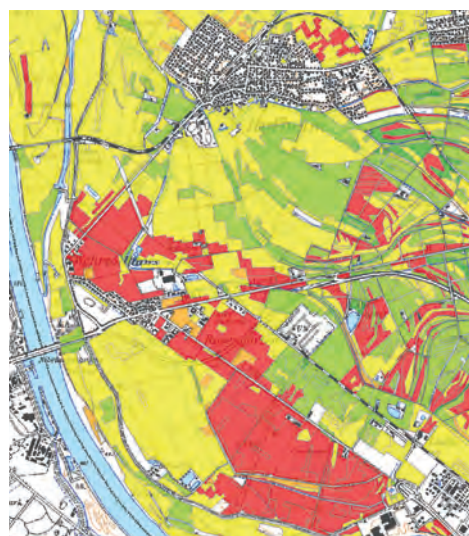
Für die Interessenabwägung konkurrierender Nutzungsansprüche in der Raumplanung sind vor allem vereinfachte Bewertungsmethoden der Stufe 1 erforderlich¹⁰⁵. Dynamische Bewertungen anhand biophysikalischer Bodenprozessmodelle sind geeignet, um detaillierte Fragestellungen zu Bodenfunktionen in Abhängigkeit der Bodennutzung zu beurteilen und zu prognostizieren. Sie erfordern jedoch einen grossen Aufwand und zahlreiche Basisdaten¹⁰⁶.

Um das Konzept der Bodenfunktionen und ösL operationell für die Raumplanung, den Boden- und Umweltschutz sowie die Ressourcenplanung fruchtbar zu machen, sind einfache und transparente Methoden erforderlich, mit denen Bodeninformationen zu einer Wertaussage über den Boden verknüpft werden können¹⁰⁷. Diese Bewertungsmethoden basieren auf bodenkundlichem Fachwissen und den Bodeninformationen, die bei einer Bodenkartierung erhoben werden. Die Bewertungsmethoden von Bodenfunktionen sind daher eng an die Systematik der Bodenkartierung geknüpft. Bodenfunktionen umfassen meist mehrere Teilaspekte. Sie werden deshalb in entsprechende Bodenteilfunktionen unterteilt¹⁰⁸. Diese lassen sich anhand definierter Bewertungskriterien beurteilen, die wiederum von geeigneten Bodenkennwerten abgeleitet werden. Tabelle 6 (S. 53–54) listet Beispiele für Bodenteilfunktionen und Bewertungskriterien auf. Einige Bodenteilfunktionen wurden im NFP 68-Projekt BODENKARTEN für zwei Fallstudiengebiete bewertet.

Abbildung 20
Beispiel für eine Bodenfunktionsbewertung im Bundesland Hessen (DE). Die Böden mit dem höchsten Leistungsvermögen werden in der Karte rot eingefärbt.

- nicht bewertet
- sehr gering
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch

Quelle: <http://bodenviewer.hessen.de>



Die Bewertungsmethoden müssen bestimmte Qualitätsanforderungen berücksichtigen, aber auch verständlich und nachvollziehbar sein¹²⁴. Das Resultat einer Bewertung wird in der Regel als dimensionslose Grösse dargestellt, üblicherweise mit Werten zwischen 1 (sehr niedriger Erfüllungsgrad) und 5 (sehr hoher Erfüllungsgrad) (Abb. 20, S. 55). Deutschland kennt eine lange Tradition in der Bewertung von Bodenfunktionen. Seit 1998 existiert in Deutschland mit dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG)¹²⁵ eine rechtliche Grundlage für den Schutz von Bodenfunktionen. Darauf aufbauend entwickelten vor allem die Landesämter Bewertungsmethoden^{108, 110, 111}. Die nationale Arbeitsgruppe Ad-Hoc-AG Boden stellte auf dieser Basis später einen Katalog mit Bewertungsmethoden zusammen und erarbeitete Empfehlungen zu deren Auswahl und Anwendung¹⁰⁶. Auch andere Länder wenden das Instrument der Bodenfunktionsbewertung vermehrt an, um die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden in die politische Diskussion einzubringen^{126–133}.

Österreich hat eine nationale Norm zur Beurteilung von Bodenfunktionen verabschiedet¹³³. In verschiedenen Fallstudien

wurden zudem Karten für Bodenfunktionen generiert^{134, 135} und Möglichkeiten untersucht, Bewertungsmethoden aus Deutschland an das bodenkundliche Klassifikationssystem Österreichs anzupassen¹³⁶. In der Schweiz existieren Bewertungsmethoden bisher vor allem für die Produktionsfunktion landwirtschaftlicher Böden^{46, 137, 138} sowie für Waldböden¹¹⁴. Einige Kantone stellen auf ihren Internetportalen auch Karten für abgeleitete Kenngrössen zur Verfügung. Für Waldböden existieren zudem weitere Methoden zur Beurteilung des Wasserhaushalts¹³⁹ sowie für die Bewertung des Zustands und der Dynamik der Bodenversauerung^{140, 141}.

Das Konzept der Bodenfunktionen bietet eine Chance für die Kommunikation zwischen der Bodenwissenschaft und anderen Fachdisziplinen¹⁰⁴. Mit den NFP 68-Projekten BODENKARTEN, FRÜHERKENNUNG und ENTSCHEIDUNGSPLATTFORM wurde ein entsprechender Weg verfolgt (Abb. 11, S. 38). Das Projekt FRÜHERKENNUNG verknüpfte die dynamische Bewirtschaftung und Nutzung landwirtschaftlicher Böden mit ihrem Leistungsvermögen (Kap. 2.8, S. 61). Mit dem Ziel, Bodenfunktionskarten zu erstellen, kamen in zwei Fallstudienregionen NFP 68-Projekt BODENKARTEN Be-

Abbildung 21
Genereller Ablauf der Bewertung von Bodenfunktionen³.

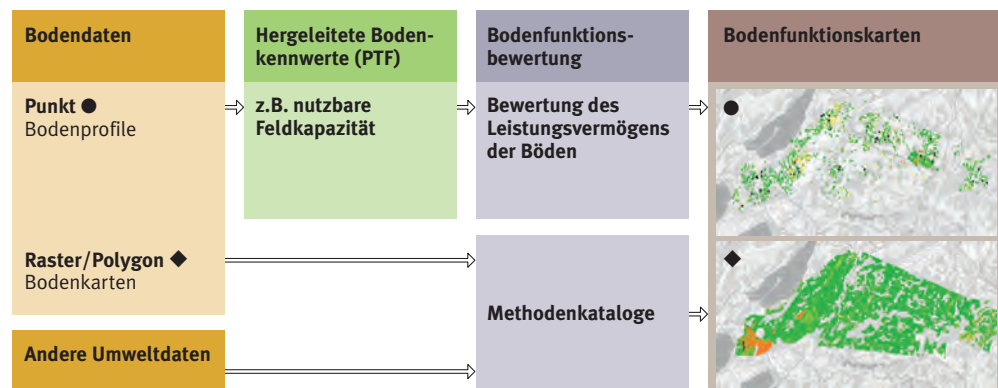
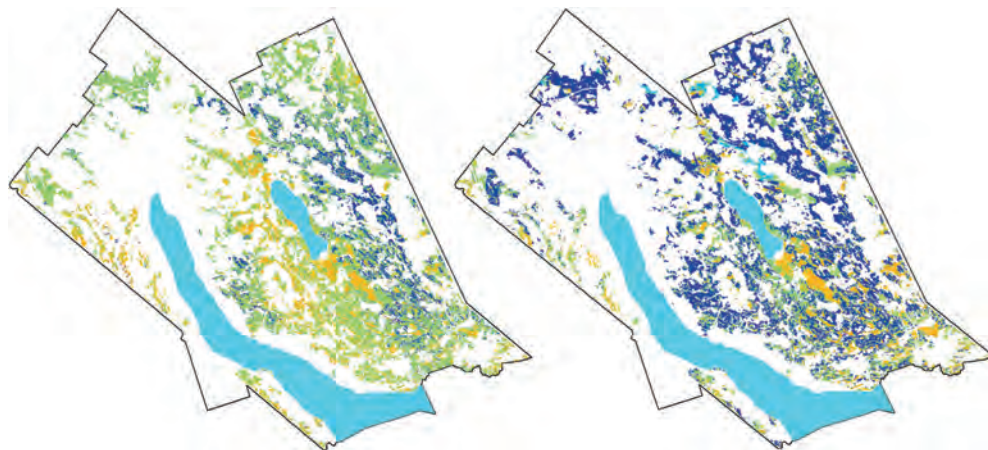


Abbildung 22
Bodenfunktionskarten für das
Fallstudiengebiet im Kanton
Zürich¹⁴⁴.

NFP 68-Projekt BODENKARTEN

- nicht bewertet
- sehr hoch
- hoch
- mittel
- gering
- sehr gering



Regulierungsfunktion Infiltration
Niederschlag und Wasserspeichervermögen

Regulierungsfunktion
Nährstoffspeichervermögen

wertungsmethoden für zehn ausgewählte Bodenteilfunktionen zum Einsatz. Abbildung 21 (S. 56) skizziert das grundsätzliche Vorgehen: In einem ersten Schritt sind vorhandene Bodeninformationen aufzubereiten und zu harmonisieren (Kap. 2.2, S. 34). Für viele Bodenteilfunktionen sind weitere Bodenkenngrößen wie die nutzbare Feldkapazität oder die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit erforderlich, die nur schwer gemessen werden können, sich aber mithilfe von Pedo-Transferfunktionen (PTF) herleiten lassen^{104, 143}. Sie sind aber nur bedingt oder nur mit beträchtlichem Aufwand auf Schweizer Verhältnisse übertragbar.

Bodeneigenschaften und Kennwerte, die im Rahmen einer Bodenkartierung erfasst werden, decken den Bedarf an Bodeninformationen für die Bewertung von Bodenfunktionen weitgehend ab. Als Ergebnis der Bewertung von Bodenfunktionen liegen Planungsgrundlagen für einzelne Bodenteilfunktionen in Form von Karten vor (Abb. 22, oben). Falls von den Nutzenden gewünscht, ist eine Aggregation

der Bodenfunktionen zu einer Gesamtbewertung möglich^{124, 132}. Das Spektrum der Multifunktionalität einzelner Böden (Abb. 23, S. 58) bildet eine wichtige Grundlage für die Beurteilung einer standortgerechten und nachhaltigen Bodennutzung.

Aggregation der Bodenteilfunktionen zu einem Bodenindex

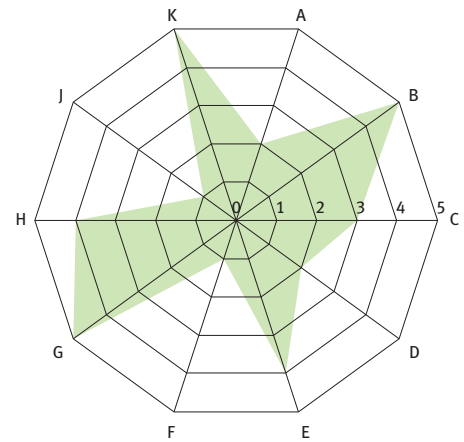
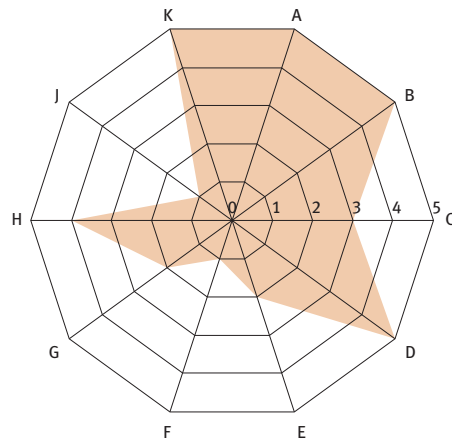
Die Bewertungsergebnisse der einzelnen Bodenteilfunktionen lassen sich auf Stufe der Bodenfunktion aggregieren oder im Sinne einer Gesamtbewertung über alle Bodenfunktionen hinweg zu einem Bodenindex zusammenführen. Eine Gesamtbewertung wird dann als sinnvoll erachtet, wenn eine Bündelung der Bodenschutzbelange als Vergleichsgrundlage zu anderen Belangen gewünscht ist¹⁴⁵, was vor allem im Rahmen der Raumplanung der Fall ist. Die Wegleitung zur Bodenfunktionsbewertung in Österreich¹³³, aber auch die Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen¹³² machen spezifische Vorgaben, welche Bodenteilfunktionen zu bewerten und mit welcher Gewichtung sie zu aggregieren sind. Die Aggregation ver-

Abbildung 23
Diagramme zur Darstellung der Multifunktionalität der Böden und des spezifischen Leistungsvermögens eines Bodens¹⁴⁴.

Links: Braunerde
Rechts: Buntgley

NFP 68-Projekt BODENKARTEN

- A Regulierung Nährstoffe 1
- B Regulierung Nährstoffe 2
- C Regulierung Wasserhaushalt
- D Produktion Landwirtschaft
- E Habitat Mikroorganismen
- F Habitat Pflanzen
- G Regulierung C-Haushalt
- H Regulierung Säuren
- J Regulierung organische Schadstoffe
- K Regulierung anorganische Schadstoffe



schiedener Bodenfunktionen kann dem Boden in Entscheidungsprozessen einen höheren Stellenwert geben. Ein Bodenindex stellt dabei einen kombinierten qualitativen und quantitativen Bodenindikator dar, der sich aus der Aggregation ausgewählter Bodenfunktionen gewinnen lässt. Ein Nachteil der Aggregation ist allerdings, dass durch die Überlagerung und Gewichtung mit anderen Bodenteilfunktionen die räumlichen Muster einzelner Bodenteilfunktionen verloren gehen können. Der Methodenkatalog der Länderarbeitsgruppe in Deutschland¹⁰⁸ rät daher von einer Aggregation ab, da grundsätzlich der Informationsgehalt der einzelnen Bodenteilfunktionen bei den bodenrelevanten politischen Entscheidungen berücksichtigt werden sollte. Im NFP 68-Projekt BODENKARTEN wurden verschiedene Varianten einer Aggregation für zehn Bodenteilfunktionen geprüft. Die Bodenindexkarten zeigen für das gleiche Gebiet teilweise grosse Unterschiede¹⁴⁴. Um die Bodenteilfunktionen für eine Gesamtbewertung einer Bodenindexkarte zu gewichten und zu aggregieren, bedarf es weiterer Diskussionen und Entwicklungen.

Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen
Ökosystemleistungen (ösl) leiten sich aus der Bewertung und Quantifizierung der Bodenfunktionen ab und berücksichtigen zudem sozioökonomische und politische Rahmenbedingungen² (Abb. 2, S. 17). Das Konzept der ösl will den Wert der Ökosysteme – inklusive der Ressource Boden – und ihrer Leistungen für den Menschen fassbar machen. Zwar wurde ein breites Spektrum unterschiedlicher Instrumente zur Operationalisierung des ösl-Konzepts entwickelt¹⁴⁶, die Ressource Boden wurde bisher aber nur selten oder unzureichend berücksichtigt^{96, 147–149}. Mehrere Projekte des NFP 68 haben die Rolle des Bodens im Kontext von ösl betrachtet.

Das FACCE-JPI-Projekt TALE (multifunktionale Landwirtschaft in Europa) untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Szenarien der Landnutzung auf Agrar-ösl wie Nahrungsmittelproduktion, Biodiversität und auf ösl im Bereich des Boden- und des Gewässerschutzes. Anhand eines biophysikalischen Modells wurde im Broje-Gebiet (NE) aufgezeigt, welche Effekte Fruchtfolgen, Zwischenkulturen und Bewirtschaftungsintensität auf die Agrar-ösl

haben. Im Fokus standen Kompromisse (Trade-offs) zwischen einzelnen öSL bei bestimmter Landnutzung.

Die NFP 68-Fokusstudie **BODENINDIKATOREN** zeigt mögliche Steuerungsinstrumente auf, um die Bodenversiegelung künftig zu begrenzen, und schlägt vor, die Bodenqualität mithilfe von Bodenindexpunkten in die Raumplanung einzubeziehen. Im Rahmen der Fokusstudie wurde eine Delphi-Umfrage durchgeführt, in der Fachexpertinnen und -experten die Bedeutung der insgesamt zehn Bodenteilfunktionen, die im NFP 68-Projekt **BODENKARTEN** berechnet wurden, für 18 öSL gewichteten. Aufgrund dieser Experteneinschätzung wurden für das Fallstudiengebiet Zürich aus den Bodenfunktionskarten öSL-Karten generiert⁷.

Die Rolle des Bodens für die globale Ernährungssicherheit bei begrenzten Landressourcen untersucht das **FACCE-JPI**-Projekt **DEVIL**. Dieser internationale Projektverbund stellt Modelle zur Nachfrage nach Lebensmitteln auf Länderebene deren Angebot auf Basis der zur Verfügung stehenden natürlichen und sozialökonomischen Ressourcen gegenüber. Die Ressource Boden ist dabei ein zentraler Faktor für die Wechselwirkungen zwischen Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Ernährungssicherheit.

Die beiden **FACCE-JPI**-Projekte **STACCATO** und **BASIL** untersuchen, mit welchen Massnahmen sich spezifische öSL in Landwirtschaftssystemen fördern lassen. Im Vordergrund stehen Produktionsfunktionen (Nährstoffe und Ertrag), Regulierungsfunktionen (biologische Schädlingsbekämpfung, Anordnung und Dichte ökologisch wertvoller Flächen), aber auch die Biodiversität von intensiv und extensiv bewirtschafteten Agrarlandschaften.

2.7 Bodenkartierung als Grundlage für die Ausscheidung von Fruchtfolgeflächen

Die Bevölkerungsdichte im Schweizer Mittelland ist im europäischen Vergleich überdurchschnittlich hoch. Produktive und ökologisch besonders wertvolle Böden geraten dadurch unter besonderen Druck (Abb. 24, S. 60). Das Bevölkerungswachstum und die Zunahme der Wohnfläche pro Kopf verknappen die Bodenfläche stetig. Von 1983 bis 2007 ist im Mittelland und in den Bergregionen eine landwirtschaftlich nutzbare Fläche von 851 Quadratkilometern verloren gegangen – ein Verlust in der Grösse des Kantons Jura. Von allen Gefährdungen bedeutet die Versiegelung den schwerwiegendsten Eingriff für die Ressource Boden, da sämtliche ökologischen Funktionen verloren gehen.

Fehlen Bodeninformationen, droht die Bodenqualität in der Raumplanung vernachlässigt zu werden. Die TS3 schlägt vor, die Qualität der Böden mittels Bodenindexpunkten in der Raumplanung zu berücksichtigen. Zentrales Instrument der Raumplanung ist diesbezüglich der **SP FFF**, der allerdings lediglich – doch immerhin – die Produktionsfunktion der Böden bezüglich Nahrungsmitteln berücksichtigt. Gemäss Beschluss des Bundesrats vom 8. April 1992 sind in der Schweiz 438 560 Hektaren **FFF** geschützt. Ob dieser Schutz auch tatsächlich greift, ist zurzeit aber ungewiss. Verschiedene Kantone verfügen nur noch über wenig Reserven in Bezug auf ihr im Rahmen des **SP FFF** zugewiesenes Kontingent. Der Schutz des Kulturlands ist denn auch Gegenstand kantonaler Initiativen.

Die Kantone haben ihr **FFF**-Inventar in den letzten Jahren selbständig überprüft, allerdings mit stark voneinander abweichenden Erhebungsmethoden und un-

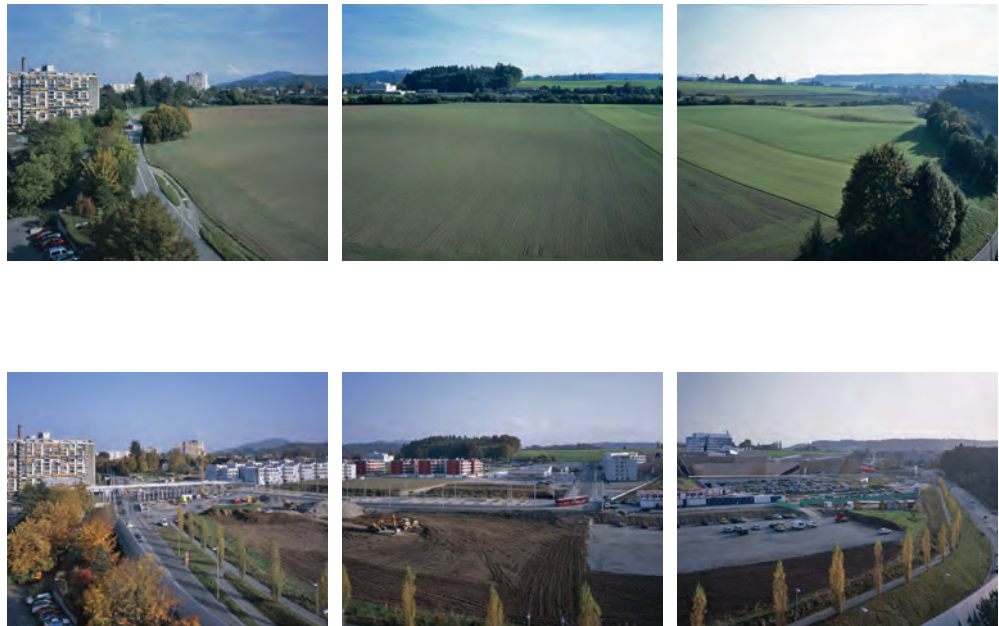
terschiedlich genau, sodass die Inventare interkantonal kaum vergleichbar sind¹⁵⁰. Einer der Hauptgründe für diesen Missstand sind fehlende bodenkundliche Planungsgrundlagen in den Kantonen. Die wichtigsten Bodenkennwerte zur Ausscheidung der FFF sind die pflanzennutzbare Gründigkeit, der Wasserhaushalt, der Skelettgehalt und die Zusammensetzung der Böden (Abb. 25, S. 61)⁴⁶. Mit einer landesweiten Bodenerhebung würden Bund und Kantone über fundierte und verlässliche Datengrundlagen für den Vollzug des SP FFF verfügen.

Für die Beurteilung von Sonderfällen oder die Neuausscheidung von FFF hat das Bundesamt für Raumplanung (ARE) 2006 eine Vollzugshilfe für den SP FFF erarbeitet¹⁵¹. Neben Standortfaktoren wie Klimazone, Parzellengrösse und Hangneigung wird für die Neuausscheidung von FFF eine pflanzennutzbare Gründigkeit von

mindestens 50 Zentimetern vorausgesetzt, und weitere Kriterien bezüglich der Lagerungsdichte und des Schadstoffgehalts in Böden werden definiert. Die Kriterien gelten als Mindestanforderung an die Boden- und Standortqualität. Für die Erarbeitung der kantonalen FFF-Inventare kommen zurzeit unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Auch werden die Kriterien verschieden angewendet¹⁵². Manche Kantone begrenzen die Höhe für die Klimaeignung auf 600 m ü. M., andere auf 900 m ü. M., manche rechnen Flächen mit einer Hangneigung zwischen 18 und 25 Grad bedingt als FFF an, und die Erhebung der pflanzennutzbaren Gründigkeit wurde in den Kantonen mit unterschiedlichen Methoden ausgeführt¹⁵⁰. Insgesamt zehn Kantone stützen ihre FFF-Definition derzeit vollständig auf die landwirtschaftliche Nutzungseignung gemäss FAL 24 ab (Abb. 26, S. 62). Bei den restlichen Kantonen richten sich die Datengrundlagen

Abbildung 24
Landnutzungsänderung im
Gebiet Bern-Westside zwischen
2002 (oben) und 2008 (unten).

Quelle: ETH-Bibliothek Zürich;
Bildarchiv/Stiftung Documenta Natura



nach der Vollzugshilfe von 1983, die sich lediglich auf grobe Übersichtskarten im Massstab 1:200 000 abstützt, beispielsweise die Klimaeignungs- und Bodeneignungskarte aus den 1970er-Jahren¹⁵⁰.

