



Bodenbericht 2017

Volkswirtschaftsdirektion
Amt für Landwirtschaft und Natur
Fachstelle Bodenschutz

Zollikofen, April 2017

«Grabe irgendwo in der Erde und du wirst einen Schatz finden.»

Khalil Gibran (1883–1931), libanesischer Maler, Schriftsteller, Mystiker und Philosoph

Vorwort

Der Boden ist eine knappe, nicht erneuerbare Ressource. Er erfüllt unverzichtbare ökonomische und ökologische Funktionen: Der Boden sorgt für gesunde Nahrungsmittel, sauberes Trinkwasser, ist vielfältiger Lebensraum der Biodiversität sowie Grundlage attraktiver Landschaften für Erholung und Tourismus. Über Jahrtausende langsam gewachsener Boden ist nicht wiederherstellbar. Wir müssen zu ihm Sorge tragen.

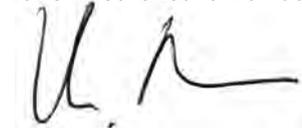
Doch unsere Böden stehen unter Druck. Ihr Volumen wird durch Überbauung zerstört; ihre Fruchtbarkeit verschlechtert sich durch zu intensive Nutzung. Ziel des Bodenschutzes ist deshalb, die Böden in ihrer Menge und Qualität dauerhaft zu schützen. Da der Mensch und das gesamte Ökosystem auf den Boden angewiesen sind, besteht die grosse Herausforderung darin, ein nachhaltiges Gleichgewicht zwischen Nutzen und Schützen zu finden und in der Praxis umzusetzen.

In Bevölkerung und Politik wächst das Interesse am Boden. Bundes- und Kantonsgesetze geben einen haushälterischen Umgang mit dem Kulturland vor. Der Kanton Bern als grösster Agrarkanton der Schweiz bremst mit dem kantonalen Richtplan die Zersiedelung.

Die Böden sollen in unserem Kanton in ihrer Qualität erhalten und schonend bewirtschaftet werden, damit ihre zentralen Funktionen auch in Zukunft zur Verfügung stehen. Das Amt für Landwirtschaft und Natur unterstützt Projekte finanziell, beispielsweise die Bodenkartierung *Grosses Moos* und Massnahmen für Bodenaufwertungen. Wichtig ist auch die Koordination und Zusammenarbeit mit Institutionen wie der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.

Bei all diesen Projekten zur Verbesserung und Stabilisierung des Bodens sind auch die Unterstützung und die Mitarbeit der Landwirtinnen und Landwirte wichtig. Ich danke allen herzlich, die sich für gesunde Böden in unserem Kanton einsetzen.

Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern



Christoph Ammann
Regierungsrat

Avant-propos

Le sol représente une ressource limitée et non renouvelable qui recouvre des fonctions économiques et écologiques indispensables : il assure l'accès à des denrées alimentaires saines ainsi qu'à de l'eau potable, constitue un habitat varié propice à la biodiversité et engendre des paysages attractifs qui favorisent la détente et le tourisme. Le sol, qui s'est formé sur des milliers d'années, n'est pas renouvelable. Il nous incombe d'en prendre soin.

En effet, nos sols sont sous pression. Leur volume diminue constamment sous l'effet des activités de construction, leur fertilité se détériore en raison de leur exploitation intensive. L'objectif de la protection des sols est de les préserver durablement aux niveaux quantitatif et qualitatif. L'être humain et tout notre écosystème étant dépendants du sol, notre grand défi consiste à trouver un équilibre durable entre l'exploitation et la protection de cette ressource et de le concrétiser dans la pratique.

L'intérêt pour les sols augmente autant auprès de la population qu'en politique. Les lois fédérales et cantonales exigent une utilisation mesurée de la terre cultivable. En tant que premier canton agricole de Suisse, Berne ralentit le mitage du territoire à l'aide de son plan directeur cantonal.