Die Politik hat diesen Handlungsbedarf erkannt: Die parlamentarische Verwaltungskontrolle hat 2015 eine Evaluation¹⁵³ zur Sicherung des landwirtschaftlichen Kulturlands mit besonderer Beachtung der Fruchtfolgeflächen zuhanden der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates (GPK-N) durchgeführt¹⁵⁴. Die Kommission kritisiert unter anderem die genannten Defizite wie die mangelnde Vergleichbarkeit der FFF-Inventare. Des Weiteren wird bemängelt, dass viele Kantone die Qualität ihrer Böden nicht flächendeckend erhoben haben. Im Rahmen der Vollzugshilfen zum SP FFF hätte die Bundesverwaltung die Möglichkeit, einheitliche Anforderungen an die

Ausscheidung von FFF zu stellen¹⁵⁴. Bis Ende 2017 erarbeitet eine Expertengruppe Empfehlungen für die Überarbeitung und Stärkung des SP FFF. Eine landesweite Kartierung der Böden für eine zuverlässige und einheitliche Ausscheidung von FFF wird eine der zentralen Empfehlungen der Expertengruppe sein.

2.8 Instrumente für den Bodenschutz

Eine Verminderung oder gar der vollständige Verlust der Bodenqualität droht Böden nebst der Versiegelung in erheblichem Masse durch chemische Belastungen, Erosion, Verdichtung, Verlust an Bodenbiodiversität und Humus. Diese Gefährdungen für den Boden können im Falle von Verdichtung oder Erosion in nur Minuten eintreten oder bei diffusen Schadstoffeinträgen oder Humusverlust über Jahre bis Jahrzehnte sehr langsam und schleichend wachsen. Schon

Abbildung 25
Schema für die Inventarisierung der Fruchtfolgeflächen. Viele Bodeneigenschaften bestimmen deren Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung. Mit der Bodenkartierung werden die relevanten Bodeneigenschaften über die Tiefe erhoben und die Fruchtfolgeflächen anhand von Bewertungsschemas bestimmt.

Quelle: M. Zürrer, myx GmbH; A. Keller, Agroscope

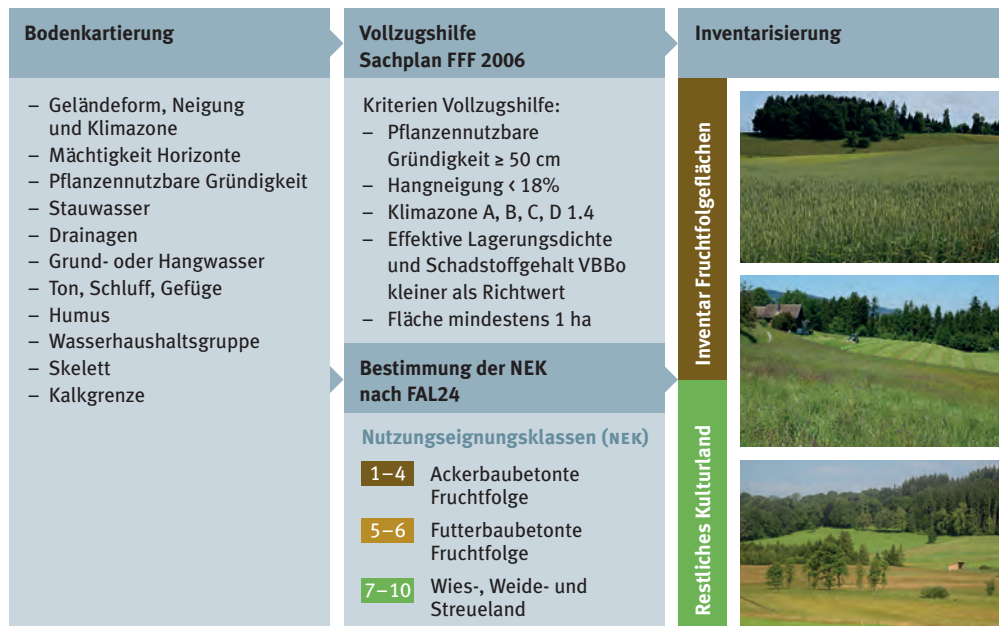


Abbildung 26
 Bodenkarte als Basis für die Bewertung der landwirtschaftlichen Eignung der Böden (NEK) und zur Ausscheidung von FFF. Beispiel Kanton Zürich (1 : 5000).

Die Farben geben die Wasserhaushaltsklassen der Böden an.

Quelle: www.gis.zh.ch



vor 25 Jahren standen diese Gefährdungen in mehreren Projekten des NFP 22 im Zentrum. Viele der damaligen Ergebnisse und Handlungsempfehlungen haben auch heute noch Gültigkeit^{103, 155}. Der «Zustandsbericht Boden 2017»¹⁵⁶ stellt fest, dass verschiedene Massnahmen zwar zur Stabilisierung oder sogar zur Abnahme bestimmter Gefahren geführt haben, insgesamt aber mit der Lebensgrundlage Boden nicht nachhaltig umgegangen wird. Der Bericht stützt sich vor allem auf Einzelinformationen des Bundes, der Kantone und aus Forschungsprojekten, eine landesweite Übersicht über das Ausmass und den Umfang der Gefahren für den Boden existiert bisher aber nicht.

In der Landwirtschaft wurden die Umweltziele hinsichtlich der Verminderung von Schadstoffeinträgen und des Schutzes vor Erosion und Bodenverdichtung entweder verfehlt, oder es waren wegen

mangelnder Informationen keine Aussagen möglich²⁴. Im Weiteren befasst sich eine umfassende Bestandsaufnahme im deutschen Sprachgebiet mit den Gefahren für den Boden aus Sicht der Praxis und des Vollzugs im Bodenschutz¹.

Die Gesetzgebung und der Vollzug konzentrierten sich hinsichtlich des Bodenschutzes in den letzten Jahrzehnten vor allem auf die Verminderung oder Vermeidung von Gefährdungen wie Bodenerosion, Bodenverdichtung und Schadstoffeinträgen. Die thematischen Synthesen TS1¹⁵⁷ und TS2¹⁵⁸ des NFP 68 gehen vertieft auf die wissenschaftlichen Kenntnisse zu den Gefährdungen des Bodens im Zusammenhang mit der Nutzung der Böden und auf geeignete Massnahmen für eine nachhaltige Nutzung der Böden ein. Die vorliegende TS4 zielt darauf ab, einen Überblick über die praxistauglichen Instrumente zur Quantifizierung und Bewertung von Gefährdungen für den Boden zu geben, die für den Vollzug von Bedeutung sein können. Instrumente in diesem Sinne sind Ansätze, Bewertungsschemata oder Umweltmodelle, die es erlauben, aus Bodeninformationen, Bewirtschaftungsdaten und anderen Standortfaktoren interpretierte Kenngrössen für den Vollzug im Bodenschutz abzuleiten und Massnahmen für eine nachhaltige Nutzung der Böden zu formulieren (Tab 7, S. 63).

Bodenverdichtung

Die Verdichtung des Bodens beeinflusst die Bodenqualität. Die Risiken steigen mit zunehmendem Gewicht der in der Land- und Waldwirtschaft eingesetzten Fahrzeuge. Gefürchtet sind vor allem die Langzeitfolgen von Verdichtungen des Unterbodens, da die Strukturregeneration in tieferen Bodenschichten nur langsam abläuft. Das Modell TERRANIMO (www.terranimoch) hilft den Nutzenden, das aktuelle Boden-

Tabelle 7
Instrumente zur Berechnung beziehungsweise Bewertung von Gefährdungen für den Boden (die Versiegelung wird in TS3 behandelt).

Gefährdungen für den Boden	Instrument und Projekt
Bodenverdichtung	NFP 68-Projekt BODENVERDICHTUNG (T. Keller, Agroscope) TERRANIMO : Modell zur Berechnung des Bodenverdichtungsrisikos beim Einsatz landwirtschaftlicher Fahrzeuge (T. Keller, Agroscope)
Bodenerosion	Potenzielles Erosionsrisiko für landwirtschaftliche Nutzflächen (Erosionsrisikokarte [ERK2], V. Prasuhn, Agroscope)
Humusverlust	NFP 68-Projekt KOHLLENSTOFFEINTRAG (J. Mayer, Agroscope) NFP 68-Projekt MOORBÖDEN (J. Leifeld, Agroscope)
Eintrag von Nähr- und Schadstoffen	NFP 68-Projekt FRÜHWARNSYSTEM (A. Keller, Agroscope) NFP 68-Projekt LANDNUTZUNGSMODELL (A. Keller, Agroscope) NFP 68-Projekt BODENVERBESSERENDE ANBAUSYSTEME (R. Charles, Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL) NFP 68-Projekt GRÜNDÜNGUNG (B. Streit, Berner Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL) NFP 68-Projekt ANTIBIOTIKARESISTENZ (B. Duffy, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, ZHAW) MODIFUSS : Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer (V. Prasuhn, Agroscope) FROSCH : Früherkennung organischer Schadstoffe in Böden (T. Bucheli, Agroscope)
Versauerung	Risiko der Versauerung von Waldböden (S. Zimmermann, wsl)
Landrutschungen	NFP 68-Projekt BODENSTABILITÄT (F. Graf, Institut für Schnee- und Lawinenforschung, WSL-SLF)

verdichtungsrisiko beim Einsatz landwirtschaftlicher Fahrzeuge zu erfassen. Erforderlich für die Verwendung sind nebst Maschinendaten (Radlast und Reifendruck) Informationen zum Tongehalt des Bodens und zur Bodenfeuchte (Saugspannung). Letztere ist im Bodenfeuchtemessnetz (Kap. 2.4, S. 42) ersichtlich. Ein Vorsorgeinstrument wie **TERRANIMO** ist für die Praxis insofern sehr wichtig, als sich die Regeneration eines Verdichtungsschadens doch mitunter über Generationen erstrecken und hohe Folgekosten generieren kann. Um die Regeneration verdichteter Böden bei unterschiedlichen Nutzungen und Kulturen über längere Zeit

zu beobachten, wurde im Rahmen des NFP 68-Projekts **BODENVERDICHTUNG** der Langzeitfeldversuch «Soil Structure Observatory» (sso) als Verbundprojekt durchgeführt¹⁵⁹.

Bodenerosion

Mit der landesweiten Erosionsrisikokarte im 2 × 2-Meter-Raster (**ERK2**) verfügt die Schweiz über ein Instrument, um gezielte Massnahmen für den Schutz der Böden vor Erosion zu ergreifen. Die **ERK2** ist auf der Geodaten-Plattform des Bundes verfügbar (www.geo.admin.ch), wird gegenwärtig aktualisiert und soll ab 2018 in einer benutzerfreundlichen Form für den

Vollzug zur Verfügung stehen^{160,161}. Das berechnete Erosionsrisiko wird verschiedenen Gefährdungstufen zugeordnet und mit Ampelfarben dargestellt. Um die Berechnung des Bodenerodibilitätsfaktor (K-Faktor) und damit die Qualität der Erosionsrisikokarte zu verbessern, sind landesweite Informationen zu den Ton- und Schluffgehalten in Oberböden erforderlich.

Humusverlust

Der Humusgehalt der Böden ist eine Schlüsselgrösse für die Bodenqualität. Der Humus spielt eine zentrale Rolle für die Stabilität der Bodenstruktur, die Porenverteilung und damit für den Wasser- und Lufthaushalt, die Aktivität der Bodenorganismen sowie für die Speicherung und Nachlieferung von Nährstoffen. Die TS1 und die TS2 behandeln den Humushaushalt und die nachhaltige Bewirtschaftung der Böden ausführlich. Das NFP 68-Projekt MOORBÖDEN entwickelte ein Instrument zur Bewirtschaftung organischer Böden, wie sie im Berner Seeland vorkommen. Eines der wesentlichen Ziele bestand darin, Merkmale zu identifizieren. Um den Einfluss der landwirtschaftlichen Produktion auf die Moorböden zu bewerten, schlägt das Projekt Indikatoren auf den Ebenen «Parzelle», «Betrieb» und «Region» vor. Für deren Einsatz ist es notwendig, die organischen Böden in der Schweiz zu erfassen, wie dies seit einigen Jahren für die rund 5000 Hektaren im Grossen Moos zwischen Bieler-, Neuenburger- und Murtensee diskutiert wird. Eine entsprechende Erhebung lieferte die essenziellen Planungsgrundlagen, um einen Konzeptplan für die von den Landwirten geforderten Bodenaufwertungen und Terrainveränderungen erarbeiten zu können¹⁶².

Ein Hilfsmittel, das die nachhaltige Nutzung der Böden im Hinblick auf den Humushaushalt unterstützen kann, stellt der Humusbilanz-Rechner für Ackerböden dar, den die Forschungsanstalt AGROSCOPE kostenlos zur Verfügung stellt (www.humusbilanz.ch). Er bietet Informationen, wie die Humusbilanz-Ergebnisse interpretiert und negative Humusbilanzen wieder ins Gleichgewicht gebracht werden können. Damit können Landwirte abschätzen, ob die aktuelle Bewirtschaftung den Humusgehalt stabil hält, fördert oder ob ein Risiko für Humusverlust besteht. Einen wichtigen Beitrag zur Berechnung der Humusbilanzen leistete das NFP 68-Projekt KOHLENSTOFFEINTRAG. Es untersuchte die Auswirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf den Eintrag von Bodenkohlenstoff durch Ackerkulturen. Die ermittelten Eintragsfaktoren verbessern die Berechnung von Humusbilanzen.

Ein günstiger Humusgehalt in Ackerböden beeinflusst die Stabilität der Bodenstruktur und ist zusammen mit dem Tongehalt im Boden ein Indikator für die Bodenstabilität¹⁶³. Das Projekt STRUDEL untersuchte Humusgehalte in Bezug auf ihren Beitrag zur Bodenstruktur und entwickelte einen Indikator, der das Verhältnis von Kohlenstoffgehalt zu Tongehalt des Bodens abbildet, sowie ein Bewertungsschema. Ein Verhältnis von 1:8 oder grösser wird für den Humusgehalt als ideal betrachtet, während Verhältnisse von 1:13 oder kleiner Massnahmen für eine Verbesserung der Humusgehalte in Ackerböden anzeigen¹⁶⁴. Der Indikator wird im Kanton Genf bereits eingesetzt.

Eintrag von Nähr- und Schadstoffen

Bei der landwirtschaftlichen Nutzung der Böden werden zusammen mit den Düngemitteln und Hilfsstoffen nebst erwünsch-

ten Nährstoffen auch Schadstoffe ausgebracht, die sich längerfristig im Boden anreichern. Bei übermässigem Eintrag können die absichtlich oder unabsichtlich zugeführten Stoffe nicht nur die Bodenqualität beeinträchtigen, sondern den Boden auch zu einer Quelle von Schadstoffen für andere Umweltbereiche und letztlich auch für die menschliche Gesundheit machen. Kritisch wird es insbesondere, wenn Nitrat, Pestizide, Arzneimittel oder andere biologisch hochwirksame Substanzen ins Grundwasser gelangen. Das NFP 68-Projekt FRÜHWARNSYSTEM entwickelte ein regionales Boden-Monitoring-Tool, das die Optimierung regionaler Nährstoffkreisläufe in der Landwirtschaft unterstützen und dazu beitragen soll, Schadstoffeinträge in die Böden zu vermeiden (Abb. 27, unten)^{165, 166}. Es erlaubt, nicht nachhaltige Entwicklungen in einer Region frühzeitig zu erkennen, und anhand von Szenarien lassen sich auf regionaler Ebene geeignete Massnahmen aufzeigen.

Da die Gefährdungen des Bodens an die Landnutzung gekoppelt sind, stellen räumlich-zeitlich detaillierte Informatio-

nen zur Landnutzung eine wichtige Datengrundlage dar, um Lage und Umfang möglicher Gefährdungen zu bestimmen. Für landwirtschaftlich genutzte Böden ist dabei die Unterscheidung zwischen Acker- und Grasland entscheidend. Das NFP 68-Projekt LANDNUTZUNGSMODELL entwickelte ein Modell zur flächendeckenden Erfassung der jährlichen und langfristigen Acker- und Graslandnutzung auf der Basis von Zeitreihen von Fernerkundungsdaten (Abb. 28, S. 66)¹⁶⁷.

Für rund die Hälfte der landwirtschaftlichen Fläche im Schweizer Mittelland fand zwischen 2000 und 2015 mindestens ein Wechsel beziehungsweise eine Rotation zwischen Gras- und Ackerland statt, während lediglich 38 Prozent permanent als Grasland und 17 Prozent permanent als Acker genutzt wurden¹⁶⁷, woraus sich die Bedeutung der Landnutzungswechsel für die Schweizer Landwirtschaft ablesen lässt.

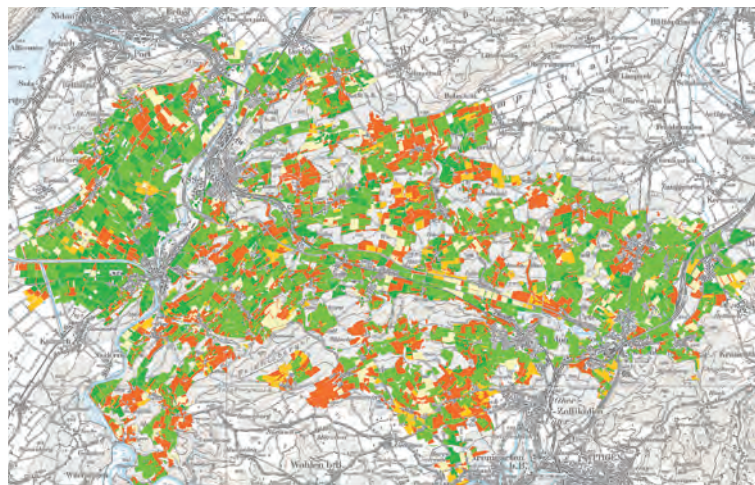
Mit dem Stoffflussmodell MODIFFUS (Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer) steht ein Emis-

Abbildung 27
Regionales Boden-Monitoring-Tool für ausgeglichene Stoffkreisläufe: mittlere Phosphorbilanzen der Jahre 2010 bis 2014 für Fallstudiengebiete im Berner Seeland¹⁶⁵.

NFP 68-Projekt FRÜHWARNSYSTEM

Phosphorbilanz in kg pro Hektare und Jahr:

- < -20
- -20 bis -5
- -5 bis 5
- 5 bis 20
- > 20
- nicht bilanziert



sionsmodell zur Verfügung, mit dem die Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen wie oberflächlicher Abschwemmung, Erosion und Auswaschung in die Gewässer berechnet werden können¹⁶⁸. Mit diesem empirischen Modell wurden diffuse Stickstoff- und Phosphorauswaschungen in die Gewässer flächendeckend für die Schweiz modelliert und Massnahmenkombinationen analysiert, mit denen die diffusen Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz im Zeitraum von 2010 bis 2025 vermindert

werden sollen¹⁶⁹. Das Modell ist unter anderem auf Bodeninformationen wie Nährstoffgehalte und flächendeckende Bodeneigenschaften angewiesen. Aufgrund mangelnder flächendeckender Bodeninformationen wurden die Bodeneigenschaften in den bisherigen Studien aus einem Mosaik verschiedener kantonaler Bodenkarten und der Bodeneignungskarte (BEK200) abgeleitet.

Abbildung 28
Landnutzungsklassen der Gras-Ackerland-Rotationen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Schweizer Mittelland von 2000 bis 2015. Basis: jährliche Klassifikationen von Landsat-Fernerkundungsdaten¹⁶⁷.

NFP 68-Projekt LANDNUTZUNGSMODELL

Dauernutzung:

■ Wiese/Weide

■ Acker

Dominante Graslandnutzung:

■ Wiese/Weide +

■ Wiese/Weide –

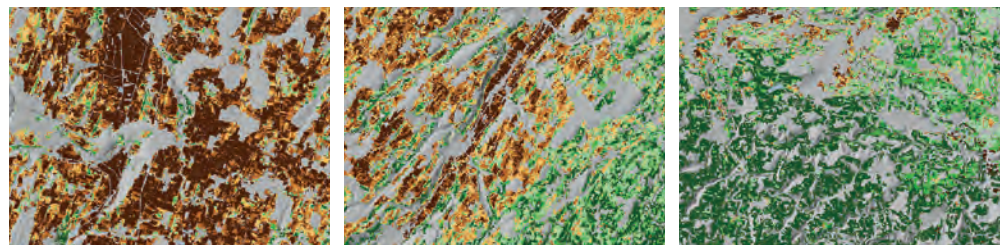
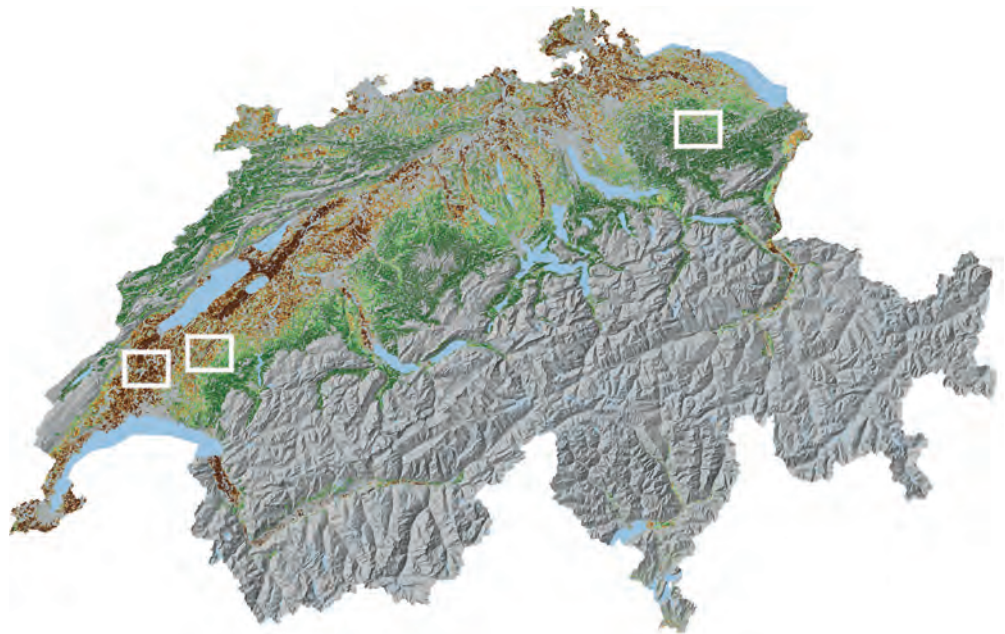
Dominante Ackerlandnutzung:

■ Acker +

■ Acker –

Die Symbole + / – indizieren die Anzahl der Gras-Ackerland-Rotationen, die Dauer konsistenter Landnutzung und die Aktualität konsistenter Landnutzung.

Räumliche Auflösung:
30 x 30 Meter.



2.9 Fazit

Für viele Politikbereiche liefern Bodeninformationen wichtige Entscheidungsgrundlagen. Die Interessen zur Nutzung von Bodeninformationen sind vielfältig. Nachgefragt werden vor allem interpretierte Produkte wie Anwendungskarten für Gefährdungen von Böden oder Bodenkennwerte, die auf Basis von Bodenkartierungen erstellt werden können. Dem grossen Bedarf an Bodeninformationen stehen grosse Datenlücken und eine fehlende nationale Koordination gegenüber: Für lediglich 10 bis 15 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche liegen Bodeninformationen in ausreichender Qualität vor.

Der Wertschöpfungszyklus der Bodeninformationen ist auf Bundesebene und in vielen Kantonen unterbrochen. Entsprechend gross ist der Handlungsbedarf. Hiervon zeugt auch die grosse Zahl politischer Vorstösse (Anhang 1)¹⁹⁰. Bezüglich der Verwendung einheitlicher Methoden sowie der Koordination besteht in der Schweiz ein Vakuum. Die Bundesämter und Kantone befinden sich deshalb in einer misslichen Lage: Da die Bodenkartierung in kantonalen Kartierungsprojekten unterschiedlich umgesetzt oder weiterentwickelt wurde, ging der nationale Referenzstandard verloren und es kam kaum zu technischen Innovationen. Kapitel 3 beleuchtet die Weiterentwicklung der bestehenden Kartierungsmethode und zeigt Wege für die Umsetzung auf.