Au sein de notre canton, les sols doivent être exploités avec ménagement et leur qualité préservée, afin qu'à l'avenir aussi, leurs fonctions centrales soient assurées. L'Office de l'agriculture et de la nature soutient financièrement des projets tels que la cartographie des sols du *Grand Marais* ou des mesures pour la réhabilitation du sol. La coordination et la collaboration avec des institutions telles que la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL) sont également essentielles.

Tous ces projets visant à améliorer et à stabiliser les sols nécessitent aussi la coopération des agriculteurs et agricultrices. Je les remercie tous et toutes vivement de leur engagement en vue de la préservation de sols sains dans notre canton.

Direction de l'économie publique du canton de Berne

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Ammann', written over a light blue horizontal line.

Christoph Ammann
Conseiller d'Etat

Impressum

Herausgeber

Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern (VOL)
 Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT)
 Abteilung Strukturverbesserungen und Produktion (ASP)
 Fachstelle Bodenschutz (FBS)
 Leiter: Wolfgang G. Sturny

Autorinnen und Autoren

Andreas Chervet	Fachstelle Bodenschutz (FBS), Zollikofen
Peter Hofer	
Claudia Maurer	
Laura Niggli	
Lorenz Ramseier	
David Remund	
Regula Schwarz	
Wolfgang G. Sturny	
Peter Trachsel	
Urs Zaugg	Vorsteher Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT), Bern
Marc Zuber	Leiter Abteilung Strukturverbesserungen und Produktion (ASP), Münsingen
Stéphane Burgos	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen
Beat Frey	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
Matthias Grob	AECOM, Olten
Armin Keller	Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Zürich
Liv Kellermann	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen
Denise König	Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich
Andreas Leu	INFORAMA Rütli, Zollikofen
Erich Linder	Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR), Bern
Volker Prasuhn	Agroscope, Zürich
Murielle Rüdy	Amt für Wasser und Abfall (AWA), Bern
Christiane Vögeli Albisser	Amt für Wasser und Abfall (AWA), Bern
Fabio Wegmann	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen
Peter Weisskopf	Agroscope, Zürich
Urs Zihlmann	Agroscope, Zürich
Stephan Zimmermann	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

Übersetzung Französisch (Résumé, Synthèse)

Patrick Schleppi
 Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

Übersetzung Englisch (Summary, Synthesis)

Fritz Oehl
 Agroscope, Wädenswil

Korrektorat

Thomas Kesselring
 Bern

Gestaltung

Urs W. Flück
 aufdenpunkt.ch, Langendorf

Druck

Stämpfli AG
 Bern

Bezug

Dieser Bericht kann kostenlos bezogen werden bei

Fachstelle Bodenschutz
Rütti 5
3052 Zollikofen
ruth.siegfried-reber@vol.be.ch
Tel.: 0041 31 636 49 00

oder er ist in elektronischer Form verfügbar auf www.be.ch/bodenschutz.

Zitiervorschlag

VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2017. Bodenbericht 2017.