Landesweite Bodeninformationen werden mit Instrumenten in Wert gesetzt, die es erlauben, aus Bodeninformationen, Bewirtschaftungsdaten und anderen Standortfaktoren Gefährdungen für die Böden zu bewerten. Zudem wurden Instrumente entwickelt, um ihr Leistungsver-

mögen (Bodenfunktionen) zu quantifizieren sowie interpretierte Kenngrössen für den Vollzug im Bodenschutz abzuleiten. Ein wesentlicher Faktor für einen funktionierenden Wertschöpfungszyklus sind aber auch die personellen Ressourcen. Der Vollzugsnotstand im Bodenschutz ist klar ausgewiesen¹⁴. Im kantonalen Bodenschutzvollzug mangelt es ebenso wie auf Bundesebene an personellen Ressourcen, um einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Boden in der Praxis gewährleisten zu können.

3.1 Ziele und Umfang

Bodeninformationen bilden die Grundlage für den Wertschöpfungszyklus, der eine effiziente und ressourcenorientierte nationale Bodenpolitik sicherstellen soll. Ausgehend von der Analyse des Bedarfs an Bodeninformationen, dem Stand der Bodenkartierung in der Schweiz und in der EU, den vorhandenen Instrumenten und dem Vollzugsdefizit beim Bodenschutz propagiert die vorliegende TS4 eine Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH), die als Informations- und Serviceplattform dienen soll. Die BIP-CH stellt eine Drehscheibe für Bodeninformationen und daraus abgeleitete Produkte dar, die die umfangreichen und vielfältigen Informationsbedürfnisse der verschiedenen Bedarfsgruppen abdecken. Im Wertschöpfungszyklus der Bodeninformationen bildet die BIP-CH den Motor, der den Wertschöpfungszyklus in Bewegung hält.

Den Bedarf für eine BIP-CH sowohl für die Praxis im Bodenschutz als auch die zahlreichen Politikbereiche und die Forschung verdeutlicht Kapitel 2.1 (S. 22) eindrücklich. Bedarf besteht vor allem an räumlich hochaufgelösten Bodeninformationen im Mittelland im Kartierungsmaßstab von mindestens 1:5000 sowie interpretierten Anwendungskarten, die Aussagen zur Nutzung und zum Schutz der Böden auf Parzellenebene und für verschiedene Bodentiefen erlauben. Auch für die Böden in den Voralpen und im Sömmerungsgebiet besteht ein Bedarf an Bodeninformationen. Die BIP-CH soll deshalb umfassend Auskunft über Bodeneigenschaften und Bodenkennwerte geben – mit je nach der Definition der zu kartierenden Gebiete variabler räumlicher Auflösung. Zudem soll sie spezifische, thematisch interpretierte Bodeninformationen für die Bewertung von Bodenfunktionen und Gefahren

für den Boden bereitstellen. Anders als bei vielen bisherigen Erhebungen soll der Fokus bei der Multifunktionalität der Böden liegen und nicht nur bei der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung.

Die Schaffung einer BIP-CH stellt ein ambitioniertes Projekt dar und benötigt mehrere langjährige Etappen. Die TS4 formuliert die wichtigsten Eckpunkte für ein solches Projekt. Fragen zur organisatorischen und technischen Umsetzung bleiben zu klären. Basierend auf bisherigen Studien und Vorarbeiten^{20,50,170} sowie den Erfahrungen aus dem NFP 68-Projekt *BODENKARTEN*, skizziert die TS4 eine Vision für den Weg zu einer BIP-CH. Vier Eckpfeiler werden nachfolgend beschrieben:

Bedarf und Instrumente

Welche Nutzerinteressen für Bodendaten bestehen? Welche Bodendaten sind notwendig, um thematisch breit für verschiedene Nutzende spezifische und leicht interpretierbare Bodeninformationen zu generieren? Mithilfe welcher Instrumente lassen sich Bodendaten und Kennwerte mit einer Beurteilung von Gefährdungen für den Boden und Bodenfunktionen zuhanden des Bodenschutzvollzugs und einer nachhaltigen Bodenpolitik verknüpfen?

Methode der Bodenkartierung und Infrastruktur

Mit welcher Methode sollen Bodendaten künftig erhoben werden? Welche technischen Varianten, Infrastrukturen und Erweiterungen der bestehenden Bodenkartierungsmethode sind notwendig?

Masstab und Vorranggebiete

Mit welcher räumlichen Auflösung müssen Bodeninformationen für die verschiedenen Regionen der Schweiz und für verschiedene Landnutzungen erzeugt werden? Für welche Gebiete müssen

Bodeninformationen zeitlich prioritär bereitgestellt werden (Vorranggebiete)? Welche zeitliche Etappierung für die Kartierung ist sinnvoll?

Informationsplattform

Wie können die generierten Bodeninformationen für Nutzende verfügbar gemacht werden? In welche organisatorischen und institutionellen Strukturen ist die BIP-CH einzubetten?

3.2 Minimalset an zu erhebenden Bodeninformationen

Tabelle 3 (S. 34) zeigt den Bedarf an Bodeneigenschaften und Bodenkennwerten auf und spiegelt den Bedarf gegenüber dem gegenwärtigen Stand der erhobenen Bodeninformationen mit der Kartierungsmethode FAL24+^{20,46}. Die heutige Erhebungsmethode deckt zwar die meisten nachgefragten Bodeninformationen ab, doch besteht Ergänzungsbedarf vor allem für bodenphysikalische Bodeneigenschaften und Kennwerte, bei der Bodenbiologie und den Nährstoffgehalten in Böden. Bisher wurden nur wenige Ergänzungen vorgeschlagen (z.B. Bodenmächtigkeit, Makroporosität, Bodenbiodiversität)⁵⁰. Kritisiert wird insbesondere die unbefriedigende Charakterisierung der Tiefenverteilung von Bodeneigenschaften und -kennwerten; eine Erhebung von metrischen Schätzwerten wird empfohlen¹⁷⁰. Die bisherige Angabe von Bodeneigenschaften für Ober- und Unterboden ist für einige Instrumente zum Schutz vor Gefährdungen für den Boden zwar hinreichend, für viele Fragestellungen sind jedoch präzisere Daten über die Tiefenverteilung von Bodeneigenschaften erforderlich. Die Frage nach einer Erweiterung um Messwerte über die Tiefe ist eng verbunden mit der Anwendung von Analysemethoden im Feld und Labor.

Mit Fokus auf die Bewertung von Bodenfunktionen legte das NFP 68-Projekt BODENKARTEN ein minimales Set an Bodeninformationen fest. Grundlage dafür bildeten über dreissig Bewertungsmethoden aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Erweiterungsbedarf für ein minimales Set an Bodeninformationen besteht wie folgt:

1. Die Porosität und Lagerungsdichte der Böden wird für fast alle Bewertungsmethoden benötigt.
2. Für die Herleitung der Bodenkennwerte wurden die für deutsche Böden entwickelten PTF der deutschen Kartierungsanleitung benutzt; es muss geprüft werden, inwiefern diese auf Schweizer Verhältnisse übertragbar sind beziehungsweise korrigiert werden müssen.
3. Die Vernässungseigenschaften der Böden sind wichtig bei der Umsetzung der Bodenfunktionsbewertung. Mit Informationen zur genauen Lage und Mächtigkeit der Horizonte mit Vernässungseigenschaften könnte die Bewertung von Bodenfunktionen verbessert werden.
4. Die flächenhaften Informationen für Ober- und Unterboden sind nur bedingt geeignet für eine Bodenfunktionsbewertung. Eine Tiefenverteilung von Bodeneigenschaften bis mindestens 1 Meter Tiefe (für tiefgründige Böden) ist eine Voraussetzung für die Funktionsbewertung.

Für eine BIP-CH muss die Liste der Bodenkennwerte nach FAL24+ demnach ergänzt werden. Im Rahmen von Fallstudien ist zu evaluieren, welche der vorgeschlagenen Bodeneigenschaften und Kennwerte in Bodenkartierungen zusätzlich erhoben werden sollen und wie dies kostengünstig erfolgen kann.

3.3 Bodenkartierung der Zukunft

Bis zur Jahrtausendwende dienten Bodenkarten primär landwirtschaftlichen Zwecken. Die dazu erhobenen Bodeninformationen reichten zur Bonitierung landwirtschaftlicher Grundstücke mittels Bodenpunktzahl und zur Planung von Entwässerungsmassnahmen aus. Auch konnten damit Bodenschutzvollzugsaufgaben bearbeitet werden (Kap. 2.2, S. 34). Die Kartierungsmethodik FAL24¹²⁰ entwickelte der Kanton Solothurn zur FAL24+²⁰ weiter. Diese Methode wird heute bei Bodenkartierungsprojekten angewendet und hat sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen bewährt.

In den letzten beiden Jahrzehnten wurden jedoch auch für Teilbereiche der Bodenkunde neue technisch-wissenschaftliche Methoden zur Untersuchung von Böden vorangetrieben. Mittels Digital Soil Mapping (DSM) beziehungsweise der Auswertung mathematisch-statistischer Beziehungen zwischen Bodeneigenschaften und Geo- und Umweltdaten (z.B. Geologie, Relief, Klima) werden Karten von Bodeneigenschaften generiert^{171–173}. DSM-Methoden können als «Werkzeugkasten» für die Bearbeitung spezifischer Fragestellungen einer Bodenkartierung verstanden werden¹⁷⁴. Das Methodenspektrum für DSM umfasst eine breite Palette wie Stichprobenverfahren, Prozessierung von Geo- und Umweltdaten, Nutzbarmachung von Nah- und Fernerkundungsdaten, Pedo-Transferfunktionen zur Ableitung von Bodenkennwerten, digitale Reliefanalyse (Kennwerte aus Höhenmodell), räumliche Prognosen, geophysikalische Messverfahren zur Erfassung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften (z.B. Georadar, elektromagnetische Messverfahren, GAMMA- oder NIR-Spektroskopie) oder die Berech-

nung von Tiefenfunktionen für Bodeneigenschaften¹⁷². Im Gegensatz zum Ausland kamen solche DSM-Ansätze in der Schweiz bisher kaum zum Einsatz. Es stellt sich aber die Frage, wie diese Technologien zur Weiterentwicklung der Bodenkartierungsmethodik genutzt werden können. Das NFP 68-Projekt BODENKARTEN setzte einige der DSM-Methoden ein und gewann daraus folgende Erkenntnisse:

Verwendung von Umweltdaten

Zur Modellierung der räumlichen Muster von Bodeneigenschaften wurden mehr als 400 Geo- und Umweltdatensätze zusammengeführt und ausgewertet^{175, 176}. Der Aufwand für die Zusammenführung und Auswertung einer derart grossen Zahl von Datensätzen ist zu gross für die relativ kleinen Kartierungsprojekte, wie sie heute typischerweise durchgeführt werden. Das NFP 68-Projekt BODENKARTEN hat gezeigt, dass es kaum einen Mehraufwand verursacht, die Umweltdaten für mehrere oder grössere Gebiete vorzubereiten. Es wird deshalb vorgeschlagen, vorbereitende Arbeiten koordiniert für grössere Gebiete durchzuführen.

Verwendung älterer Bodendaten

Sollen Bodendaten früherer Projekte für die digitale Bodenkartierung verwendet werden, ist die Harmonisierung dieser Daten unabdingbar. Die Harmonisierung ist methodisch anspruchsvoll und muss durch Bodenfachleute in Zusammenarbeit mit Spezialisten durchgeführt werden. Es gilt allerdings den Trade-off zwischen dem Aufwand für die Harmonisierung alter Bodendaten und den Kosten für die Erhebung neuer Daten zu beachten.

Erhebung von Bodendaten in Kartierungsprojekten

Technische Neuerungen sollen für die Erhebung von Bodendaten geprüft und

gegebenenfalls implementiert werden. In Bodenkartierungsprojekten werden Bodendaten von fünf bis maximal zehn Profilen pro 100 Hektaren erhoben. Die zahlreichen Bohrungen im Gelände zur Erstellung einer Karte werden aber aus Kostengründen nicht dokumentiert, und es werden auch keine Bodenanalysen durchgeführt. Für die flächenhafte Prognose von Bodeneigenschaften wären solche aber sehr wertvoll. Sie sollten daher trotz Mehraufwand dokumentiert werden. Zudem sollten davon ebenfalls Bodenanalysen gemacht werden, vorzugsweise mit neuen Analysemethoden.

Grösse und Umfang von Kartierungsprojekten

Eine weitere Empfehlung aus dem NFP 68-Projekt BODENKARTEN bezieht sich auf die geografische Vorgehensweise und den Ablauf der Bodenkartierung. Massnahmen zur Verbesserung der Infrastruktur zahlen sich vor allem dann aus, wenn grössere Gebiete von mehreren tausend Hektaren kartiert werden. Mit der oben genannten Aufbereitung von Umwelt- und Bodendaten und technischen Neuerungen zur Bestimmung des Erhebungsplans ändern sich der Ablauf und die Organisation einer Bodenkartierung. Der Aufwand und der Nutzen eines derart angepassten Vorgehens sollen in mindestens einem Praxistest geprüft werden.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Um die Arbeitsschritte einer Bodenkartierung inklusive der Auswertung der Bodeninformationen abzudecken, bedarf es der Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen.

Die Diskussion um die Anwendung von DSM-Methoden in der Schweiz im Rahmen des NFP 68-Projekts BODENKARTEN hat zudem gezeigt:

- Der Einsatz transparenter, gut dokumentierter DSM-Methoden führt zu reproduzierbaren räumlichen Bodeninformationen.
- Es bestehen etablierte Modellansätze zur räumlichen Modellierung von Bodeneigenschaften.
- Der Umfang und die Verfügbarkeit von Geo- und Umweltinformationen sowie von Informationen aus Fern- und Naherkundung entwickeln sich rasant.
- Beim Einsatz von DSM-Methoden können Angaben zur Zuverlässigkeit der modellierten Bodeneigenschaften gemacht werden, während die Zuverlässigkeit von Bodenkarten bis heute nicht systematisch geprüft worden ist.
- Bodeneigenschaften variieren im Raum kontinuierlich, was modellierte Rasterkarten für einzelne Bodeneigenschaften und Kennwerte angepasst wiedergeben. Im Gegensatz dazu grenzt die bisherige Kartierungsmethodik auf Basis von Polygonen die räumlichen Einheiten für alle Bodeneigenschaften scharf ab, was nur in den seltensten Fällen der Realität entspricht.
- Neue Methoden und Geräte zur kostengünstigen Probenahme und Analyse von Bodeneigenschaften werden im Ausland in der Praxis bereits eingesetzt.

Bei der Skizzierung der BIP-CH sind neben diesen technologischen Entwicklungen auch die Rahmenbedingungen in der Praxis zu berücksichtigen:

- Bodeninformationen sind letztlich eigentumsrelevant und müssen sehr hohen Anforderungen genügen.
- Die Schweiz verfügt über eine weit entwickelte und bewährte feldbodenkundliche Methode, um Bodeninformationen zu erheben und in unterschiedlicher Form auszuwerten und darzustellen. Für das Berggebiet sind allerdings Anpassungen notwendig.

Aktuell herrscht unter Bodenkartierungsfachleuten in der Schweiz die Meinung vor, dass es «sehr anspruchsvoll» bis unmöglich sei, Bodeneigenschaften räumlich hoch aufgelöst und parzellenscharf, das heisst im Kartierungsmaassstab grösser als 1:5000, zu modellieren^{50,170}. «Sehr anspruchsvoll» bedeutet, dass für eine parzellenscharfe Modellierung mit DSM-Methoden viele Felderhebungen erforderlich sind, sodass dem Mehrwert im Vergleich zur gegenwärtigen Kartierungsmethode erhöhte Kosten gegenüberstehen. Doch wurde ein solches Vorgehen bisher weder in der Praxis geprüft, noch wurden neue und kostengünstige Analysemethoden eingesetzt.

Die Zurückhaltung der Praktikerinnen und Praktiker bei der Anwendung von DSM-Methoden liegt unter anderem daran, dass Bodenkartierungsprojekte in der Regel kleinräumig angelegt werden. Ein übliches Bearbeitungsgebiet erfasst rund 300 Hektaren. Für Flächen dieser Grössenordnung ist es pragmatisch, bewährte Methoden anzuwenden und sich vollständig auf empirische Erhebungen abzustützen. Eine umfangreiche Datenaufbereitung und Modellentwicklung für den Einsatz von DSM-Methoden für derart kleinräumige Gebiete sowie zusätzliche Felderhebungen und Bodenanalysen führen zu Mehrkosten, die die Auftraggeber nicht zu finanzieren bereit sind. Selbst bei bereits gegrabenen Bodenprofilen werden aus Kostengründen heute nicht für alle Horizonte die Bodeneigenschaften erhoben. Die Grösse eines Kartierungsgebiets und der Einsatz neuer Analysemethoden spielen somit für die Verwendung neuer technischer Methoden eine zentrale Rolle.

Die BIP-CH stellt ein Generationenprojekt dar, das die Chance bietet, Innovationen zu fördern und deren Nutzen sorgfältig

und umfassend zu evaluieren. Im Folgenden wird der Ablauf einer Bodenkartierung auf der bisherigen Grundlage (Kap. 2.2, S. 34) weiterentwickelt und aufgezeigt, für welche Arbeitsschritte die Ergänzung beziehungsweise das Potenzial für technische Innovationen zu prüfen ist (Abb. 29, S. 74).

Aufbereitung der Grundlagendaten

Die Auswertung aller georeferenzierten Geo- und Umweltdaten, die möglicherweise Informationen über die Bodenbildungsfaktoren im Kartierungsgebiet enthalten, bildet den Start eines Bodenkartierungsprojekts. Diese Informationen sind zentral für das Erstellen der Konzeptkarte in einem zweiten Schritt (Abb. 29). Nah- und Fernerkundungsdaten können hinzugezogen werden, beispielsweise multispektrale Satellitendaten (Landsat, MODIS, Sentinel usw.)¹⁷⁷. Sie liefern direkt Informationen über die Oberfläche brachliegender Böden und zeitlich differenzierte Angaben zur Landnutzung auf vegetationsbedeckten Flächen¹⁷⁸. Darüber hinaus wurden im Ausland auch Erfahrungen mit geophysikalischen Messverfahren wie der GAMMA-Spektrometrie gesammelt¹⁷⁹, die am Boden oder per Flugzeug eine flächendeckende Erfassung physikalisch-chemischer Eigenschaften im Oberboden erlaubt. Damit lassen sich beispielsweise Unterschiede im geologischen Ausgangsmaterial erkennen. Hochauflösende Informationen dieser Art sind für das Erstellen der Konzeptkarte von hohem Nutzen.

Erstellen der Konzeptkarte:

Zusammenspiel von Feldbodenkunde und modellbasierter Probenahmestrategie

In diesem Arbeitsschritt erarbeiten Kartierungsfachleute aus den vorhandenen Umwelt- und ersten Bodeninformationen eine Karte, die den Einfluss der dominanten Bodenbildungsfaktoren und die zu er-

wartenden Bodenverhältnisse im Kartierungsgebiet aufzeigt. Sie wird zur Auswahl der Standorte verwendet, an denen der Boden eingehend untersucht werden soll. Das Untersuchungsgebiet kann durch Klassifikationsverfahren (Clusteranalyse) der Umweltdaten in Teilgebiete unterteilt werden, in denen «relativ homogene» Umweltbedingungen zu erwarten sind¹⁷².

Anhand von Regressionsanalysen oder von überwachten Klassifikationsverfahren werden Bodendaten – sofern ausreichend in Umfang und Qualität vorhanden – mit den Geo- und Umweltdaten in Beziehung gesetzt. Daraus werden Prognosekarten von Bodeneigenschaften und -klassifikationsmerkmalen abgeleitet. Diese Informationen unterstützen Kartierende beim Erstellen der Konzeptkarte und können direkt für die Wahl der Standorte für Profiluntersuchungen und Bohrungen verwendet werden. Für Prognosen, die mit statistischen Verfahren erstellt werden, lässt sich die Genauigkeit quantifizieren und in Karten darstellen. Karten zur Prognosequalität erlauben den Kartierungsfachleuten ein zielgerichtetes Vorgehen bei der Wahl von Standorten für die Bodenuntersuchung.

Bodeninformationen sollten primär dort erhoben werden, wo die Prognosen unsicher sind. In diesem Sinne ist ein iteratives Vorgehen denkbar, indem schrittweise gefragt wird, für welche Teilgebiete schon viele zuverlässige Daten zur räumlichen Verteilung der Böden vorliegen und in welchen weitere Profilerhebungen erforderlich sind (Pfeile in Abb. 29, S. 74).

Standortwahl für Bohrungen

Statistische Stichprobenverfahren unterstützen Kartierungsfachleute bei der Wahl der Standorte, an denen Bohrungen erfolgen sollen. Sie stellen sicher, dass mit ei-

ner möglichst geringen Zahl von Standorten die Variationsbreite der «homogenen» Raumeinheiten aus der Konzeptkarte möglichst gut abgedeckt wird. Je nach Grösse des Gebiets und der erforderlichen Genauigkeit kann wiederum ein iteratives Vorgehen sinnvoll sein, bei dem nach Bedarf weitere Standorte untersucht werden, bis die räumliche und inhaltliche Abdeckung der Umweltdaten ausreichend ist (Abb. 29).

Probenahme und Analyse von Bodeneigenschaften und Bodenkennwerten: technische Innovationen

Die Entnahme und Aufbereitung von Bodenproben sowie die Analyse von Bodeneigenschaften sind einer der wichtigsten Kostenfaktoren bei einer Bodenkartierung. Neben den Feldschätzungen durch den Kartierenden werden Bodeneigenschaften bisher vor allem im Labor mit teuren, nasschemischen Methoden bestimmt. Auch in diesem Bereich fanden im letzten Jahrzehnt technische Innovationen statt. Kostengünstige Analysemethoden für verschiedenste Bodeneigenschaften werden im Ausland sowohl im Feld als auch im Labor angewendet. Vor allem spektroskopische Methoden, die die Reflexion im sichtbaren und im Infrarotteil des Lichtspektrums erfassen, wurden zur Praxistauglichkeit weiterentwickelt¹⁸⁰. Einmal im Labor geeicht, erlauben bodenspektroskopische Methoden, eine grosse Anzahl Analysen rasch und kostengünstig auszuführen. Der Aufbau der dazu notwendigen (nationalen) Spektralbibliotheken verursacht einen Initialaufwand, der sich bei grosser Probenzahl schnell bezahlt macht. In vielen Ländern der EU, aber auch weltweit, wurden bereits solche Spektralbibliotheken erstellt oder sind im Aufbau begriffen^{48,49}. Auch andere spektroskopische Messverfahren wie die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)

Arbeitsschritte Bodenkartierung FAL24+		Ergänzende Weiterentwicklung
<ul style="list-style-type: none"> – Projektformulierung – Schaffung Organisation und Finanzierung – Verbände, Grundeigentümer, Bewirtschafter, Gemeinde 	<p>1. Projektvorbereitung</p> <ul style="list-style-type: none"> Zielsetzung formulieren Mitwirkung/Zusammenarbeit der Stakeholder sichern 	<ul style="list-style-type: none"> – FAL24+-Standard-Datensatz ergänzen → Kapitel 3.2, S. 69
<ul style="list-style-type: none"> – Information über bodenbildende Faktoren sammeln und auswerten – In welchen Teilgebieten werden welche Böden vermutet, wie gut sind die Bodeneigenschaften bekannt? Wo sind die Wissenslücken? – Standortwahl der Bodenprofile in mehreren Schritten aufgrund bestehender Wissenslücken – Aufnahme Bodenprofil und Beschreibung, Beprobung und Analysen, Fotodokumentation 	<p>2. Grundlagen erarbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> Vorhandene Geo- und Umweltdaten aufbereiten Konzeptkarte erstellen Übersichtsbegehung und Evaluation Profilstandorte Dokumentation Bodenprofile 	<ul style="list-style-type: none"> – Prozessierung umfangreicher Geo- und Umweltdaten inklusive Nah- und Fernerkundungsdaten, evtl. Einbezug geophysikalischer Messverfahren – Überwachte Verfahren zur Klassifikation (Clusteranalyse) der Umweltdaten in Teilgebiete – Prognosekarten von Bodeneigenschaften – Iteratives Beprobungskonzept: statistische Stichprobenverfahren für die Wahl der Beprobungsstandorte
<ul style="list-style-type: none"> – In Abhängigkeit vom Stand der Arbeiten Kartiergrundlage zur Verfügung stellen – Auf Basis der Kartiergrundlage gezielte und repräsentative Standortwahl – Lage, Bodeneigenschaften und Kennwerte, Aussagen zur Variabilität – Abgrenzung von Flächen mit vergleichbaren Bodeneigenschaften (Polygone) – Laufende Eichung der Felderhebungen mit Analysen im Labor 	<p>3. Feldkartierung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kartierungsgrundlage («Feldkarte») erarbeiten Evaluation von Bohrstellen Dokumentation Bohrpunkte Konkretisierung Flächenbezug 	<ul style="list-style-type: none"> – Anwendung neuer Analysemethoden im Feld und Labor – Infrastruktur: Bohrfahrzeuge, Logistik, Bodenproben und -aufbereitung – Iteratives Beprobungskonzept: statistische Stichprobenverfahren für die Wahl der Beprobungsstandorte – Geostatistische Modelle, Modellierung, Tiefenverteilung der Bodeneigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> – Basisprodukte: Im Feld erhobene Bodeninformationen vollständig digital erfassen – Qualitätssicherung der Bodeninformationen – Korrektheit der Klassifikation und der Datenschlüssel – Plausibilisierung der Bodeninformationen und deren räumlicher Bezug zu Kartiereinheiten – Prüfung fachlicher und räumlicher Zusammenhänge, finale Qualitätssicherung 	<p>4. Qualitätssicherung</p> <ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung Datenprüfung Plausibilitätsprüfung Endkontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> – Standardisierte Eingabemasken zur digitalen Erfassung – Automatisierte Prüfung von Regeln – Regelwerk für die Plausibilisierung – Automatisierte Prüfung gemäss nationalem Referenz-Datenmodell
<ul style="list-style-type: none"> – Auswertungen für Anwendungskarten in Bezug zu Bodengefahren (Vollzug) und nachhaltige Nutzung, Karten für Bodenfunktionen, Karten mit interpretierten Kenngrößen je nach Nutzerinteressen 	<p>5. Auswertungen</p> <ul style="list-style-type: none"> Erstellung von bedarfsgerechten Produkten 	<ul style="list-style-type: none"> – Zusätzlich rasterbasierte Produkte gemäss Nutzerbedürfnissen, differenziert nach Bodeneigenschaft und Kennwerten möglich, Ausweisung der Zuverlässigkeit der modellbasierten Schätzungen

Abbildung 29
Arbeitsschritte der gegenwärtigen Kartierungsmethode und Vorschläge für die technischen Weiterentwicklungen¹⁷⁴.

eignen sich für die Messung bestimmter Bodeneigenschaften¹⁸¹. Diese Analysemethoden bieten den Vorteil, Bodeneigenschaften quasi kontinuierlich über die Tiefe erfassen zu können. Die Weiterentwicklung der Kartierungsmethode böte die Gelegenheit, die genannten sowie andere neue Analysemethoden in der Praxis umzusetzen und zu eichen.

Verbunden mit der Weiterentwicklung von Analysemethoden ist die Frage nach einer angepassten Infrastruktur für die Kartierung grösserer Gebiete. Fahrzeuge mit integrierter Bohreinrichtung, die die Entnahme von Bohrkernen erleichtern und eine grössere Anzahl Bohrungen pro Zeiteinheit ermöglichen, wurden bereits bei früheren Bodenkartierungen eingesetzt. Zur Effizienzsteigerung gilt es aber auch eine landesweite Infrastruktur für die Logistik von Bodenproben, für die Probenaufbereitung, die Bodenanalysen und die zentrale Archivierung von Bodenproben – für spätere Analysen und die spätere Anwendung allfälliger neuer Analysemethoden – aufzubauen, damit diese Arbeitsschritte möglichst rationell und für eine grosse Anzahl Bodenproben kosteneffizient gestaltet werden können.

Untersuchung von Bodenprofilen und Feldkartierung

Um die Qualität von Feldaufnahmen zu optimieren, sollte die Möglichkeit bestehen, während der Kartierungsarbeit gezielt Flächenmischproben im Labor untersuchen zu lassen oder mit neuen Methoden in situ zu untersuchen. Dadurch lassen sich die Felderhebungen eichen und überprüfen. Im Feld geschätzte Bodeneigenschaften (Feldschätzwerte) wurden bisher meist als Klassenwerte (z.B. «schwach skeletthaltig») und nicht als metrische Werte registriert. Eine derartige Kodierung birgt einen Informationsverlust in

sich und erschwert die Auswertung von Zeitreihen, wenn Kodierungsschemata geändert werden. In Zukunft sollten Feldschätzwerte deshalb wenn möglich als metrische Werte kodiert und durch eine Genauigkeitsangabe ergänzt werden⁵⁰. Sämtliche Daten aus der Feldkartierung sollten zudem dokumentiert und digital erfasst werden.

Die eigentliche Kartierung erfolgt weiterhin direkt im Feld – allerdings auf der Basis erweiterter Grundlagen. Karten von kontinuierlich variierenden Bodeneigenschaften können a posteriori mit statistischen Regressionsmodellen aus den vollständigen Bohr- und Umweltdaten berechnet werden. Aufgrund des beschriebenen iterativen Zusammenspiels von Feldbodenkunde und einer modellbasierten Probenahmestrategie ist allerdings zu erwarten, dass die Projektbearbeitung im Vergleich zu heute für kleinere Gebiete aufwendiger und länger dauern wird. Für grössere Gebiete hingegen von mehreren tausend Hektaren kann ein iteratives Vorgehen sehr effizient sein und den Gesamtaufwand pro kartierte Fläche minimieren.

Basisprodukte

Die polygonbasierte Bodenkarte und die Bodeninformationen aus den untersuchten Bodenprofilen sind die heute üblichen Basisprodukte einer Bodenkartierung. Sie stellen den Ausgangspunkt dar für verschiedene nutzerorientierte Auswertungen. Mit der Modellierung von Bodeneigenschaften lassen sich alternativ dazu Rasterkarten für die Darstellung räumlich kontinuierlicher Bodeneigenschaften generieren. Je nach Fragestellung und Bedarfsgruppe lassen sich auf diese Weise angepasste Wertgrenzen und Kartenprodukte wählen. Nebst Prognosen für eine Bodeneigenschaft können auch Angaben zur Zuverlässigkeit der Schätzung gemacht

werden. Die Rasterkarten sind reproduzierbar und lassen sich effizient nachführen, falls zu einem späteren Zeitpunkt neue Bodeninformationen vorliegen.

Fallstudien zur Weiterentwicklung der Kartierungsmethodik

Die vorgeschlagenen Erweiterungen und Änderungen der Kartierungsmethodik sind teilweise technisch sehr ausgereift. Es bedarf aber noch einer praktischen Umsetzung, damit sie in ein Kartierungsprojekt implementiert werden können. Dabei besteht weniger Forschungsbedarf als vielmehr Bedarf für die Umsetzung technischer Anwendungen im Feld beziehungsweise im Labor oder für die Überprüfung der beschriebenen iterativen Vorgehensweise. Apparate für spektroskopische Analysemethoden sind beispielsweise im Handel erhältlich, instrumentelle Vorrichtungen für ein Bohrfahrzeug oder für das automatische Scannen von Bohrprofilen im Labor jedoch kaum. Die technische Umsetzung sowie Nutzen und Kosten der oben genannten möglichen Weiterentwicklung einer Bodenkartierung sind deshalb im Rahmen von regionalen Fallstudien eingehend zu evaluieren. Die Studiengebiete sollten genügend gross gewählt werden, damit Skaleneffekte und die damit zusammenhängenden Kostenfaktoren zuverlässig abgeschätzt werden können. In weitgehender Übereinstimmung mit vorhandenen Studien^{50, 170} wird vorgeschlagen, folgende technischen Optionen für Bodenkartierungen in einer oder parallel in mehreren regionalen Fallstudien zu erproben:

Fallstudien zu Bedürfnisanalyse und minimalem Bodendatensatz

Festlegung des Datensatzes einer künftigen Bodenkartierung auf Basis der in TS4 erarbeiteten Grundlagen (Kapitel 2.1, S. 22 und 3.2, S. 69). Durch Integration ver-

schiedener Bedarfsgruppen soll der Datensatz überprüft und bereinigt werden.

Fallstudien zur Weiterentwicklung der Analytik und Infrastruktur

Die Anwendung neuer Analysemethoden für Feldarbeiten und Labor soll getestet und deren Potenzial für die Bodenkartierung ermittelt werden. Diese Arbeiten sind gekoppelt an die Optionen zur Verbesserung der Infrastruktur bezüglich Probenahme, Logistik, Apparaten und Labor. Für Bodenkennwerte, die mit herkömmlichen Methoden nur unbefriedigend bestimmt werden können, sollen Alternativen zur aktuellen Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik evaluiert werden beziehungsweise PTF für Schweizer Böden erarbeitet werden.

Fallstudien mit verändertem Ablauf: Erstellung einer Konzeptkarte und Wahl der Standorte für Bodenuntersuchungen

Die Chancen sind zu überprüfen, die sich durch den Einbezug umfassender Geo- und Umweltdaten sowie Nah- und Fernerkundungsdaten, aber auch durch die Prozessierung für das Erstellen einer Konzeptkarte ergeben. Zudem sind die Kosten für dieses Vorgehen abzuschätzen. Dabei sind Nutzen und Kosten eines iterativen Vorgehens bei der Erstellung der Konzeptkarte und der Wahl der Standorte für Bodenprofile und Bohrungen für unterschiedliche Regionen zu evaluieren.

Fallstudie zur Verknüpfung der als günstig beurteilten Bausteine einer weiterentwickelten Bodenkartierungsmethodik

Eine Machbarkeitsstudie für die weiterentwickelte Methode ist zu erarbeiten, die für den praktischen Einsatz im grossen Stil getestet werden soll. Für die Fallstudie ist eine Projektorganisation zu etablieren, in der die verschiedenen Fachdisziplinen zusammenarbeiten.

Die Erarbeitung der BIP-CH ist angesichts des Aufwandes auf eine möglichst aktuelle und erprobte Methode abzustützen. Die Grundlagenbeschaffung und -auswertung ist mit hohen Fixkosten verbunden, die das Budget von üblicherweise relativ kleinen Bodenkartierungsprojekten mit rund 400 Franken pro Hektare für eine grossmassstäbliche Kartierung schnell sprengen dürften⁵⁰. Es wird daher empfohlen, ein gegenüber heutigen Massstäben wesentlich grösseres Kartierungsgebiet zu wählen. Auch die mutmasslich verlängerte Bearbeitungszeit, die zusätzlichen Bodenanalysen während der Kartierung und eine allfällige iterative Vorgehensweise bei den Feldarbeiten können kostentreibend sein. Dem stehen mögliche Einsparungen im Vergleich zum heute üblichen Vorgehen gegenüber:

- Skaleneffekte bei der Aufbereitung der Grundlagendaten, da für die Bearbeitung

grösserer Gebiete die Fixkosten weniger ins Gewicht fallen.

- Einsparungen durch die Anwendung neuer Analysemethoden, verbunden mit einer verbesserten Infrastruktur und Skaleneffekten für die Analytik (es können mehr Bodenproben mit gleichen Kosten analysiert werden).
- Unterschiedliche Intensität der Feldkartierung in Gebieten mit geringer oder hoher Variabilität sowie mögliche Einsparungen durch modellunterstützte Wahl der Beprobungsstandorte.

3.4 Vorranggebiete und Kartierungsmassstab

Je nach politischen Prioritäten sind auf nationaler und kantonaler Ebene unterschiedliche Zieldefinitionen oder Kombinationen einzelner Themen für die prioritär zu kartierenden Gebiete denkbar. Diese sind in einem partizipativen Ver-

Abbildung 30
Mögliche Vorranggebiete für die Bodenkartierung: Böden rund um siedlungsgeprägte Landschaften (Kriterium «Siedlungsdruck»).

- Siedlungslandschaften und Stadt
- Pufferbereich um Siedlungen

Quelle: A. Keller, Agroscope



Tabelle 8
Mögliche Definitionen von Vorranggebieten gemäss Fragestellungen verschiedener Bedarfsgruppen.

Frage/Thema	Vorranggebiete
Fruchtfolgeflächen	Mittelland: vorrangig in Gebieten mit hohem Siedlungsdruck und weniger als 18 % Hangneigung
Meliorationen und Erneuerung Drainagen	Drainierte Gebiete und vernässte Böden
Waldbodenversauerung	Mittelland, Alpen und Voralpen mit silikatischem Ausgangsmaterial
Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer	Einzugsgebiete von Binnenseen, Puffer um Seen, die belüftet werden, Puffer um Fließgewässer, vornehmlich im Mittelland
Bodenschonende Waldbewirtschaftung und Baumartenwahl	Mittelland, Jura, Voralpen
Klimawandel: Trockenheitsrisiko	Zur Austrocknung neigende Einzugsgebiete, Gebiete für Bewässerung, Jura, Wallis
Verwendung von Aushubmaterialien zur Verbesserung beeinträchtigter Böden	Anthropogen geprägte Böden
Klimawandel: Wasserangebot	Alpen, Voralpen
Umgang mit degradierten Moorböden	Ehemalige Moore, die heute wieder vernässen
Naturgefahren	Alpen, Voralpen

fahren mit allen Beteiligten in einem politischen Prozess festzulegen. Abbildung 30 (S. 77) zeigt beispielsweise Flächen, die im Bereich siedlungsgeprägter Landschaften liegen, wo die Böden einem hohen Überbauungsrisiko ausgesetzt sind. Tabelle 8 (S. 78) gibt eine Übersicht über weitere mögliche Themengebiete und Interessen in Bezug auf Vorranggebiete.

Die Frage nach dem Kartierungsmaßstab kann nicht ganz losgelöst vom zu kartierenden Gebiet betrachtet werden. Viele Nutzende haben sich an die Vorzüge von Detailbodenkarten im Maßstab 1:5000 gewöhnt. Je grösser der Maßstab ist, desto grösser auch die Auflösung der Bodeninformation und ihr räumlicher Bezug. Wie die Nutzerinteressen zeigen, ist dieser Detaillierungsgrad grundsätzlich flächendeckend gewünscht (Kap. 2.1, S. 22). Ebenso sollten Geoinformationen wo immer

möglich gleich aufgelöst sein – ein Mosaik verschiedener Maßstäbe erschwert die Nutzung der Daten. Detailbodenkarten im Maßstab 1:5000 liegen vor allem für Gebiete im Mittelland vor. Im Alpenraum oder im Jura existieren erst wenig Erfahrungen mit Detailbodenkarten oder auch mit Maßstäben bis 1:50 000. Sehr steiles, unwegsames Gelände zeichnet sich in der Regel durch eine extreme Variabilität der Bodeneigenschaften aus, wodurch der Aufwand zur bodenkundlichen Kartierung sehr hoch ausfallen würde. Eine flächendeckende Feldarbeit, die der Methode für Detailkartierungen entspricht, ist in diesem Gelände zudem kaum möglich. Für ausgewählte Gebiete und allenfalls Nutzungen sind deshalb andere Maßstäbe und allenfalls auch andere Methoden zu evaluieren. Diese Überlegungen decken sich mit anderen Studien^{22, 50, 170}.

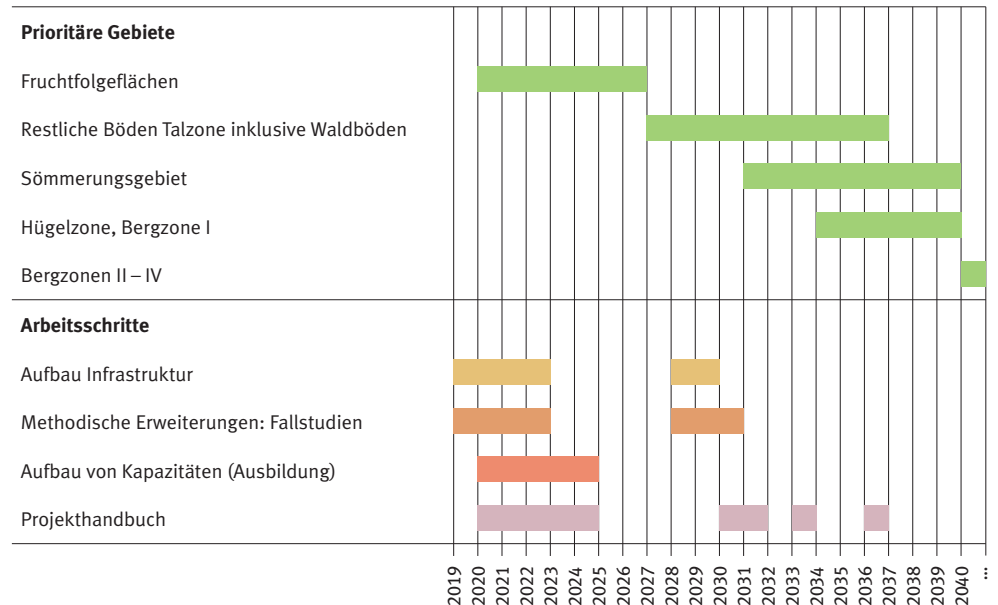
3.5 Etappierung

Der Aufbau einer BIP-CH erfolgt sinnvollerweise in Etappen. Hierbei gilt es zu beachten, dass zur methodischen Weiterentwicklung parallel zu laufenden Kartierungsprojekten die genannten Fallstudien zu projektieren sind. Um nicht wertvolle Zeit zu verlieren, ist die kontinuierliche Erhebung von Bodeninformationen mit der gegenwärtigen Kartierungsmethode (FAL24+²⁰) unbedingt die nächsten Jahre weiterzuführen und zu einem geeigneten Zeitpunkt durch praxistaugliche und im Feld geprüfte technische Entwicklungen zu ergänzen. Bei der Etappierung der Kartierung ist darauf zu achten, das Erfahrungswissen der Bodenkartierenden zu erhalten und den Wissenstransfer an Nachfolgenerationen zu fördern. Derzeit lässt sich nur bedingt abschätzen, wie sich die vorgeschlagenen technischen Weiterentwicklungen

auf die Kosten und die Zeitdauer der Kartierung auswirken. Aufgrund der genannten Empfehlungen und einer Vergrößerung der Kartierungskapazitäten dank verlässlicher Rahmenbedingungen für die Privatwirtschaft wird die Zeitdauer für die Kartierung der Böden im Talgebiet auf rund zwei Jahrzehnte geschätzt (Abb. 31, S. 79).

Die vorgeschlagenen technischen Weiterentwicklungen im Rahmen von Fallstudien (parallel zu laufenden Kartierungen) werden etwa fünf Jahre in Anspruch nehmen. Methodische Vorgaben für jene Teile der Schweiz, in denen bis heute wenig Erfahrungen existieren (z.B. Sömmerungsgebiet), sowie weitere technische Innovationen können zu definierten Zeitpunkten in ein Projekthandbuch integriert werden (Versionierung von Methoden).

Abbildung 31
Mögliche Etappierung für die Realisierung einer BIP-CH.



Der Aufbau einer BIP-CH erfordert den Einsatz zahlreicher Fachleute mit Kartierungserfahrung sowie von Fachleuten aus dem DSM-Bereich und anderen Fachdisziplinen. Mit der gegenwärtigen Kartierungsmethodik reichen die vorhandenen Kartierungskapazitäten in der Schweiz derzeit für etwa 10 000 Hektaren pro Jahr. Für eine landesweite Bodenkartierung von über einer Million Hektaren in rund zwei Jahrzehnten sind diese Kapazitäten nahezu zu verzehnfachen. Nebst der Infrastruktur sind deshalb auch sukzessive Kapazitäten zur Ausbildung neuer Fachkräfte aufzubauen. Die Privatwirtschaft ist dazu relativ rasch in der Lage, sofern das Auftragsvolumen klar ist und Planungssicherheit besteht. Analogien dazu gibt es in jüngster Zeit im Zusammenhang mit der Altlastenproblematik und mit dem VASA-Altlasten-Fonds, der die langfristige Finanzierung der Sanierung von Altlasten unterstützt. Parallel zum Praxistest methodischer Weiterentwicklungen ist es unabdingbar, die erforderliche Infrastruktur aufzubauen (Kap. 3.3, S. 70) oder privatwirtschaftlich aufbauen zu lassen. Sie muss nicht zwingend von der Trägerschaft der BIP-CH bereitgestellt werden.

Nach derzeitiger Einschätzung ist eine einheitliche Ausscheidung von FFF auf Basis einer Bodenkartierung eine der zeitlich drängendsten Aufgaben. So ist es sinnvoll, in einer ersten Etappe potenzielle FFF zu kartieren (Abb. 31, S. 79). Um grossräumig flächendeckende Bodendaten verfügbar zu machen, empfiehlt es sich, in einer zweiten Etappe die übrigen Böden der Talzone inklusive der Waldböden zu kartieren. Aufgrund der Intensität der land- und waldwirtschaftlichen Nutzung ist es angezeigt, in einer dritten Etappe die Hügelzone und die Bergzone I zu kartieren und in einer vierten Etappe die Bergzonen II bis IV. Das Sömme-

rungsgebiet folgt als fünfte Etappe. Wegen der Grösse des Sömmerungsgebietes und der aufgrund der Höhenlage kurzen jährlichen Bearbeitungszeit wird ein frühzeitiger Beginn dieser Etappe empfohlen, die sich möglicherweise mit den Etappen 2 bis 4 überschneidet. Diese Überschneidung ist auch sinnvoll, um die Fachkräfte längerfristig zu binden: Können sie über Jahre nur in den Sommermonaten im Feld arbeiten, ist mit einer hohen Personalfuktuation, entsprechendem Know-how-Verlust und stark reduzierter Effizienz zu rechnen.

3.6 Informationsplattform

Die BIP-CH stellt als Informations- und Serviceplattform eine Drehscheibe für Bodeninformationen und daraus interpretierten Produkten dar. Sie soll die umfangreichen und vielfältigen Informationsbedürfnisse der unterschiedlichen Bedarfsgruppen erfüllen. Zentrales Element des Datenmanagements und der Zusammenführung der Bodendaten bildet NABODAT, ein Fachinformationssystem für Bund und Kantone mit beschränktem Zugang für die Forschung und die Öffentlichkeit. Ergänzend dazu gilt es, für die Nutzenden von Bodeninformationen eine webbasierte Plattform zu schaffen, auf der die verfügbaren Bodeninformationen und essenziellen Meta-Informationen ohne Zugriffsbeschränkung abgerufen werden können. Eine solche Informationsplattform kann regelmässig mit ausgewählten Bodeninformationen aus NABODAT gespeist werden. Die BIP-CH braucht eine Trägerschaft, die auch als zentrale Servicestelle für Fachkoordination, Wissenstransfer, Ausbildung und Beratung in der Schweiz fungiert.

Im Sinne eines Vorzeigebispiels ist auf das ISRIC (Kap. 2.5, S. 46) zu verweisen so-

wie die vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) lancierte Förderinitiative «BonaRes» (Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie, www.bonares.de). Ziel von «BonaRes» ist es, die wissenschaftlichen Kenntnisse über Bodenökosysteme zu erweitern, die Produktivität der Böden und ihre anderen Funktionen zu verbessern und neue Strategien für ihre nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung zu entwickeln. Das Portal soll Forschenden, Landnutzenden sowie Politikerinnen und Politikern helfen, Auswirkungen getroffener und künftiger Entscheidungen besser einzuschätzen. Im Hinblick auf eine BIP-CH zeigt das Beispiel «BonaRes» deutlich, dass neben einer Drehscheibe für Bodeninformationen auch Instrumente zur Beurteilung von Gefährdungen des Bodens und von Bodenfunktionen sowie bedarfsgerechte Services zielführend sind.

3.7 Fazit

Die propagierte BIP-CH stellt den Motor eines funktionierenden Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen dar. Sie dient als Drehscheibe für Bodeninformationen und daraus interpretierte Produkte, um die vielfältigen Informationsbedürfnisse unterschiedlicher Bedarfsgruppen interaktiv zu erfüllen. Die BIP-CH soll umfassend Auskunft über Bodeneigenschaften und Bodenkennwerte in variabler räumlicher Auflösung geben können. Zudem soll sie – sowohl für Landwirtschafts- als auch Waldböden – spezifische, thematisch interpretierte Informationen zur Bewertung von Bodenfunktionen (inklusive FFF) und der Gefährdungen des Bodens bereitstellen.