© VOL 2017

Bildnachweis

Umschlagfrontseite ¹	© Gabriela Brändle, Urs Zihlmann, Agroscope, Zürich; Andreas Chervet, Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern (FBS), Zollikofen
Umschlagrückseite	© Denise König, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich; Lorenz Ramseier und Andreas Chervet, Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern (FBS), Zollikofen
Kapiteltitelbilder ¹	© Gabriela Brändle, Urs Zihlmann, Agroscope, Zürich; Andreas Chervet, Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern (FBS), Zollikofen
Abbildung 2-3, 2-5	© Andreas Leu, INFORAMA Rütli, Zollikofen
Abbildung 3-2	© Stefanie Schwamberger, INFORAMA Rütli, Zollikofen
Abbildung 3-7	© Thomas Leu, Abteilung Naturförderung (ANF), Münsingen
Abbildung 3-8	© Fritz Oehl, Agroscope, Wädenswil
Abbildung 4-2	© Gabriela Brändle, Agroscope, Zürich
Abbildung 4-10	© Fritz Oehl, Agroscope, Wädenswil
Abbildung 4-12	© Thomas Gennen, Zasso Group AG, D-Aachen
Abbildung 5-2	© Volker Prasuhn, Agroscope, Zürich
Abbildung 6-7	© Gabriela Brändle, Agroscope, Zürich
Abbildung 7-5, 7-6, 7-9	© Denise König, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich; Lorenz Ramseier und Andreas Chervet, Fachstelle Bodenschutz (FBS), Zollikofen
Abbildung 7-7	© Hans Paul Käser, Ins
Abbildung 7-10	© Rainer Schulín, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich
Abbildung 8-1	© Murielle Rüdy, Amt für Wasser und Abfall (AWA), Bern
Abbildung 8-2	© Hans Flückiger, Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR), Bern
Abbildung 9-3	© Roger Köchli und Beat Frey, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
Abbildung 10-2	© Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen; Agroscope, Zürich, Aarhus University
Abbildung 11-1	© Urs Zihlmann, Agroscope, Zürich
Abbildung 11-2	© Gabriela Brändle, Agroscope, Zürich
Abbildung 12-1	© Gabriela Brändle, Agroscope, Zürich
Alle weiteren Abbildungen	© Fachstelle Bodenschutz (FBS), Zollikofen

¹ Das Bild auf der Umschlagfrontseite und die Kapiteltitelbilder stammen aus *Faszination Boden 2013* und *Faszination Boden 2017*.

Umschlagfrontseite:

Drei junge Saanen-Ziegen blicken neugierig auf eine saure Braunerde, welche sich aus unvollständig verwittertem, prächtig marmoriertem Schiefergestein gebildet hat.

Umschlagrückseite:

Den drei entwässerten Torfboden-Referenzen (links) aus dem Berner Seeland sind die aufgewerteten Torfböden derselben Parzelle gegenübergestellt: rechts oben übersandet (1972); rechts Mitte tiefgepflügt (1982); rechts unten zweimalig überschüttet (1994 und 2000). Die Bildserie zeigt die Heterogenität der Böden im *Grossen Moos*.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Generell wurden stattdessen die Begriffe stets in der kürzeren, männlichen Schreibweise verwendet. Die weibliche Form ist dabei immer eingeschlossen.

Zusammenfassung

Natürlich gewachsener Boden stellt eine knappe, nicht erneuerbare Ressource dar. Er ist Produktionsgrundlage für gesunde Nahrungsmittel und einheimisches Holz, Filtersubstrat für sauberes Trinkwasser, Abbaustätte von Sand und Kies, Lebensraum einer grossen Biodiversität und Gestaltungselement attraktiver

Im Kanton Bern wird über 40% der Gesamtfläche landwirtschaftlich genutzt. Intensivierung, Rationalisierung und demzufolge Verdichtung und Erosion, Schadstoffeintrag sowie die anhaltend hohe Überbauung der produktivsten Landwirtschaftsböden im Mittelland gefährden jedoch langfristig unsere Lebensgrundlage.

Vor dem Hintergrund der Sorge um die Qualität dieser endlichen Ressource ist es das Ziel, die Böden auf lange Sicht in ihrem standortspezifischen Aufbau und frei von Belastungen fruchtbar zu erhalten. Die Produktion von hochwertigen Nahrungs- und Futtermitteln ist mit dem Schutz der Lebensgrundlage Boden und seiner Umweltkompartimente zu vereinbaren. Dieses Ziel wurde mit dem *Förderprogramm Boden Kanton Bern* angegangen: Durch Förderbeiträge und Weiterbildung konnten während sechs Jahren nachhaltige Anbausysteme mit konservierender Bodenbearbeitung, permanenter Bodenbedeckung und sorgfältiger Befahrung etabliert werden. Zudem fand eine Sensibilisierung hinsichtlich Ammoniakproblematik und Achslastbegrenzung statt. Die rund 20% beteiligten Berner Landwirte leisteten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Bodenstruktur, zum Aufbau organischer Bodensubstanz und zur Verminderung von Ammoniakemissionen. Der Bund leitete daraus die Ressourceneffizienzbeiträge (REB) in der Agrarpolitik (AP) 2014–2017 ab.