Die BIP-CH ist zwar ein Generationenprojekt, doch ihr Mehrwert dürfte nach wenigen Jahren bereits deutlich sein. Sie bie-

tet die Chance, Innovationen zu fördern und deren Nutzen sorgfältig und umfassend zu evaluieren. Die Schweiz verfügt über eine weit entwickelte und bewährte feldbodenkundliche Methode, um Bodeninformationen zu erheben und in unterschiedlicher Form auszuwerten und darzustellen. In den letzten beiden Jahrzehnten wurden jedoch für Teilbereiche der Bodenkunde neue technisch-wissenschaftliche Methoden zur Untersuchung von Böden vorangetrieben. Auf Basis von vier Eckpfeilern für eine BIP-CH – Bedarf und Instrumente, Methode der Bodenkartierung und Infrastruktur, Massstab und Vorranggebiete, Informationsplattform – wird empfohlen, technische Weiterentwicklungen im Zuge einer Bodenkartierung zu realisieren und deren praxistaugliche Umsetzung im Feld durch regionale Fallstudien zu evaluieren. Um Kosteneinsparungen durch die technischen Weiterentwicklungen zu erzielen, spielt die Grösse der zu kartierenden Gebiete eine zentrale Rolle. Für eine landesweite Kartierung der Böden im Talgebiet wird mit schätzungsweise zwei Jahrzehnten gerechnet. Nebst der Umsetzung technischer Innovationen müssen dazu auch die personellen Kapazitäten für die Kartierung durch gezielte Ausbildung erhöht sowie die Koordination und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen gefördert werden.

Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH) – eine Investition mit Rendite

4.1 Annäherung an eine Kosten-Nutzen-Rechnung

Der Mehrwert einer landesweiten Bodenkartierung erschliesst sich nicht unmittelbar, kann aber anhand von Szenarien zur Vermeidung von Bodengefährdungen und zur Optimierung der nachhaltigen Nutzung von Böden sowie anhand von Überlegungen zu Vermeidungs- beziehungsweise Wiederherstellungskosten abgeleitet werden⁹⁵. Beispielsweise ermöglichen Boden- und Anwendungskarten eine optimierte, standortgerechte Düngung und können so den Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Gewässer minimieren und hierdurch beispielsweise die Kosten für die Trinkwasseraufbereitung. Ein solcher indirekter Nutzen von Bodenfunktionen kann mangels flächenhafter Bodeninformationen nur schwer abgeschätzt werden. Zumeist steht in den Erwägungen der direkte Nutzen des Bodens im Zentrum

(Abb. 32, S. 82). Ziel ökonomischer Bewertungsverfahren ist es, möglichst alle Werte von Bodenfunktionen beziehungsweise deren Beitrag zu öSL zu berücksichtigen. Dies bedeutet, nicht nur die direkten Güter wie den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen, sondern auch frei nutzbare Güter, für die kein Markt besteht, in die Bewertung miteinzubeziehen^{95,182}. Ökonomische basierte Bewertungsverfahren für öSL sind nicht unumstritten, und deren Vor- und Nachteile werden kontrovers diskutiert¹⁸²⁻¹⁸⁴. Ökonomische Bewertungen, die die öSL der Böden ins Zentrum stellen und Schadens- sowie Vermeidungskosten von Bodengefährdungen quantifizieren, zeigen eindrücklich den Wert des Bodens für die Gesellschaft in monetären Werten auf¹⁸⁵⁻¹⁸⁷.

Solche Betrachtungen können ethische¹⁸⁸ und kulturelle^{103,189} Argumente zur Bedeutung der Böden als Lebensgrundlage

Abbildung 32
Direkter Nutzen des Bodens
(Auswahl, Angaben pro Hektare und Jahr).

Fotos: Nationale Bodenbeobachtung der Schweiz



Ackerbau	
Getreide:	65 dt/ha
oder Raps:	35 dt/ha
oder Zuckerrüben:	900 dt/ha
oder Kartoffeln:	450 dt/ha

Grasland	
Milch:	6500 l/a
oder Käse:	310 kg/a
oder Fleisch:	560 kg/a

Wald
Holzerlös von rund 70 CHF

Abbildung 33
Bodenkultur: «Le semeur»,
Vincent van Gogh, 1888,
Öl auf Leinwand.

Quelle: Hahnloser/Jaeggli Stiftung,
Kunstmuseum Bern



von Mensch und Tier ergänzen. So wurde bereits im NFP 22 darauf hingewiesen, dass die «Menschen der modernen Gesellschaft einen Orientierungsbedarf zum Umgang mit dem Boden haben»¹⁸⁸, und ein neues Verhältnis zum Boden im Sinne einer nachhaltigen Bodenkultur gefordert sei¹⁰³. «Der Sämann» von Vincent van Gogh drückt sinnbildlich die Verbundenheit der Menschen mit den Nahrungsmitteln und dem Boden und die Abhängigkeit von ihnen aus. Ein solches Bewusstsein scheint in der heutigen Dienstleistungsgesellschaft und angesichts immerwährender voller Regale in den Supermärkten verloren zu gehen. Mit der nachfolgenden Annäherung an eine Kosten-Nutzen-Rechnung für eine landesweite Bodenkartierung soll primär der vielfältige Nutzen der Böden für die Gesellschaft und die Bedeutung der Böden als Lebensgrundlage für die Menschheit aufgezeigt werden. Die monetären Grössen in den Bewertungsszenarien sind von sekundärer Bedeutung.

4.2 Beispiele für den Mehrwert von Bodeninformationen

Nachfolgend wird für zehn ausgewählte Themengebiete der inhaltliche Zusam-

menhang zwischen dem Nutzen einer Bodenkartierung und dem Mehrwert erörtert, der sich aus der Kartierung ergibt. Zudem werden die Szenarien zur vereinfachten Berechnung des Mehrwerts beschrieben¹⁹⁰. Dabei wurde der Nutzen einer Bodenkartierung in Bezug zu den Schlüsselgrössen der jeweiligen Themengebiete generell sehr konservativ eingeschätzt, um letztlich die Grössenordnung des Mehrwerts abschätzen zu können, den eine landesweite Bodenkartierung im Minimum für die Gesellschaft generiert. Eine Bodenkartierung stiftet über die ausgewählten Themengebiete hinaus Nutzen für weitere Umweltthemen. Je mehr Zusatznutzen für andere Umweltgebiete recherchiert und aufgezeigt werden kann, umso grösser wird der monetäre Mehrwert einer Bodenkartierung ausfallen.

Filterleistung des Bodens spart Kosten für die Trinkwasseraufbereitung

Dank der guten Qualität und Filterleistung der Böden können Quell- und Grundwasser in der Schweiz zu einem grossen Teil unbehandelt ins Trinkwassernetz eingeleitet werden. Übermässige Mengen an Nähr- und/oder Schadstoffen können die Filter- und Pufferleistung der Böden aber derart überlasten, dass das Wasser nicht mehr ohne Aufbereitung verwendet werden kann. Vor allem in intensiv genutzten Landwirtschaftsgebieten überschreiten Nitrat und Pestizide die Grenzwerte im Grundwasser^{191,192}. Eine flächendeckende Bodenkartierung trägt dazu bei, die natürliche Filterleistung des Bodens zu erhalten und standortspezifisch zu nutzen.

Aus Bodenkarten lassen sich anwenderbezogene Karten zur Filter- und Pufferfunktion der jeweiligen Bodentypen generieren, die als Planungsgrundlagen für eine standortgerechte Landwirtschaft die-

nen können. Auf diese Weise lassen sich die Einträge von Nähr- und Schadstoffen ins Quell- und/oder Grundwasser und damit die Kosten der Trinkwasseraufbereitung in der Schweiz um mindestens 10 bis 15 Prozent senken. Unter der Annahme, dass rund die Hälfte der Trinkwasseraufbereitungskosten auf das Mittelland entfallen, beläuft sich unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ der Nutzen der Bodenkartierung auf jährlich rund 7 bis 10 Millionen Franken.

Wasserspeicher für eine effiziente Bewässerung

Da die Niederschläge den Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Kulturen nicht zu decken vermögen, werden in der Schweiz rund 55 000 Hektaren bewässert, vor allem Flächen in Teilen des Mittellandes, der Westschweiz sowie in einigen Alpentälern. Der entsprechende Wasserbedarf beträgt jährlich rund 144 Millionen Kubikmeter¹⁹³. Als Folge des Klimawandels ist mit einem steigenden Bewässerungsbedarf zu rechnen. Für eine effizientere und zielgerechtere Bewässerung sind detaillierte und flächendeckende Kenntnisse über die Böden und ihre Eigenschaften in verschiedenen Tiefen unumgänglich.

Unter der Annahme, dass räumliche Grundlagenkarten von Bodeneigenschaften auf 20 bis 30 Prozent der derzeit bewässerungsbedürftigen Flächen standortgerechtere Kulturen und eine ebensolche Bodenbearbeitung mit effizienterer Bewässerung möglich machen, könnte Wasser in der Grössenordnung von rund 3 bis 4 Prozent des jährlichen Trinkwasserverbrauchs der Schweiz eingespart werden. Unter den verwendeten Annahmen¹⁹⁰ erwächst demnach aus der Bodenkartierung ein jährlicher pekuniärer Nutzen zwischen rund 2 und 5 Millionen Franken.

Bodenkartierung als Grundlage für die Projektierung und Erneuerung von Drainagen

Seit den 1880er-Jahren bis zur Jahrtausendwende wurden in der Schweiz umfangreiche Entwässerungs- und Meliorationsprojekte realisiert. Insgesamt wurden rund 192 000 Hektaren landwirtschaftliche Flächen drainiert, davon rund 70 Prozent **FFF**. Viele dieser Drainagesysteme müssen in den kommenden zehn bis fünfzehn Jahren erneuert werden. Der Erneuerungsaufwand wird auf rund 25 000 Franken pro Hektare geschätzt¹⁹⁴. Mithilfe detaillierter und flächendeckender Kenntnisse über die Böden und ihre Eigenschaften können die Erneuerung der Drainagen und die Projektierung neuer Drainagen effizient und zielgerecht erfolgen, oder es kann bei ungeeigneten Bodenverhältnissen ganz darauf verzichtet werden. Mit der Bodenkartierung werden wichtige Voraussetzungen dafür geschaffen.

Abbildung 34
Anzeichen für Bodenverdichtung nach starken Regenfällen auf Schweizer Ackerflächen.

Quelle: T. Keller, Agroscope



Auf Basis einer Flächenanalyse für den Kanton Zürich wird angenommen, dass mit den Angaben aus der Bodenkartierung die Projektierung und Erneuerung der Drainagen effizienter durchgeführt werden kann, konkret für rund 10 bis 30 Prozent der drainierten Flächen auf die Erneuerung der Drainage verzichtet oder sie mit Bodenkarten effizienter projektiert werden kann. Unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ beläuft sich die Einsparung bei den Projektierungskosten und damit der pekuniäre Nutzen der Bodenkartierung auf jährlich rund 11 bis 34 Millionen Franken.

Regulierungsleistung der Böden macht Belüftung von Seen überflüssig

Seen stehen in einer intensiven Beziehung zur Umgebung. Aus der landwirtschaftlichen Nutzung können zu viele Nährstoffe in sie gelangen, die zu einer Überdüngung und im schlimmsten Fall zu Sauerstoffnot führen, was die natürliche Selbstregulation und die standorttypische Artenvielfalt eines Gewässers stört. Um einen See wieder ins ökologische Gleichgewicht zu bringen, sind aufwendige und kostspielige Massnahmen erforderlich, im Falle des Baldeggersees und des Hallwilersees im Mittelland eine Kombination aus seeinternen (z.B. künstliche Belüftung) und seeexternen Massnahmen im Einzugsgebiet (angepasste Düngung und Bodenbearbeitung). Für eine zielgerechte Umsetzung sind detaillierte Kenntnisse der Böden im Einzugsgebiet rund um die Seen unabdingbar.

Erfolgte die landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet von Baldegger- und Hallwilersee auf Basis räumlicher Grundlagenkarten von Bodeneigenschaften während zehn Jahren standortgerecht und die Düngung entsprechend der Regulierungsleistung der Böden, könnten

die Belüftungskosten für die Seen reduziert werden (Annahme: 10–30%). Unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ entspricht dies einem pekuniären Nutzen einer Bodenkartierung von rund 2 bis 5 Millionen Franken über zehn Jahre.

Schäden durch Bodenerosion vermindern
Modellrechnungen gehen davon aus, dass auf Ackerland jährlich durchschnittlich rund 2 Tonnen Feinerde pro Hektare verloren gehen. Detaillierte Kenntnisse über die Böden könnten dazu beitragen, das Erosionsrisiko durch standortgerechte Kulturen und ebensolche Düngung und Bodenbearbeitung zu minimieren (Kap. 2.8, S. 61).

Falls auf rund 20 bis 30 Prozent der erosionsgefährdeten Ackerbauflächen der Schweiz anhand anwenderbezogener Bodenkarten die Bodenerosion durch eine standortgerechte Bewirtschaftung und Bodenbearbeitung minimiert oder verhindert wird, liesse sich unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ der jährliche Nutzen einer Bodenkartierung auf rund 10 bis 15 Millionen Franken beziffern.

Schäden durch Bodenverdichtung vermindern

Die Verdichtung des Bodens beeinflusst die Bodenqualität. Verdichtungen des Unterbodens sind bezüglich ihrer Langzeitfolgen besonders schwerwiegend (Kap. 2.8, S. 61). Verdichtete Böden können insbesondere das Erosionsrisiko durch erhöhten Oberflächenabfluss steigern, den Pflanzenertrag mindern und die Grundwasserneubildung reduzieren (Abb. 34, S. 85). Dies wirkt sich negativ auf den Ertrag und einschränkend auf die Kulturwahl aus.

Rund ein Drittel aller Landwirtschaftsböden der Zentralschweiz sind verdicht-

tet¹⁹⁵. Die Situation in anderen Teilen der Schweiz dürfte ähnlich sein. Neben Ertragseinbussen sind Kosten für den erhöhten Energieverbrauch bei der Bearbeitung und Bewirtschaftung verdichteter Böden und weitere Folgekosten zu berücksichtigen^{190,196}. Unter der Annahme von lediglich 5 Prozent Ertragsverlust auf jeweils einem Drittel der Fläche für Getreide und für Hackfrüchte betragen die Schadenskosten pro Jahr 6,6 Millionen (Getreide) bis 11,3 Millionen Franken (Getreide plus Hackfrüchte). Lässt sich die Fläche, die von der Bodenverdichtung betroffen ist, dank besserer Bodeninformationen sowie Daten zur Bodenfeuchte (Instrument TERRANIMO; Kap. 3.7, S. 81) halbieren, werden Schadenskosten von jährlich rund 4 bis 6 Millionen Franken vermieden.

Nährstoffspeichervermögen:

Optimierter Einsatz von Mineraldünger

Die Schweizer Landwirtschaft bringt jährlich rund 50 000 Tonnen Stickstoff (N) und 10 000 Tonnen Phosphor (P) in Form von Mineraldünger auf die Böden aus⁷⁵. Überschüssiger N kann als Ammoniak in

die Luft oder als Nitrat ins Grundwasser gelangen, überschüssiger P das Algen- und Pflanzenwachstum in Seen übermässig fördern.

Anwenderbezogene Bodenkarten zeigen das Nährstoffspeichervermögen der Böden auf und geben Hinweise für standortgerechte Kulturen. Anhand solcher Planungsgrundlagen und der Informationen über den Nährstoffgehalt der Böden kann die Düngung standortgerecht optimiert und der Mineraldüngereinsatz weiter reduziert werden. Angenommen, es können dadurch die Kosten für Mineraldünger um 10 bis 20 Prozent gesenkt werden, entspricht dies unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ einem jährlichen Nutzen der Bodenkartierung von rund 15 bis 30 Millionen Franken.

Organische Böden schützen:

Treibhausgase vermeiden

Böden speichern insgesamt mehr Kohlenstoff (C) in Form organischer Substanz (Humus) als Wälder oder die Atmosphäre. Natürlicherweise haben viele Böden ausgeglichene Kohlenstoffvorräte. Moore akkumulieren sogar über Jahrtausende stetig C in Form von Torf (Abb. 35, S. 87). Verlieren sie diesen C, beispielsweise nach einer Entwässerung durch mikrobielle Veratmung, werden Böden zu CO₂-Quellen und tragen erheblich zum Klimawandel bei. Zudem entweichen aus landwirtschaftlich genutzten Böden beträchtliche Mengen an Lachgas, das ein sehr potentes Treibhausgas ist. Die C-Vorräte in den Böden sind nur ungenügend bekannt¹⁹⁷. Mit flächendeckenden, räumlich hoch aufgelösten Informationen über die C-Vorräte könnten Standorte mit hohen und empfindlichen C-Vorräten identifiziert werden, an denen eine Nutzungsänderung zu einer substanziellen Reduktion der Treibhausgasemissionen führen würde.

Die globalen Kosten der Bodendegradation

Die Bodendegradation ist ein globales Problem, wobei die Auswirkungen in armen Ländern am grössten sind. Obwohl Boden die Lebensgrundlage unseres Planeten bildet, wurde bisher zu wenig für eine nachhaltige Landnutzung getan. Zu diesem Schluss kommt ein weltweit agierendes Wissenschaftsteam, das zwölf Länder und Weltregionen unter die Lupe nahm – darunter Indien, Argentinien, weite Teile Afrikas und Zentralasiens⁹¹. Die auf Satellitenkartierungen basierenden Ergebnisse zeigen ein drastisches Bild: In den letzten drei Jahrzehnten degradierten global 33 Prozent des Weidelands, 25 Prozent der Ackerböden und 23 Prozent der Waldflächen. Etwa 30 Prozent der globalen Landfläche, der Lebensraum von etwa 3,2 Milliarden Menschen, sind von signifikanter Bodendegradation betroffen. Die Kosten dieser Bodenzerstörung belaufen sich weltweit auf jährlich rund 300 Milliarden Euro. Die Untersuchung zeigt auch, dass die Kosten zur Vermeidung von Landdegradation viel niedriger wären als jene für die Schadensbehebung. Jeder heute in den Bodenschutz investierte US-Dollar würde in der Zukunft fünf für die Schadensbehebung aufzuwendende US-Dollar einsparen⁹¹.

Abbildung 35

Tiefgepflügter drainierter Moorboden: Als Folge der Entwässerung werden organische Böden zu C-Quellen und tragen erheblich zum Klimawandel bei.

Foto: G. Brändli, U. Zihlmann, Agroscope; A. Chervet, LANAT Bern



Gegenwärtig entweichen in der Schweiz aus entwässerten Moorböden auf einer Fläche von rund 20 000 Hektaren jährlich rund 700 000 Tonnen CO₂-Äquivalente an Treibhausgasen¹⁹⁸. Würden auf Basis der Bodeninformationen einer Bodenkartierung rund 10 Prozent bis ein Drittel dieser Böden wiedervernässt und würde dort nur sehr intensiv produziert, wäre der Humus geschützt und es würden jährlich 230 000 Tonnen CO₂ weniger in die Atmosphäre gelangen. Bei einem durchschnittlichen Preis pro Tonne CO₂ von rund 72 Euro entspricht das kompensierte CO₂ einem Gegenwert von rund 6 bis 18 Millionen Franken pro Jahr¹⁹⁰.

Fruchtbare Böden für die Nahrungsmittelproduktion erhalten

Im Mittelland sind rund 90 Prozent der neuen Siedlungsflächen auf ehemaligem Landwirtschaftsland entstanden. In den Bergregionen ist infolge nachlassender Bewirtschaftung eine zunehmende Ver-

buschung und Verwaldung zu beobachten⁷. Für den Schutz, die Erhaltung und eine zukunftsweisende und nachhaltige Planung der Nahrungsgrundlage ist als Grundlage eine flächendeckende Bodenkartierung notwendig (Kap. 2.7, S. 59).

Mit den Nutzungseignungsklassen, wie sie in der Bodenkartierung ausgeschieden sind, kann die Raumplanung die Einzonung neuer Bauzonen von den guten Ackerbauflächen gezielt auf die weniger guten Böden umlenken. Unter der Annahme, dass bisher vor allem die besten Ackerbauböden versiegelt wurden, könnten durch diese gezielte Innenentwicklung bei der Produktion von Nahrungsmitteln jährlich rund 10 Millionen Franken Schadenskosten vermieden werden¹⁹⁰. Dies entspricht der Fläche für die Ernährung von rund 6000 (Grössenordnung der Gemeinde Rothenburg LU) bis 19 000 Personen (Grössenordnung Stadt Aarau).

Wasserspeichervermögen senkt das Hochwasserrisiko

Die Hohlräume der Böden können je nach Bodeneigenschaften und Art der Nutzung mehrere hundert Liter Wasser pro Quadratmeter aufnehmen. Intakte Böden wirken als leistungsfähigstes Wasserspeichermedium und sind entscheidend für die Vermeidung von Hochwassern⁷⁰. Durch die Versiegelung oder Verdichtung können die Böden ihre natürliche Infiltrationsleistung verlieren, was zu höheren Abflussmengen führt. Zur Dämpfung der Abflussspitzen sind dann aufwendige Schutzmassnahmen wie Hochwasserrückhaltebecken notwendig. Allein im Kanton Zürich wurden seit 1970 mehr als zwanzig solcher Becken realisiert. Für eine bessere Vorhersage von Hochwasserereignissen sind detaillierte Kenntnisse über die Böden und ihre Eigenschaften im jeweiligen Einzugsgebiet zentral.

Das Berechnungsszenario stellt den Verlust an Wasserspeichervermögen der jährlich neu versiegelten Fläche im Kanton Zürich den Ersatzkosten für ein Hochwasserrückhaltebecken gegenüber. Könnte mithilfe anwenderbezogener Bodenkarten auf die Überbauung von rund einem Drittel der momentan versiegelten Fläche verzichtet werden, entspricht dies unter den gemachten Annahmen¹⁹⁰ einem jährlichen Nutzen einer Bodenkartierung von rund 4 Millionen Franken.

4.3 Zwei Beispiele für Reparaturkosten

Neben den zehn angeführten Fallbeispielen für eine ökonomische Annäherung an den Mehrwert landesweiter Bodeninformationen zeigt sich der Wert des Bodens auch indirekt, etwa indem man sich die Kosten für die Sanierung oder Melioration von Böden oder für technische Anlagen, die ihre Filter- und Abbauleistung nachbilden, vor Augen führt. Die folgenden Beispiele stehen nicht im unmittelbaren Kontext einer landesweiten Bodenkartierung. Sie zeigen aber die Grössenordnung

von Schadens- und Reparaturkosten von Böden im Vergleich zu einem Vorsorgeinstrument wie der BIP-CH. Vorsorgeinstrumente im Bodenschutz verursachen Kosten. Sie sind jedoch um ein Vielfaches günstiger als der Versuch, die meist irreversiblen Schäden später zu «reparieren».

Zu den technischen Anlagen, die die Filterwirkung der Böden nachbilden, zählen sogenannte Retentionsfilterbecken beziehungsweise Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA). Gemäss Gewässerschutzgesetz muss verschmutztes Abwasser behandelt werden, bevor es in den Wasserkreislauf zurückgeführt werden kann. Die günstigste Reinigungsmöglichkeit für Strassenabwasser ist die Versickerung über die Böden neben der Strasse. Die SABA stellen aufwendige technische Lösungen dar (Abb. 36, S. 88). In der Schweiz wurden bereits über 500 Millionen Franken in deren Bau investiert. Die Kosten einer SABA belaufen sich auf 0,2 bis 3 Millionen Franken pro Hektare entwässerte Strasse¹⁹⁹, was den Wert der Regulierungsleistung eines gesunden Bodens (Filtern und Abbau von Schadstoffen) verdeutlicht.

Abbildung 36
Strassenabwasser-Behandlungsanlage (SABA) in Zürich-Affoltern.