Boden schonende Anbausysteme sind ebenfalls zentrales Element eines wirksamen Ero-

Nicht nur bei der landwirtschaftlichen Nutzung, auch in der Bauwirtschaft führen Überfahrten mit schweren Maschinen bei nassen Bedingungen zu einer Verdichtung des Bodens. Auf Baustellen sollte der fachgerechte Umgang mit dem Boden die Regel sein: Boden ist sorgsam abzutragen, zwischenzulagern und wiederzuverwerten. Abgetragener, unverschmutzter Ober- und Unterboden sollte aufgrund neuer gesetzlicher

Landschaften. An der Schnittstelle von Atmo-, Hydro- und Lithosphäre erfüllt er unverzichtbare ökologische und ökonomische Funktionen. Mit dem vierten Bodenbericht orientiert die Fachstelle Bodenschutz über den Zustand der Berner Böden.

sionsschutzes: Zusammen mit geeigneten Fruchtfolgen inkl. Gründüngungen und einem verantwortungsvollen Umgang mit dem Verdichtungsrisiko sind sie die wichtigsten Massnahmen zur Prävention von Erosion. Setzt der Landwirt diese Massnahmen eigenverantwortlich um, drohen ihm auch mit den neuen Regelungen zum Vollzug bei Auftreten von Erosion keine Direktzahlungskürzungen.

Dass ein Boden nach 20 Jahren pflugloser Bewirtschaftung verändert ist, zeigen die Erhebungen auf der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker*: Die fehlende Durchmischung bei Böden mit Direktsaat führt zu veränderten chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften. In einem langjährig kontinuierlichen Direktsaatsystem erhöht sich die Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden, die Durchlüftung im Unterboden, das Angebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser sowie Menge und Vielfalt an Regenwürmern und Mykorrhiza-Pilzen. Teilweise höhere Erträge, ein geringerer Arbeitsaufwand sowie vermehrte Abgeltungen machen das Direktsaatsystem wirtschaftlich. Es bietet sich damit als Alternative zum herkömmlichen Pflugsystem an – auch, aber keineswegs nur, in Lagen mit hohem Erosionsrisiko. Was den Glyphosateinsatz betrifft, konnte dieser auf dem *Oberacker* dank geeigneten Gründüngungsgemengen gegen null reduziert werden. Die nachgewiesenen Rückstände sind bei Direktsaat lediglich in den obersten 5 cm geringfügig höher.

Auflagen nicht mehr im knappen Deponieraum entsorgt, sondern unter Anleitung einer *Bodenkundlichen Baubegleitung* zur Qualitätsverbesserung degradierter Böden verwendet werden, damit diese wieder die Güte von Fruchtfolgeflächen erhalten.

Auf Waldböden, wo bei feuchten Verhältnissen die Gefahr der Bodenverdichtung durch

schwere Holzernte-Maschinen besteht, empfiehlt es sich, möglichst die vorbereiteten Rückegassen zu benützen. Sie erlauben ein kontrolliertes Befahren auf begrenztem Raum. Unter den Fahrspuren werden Porenraum und Wasserleitfähigkeit reduziert, die mikrobielle Lebensgemeinschaft verändert sich zu Ungunsten von Mykorrhiza-Pilzen und Sauerstoff liebenden, aeroben Bakterien. Nachweislich findet nach einigen Jahren eine mikrobielle Regeneration im Oberboden statt.

Die Fruchtbarkeit entwässerter Torfböden zu erhalten und sie nachhaltig zu bewirtschaften bedeutet eine grosse Herausforderung. In der Schweiz wurden diese Böden für die Landwirtschaft nutzbar gemacht. Als Folge davon wird das organische Material zu klimawirksamen CO_2 und N_2O abgebaut und die tieftorfigen Böden sacken jedes Jahr um ca. 0.5 cm in sich zusammen. Der Flurabstand nimmt ab und die Produktion wird durch Stauwasser beeinträchtigt. Vielerorts sind diese Böden in ihrer Qualität als Fruchtfolgeflächen gefährdet. Um den Torfabbau zu bremsen und Torfböden

Detaillierte Kenntnisse über Eigenschaften und Qualität der Böden sind eine Voraussetzung für sämtliche bodenrelevanten Handlungen, und zwar sowohl in der Raumplanung, in der Bau-, Land- und Forstwirtschaft als auch im Gewässer-, Gefahren- und Naturschutz. Noch fehlt im Kanton Bern eine flächendeckende Bodenkarte. Soweit vorhanden, wurden die analogen Bodenkarten digitalisiert und sind heute im Geoportal des Kantons Bern abrufbar. Neue Bodeninformation wird laufend projektbezogen erarbeitet, insbesondere in den Bereichen *Fruchtfolgeflächen*, *Hinweiskarte Boden* sowie *Aufwertungen entwässerter Torfböden*. Das Bedürfnis nach Koordination und Einheitlichkeit beim Umgang mit Bodeninformation ist schweizweit erkannt; mit einem geplanten nationalen Kompetenzzentrum wird dem Rechnung getragen. Die in der *Nationalen Bodendatenbank* (NABODAT) zentral abgelegte und verwaltete Bodeninformation dient als Grundlage für sachlich fundierte Entscheide in Politik und Verwaltung und fördert den haushälterischen Umgang mit der Ressource Boden.

Weitere Schwerpunkte der Fachstelle Bodenschutz sind die strategische Federführung in der direktionsübergreifenden *Fachgruppe Boden Kanton Bern*, die Sensibilisierung von Öffentlichkeit und Akteuren sowie die Information von Politik und Verwaltung. Mit Bildern, Filmen,

Eine entscheidende Beurteilungsgrösse zur Abschätzung des Verdichtungsrisikos bei Erdarbeiten und bodenverträglichem Maschineneinsatz in der Land- und Forstwirtschaft ist die Bodenfeuchte. Ein Netz automatisch betriebener Tensiometer-Anlagen erlaubt Rückschlüsse auf die Befahrbarkeit des Bodens und erleichtert es damit Unternehmern, Landwirten und Forstwarten, ihre Entscheide nach den Erfordernissen der Bodenschonung zu richten.

nutzbringend zu erhalten, wurden verschiedene Bodenaufwertungsmassnahmen entwickelt und punktuell umgesetzt. Mit den Massnahmen Übersanden, Tiefpflügen und Überschütten lässt sich ein klimagünstiges Bodensubstrat herstellen, das aus mineralischem und rund 10% organischem Material besteht. Die extrem grosse Heterogenität organischer Flächen sowie der Wasserhaushalt bedeuten für die Boden- und Kulturlandaufwertungen eine gewisse Schwierigkeit, die sich aber mit einem differenzierten und standortspezifischen Vorgehen meistern lässt.

Die Datenbank enthält auch chemische, physikalische und biologische Messresultate, die es erlauben, den Zustand der Böden zu beurteilen, geeignete Gegenmassnahmen zu ergreifen und diese zu bewerten. Die umfangreichen Daten der während über 20 Jahren durch die *Kantonale Bodenbeobachtung* (KABO) auf 19 Landwirtschaftsbetrieben durchgeführten Erhebungen sind im Rahmen des Wirkungsmonitorings *Förderprogramm Boden Kanton Bern* aufgearbeitet worden. Mit dem Schlussbericht wurde der Bund über die Ergebnisse in Kenntnis gesetzt. Die langjährigen Messreihen der Berner KABO sind landesweit einzigartig und für den Schutz und die nachhaltige Nutzung unserer Böden von ausschlaggebender Bedeutung. Solche Zeitreihen von Bodendaten dienen dazu, auf problematische Entwicklungen hinzuweisen und eine Beurteilung der getroffenen Massnahmen zu ermöglichen.