Quelle: A. Keller, Agroscope



Die Kosten für die Sanierung schadstoffbelasteter Böden (Altlasten) können als Kosten zur Wiederherstellung von Böden aufgefasst werden. In der Schweiz sind rund 38 000 mit Abfällen belastete Standorte registriert²⁰⁰, bei rund 4 000 davon handelt es sich um Altlasten, die bis 2040 saniert werden müssen. Viele der belasteten Standorte liegen in unmittelbarer Nähe zu empfindlichen Grundwasservorkommen. In den meisten Fällen werden diese Standorte durch die Entfernung und Entsorgung des Aushubs saniert. Das belastete Material ist oft mineralischen Ursprungs und muss häufig auf speziellen Deponien entsorgt werden. Jährlich wird rund eine Million Tonnen Material von

belasteten Standorten entfernt und grösstenteils auf Deponien entsorgt. Insgesamt belaufen sich die Kosten der Altlastensanierung in der Schweiz bis 2040 auf schätzungsweise 5 Milliarden Franken²⁰⁰.

4.4 Fazit

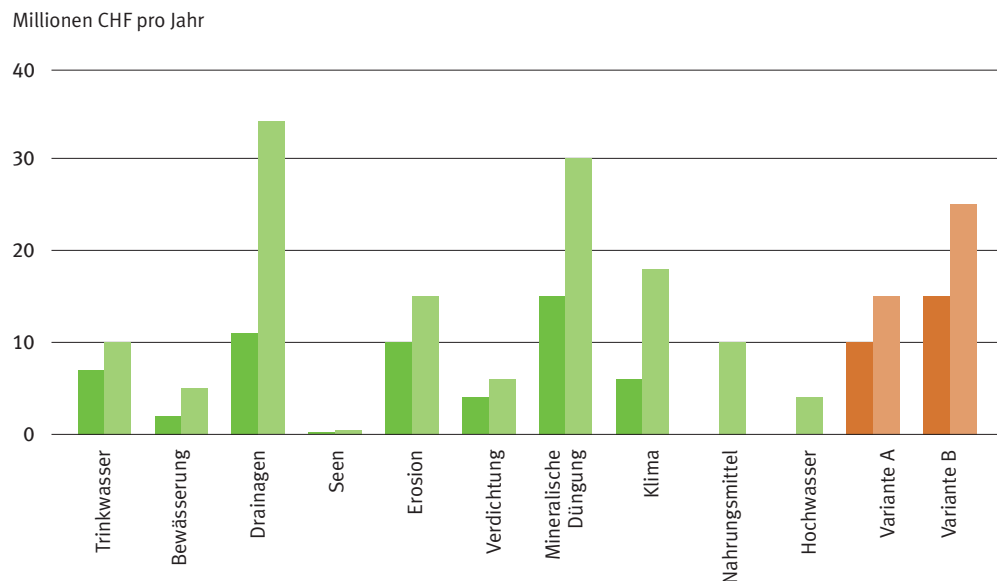
Der Mehrwert einer flächendeckenden Bodenkartierung ist in vielen Umwelt- und Politikbereichen nicht unmittelbar ersichtlich. Trotz sehr konservativ gewählten Annahmen resultiert aus der Annäherung an den ökonomischen Nutzen landesweiter Bodeninformationen mit vereinfachten Bewertungsansätzen für zehn ausgewählte Themengebiete in der Summe ein Mehrwert von 55 bis 132 Millionen Franken pro Jahr. Dieser ergibt sich aus vermiedenen Schadens- oder technischen Ersatzkosten oder einer optimierten Bodennutzung (Abb. 37). Auch in anderen Bereichen wäre eine BIP-CH nützlich. Die Kosten einer landesweiten Bodenkartierung sind nur schwer zu

schätzen. Sie sind unter anderem abhängig von den technischen Innovationen, der Grösse der zu kartierenden Gebiete und weiteren Faktoren (Kap. 3, S. 68).

Bei einer optimistischen Einschätzung der Kosten für eine landesweite Erhebung von jährlich 10 bis 15 Millionen Franken während mindestens zwei Jahrzehnten beziehungsweise einer konservativen Schätzung mit jährlichen Kosten von 15 bis 25 Millionen Franken bewegt sich der Mehrwert einer BIP-CH in der Grössenordnung von 1:2 (konservativ), 1:6 (durchschnittlich) bis zu 1:13 (positiv). Jeder Franken, der in eine Bodenkartierung als Vorsorgeinstrument für den Boden investiert wird, macht sich somit für die Gesellschaft und künftige Generationen mehrfach bezahlt. Die BIP-CH ist ein Vorsorgeinstrument, das einen hohen Mehrwert stiftet und im Sinne der nachhaltigen Nutzung der Ressource Boden dazu beiträgt, künftige Schadens- und Reparaturkosten zu vermeiden.

Abbildung 37
Übersicht über den Mehrwert einer Bodenkartierung für zehn ausgewählte Themengebiete.

Mehrwertbereich pro Themengebiet:
 ■ minimal
 ■ optimistisch
 Jährliche Kosten für eine BIP-CH mit einer landesweiten Bodenkartierung innerhalb von zwei Jahrzehnten:
 ■ optimistisch
 ■ konservativ



Für den Aufbau der BIP-CH wurden zehn Handlungsfelder identifiziert, die zusammengefasst zu den vier Kernbotschaften führen, die der TS4 vorangestellt sind. Die zehn Handlungsfelder orientieren sich am Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen (Abb. 3, S. 19).

- 1 Bedarf an Bodeninformationen neu definieren**

Während die bisherigen Bodenkartierungen primär zum Ziel hatten, die Eignung der Böden für die landwirtschaftliche Produktion zu bewerten, ist es für die Erhaltung der Bodenfunktionen und den Schutz des Bodens erforderlich, zusätzliche Bodeneigenschaften zu erheben. Es soll ein standardisierter Datensatz definiert werden, um mit der BIP-CH alle Bedürfnisse zur Nutzung von Bodeninformationen abzudecken. Die bestehenden Erhebungsmethoden sind möglichst weitgehend auf die Bedürfnisse aller Bedarfsgruppen abzustimmen und entsprechend weiterzuentwickeln.
- 2 Standard für Bodenklassifikation festlegen**

Für eine BIP-CH sind nach heutigem Wissensstand nationale Standards für die Bodenklassifikation zu erstellen, die auch internationale Vergleiche zulassen. Die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) hat dazu ein Konzept erarbeitet (Kap. 3, S. 68). Die Klassifikation sollte periodisch aufgrund neuer Entwicklungen, Erkenntnisse und Nutzerbedürfnisse aktualisiert werden, wie es in anderen europäischen Ländern üblich ist.
- 3 Methode der Bodenkartierung weiterentwickeln**

In einem ersten Schritt ist die mittlerweile über zwei Jahrzehnte alte Anleitung für die Kartierung von Landwirtschafts- und Waldböden (FAL24+) zu überarbeiten und auf den heutigen Stand zu aktualisieren. Parallel zu diesen Arbeiten ist zu prüfen, wie die Kartierungsanleitung gezielt mit digitalen Kartierungsmethoden (DSM) anhand praktischer Fallbeispiele weiterentwickelt werden kann. Die TS4 hat Themenbereiche identifiziert, für die vorrangig regionale Fallstudien im Feld durchgeführt werden sollten, um die Praxistauglichkeit bestimmter DSM-Werkzeuge und -Verfahren zu testen. Diese Fallstudien und die Bearbeitung von Gebieten über 1000 Hektaren sind Voraussetzungen für die Nutzung von Synergien (Skalierungseffekte).
- 4 Infrastruktur für Bodenkartierung schaffen**

Dem Bedarf an umfangreichen Bodeninformationen stehen relativ hohe Kosten für die Analyse von Bodeneigenschaften im Labor gegenüber. Neue spektroskopische Analysemethoden erlauben die zeitnahe Untersuchung einer grossen Anzahl Bodenproben im Feld oder im Labor. Die Weiterentwicklung solcher kostengünstigen Messmethoden ist für eine Bodenkartierung zentral. Der Aufwand lässt sich in Verbindung mit technischen Vorrichtungen weiter reduzieren, etwa wenn die Feldarbeit durch den Einsatz von Fahrzeugen mit integrierter Bohreinrichtung zur Entnahme von Bohrkernen erleichtert werden kann. Für eine landesweite Bodenkartierung sind zudem Investitionen in die Infrastruktur (Logistik der Bodenproben, Probenaufbereitung, Durchführung von Bodenanalysen) und die zentrale Archivierung der Bodenproben unerlässlich, um so die Kosten pro Bodenprobe bei hoher Anzahl moderat zu halten.

5 Etappen und Vorranggebiete definieren

Eine landesweite Bodenkartierung im Rahmen einer BIP-CH stellt ein Generationenprojekt dar und wird schätzungsweise zwei bis drei Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Die vorrangig zu kartierenden Böden sollten nach den dringendsten Bedürfnissen festgelegt werden (beispielsweise Identifikation der RFF rund um Siedlungsgebiete). Die TS4 zeigt die wesentlichen Kriterien und methodischen Varianten auf, wie das geschehen kann.

6 Datenmanagement und Bodeninformationssystem (BIS) sicherstellen

Mit NABODAT wurde in den letzten Jahren ein leistungsfähiges und praxistaugliches nationales BIS aufgebaut, auf das aber nur der Bund und die Kantone Zugriff haben. Der dauerhafte Betrieb und die Weiterentwicklung des BIS sind sicherzustellen. Die freie Verfügbarkeit von Bodeninformationen für Forschung, Bund, Kantone und Gemeinden und der Abbau von Zugangsbarrieren für Vollzug und Öffentlichkeit sind wichtige Voraussetzungen für deren breite Nutzung. Für den Aufbau einer BIP-CH wird eine webbasierte Plattform empfohlen, die die Bodeninformationen und die essenziellen Meta-Informationen den Nutzergruppen in Verbindung mit Serviceangeboten und Beratung zugänglich macht. Künftig sollen Bodendaten nach einheitlichem Standard zwischen Akteurinnen und Akteuren schnell und effizient ausgetauscht werden können.

7 Landesweite Kartierung mit Mehrwert

Die Kosten für eine landesweite Bodenkartierung bewegen sich in der Grössenordnung von jährlich 10 bis 15 Millionen Franken (optimistische Schätzung) beziehungsweise 15 bis 25 Millionen Franken (konservative Schätzung) für die nächsten zwei bis drei Jahrzehnte. Diese Kostenschätzung ist allerdings mit grossen Unsicherheiten behaftet, da derzeit unklar ist, wie effizient sich mit den vorgeschlagenen Massnahmen eine landesweite Bodenkartierung gestalten lässt. Der Übergang von bisher kleineren zu grösseren Kartierungsgebieten und der Einsatz technisch weiterentwickelter Methoden können den spezifischen Kostenaufwand pro Hektare verringern (Skaleneffekt).

Die Kosten einer Bodenkartierung sind eine lohnende Investition in die Zukunft. Eine grobe Erfassung des indirekten wirtschaftlichen Nutzens einer BIP-CH veranschaulicht dies: Jedem Franken, der in eine landesweite Bodenkartierung investiert wird, steht selbst bei konservativen Annahmen ein Mehrwert von 2 bis 13 Franken gegenüber. Im Gegensatz zu anderen Bereichen der Umweltbeobachtung ist der Nutzen einer Bodenkartierung und der erhobenen Bodeninformationen langfristig. Es wird empfohlen, die ökonomische Betrachtung zum Mehrwert von Bodeninformationen zu vertiefen.

8 Instrumente und Bodenindikatoren anwenden

Um Gefährdungen des Bodens durch Verdichtung, Erosion, Humusverlust, Bodenversauerung oder einen diffusen Eintrag von Nähr- und Schadstoffen aus Gewässern zu vermeiden und zu vermindern, wurden praxistaugliche Instrumente entwickelt. Ihre Verwendung in der Fläche war bisher aber wegen fehlender Bodendaten begrenzt. Künftig sind diese Instrumente einheitlich und grossflächig einzusetzen und aus den Ergebnissen Anwendungskarten zu generieren, die den Bedarfsgruppen zur nachhaltigen Nutzung der Böden zur Verfügung stehen. Zudem sind geeignete Bodenindikatoren zur Steuerung einer nachhaltigen Nutzung der Böden auszuarbeiten. Mit der Bewertung von

Bodenfunktionen und den daraus abgeleiteten Bodenindexpunkten wird eine Brücke zwischen Bodenwissenschaften und der Raumplanung geschlagen. Im NFP 68 wurde ein erster Katalog von Bewertungsmethoden entwickelt (Kap. 2.6, S. 51), und mittelfristig sollte ein nationaler Katalog mit weiteren relevanten und praxiserprobten Bewertungsmethoden erstellt werden.

9 **Zentrale Servicestelle**

Für Politik, Vollzug, Forschung und Öffentlichkeit ist eine zentrale Servicestelle für Boden einzurichten, die die Koordination der Tätigkeiten im Rahmen des Wertschöpfungszyklus von Bodeninformationen gewährleistet, die erforderlichen Methoden nach Stand der Technik mit Partnern entwickelt und sie den Kantonen zur Verfügung stellt. Zudem soll sie den Wissenstransfer und die Beratung sicherstellen sowie die BIP-CH als Informations- und Wissensplattform pflegen. In anderen Umweltbereichen wie der Landesgeologie oder Landeshydrologie werden entsprechende Aufgaben seit langem zentral ausgeführt. Analog dazu wird hier der Aufbau einer Landespedologie empfohlen, die als Träger der BIP-CH fungiert.

Die Schlussfolgerungen im Rahmen der BIP-CH sind nicht neu. Sie wurden teilweise bereits in der Motion Müller-Altmett formuliert, die eine «zentrale und unabhängige Verwaltungs- und Koordinationsstelle für Bodeninformationen» fordert. Diese Motion gilt es auf Bundesebene dringend umzusetzen und damit nach über zwei Jahrzehnten den Fehlentscheid zu korrigieren, der den Nationalen Kartierungsdienst aufgehoben hat. Begleitend gilt es die Nationale Bodenstrategie zu finalisieren und zusammen mit Bundesämtern und Kantonen im Vollzugssystem und in den Politikbereichen zu verankern.

10 **Öffentlichkeitsarbeit: Die Bedeutung der Böden wahrnehmen**

Boden ist eine nicht erneuerbare, immer knapper werdende natürliche Ressource. In Zeiten der Globalisierung der Landwirtschaft und der Urbanisierung werden Böden oft nicht mehr bewusst als Lebensgrundlage wahrgenommen, obschon ihre existenzielle Bedeutung unverändert ist. Um eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden sicherzustellen bedarf eines hohen Engagements der Politik. Parallel zu den genannten, eher technisch geprägten Handlungsfeldern gilt es deshalb, das Bewusstsein und die Wahrnehmung in Politik und Gesellschaft dafür zu schärfen, dass unsere Kultur und unser Wohlstand letztlich auch von den Funktionen und Ökosystemleistungen (ösl) der Böden abhängig sind.

Zentral ist dabei die Botschaft, dass sich einmal zerstörter oder beschädigter Boden ungeachtet der vielen technischen Lösungen in unserem Alltag nicht mehr regenerieren kann. Für den Boden gilt deshalb vor allem das Vorsorgeprinzip. Eine unsachgemässe und nicht nachhaltige Nutzung bewirkt Schäden, die sich kaum beheben lassen. Technische Methoden zur Wiederherstellung der Bodenfunktionen sind – wenn überhaupt möglich – finanziell nicht tragbar. Mit der BIP-CH wird das Vorsorgeprinzip im Bodenschutz gestärkt.

Anhang

Anhang 1

Auswahl parlamentarischer Vorstösse, die von hoher Relevanz für die natürliche Ressource Boden sind und wofür Bodeninformationen eine wichtige Entscheidungsgrundlage bilden.

Motion Bigger (05.3676)

Kulturlandverlust und landwirtschaftliche Nutzfläche, Einreichungsdatum: 07.10.2005

Parlamentarische Initiative Malama (08.437)

Mehrwertabgabe. Aufhebung von Artikel 5 Absatz 1 RPG, Einreichungsdatum: 13.06.2008

Parlamentarische Initiative UREK-s (09.474)

Flexibilisierung der Waldflächenpolitik, Einreichungsdatum: 25.06.2009

Motion Bourgeois (09.4036)

Raumplanung. Landwirtschaftsverträglichkeitsprüfung, Einreichungsdatum: 02.12.2009

Motion Bourgeois (10.3659)

Raumplanung und wirksamer Schutz von Kulturland, Einreichungsdatum: 15.09.2010

Motion von Siebenthal (10.3404)

Wiederherstellung und Erhaltung von verbuschten und verwaldeten landwirtschaftlichen Nutzflächen, Einreichungsdatum: 10.06.2010

Postulat von Siebenthal (13.4201)

Rückführung von Asche in den Wald als Sofortmassnahme gegen Bodenversauerung, Einreichungsdatum: 12.12.2013

Motion Hassler (10.3489)

Umfassender Schutz des Kulturlandes in der Raumplanung, Einreichungsdatum: 17.06.2010

Postulat Lachenmeier-Thüring (10.3529)

Plafonierung der Verkehrsflächen, Einreichungsdatum: 17.06.2010

Postulat Walther (10.3533)

Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen, Einreichungsdatum: 17.06.2010

Interpellation Geissbühler (11.3046)

Überprüfung der Fruchtfolgeflächen, Einreichungsdatum: 03.03.2011

Postulat Moser (12.3299)

Aktionsplan zur Risikominimierung und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, Einreichungsdatum: 16.03.2012

Interpellation Joder (12.3883)

Koordination des qualitativen und quantitativen Bodenschutzes und Umsetzung in der Raumplanung, Einreichungsdatum: 27.09.2012

Motion Müller-Altermatt (12.4230)

Nationales Kompetenzzentrum Boden als Gewinn für Landwirtschaft, Raumplanung und Hochwasserschutz, Einreichungsdatum: 14.12.2012

Anhang 1

Postulat Bourgeois (13.4158)

Potenzial des Untergrunds. Konflikt- und Aufgabenmanagement,
Einreichungsdatum: 11.12.2013

GPK, Geschäftsbericht 2015

Sicherung landwirtschaftlichen Kulturlandes. Bericht der parlamentarischen Verwaltungskontrolle zuhanden der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates.
Juni 2015.

Motion Graf (15.3411)

Sofortige Sistierung des Vertriebs von gefährlichen, glyphosathaltigen Unkrautvertilgungsmitteln, Einreichungsdatum: 05.05.2015

Motion Knecht (15.3458)

Die Agrarpolitik 2014–2017 konsolidieren und Kontinuität sichern,
Einreichungsdatum: 19.06.2015

Motion Graf (15.3717)

Die Agrarpolitik 2014–2017 konsolidieren und Kontinuität sichern,
Einreichungsdatum: 19.06.2015

Motion Schelbert (15.3835)

Pestizide. Vorsorgeprinzip durchsetzen, Einreichungsdatum: 04.11.2015

Motion Reynard (16.4070)

Quecksilber-Schwellenwert. Gegen unnötige Bürokratie und Wertminderung,
Einreichungsdatum: 15.12.2016

Interpellation Bertschy (17.4186)

Ernährungssicherheit als ökologische Herausforderung. Welche Massnahmen ergreift der Bundesrat?
Einreichungsdatum: 14.12.2017

Bodeninformationssysteme

Land	Institution	Bodeninformationen
D – national	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	<ul style="list-style-type: none"> – FachInformationssystem Bodenkunde (FISBo) – Bodenkundliche Grundlagendaten – Flächendaten – Labor/Profildaten – Methoden – Thematische Karten
→	http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/informationsgrundlagen_node.html http://www.bgr.de/app/FISBoBGR_MapServer/index.php?project=fisbo&lang=de	
D – national	Umweltbundesamt Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> – FachInformationssystem Bodenschutz (FIS Bodenschutz) – Bodendauerbeobachtung – Transfer Boden – Pflanze
→	www.umweltbundesamt.de (siehe Übersicht Publikation: UBA 2012. Bodendaten in Deutschland.)	
D – national	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	– Übersichtskarten
→	www.bodenatlas.de	
D – national	Staatliche Geologische Dienste Deutschlands	<ul style="list-style-type: none"> – Bohrpunktnachweise – Kartenserver
→	http://www.infogeo.de	
D – national	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	<ul style="list-style-type: none"> – Geoportal des Bundes – Suche nach Themengebieten
→	http://www.geoportal.de	
D – national	Zentrum für Bodenforschung	<ul style="list-style-type: none"> – Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) – Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)
→	www.bonares.de	
D – Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt	– Bodenkartierung
→	Bodeninformationssystem Bayern: http://www.bis.bayern.de	
D – Nordrhein-Westfalen	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen	– Bodenkartierung
→	Informationssystem Bodenkarte: http://www.gd.nrw.de/g_bk.php	
D – Niedersachsen	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)	– Bodenkartierung
→	Niedersächsisches Bodeninformationssystem NIBIS: http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=608&article_id=841&psmand=4	
D – Baden-Württemberg	Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau	– Bodenkartierung
→	Geodaten-Dienste Landesamt Geologie: https://produkte.lgrb-bw.de/catalog/list/?wm_group_id=2	
AT	Bodeninformationssystem BORIS Umweltbundesamt Wien	<ul style="list-style-type: none"> – Bodenkartierung – Bodenmonitoring – Bodenzustand
→	http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/boden/boris/boris_datenzugang/	

Anhang 1

Bodeninformationssysteme

Land	Institution	Bodeninformationen
CH – national	Bundesamt für Umwelt (BAFU)	– Bodenkartierung – Bodenmonitoring – Bodenzustand
→	Bodeninformationssystem NABODAT: www.nabodat.ch	
CH – Kanton Basel-Landschaft	Direktion für Bau und Umwelt, Umweltschutz	– Bodenkartierung – Bodenzustand
	Bodeninformationen BL: http://www.baselland.ch/Bodeninformation.312689.o.html (www.geo.bl.ch)	
CH – Kanton Zürich	Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur	– Bodenkartierung – Bodenmonitoring
→	Bodenkarte Kanton ZH: http://www.aln.zh.ch/internet/audirektion/aln/de/fabo/bodenzustand/bodenkarten.html (http://www.gis.zh.ch/gb4/bluevari/gb.asp?app=boka)	
CH – Kanton Solothurn	Amt für Umwelt, Fachbereich Bodenschutz	– Bodenkartierung – Bodenzustand
→	Interaktive Karte Bodeninformationen: http://www.so.ch/departemente/bau-und-justiz/amt-fuer-umwelt/fachbereiche/bodenschutz.html (http://www.sogis1.so.ch/sogis/internet/pmapper/map.phtml?config=boden_lw)	
CH – Kanton St. Gallen	Amt für Umwelt und Energie (AFU) Amt für Raumentwicklung und Geoinformation (AREG)	– Bodenkartierung
→	http://www.umwelt.sg.ch/home/Themen/Boden/Messergebnisse/bodenkarte.html (www.geoportal.sg.ch)	
CH – Kanton Luzern	Umwelt und Energie (uwe), Abteilung Boden und Abfall, Bodenschutz	– Bodenkartierung
→	Interaktive Karte Bodeninformationen: http://www.umwelt-luzern.ch/index/bodenschutz.htm (http://www.geo.lu.ch/map/boden/)	
CH – Kanton Genf	Service de géologie, sols et déchets (GESDEC)	– Bodenkartierung
→	Interaktive Karte Bodeninformationen: http://ge.ch/geoportail/infogesdec	
England und Wales	Cranfield University, Ministry of Environment	
→	Informationssystem Bodenkarte: http://www.gd.nrw.de/g_bk.php	
Irland	Environmental Protection Agency	
→	http://soils.teagasc.ie	
Frankreich	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol)	
→	DONESOL: http://www.gissol.fr/outil/donesol/donesol.php	
Dänemark	Geological Survey of Denmark and Greenland	
→	Soil Mapping Service: http://www.geus.dk/departments/quaternary-marine-geol/gis/j200-dk.html	
Norwegen	Norwegian Institute of Land Inventory	
→	Soil Mapping Service: http://www.geus.dk/departments/quaternary-marine-geol/gis/j200-dk.html	
Osteuropa	Zusammenfassung	
→	siehe Hengl et al. 2007 ⁸³	

Bodeninformationssysteme

Land	Institution	Bodeninformationen
Europa	Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European Commission	
→		EUSIS (European Soil Information System): http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esbn/EUSIS.html European Soil Data Centre (ESDAC): http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets
USA	National Cooperative Soil Survey (ncss)	
→		NASIS (National Soil Information System): http://soils.usda.gov/technical/nasis/index.html
Kanada	Agriculture and Agri-Food Canada	
→		CanSIS (The Canadian Soil Information System): http://sis.agr.gc.ca/cansis

**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 → 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

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.)
- E * 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.)
- P** * **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.)
- Z** **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.)

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-CAFÉ: 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., Zürrer M., Knüsel P., Franzen J., Papritz J.A.)

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.)

* Projekte mit einem Beitrag zu dieser thematischen Synthese.

Anhang 2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Bodenprofile von Ackerbaustandorten, Grasland- und Waldböden	15
Abbildung 2	Der Boden als Ganzes	17
Abbildung 3	Bodeninformationen als Teil des Wertschöpfungszyklus einer nachhaltigen Bodenpolitik	19
Abbildung 4	Teilaspekte des Bodeninformationen-Wertschöpfungszyklus	20
Abbildung 5	Für die Produktion von Nahrungsmitteln geeignete und nicht geeignete Bodentypen	27
Abbildung 6	Filterleistung von Böden	29
Abbildung 7	Beispiele von Bodenlebewesen	31
Abbildung 8	Ausschnitt aus der Hinweiskarte für anthropogene Böden im Kanton Zürich	32
Abbildung 9	Erhebungsblatt einer Bodenkartierung	36
Abbildung 10	Beispiel für eine thematische Anwenderkarte für den Bodenschutz	37
Abbildung 11	Vorgehen bei der Erstellung von Karten für Bodeneigenschaften und für Bodenfunktionen	38
Abbildung 12	Übersicht über die Bodenkartierungen seit den 1950er-Jahren in der Schweiz	40
Abbildung 13	Ausschnitt aus dem Nationalen Bodeninformationssystem (NABODAT)	43
Abbildung 14	Übersicht Bodenfeuchte-Messnetze 2015	45
Abbildung 15	Phosphorversorgung in Grasland-Oberböden 2014	46
Abbildung 16	Stand der Bodenkartierung in der EU	49
Abbildung 17	Verfügbarkeit von Bodeninformationssystemen in EU-Ländern	49
Abbildung 18	Weltweit verfügbare Ackerböden	50
Abbildung 19	Handlungsebenen der Global Soil Partnership (GSP)	52
Abbildung 20	Beispiel für eine Bodenfunktionsbewertung im Bundesland Hessen (DE)	55
Abbildung 21	Genereller Ablauf der Bewertung von Bodenfunktionen	56
Abbildung 22	Bodenfunktionskarten für das Fallstudiengebiet im Kanton Zürich	57
Abbildung 23	Diagramme zur Darstellung der Multifunktionalität der Böden und des spezifischen Leistungsvermögens eines Bodens	58
Abbildung 24	Landnutzungsänderung im Gebiet Bern-Westside zwischen 2002 und 2008	60
Abbildung 25	Schema für die Inventarisierung der Fruchtfolgeflächen	61
Abbildung 26	Bodenkarte als Basis für die Bewertung der landwirtschaftlichen Eignung der Böden (NEK) und zur Ausscheidung von FFF	62
Abbildung 27	Regionales Boden-Monitoring-Tool für ausgeglichene Stoffkreisläufe	65
Abbildung 28	Landnutzungsklassen der Gras-Ackerland-Rotationen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Schweizer Mittelland von 2000 bis 2015	66
Abbildung 29	Arbeitsschritte der gegenwärtigen Kartierungsmethode und Vorschläge für die technischen Weiterentwicklungen	74

Abbildung 30	Mögliche Vorranggebiete für die Bodenkartierung: Böden rund um siedlungsgeprägte Landschaften (Kriterium «Siedlungsdruck»)	77
Abbildung 31	Mögliche Etappierung für die Realisierung einer BIP-CH	79
Abbildung 32	Direkter Nutzen des Bodens (Auswahl)	82
Abbildung 33	Bodenkultur: «Le semeur», Vincent van Gogh	83
Abbildung 34	Anzeichen für Bodenverdichtung nach starken Regenfällen auf Schweizer Ackerflächen	85
Abbildung 35	Tiefgepflügter drainierter Moorboden	87
Abbildung 36	Strassenabwasser-Behandlungsanlage (SABA) in Zürich-Affoltern	88
Abbildung 37	Übersicht über den Mehrwert einer Bodenkartierung für zehn ausgewählte Themengebiete	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Themengebiete, in denen Bodeninformationen erhoben werden	23
Tabelle 2	Nutzungsinteressen, Bedarfsgruppen und ausgewählte Fragestellungen betreffend Bodeninformationen	24–25
Tabelle 3	Bedarf an Bodeninformationen auf Stufe Bodeneigenschaften und Bodenkennwerte	34
Tabelle 4	Arbeitsschritte bei der Erhebung von Bodeninformationen für eine Bodenkartierung	35
Tabelle 5	Stand der Bodenkartierung in der Schweiz	41
Tabelle 6	Beispiele von Bewertungskriterien für ausgewählte Bodenteilfunktionen	53–54
Tabelle 7	Instrumente zur Berechnung beziehungsweise Bewertung von Gefährdungen für den Boden	63
Tabelle 8	Mögliche Definitionen von Vorranggebieten gemäss Fragestellungen verschiedener Bedarfsgruppen	78

Glossar

B Bodendaten

Direkt messbare oder schätzbare Eigenschaften von Böden (z.B. Tongehalt), die für die Beschreibung von Bodeneigenschaften entweder direkt benutzt werden können oder zu abgeleiteten Bodenkennwerten aggregiert werden müssen¹.

Bodeneigenschaften

Bezeichnen die Beschaffenheit des Bodens. Sie werden in der Regel über Bodenkennwerte beschrieben. Beispiele sind die Lagerungsdichte oder die Wasserdurchlässigkeit. Bodeneigenschaften geben Hinweise darauf, wie bestimmte Prozesse im Boden ablaufen. So weist etwa die Durchlässigkeit darauf hin, wie schnell Wasser durch den Boden sickern kann¹.

Bodenfruchtbarkeit

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

Boden gilt 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 Bundesbodenschutzgesetz¹²⁵:

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

Bodeninformationen

Bezeichnung für die Gesamtheit an Bodendaten, Kenngrössen, Kartenwerken und weiteren Informationsprodukten, die zur Erfassung, Auswertung und Interpretation räumlich-zeitlicher Eigenschaften von Böden dienen.

Bodenkartierung

Bezeichnung für eine systematische, flächendeckende Erhebung (Inventur) der Bodenverhältnisse. Ziel einer Bodenkartierung ist es, die räumliche Verbreitung der Böden differenziert nach ihrem Aufbau und ihren Eigenschaften zu erfassen. Grundlage der Bodenkartierung bildet die Kartierungsanleitung⁴⁶.

Bodenkennwerte

Bezeichnen zumeist abgeleitete Parameter zur Beschreibung von Bodeneigenschaften (z.B. pflanzennutzbare Gründigkeit).

Bodenqualität

Leistungsvermögen der Böden, ihre Bodenfunktionen in Ökosystemen zu erfüllen^{201, 202}.

D Datenschlüssel

(Zeitliche) Version des Datenmodells für Bodendaten, das definiert, wie die Bodeneigenschaften und -kenngrössen erfasst werden. Der Datenschlüssel definiert zudem die möglichen Ausprägungen (Codeklassen) für taxonomische Grössen.

Digital Soil Mapping (DSM)

Bereich der Bodenkunde, der sich mit der Anwendung mathematischer und statistischer Methoden zur Untersuchung der Verbreitungssystematik und der Genese der Böden inklusive ihrer Eigenschaften beschäftigt. Hauptziel ist die Erstellung von bodenkundlichen Kartenwerken auf Basis von quantitativen Beziehungen zwischen bodenkundlichen Feld- oder Labordaten und flächendeckend vorliegenden Umweltdaten (Relief, Geologie, Klima und anderen Faktoren)¹⁷⁴.

F Fruchtfolgeflächen (FFF)

Bezeichnung für die wertvollsten Landwirtschaftsflächen der Schweiz, die im Sachplan Fruchtfolgeflächen (SP FFF) auszuweisen sind, um die ausreichende Versorgungsbasis der Schweiz gemäss Artikel 1 Absatz 2 des Bundesgesetzes vom 22. Juni 1979 über die Raumplanung (RPG) sicherzustellen. Die FFF umfassen 444 000 Hektaren vorab Ackerland und Kunstwiesen in Rotation sowie ackerfähige Naturwiesen. FFF liegen grossmehrheitlich im Schweizer Mittelland.

L Landwirtschaftliche Nutzfläche (LN)

Bezeichnung für die einem Betrieb zugeordnete, für den Pflanzenbau genutzte Fläche ohne die Sömmerungsfläche, die dem Bewirtschafter ganzjährig zur Verfügung steht²⁰³. Die gesamte LN der Schweiz beträgt rund 1,05 Millionen Hektaren (2017)²⁰⁴.

O Ökosystemleistungen (ösl)

Leistungen, die Menschen von Ökosystemen beziehen, beziehungsweise Aspekte des Ökosystems, die – aktiv oder passiv – genutzt werden, um menschliches Wohlbefinden zu erzeugen. ösl fördern die Anerkennung des Wertes des Bodens für das menschliche Wohlbefinden und die Berücksichtigung von Boden in Entscheidungsprozessen. Im Gegensatz dazu sind die (→) Bodenfunktionen Funktionen, die ein Boden uneingedenk ihrer Wirkungen auf das menschliche Wohlbefinden erfüllt².

T Tensiometer

Instrument zur kontinuierlichen Messung der Bodenfeuchte anhand der Saugspannung.

Abkürzungsverzeichnis

ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
BGS	Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BSI	Bodeninformationssystem
BV	Bundesverfassung
DSM	Digital Soil Mapping
FAL24	Kartiermethodik gemäss «Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden» ⁴⁶
FAL24+	Kartiermethodik gemäss Konzept Bodenkartierung Kanton Solothurn ^{20, 46} , die die FAL24 erweitert und jeder Flächeneinheit (Polygon) in der Bodenkarte einen minimalen Datensatz für Bodeneigenschaften und Kennwerte zuordnet.
FFF	Fruchtfolgeflächen
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
NABO	Nationale Bodenbeobachtung
NABODAT	Nationales Bodeninformationssystem Schweiz (www.nabodat.ch)
NEK	Nutzungseignungsklassen
NFP 22	Nationales Forschungsprogramm «Nutzung des Bodens in der Schweiz»
NFP 61	Nationales Forschungsprogramm «Nachhaltige Wassernutzung»
NEK	Landwirtschaftliche Nutzungseignungsklassen (gemäss FAL24)
ÖSL	Ökosystemleistungen
PTF	Pedo-Transferfunktion
SNF	Schweizerischer Nationalfonds
SP FFF	Sachplan Fruchtfolgeflächen
THG	Treibhausgas
TS	Thematische Synthese
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UZL	Umweltziele Landwirtschaft
VBBO	Verordnung über Belastungen des Bodens (SR 814.12)

Literatur

- [1] Krebs R., Egli M., Schulin R., Tobias S. (Hrsg.) (2017): Bodenschutz für die Praxis. Haupt-Verlag, UTB-Band-Nr.: 4820, ISBN 978-3-8252-4820-8.
- [2] 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
- [3] Greiner L. et al. (2017): Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. In: Land Use Policy 67, 224–237.
- [4] Bundesämter für Umwelt (BAFU), Raumentwicklung (ARE) und Landwirtschaft (BLW) (2016): Entwurf einer nationalen Bodenstrategie (internes Dokument).
- [5] Staub C., Ott W., Heusi F., Klingler G., Jenny A., Häcki M., Hauser A. (2011): Indikatoren für Ökosystemleistungen: Systematik, Methodik und Umsetzungsempfehlungen für eine wohlfahrtsbezogene Umweltberichterstattung. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- [6] Bundesamt für Landwirtschaft (2012): Schutz des Kulturlandes. Fakten und Herausforderungen. Bern. www.blw.admin.ch >Themen >Schutz des Kulturlandes.
- [7] Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S. (2018): Eine Bodenagenda für die Raumplanung. Thematische Synthese TS3 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- [8] Chemnitz C., Weigelt J. (2015): Bodenatlas – Daten und Fakten über Acker, Land und Erde. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin. www.boell.de/bodenatlas
- [9] Science for Environment Policy (2016): No net land take by 2050? Future Brief 14. Produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol. Available at: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>
- [10] www.farmlandgrab.org
- [11] Bundesamt für wirtschaftliche Landesversorgung (BWL) (2010): Berechnung theoretisches Produktionspotential Fruchtfolgeflächen. Geschäftsstelle Bereich Ernährung.
- [12] Moser A., Lüscher C. (2013): Ernährungsfläche der Agglomeration Basel – eine Visualisierung. In: Agrarforschung 4, 88–91.
- [13] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2010): Land- und Ernährungswirtschaft 2025. Diskussionspapier des Bundesamtes für Landwirtschaft zur strategischen Ausrichtung der Agrarpolitik, Bern.
- [14] Rieder S., Landis F., Lienhard A., Schwenkel C., Dolder O. (2014): Stärkung des Vollzugs im Umweltbereich – Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Interface/Kompetenzzentrum für Public Management der Universität Bern, Luzern.
- [15] Hepperle E., Stoll T. (2006): Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität. BAFU Umwelt-Wissen UW-0633, Bern.
- [16] Neue Zürcher Zeitung (14.11.2014): Föderalismus in Bewegung. Es hapert beim Vollzug der Umweltgesetze. Zürich.
- [17] Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern für Landwirtschaft und Natur (VOL) (2017): Bodenbericht 2017. Zollikofen. www.be.ch/bodenschutz.
- [18] Campbell G.A., Lilly A., Corstanje R., Mayr T.R., Black H.I.J. (2017): Are existing soils data meeting the needs of stakeholders in Europe? An analysis of practical use from policy to field. In: Land Use Policy 69, 211–223.
- [19] Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1. Juli 1998, Stand: 12. April 2016 (SR 814.12).

- [20] Fachstelle Bodenschutz des Kantons Solothurn (2005): Bodenkartierung Kanton Solothurn. Konzept Bodenkartierung Kanton Solothurn 2005. Aktualisierung des Konzeptes von 1995. Solothurn.
- [21] Lüscher C. (2004): Leitfaden Bodenkartierung Bodendaten – ein Werkzeug für Planung, Nutzung und Schutz des Lebensraumes Boden. BGS und BUWAL.
- [22] Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017): Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Zuhanden BAFU. AMBIO GmbH, Zürich.
- [23] Schweizerischer Bundesrat (2017): Botschaft zur Volksinitiative «Für Ernährungssouveränität. Die Landwirtschaft betrifft uns alle», SR 17.023.
- [24] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. BAFU, Umwelt-Wissen UW-1633, Bern.
- [25] World Food System Center der ETH Zürich (2015): Foresight Study: Research for a Sustainable Swiss Food System. www.worldfoodsystem.ethz.ch
- [26] Zihlmann U., Weisskopf P., Müller M. (2010): Böden standortgerecht nutzen. Datenblätter Ackerbau, Grundlagen 1.7.1, Agridea.
- [27] Bundesamt für Umwelt (2009): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. BAFU, Umwelt-Zustand UZ-0903, Bern.
- [28] Doppler T., Mangold S., Wittmer I., Spycher S., Comte R., Stamm C., Singer H., Jung-hans H., Kunz M. (2017): Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen. In: Aqua & Gas 4.
- [29] Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Singer H., Stamm C., Hollender J., Junghans M., Leu C. (2014): Über 100 Pestizide in Fliessgewässern – Programm NAWA SPEZ zeigt die hohe Pestizidbelastung der Schweizer Fliessgewässer auf. In: Aqua & Gas 3.
- [30] Prasuhn V., Konz N., Stamm C., Frey M. (2011): Machbarkeitsstudie Kartierung beiträger Flächen – Problem fehlender Bodendaten. In: BGS Bulletin 32, Knappe Ressource Boden: eine Herausforderung, 71–74.
- [31] Chiaia-Hernandez A.C., Keller A., Wächter D., Steinlin C., Camenzuli L., Hollender J., Krauss M. (2017): Long-term persistence of pesticides and TPs in archived agricultural soil samples and comparison with pesticide application. In: Environmental Science & Technology 51 (18), 10642–10651.
- [32] Schweizerischer Bundesrat (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. BAFU (Hrsg.).
- [33] Schweizerischer Bundesrat (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014. BAFU (Hrsg.).
- [34] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2011): Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. Bern.
- [35] Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J., van der Putten W.H. (Hrsg.; 2010): European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission.
- [36] Schweizerischer Bundesrat (2012): Strategie Biodiversität Schweiz. BAFU (Hrsg.), Bern.
- [37] Schweizerischer Bundesrat (2017): Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz. BAFU (Hrsg.), Bern.
- [38] Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014): In: Nature 515, 505–511. doi:10.1038/nature13855

- [39] Abteilung Umwelt Kanton Aargau (2015): «Jahr des Bodens 2015». UMWELT AARGAU, Sondernummer 45. Aarau.
- [40] Amt für Landschaft und Natur (ALN) Kanton Zürich (2012): Massnahmenplan Bodenschutz. Zürich.
- [41] Amt für Umwelt und Energie (AFU) Kanton St. Gallen (2014): Kantonale Bodenüberwachung St. Gallen – Konzept 2015. St. Gallen. S. 29.
- [42] Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft (1999): Integration des Bodenschutzes in die Raumplanung. Liestal.
- [43] Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur. www.maps.zh.ch
- [44] Schweizerischer Bundesrat (2016): Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016–2019, 27. Januar 2016. ARE (Hrsg.).
- [45] Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) (2002): Sicherheit vor Naturgefahren – Vision und Strategie. www.planat.ch
- [46] Brunner J., Jäggi F., Nievergelt J., Peyer K. (1997): Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL, Hrsg.), Schriftenreihe Nr. 24., Reckenholz, Zürich.
- [47] Sticher H. (2001): Bodenkunde und Bodenkundler in der Schweiz 1855–1962. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (Hrsg.), Dokument 11, Dietikon.
- [48] Viscarra Rossel R.A., Behrens T., Ben-Dor E., Brown D.J., Demattè J.A.M., Shepherd K.D., Shi Z., Stenberg B., Stevens A., Adamchuk A., Aichi H., Barthès B.G., Bartholomeus H.M., Bayer A.D., Böttcher K., Brodský L., Du C.W., Ji W. (2016): A global spectral library to characterize the world's soil. In: *Earth-Sci. Rev.* 155, 198–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev>.
- [49] Viscarra Rossel R.A., Webster R. (2012): Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database. In: *Eur. J. Soil Sci.* 63, 848–860.
- [50] Carizzoni M., Cavelti G., Hurst T., Zürrer M. (2017): Konzept für ein flächendeckendes Bodeninformationssystem. Im Auftrag des BAFU. BHP Brugger und Partner, Zürich.
- [51] Leitgeb E., Reiter R., Englisch M., Lüscher P., Schad P., Feger K.H. (2013): Waldböden: Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. Wiley-vch Verlag, Weinheim.
- [52] Rued A., Peyer K. (1996): Handbuch Waldbodenkartierung, BUWAL, Vollzug Umwelt, Bern.
- [53] Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS; Hrsg.) (2008): Klassifikation der Böden der Schweiz.
- [54] Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Staatliche Geologische Dienste, 5. Auflage, Hannover.
- [55] Bodenkarte Solothurn, <https://geoweb.so.ch/map/isboden/>; © Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Abteilung Boden, Solothurn.
- [56] Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A. (2017): Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. In: *SOIL Discussions*, 1–32, 10.5194/soil-2017-14, <https://www.soil-discuss.net/soil-2017-14>.
- [57] Nussbaum M., Walthert L., Fraefel M., Greiner L., Papritz A. (2017): Mapping of soil properties at high resolution in Switzerland using boosted geospatial models. In: *SOIL Discussions*, 1–32, 10.5194/soil-2017-13, <https://www.soil-discuss.net/soil-2017-13>.

- [58] Behrens, T., Scholten, T., (2006): Digital Soil Mapping in Germany – a review. *J Plant Nutri Soil Sci* 169, 434–443.
- [59] Pazeller A., Ruef A., Petrasek M. (2004): Sichere und benutzerfreundliche Archivierung von Bodenprofil- und Bohrdaten. Projekt Bodeninformation Schweiz BIP-CH – Teilprojekt 1. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS; Hrsg.) im Auftrag des BUWAL.
- [60] Knecht M. (2004): Bodeninformation Schweiz BI-CH. Schlussbericht 2003. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS; Hrsg.) im Auftrag des BUWAL.
- [61] Grob U., Ruef A., Zihlmann U., Klauser L., Keller A. (2015): Agroscope-Bodendatenarchiv. Bodendaten aus Bodenkartierungen 1953–1996. *Agroscope Science* 14.
- [62] siehe www.nabodat.ch
- [63] Rehbein K., Grob U., Klauser L., Keller A. (2017): Nationales Bodeninformationssystem NABODAT – Datenmodell-Version 1.5, Agroscope, Servicestelle NABODAT, Zürich. www.nabodat.ch
- [64] Vökt U., Pazeller A. (2002): Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000 – Qualität und Aussagekraft der Archivadokumente. BGS (Hrsg.).
- [65] www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden
- [66] Walthert L., Bridler L., Keller A., Lussi M., Grob U. (2017): Harmonisierung von Bodendaten im Projekt «Predictive mapping of soil properties for the evaluation of soil functions at regional scale (PMSoil)» des Nationalen Forschungsprogramms Boden (NFP 68). ETH Zürich. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010801994>.
- [67] Grob U., Rehbein K., Keller A. (2018): Stand der Bodenkartierung in der Schweiz: Informationsplattform und Metadatenkatalog. Agroscope, Zürich. www.nabodat.ch
- [68] Senn D. (2015): Vision vom lückenlosen Bodenmessnetz. In: *Magazin Schweizer Landtechnik*, 46–51.
- [69] Stehrenberger E., Huguenin-Landl B. (2016): Evaluation der Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- [70] Mösch D., Liener C. (2015): Bodendaten sind wichtig für die Hochwasserprognose. In: *Umwelt Aargau*, Sondernummer 45, 34–36.
- [71] Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R.G., Keller A. (2015): Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507.
- [72] Desales A., Dahinden R. (2000): Nationales Boden-Beobachtungsnetz – Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren: Messperioden 1985–1991 und 1992–1997. BUWAL, Schriftenreihe Umwelt, 320, Bern.
- [73] Schaub M., Dobbertin M., Kräuchi N., Kaennel Dobbertin M. (2011): Preface – long-term ecosystem research: understanding the present to shape the future. In: *Environ. Monit. Assess.* 174, 1–2.
- [74] Braun S., Belyazid S., Burger T., Stocker R., Kurz D., Remund J., Rihm B. (2015): Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006–2014. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- [75] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014): Agrarbericht 2014. www.agrarbericht.ch
- [76] Hämman M., Desales A. (2003): Handbuch Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. BUWAL, VU-4814, Bern.

- [77] Nussbaum M., Aregger K., Burgos S., Keller A., Papritz A. (2018): Übersicht der Bodeninformationssysteme und der Bodenkartieraktivitäten in Europa im Hinblick auf die Bodenkartierung in der Schweiz. Fokusstudie BODENINFORMATIONSSYSTEME des NFP 68.
- [78] Jones R.J.A., Houšková B., Bullock P., Montanarella L. (2005): Soil Resources of Europe, second edition, Institute for Environment & Sustainability, JRC Ispra.
- [79] Umweltbundesamt (Hrsg.; 2012): Bodendaten in Deutschland: Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden.
www.umweltbundesamt.de/publikationen
- [80] Welternährungsorganisation (FAO) (2015): Status of the World's Soil Resources (sWSR) – Main Report.
- [81] Omuto C., Nachtergaele F., Vargas Rojas R. (2012): State of the Art Report on Global and Regional Soil Information: Where are we? Where to go? Global Soil Partnership technical report. FAO (Hrsg.), Rom.
- [82] Hartemink A.E., Krasilnikov P., Bockheim J. (2013): Soil maps of the world. In: *Geoderma* 207/208, 256–267.
- [83] Hengl T., de Jesus J.M., MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Ribeiro E., Samuel-Rosa A., Kempen B., Leenaars J.G.B., Ruiperez Gonzalez M. (2014): Soil Grids 1 km – Global Soil Information Based on Automated Mapping. In: *PLOS ONE* 9 (8), e105992.
- [84] Welternährungsorganisation (FAO), IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC (2012): Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rom.
- [85] Ribeiro E., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Van Oostrum A.J.M., Mendes de Jesus J. (2015): Towards the standardization and harmonization of world soil data: Procedures Manual ISRIC World Soil Information Service (WoSIS version 2.0). ISRIC – World Soil Information, Wageningen. http://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_2015_03.pdf
- [86] Sanchez P.A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A.E., Hempel J. (2009): Digital Soil Map of the World. In: *Science* 325, 680–681.
- [87] Arrouays D., McBratney A.B., Minasny B., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., MacMillan R.A., Hartemink A.E., Lagacherie P., McKenzie, N.J. (2014): The GlobalSoilMap project specifications. In: *GlobalSoilMap Basis of the global spatial soil information system* 9–12, CRC Press.
- [88] Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012): European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. In: *Land Use Policy* 29 (2), 329–338, doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003.
- [89] Latham J., Cumani R., Rosati I., Bloise M. (2014): Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE). Database Beta-Release Version 1.0.
- [90] Pimentel D., Burgess M. (2013): Soil Erosion Threatens Food Production. In: *Agriculture* 3, 443–463; doi:10.3390/agriculture3030443.
- [91] Nkonya E., Mirzabaev A., von Braun J. (Hrsg.) (2016): Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development. Springer-Verlag, doi 10.1007/978-3-319-19168-3.
- [92] Bouma J. (2009): Soils are back on the global agenda: Now what? In: *Geoderma* 150, 224–225.
- [93] Daily G.C., Polasky S., Goldstein J., Kareiva P.M., Mooney H.A., Pejchar L., Shallenberger R. (2009): Ecosystem services in decision making: time to deliver. In: *Front. Ecol. Environ.* 7 (1), 21–28.

- [94] Baveye P.C. (2017): Quantification of ecosystem services: beyond all the guesstimates, how do we get real data? In: *Ecosyst. Serv.* 24, 47–49.
- [95] Naturkapital Deutschland – TEEB (2012): Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – eine Einführung. München, ifuplan; Leipzig, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ Bonn; Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- [96] Bouma J. (2014): Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177 (2), 111–120.
- [97] Herrick J.E. (2000): Soil quality: an indicator of sustainable land management? In: *Applied Soil Ecology* 15 (2000), 75–83.
- [98] Wienhold B.J., Andrews S.S., Karlen D.L. (2004): Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. In: *Environmental Geochemistry and Health* 26, 89–95.
- [99] 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 (Guest Editorial). In: *Soil Science Society of America Journal* 61, 4–10.
- [100] McBratney A., Field D.J., Koch A. (2014): The dimensions of soil security. In: *Geoderma* 213, 203–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.
- [101] Patzel N., Sticher H., Karlen D. (2000): Soil fertility – Phenomenon and Concept. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 129–142.
- [102] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (1991): Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. BUWAL, Bern.
- [103] Häberli R., Lüscher C., Chastonay B.P., Wyss C. (1991): Bodenkultur – Vorschläge für eine haushälterische Nutzung des Bodens in der Schweiz. Schlussbericht des Nationalen Forschungsprogrammes «Nutzung des Bodens in der Schweiz» (NFP 22), Verlag der Fachvereine, Zürich.
- [104] Greiner L., Schwab P., Zimmermann S., Nussbaum M., Papritz A., Keller A. (2016): Bodenfunktionen bewerten: Anwendungsbeispiele Wasserhaushalt und Landwirtschaft. In: *BGS-Bulletin* 37, 17–23.
- [105] Greiner L., Keller A. (2015): Indexpunkte gegen den Landverbrauch. In: *TEC21 Schweizerische Bauzeitung* 41, 24–26.
- [106] Vereecken H., Schnepf A., Hopmans J.W., Javaux M., Or D., Roose T., Vanderborght J., Young M.H., Amelung W., Aitkenhead M., Allison S.D., Assouline S., Baveye P., Berli M., Brüggemann N., Finke P., Flury M., Gaiser T., Govers G., Ghezzehei T., Hallett P., Hendricks Franssen H.J., Heppell J., Horn R., Huisman J.A., Jacques D., Jonard F., Kollet S., Lafolie F., Lamorski K., Leitner D., McBratney A., Minasny B., Montzka C., Nowak W., Pachepsky Y., Padarian J., Romano N., Roth K., Rothfuss Y., Rowe E.C., Schwen A., Šimůnek J., Tiktak A., Van Dam J., van der Zee S.E.A.T.M., Vogel H.J., Vrugt J.A., Wöhling T., Young I.M. (2016): Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives. In: *Vadose Zone Journal* 15 (5), 32–88. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>.
- [107] Bayerisches Geologisches Landesamt (2003): Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren. Augsburg.
- [108] Ad-hoc AG Boden des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) (2007): Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Nutzungsfunktion «Rohstofflagerstätte» nach BBodSchG sowie der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Erosion und Verdichtung.

- [109] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (1995): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren. Karlsruhe.
- [110] Lehmann A., David S., Stahr K. (2013): Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 86.
- [111] Müller U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Arbeitshefte Boden, 2004/2. Hannover.
- [112] Brunner H., Jäggli F., Nievergelt J., Peyer K. (1997): Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich Reckenholz.
- [113] Gröngroft A., Hochfeld B., Miehlich G. (2001): Funktionale Bewertung von Böden bei grossmassstäbigen Planungsprozessen – Bewertungsverfahren. Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg.
- [114] Ruff A., Peyer K. (1996): Vollzug Umwelt: Handbuch Waldbodenkartierung. BUWAL, Bern.
- [115] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2010): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren. Karlsruhe.
- [116] Bayerisches Geologisches Landesamt und Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2003): Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren. München und Augsburg.
- [117] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1988): Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. Merkblätter zur Wasserwirtschaft.
- [118] Litz N. (1998): Schutz vor Organika. In: Blume H.-P. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde, Kapitel 7.6.6. Landsberg.
- [119] Litz N., Blume H. (1989): Verhalten organischer Chemikalien in Böden und dessen Abschätzung nach einer Kontamination. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 30, 355–364.
- [120] Mosimann T. (1999): Integration des Bodenschutzes in die Raumplanung. Ziele, Konzept und Methodik zur Bestimmung besonders schutzwürdiger Bodenflächen am Beispiel des Kantons Basel-Landschaft.
- [121] Gemeinsame Arbeitsgruppe des Fachbeirats für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz im Lebensministerium und des Österreichischen Normungsinstituts (2013): Bodenfunktionsbewertung: Methodische Umsetzung der ÖNORM L 1076. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- [122] Gerdes H., Naumann S., Landgrebe R., Stupak N. (2010): Ökonomische Bewertung der ökologischen Funktionen von Böden. In: Ecologic Institut, Berlin. www.ecologic.eu
- [123] Griffiths B.S., Römbke J., Schmelz R.M., Scheffczyk A., Faber J.H., Bloem J., Pérès G., Cluzeau D., Chabbi A., Suhadolc M., Sousa J.P., Martins Da Silva P., Carvalho F., Mendes S., Morais P., Francisco R., Pereira C., Bonkowski M., Geisen S., Bardgett R.D., De Vries F.T., Bolger T., Dirilgen T., Schmidt O., Winding A., Hendriksen N.B., Johansen A., Philippot L., Plassart P., Bru D., Thomson B., Griffiths R.I., Bailey M.J., Keith A., Rutgers M., Mulder C., Hannula S.E., Creamer R., Stone D. (2016): Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. In: Ecological Indicators 69, 213–223.
- [124] Feldwisch N., Neite H., Düntgen J. (2011): Grundlagen und Anwendungsbeispiele von Bodenfunktionskarten in Nordrhein-Westfalen. In: Bodenschutz 2/11, 37–45.

- [125] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG).
- [126] Calzolari C., Ungaro F., Filippi N., Guermandi M., Malucelli F., Marchi N., Staffilani F., Tarocco P. (2016): A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. In: *Geoderma* 261, 190–203.
- [127] Dominati E., Mackay A., Green S., Patterson M. (2014): A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. In: *Ecological Economics* 100, 119–129.
- [128] Schulte R.P.O., Creamer R.E., Donnellan T., Farrelly N., Fealy R., O'Donoghue C., O'Huallachain D. (2014): Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. In: *Environmental Science & Policy* 38, 45–58.
- [129] Rutgers M., van Wijnen H.J., Schouten A.J., Mulder C., Kuiten A.M.P., Brussaard C. L., Breure A.M. (2012): A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. In: *Science of the Total Environment* 415, 39–48.
- [130] Robinson D.A., Hockley N., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I., Warren G.P., Robinson J.S. (2013): Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. In: *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1023–1033.
- [131] Toth G., Gardi C., K. Bódis, Ivits É., Aksoy E., Jones A., Jeffrey S., Petursdottir T., Montanarella L. (2013): Continental-scale assessment of provisioning soil functions in Europe. In: *Ecological Processes* 2 (32).
- [132] Miller R. (2012): Bodenfunktionsbewertung für die Raum- und Bauleitplanung in Hessen und Rheinland-Pfalz. Methoden zur Klassifizierung und Bewertung von Bodenfunktionen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 65203 Wiesbaden. Deutschland. www.hlug.de
- [133] Gemeinsame Arbeitsgruppe des Fachbeirats für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz im Lebensministerium und des Österreichischen Normungsinstituts (2012): Bodenfunktionsbewertung – Grundlagen und Erläuterungen zur ÖNORM L 1076. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- [134] Geitner C., Tusch M., Stötter J. (2005): Abschlussbericht: Bodenkartierung zur Bewertung der Bodenfunktionen im Gemeindegebiet von Wörgl (Tirol). Institut für Geographie, Universität Innsbruck.
- [135] Knoll A., Sutor G., Huber G., Kübler B. (2010): «Pilotprojekt Boden». Bewertung von Bodenfunktionen in Planungsverfahren. Land Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz.
- [136] Haslmayr H.P., Gerzabek M.H. (2010): Bewertung der Bodenfunktionen landwirtschaftlicher Böden auf Basis der österreichischen Datengrundlagen. In: *Die Bodenkultur* 61(2), 19–34.
- [137] Jäggi F., Peyer K., Pazeller A., Schwab P. (1999): Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich – Landwirtschaftsareal. Amt für Landschaft und Natur Kanton Zürich, Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [138] Vereinigung für Strukturverbesserungen und Agrarkredite (vsvak) (2004): Grundlagen zur Bewertung von Kulturland und naturnahen Flächen bei Landumlegungen. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW).

- [139] Teepe R., Dilling H., Beese F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 111–119.
- [140] Walthert L., Zimmermann S., Blaser P. (2004): *Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura*. Eidg. Forschungsanstalt wsl, Hep-Verlag, Bern.
- [141] Blaser P., Walthert L., Zimmermann S., Graf Pannatier E., Luster J. (2008): Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 163–170.
- [142] Bouma J., Broll G., Crane T.A., Dewitte O., Gardi C., Schulte R., Towers W. (2012): Soil information in support of policy making and awareness raising. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 552–558.
- [143] McBratney A.B., Minasny B., Cattle S.R., Vervoort R. (2002): From pedotransfer functions to soil inference systems. In: *Geoderma* 109, 1–2, 41–73.
- [144] Greiner L., Nussbaum M., Papritz A., Zimmermann S., Schwab P., Grêt-Regamey A., Keller A.: Assessing of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources *Geoderma regional* (subm.).
- [145] Feldwisch N., Balla S. (2007): Orientierungsrahmen zur zusammenfassenden Bewertung von Bodenfunktionen. In: *Bodenschutz* 1 (07), 15–19.
- [146] Grêt-Regamey A., Sirén E., Brunner S.H. Weibel B. (2017): Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. In: *Ecosystem Services*, 26 Part B, 306–315.
- [147] Adhikari K., Hartemink A. (2016): Linking soils to ecosystem services – A global review. In: *Geoderma* 262, 101–111.
- [148] Haygarth P., Ritz K. (2009): The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. In: *Land Use Policy* 26, Supplement 1, 187–197.
- [149] Robinson D.A., Hockley N., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I.J., Warren G.P., Robinson J.S., Cooper D.M., Emmett B.A., Keith A.M., Lebron I., Reynolds B., Tipping E., Tye A.M., Watts C.W., Whalley W.R., Black H.I.J., Warren G.P., Robinson J.S. (2013): Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. In: *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1023–1033.
- [150] Planteam AG Boden und Landwirtschaft Vogt. Planteam (2013): *Sachplan Fruchtfolgeflächen – Bericht zum Stand der Umsetzung des Sachplanes. Bericht zuhanden Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)*. Bern.
- [151] Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2006): *Sachplan Fruchtfolgeflächen – Vollzugshilfe*. Bern.
- [152] Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2015): *Sachplan Fruchtfolgeflächen – agrarpedologische Analyse*. myx GmbH, Uster.
- [153] Parlamentarische Verwaltungskontrolle (2015): *Sicherung landwirtschaftlichen Kulturlandes. Bericht zuhanden der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates*. Bern.
- [154] Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates (2015): *Sicherung landwirtschaftlichen Kulturlandes*.
- [155] Weisskopf P., Schwab P., Jäggli F., Kramer E., Peyer K., Studer R. (1988): *Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden*. NFP 22-Bericht 20, Liebefeld-Bern.

- [156] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2017): Boden in der Schweiz – Zustand und Entwicklung, Stand 2017. Umwelt-Zustand Nr. 1721: 86 S.
- [157] Charles R., Wendling M., Burgos S. (2018): Boden und Nahrungsmittelproduktion. Thematische Synthese TS1 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- [158] Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A. (2018): Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- [159] Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H.R., 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 (4), 1–16.
- [160] Alder S., Herweg K., Liniger H., Prasuhn V. (2013): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2 × 2-Meter-Raster. Hrsg.: Universität Bern und Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Bern und Zürich.
- [161] Alder S., Prasuhn V., Liniger H.P., Herweg K., Hurni H., Candinas A., Gujer H.U. (2015): A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland – A risk assessment tool for planning and policy-making. In: *Land Use Policy* 48, 236–249.
- [162] Bader C., Müller M., Schulin R., Leifeld J. (2017): Amount and stability of recent and aged plant residues in degrading peatland soils. In: *Soil Biology & Biochemistry* 109, 167–175.
- [163] Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Boivin P. (2017): Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? In: *Geoderma* 302, 14–21.
- [164] 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>
- [165] 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. In: *BGS-Bulletin* 37, 9–15.
- [166] Gómez Giménez M., de Jong R., Della Peruta R., Keller A., Schaepman M. (2017): Determination of grassland use intensity based on multi-temporal remote sensing data and ecological indicators. In: *Remote Sensing of Environment*, 198, 126–139.
- [167] Stumpf F. et al. 2018. *Agroecosystems, Ecosystems & Environment*. 258: 129–142.
- [168] Hürdler J., Prasuhn V., Spiess E. (2015): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit «MODIFFUS 3.0». Bericht im Auftrag des BAFU. Agroscope, Zürich.
- [169] Prasuhn V., Kupferschmid P., Spiess E., Hürdler J. (2016): Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit «MODIFFUS»: Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Agroscope, Zürich.
- [170] Tobias S. (2012): Brainstorming «Zukunft Bodeninformation Schweiz». Projektabschlussbericht. WSL.
- [171] Behrens T., Scholten T. (2006): Digital Soil Mapping in Germany – a review. In: *J Plant Nutri Soil Sci* 169, 434–443.

- [172] McBratney A.B., Mendonca-Santos M.L., Minasny B. (2003): On digital soil mapping. In: *Geoderma* 117, 3–52.
- [173] Brevik E., Baumgarten A., Calzolari C., Miller B., Jordan A., Pereira P., Kabala C. (2016): Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. In: *Geoderma* 264, Part B, 256–274.
- [174] Behrens T., Schmidt K., Keller A. (2017): Factsheet Digital Soil Mapping. Im Auftrag des BAFU. www.nabo.ch
- [175] Nussbaum M. (2017): Digital Soil Mapping for Switzerland, Evaluation of Statistical Approaches and Mapping of Soil Properties. Dissertation, ETH Zürich.
- [176] Nussbaum M., Spiess K., Baltensweiler A., Grob U., Keller A., Greiner L., Schaepman M.E., Papritz A. (2017): Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. In: *SOIL Discussions*, 1–32.
- [177] Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R. (2011): The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review. In: *Geoderma* 162, 1–19.
- [178] Wulf H., Mulder T., Schaepman M., Keller A., Jörg P. (2015): Remote Sensing of Soils. University of Zurich, Remote Sensing Laboratories, Zürich.
- [179] Heggemann T., Welp G., Amelung W., Angst G., Franz S., Koszinski S., Schmidt K., Pätzold S. (2017): Proximal gamma-ray spectrometry for site-independent in situ prediction of soil texture on ten heterogeneous fields in Germany using support vector machines. In: *Soil Till. Res.* 168, 99–109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016>
- [180] Ben-Dor E., Granot A., Notesco G. (2017): A simple apparatus to measure soil spectral information in the field under stable conditions. In: *Geoderma* 306, 73–80.
- [181] Towett E.K., Shepherd K.D., Cadisch G. (2013): Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). In: *Science of the Total Environment*, 463–464, 374–388.
- [182] Wittmer H., Gundimeda H. (Hrsg.) (2012): *The Economics of Ecosystems and Biodiversity in Local and Regional Policy*. Earthscan, London.
- [183] Fromm O., Brüggemann R. (1999): Ökonomische Ansätze zur Ökosystembewertung am Beispiel des Bodens. In: *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 11 (2), 119–124.
- [184] Fromm O., Brüggemann R. (1999): Verfahren zur Monetarisierung von Ökosystemleistungen. In: *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 11 (3), 177–179.
- [185] Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Fitton L., Saffouri R., Blair R. (1995): Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. In: *Science* 267 (5201), 1117–1123.
- [186] Gerdes H., Naumann S., Landgrebe R., Stupak N. (2010): Ökonomische Bewertung der ökologischen Funktionen von Böden. 1. Projektphase: Auswertung der Literatur- und Datenlage. Ecologic Institut, Berlin.
- [187] Gambarelli G. (2013): A framework for the economic evaluation of soil functions. Background paper to the Swiss Soil Strategy. Bericht im Auftrag des BAFU.
- [188] Ruh H., Brugger F., Schenk C. (1990): Ethik und Boden. NFP 22, Bericht 52, Liebefeld-Bern.
- [189] Sticher H. (1991): Schutz der natürlichen Ressourcen – das Beispiel Boden. In: *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 136 (3), 137–149.
- [190] Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. (2018): Bodeninformations-Plattform Schweiz: Bodeninformationen, Methoden und Instrumente für eine nachhaltige Nutzung der Ressource Boden. Thematische Synthese TS4 des Nationalen Forschungs-

programms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern. Anhang.
Verfügbar unter:

http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/NFP68_TS4_Anhang.pdf

- [191] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2009): Das Grundwasser konsequent schützen. BAFU, UD-1003, Bern.
- [192] SRU 2015. 30 Jahre SRU-Sondergutachten – Umweltprobleme in der Landwirtschaft. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Texte 28/2015. Umweltbundesamt. Deutschland. Dessau.
- [193] Fuhrer J., Holzkämper A., Klein T., Tendall D., Lehmann N., (2013): Wasser und Schweizer Landwirtschaft. Das Projekt AGWAM im Rahmen des NFP 61. In: Aqua & Gas 7/8.
- [194] Béguin J., Smola S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. BLW, Fachbereich Meliorationen.
- [195] Presler J., Carizzoni M., Widmer D. (2010): Erfassung von Bodenverdichtung – Beprobungsrunde 2010. Hrsg.: Zentralschweizer Umweltdirektionen (ZUDK) – gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone (KABO-ZCH). Fachstelle Bodenschutz, Umwelt und Energie Kanton Luzern.
- [196] Ledermann T., Herweg K., Liniger H., Schneider F., Hurni H., Prasuhn V. (2008): Erosion damage mapping: assessing current soil erosion damage in Switzerland. In: Advances in Geoecology 39, 263–283.
- [197] Wüst C., Grünig A., Leifeld J. (2015). Locating organic soils for the Swiss greenhouse gas inventory. In: Agroscope Science, 26.
- [198] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2017): Greenhouse Gas Inventory 1990–2015. National Inventory Report. Bern.
- [199] Bundesamt für Strassen (ASTRA) (2014): SABA-Projekte – Projektierungsstand. Bern.
- [200] Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2015): Altlastenbearbeitung auf Kurs. BAFU UZ-1516-D, Bern.
- [201] Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Hrsg.; 1994): Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. In: Soil Sci. Soc. Amer. Spec. Pub. 35.
- [202] 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. In: Soil Sci. Soc. Am., Jg. 61, 4–10.
- [203] Verordnung über landwirtschaftliche Begriffe und die Anerkennung von Betriebsformen (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung, LBV) (SR 910.91).
- [204] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2017): Agrarbericht 2017. www.agrarbericht.ch

Dank

Zahlreichen Forschenden und Fachpersonen aus der Praxis sei für die Unterstützung und die Zusammenarbeit bei der Erarbeitung der vorliegenden thematischen Synthese bestens gedankt. Dazu gehören die Mitglieder der Leitungsgruppe des NFP 68 sowie der Programm-Manager und der Leiter Wissenstransfer, die Mitglieder der Begleitgruppe und der Kerngruppe, die NFP 68-Projektteams und die Verantwortlichen der anderen thematischen Synthesen. Zudem haben die folgenden Personen die Arbeit an Text und Bild unterstützt: Madlene Nussbaum, Urs Grob, Lucie Greiner, Felix Stumpf, Thomas Keller, Jens Leifeld, Volker Prasuhn, Urs Zihlmann, Peter Schwab, Anna Hug und viele mehr.

Impressum

Autorenteam

Armin Keller, Agroscope, Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Zürich
Julia Franzen, Agroscope, Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Zürich
Paul Knüsel, Wissenschaftsjournalist BR (Berufsregister), Zürich
Andreas Papritz, ETH Zürich, Zürich
Martin Zürrer, myx GmbH, Uster

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

David Brugger, Schweizerischer Bauernverband (SBV), Bern
Prof. Stephane Burgos, Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS) und Berner Fachhochschule, Zollikofen
Lukas Mathys, Nategra Remote Sensing, Bern
Dr. Nathalie Dakhel, Prona SA, Yverdon-les-Bains
Dr. Barbara Gfeller, Dienststelle Umwelt, Kanton Freiburg, Freiburg
Olivia Grimm, Bundesamt für Raumplanung (ARE), Bern
Dr. Rolf Gsponer, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich, Zürich
Dr. Fabio Wegmann, Sektion Boden, Bundesamt für Umwelt (BAFU), 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

Titelbild

Nils Nova, Luzern

Layout und Grafik

Grafikatelier Max Urech, Unterseen

Druck

Engelberger Druck AG, 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

Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. (2018):
Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH). Thematische
Synthese TS4 des Nationalen Forschungsprogramms
«Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.

ISBN: 978-3-907087-34-3

www.snf.ch

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 (engen) Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des SNF unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Nationalen Forschungsprogramms «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 TS4

Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)

Die thematische Synthese TS4 des NFP 68 «Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH)» skizziert das Konzept einer BIP-CH als Informations- und Serviceplattform für Bodeninformationen. Sie zeigt auf mit welchen Inhalten die Plattform ausgestattet werden soll und welche Bedingungen für deren Aufbau erfüllt sein müssen. Es werden technische Weiterentwicklungen der Bodenkartierung beleuchtet und ein Weg für die nächsten Schritte zur BIP-CH wird aufgezeigt. Die BIP-CH stellt ein Generationenwerk dar. Dem entsprechenden Investitionsaufwand wird der Mehrwert für die Gesellschaft gegenübergestellt.

Thematische Synthese TS1

Boden und Nahrungsmittelproduktion

Thematische Synthese TS2

Boden und Umwelt

Thematische Synthese TS3

Eine Bodenagenda für die Raumplanung

Thematische Synthese TS5

Wege zu einer nachhaltigen Bodenpolitik