Referaten, Artikeln und Merkblättern, vor allem aber mit Demonstrationen im Feld, wird auf die Bedeutung und den schonenden Umgang mit der endlichen Ressource Boden aufmerksam gemacht.

Synthese

Nahrungsmittelsicherheit bedingt schadstofffreie, strukturstabile und ertragsfähige Böden – kurz: eine nachhaltige Bodennutzung. Um dieses Ziel zu erreichen, gilt es, den Ackerbau in ein *Low-Input-Produktionssystem* mit maximaler Energie- und Ressourceneffizienz bei minimalem Einsatz an Hilfsstoffen zu überführen. Dies erfordert Veränderungen beim Befahren und Bearbeiten des Bodens – nicht nur Kulturlandböden, auch Waldböden sind schonend zu bewirtschaften. Um unsere Böden funktionsfähig und weitere Umweltkompartimente intakt zu erhalten, bedarf es eines ganzheitlichen Ansatzes, der mehrere Anliegen gleichzeitig berücksichtigt: das Klima schützen, die Landschaft erhalten, Naturgefahren vermindern, die Gewässer sauber halten und – nicht zuletzt – unsere Nahrungsmittel produzieren. Folgende Vorgehensweisen sind auf lange Sicht unabdingbar:

Den Druck auf den Boden beim Befahren begrenzen:

Unterboden-Schadverdichtungen bleiben aus, indem die Radlast auf 5 Tonnen beschränkt, die Auflagefläche des Reifens maximiert und die Bodenfeuchte in Abhängigkeit des Tongehaltes berücksichtigt werden (Anwendermodell *Terranimo*). Die wendende Pflugarbeit wird mit einem «On Land-Pflug» durchgeführt, d. h. alle Traktorräder laufen auf der bewachsenen, durchwurzelten und somit tragfähigen Bodenoberfläche.

Die Intensität beim Bearbeiten des Bodens reduzieren:

Langjährig konservierende Bodenbearbeitung bzw. der völlige Verzicht auf Bodeneingriffe mittels Direktsaat werden zum Normalfall. Sofern notwendig, erfolgt der Pflugeinsatz «On Land». Dabei wird die Bearbeitungstiefe auf 15 Zentimeter begrenzt und das Saatbett ohne zapfwellengetriebene Geräte grobschollig bereitet.

Mit organischem Material den Boden regenerieren:

Pflanzen und ihre Reste bedecken den Boden permanent und bauen Humus auf. Fruchtbare, lebendige und strukturstabile Böden weisen eine grosse Biodiversität auf und gewährleisten einen wirksamen Erosionsschutz. Pflanzenschutzmittel und Dünger gelangen kaum mehr in die Gewässer.

Den Boden nicht weiter mit Schadstoffen belasten:

Um die Akkumulation von Schwermetallen und Organika im Boden zu vermindern und Kreisläufe zu schliessen, werden Recyclingdünger statt Mineraldünger optimiert eingesetzt, wobei der Stickstoff in den Boden zu platzen ist. Frostempfindliche Gründüngungsgemenge, «Elektroherbizid» und andere Neuentwicklungen ersetzen weitgehend synthetische Pflanzenschutzmittel. Futtermittelzusätze und Arzneimittel werden minimiert.

Den Verlust an fruchtbarem Boden stoppen:

Mit flächendeckender Bodeninformation werden die fruchtbarsten Böden durch sachlich fundierte Entscheide vor Überbauung und Versiegelung geschützt. Anthropogen degradierte Böden, insbesondere entwässerte Torfböden, werden durch unverschmutzten Ober- und Unterboden zu Fruchtfolgefleichen-Qualität aufgewertet. Dies reduziert Torfschwund und Klimagas-Emissionen.

Die Veränderungen des Bodens mit Dauerbeobachtung erfassen:

Langjährig und kontinuierlich erhobene Daten geben Aufschluss über den Zustand des trägen Mediums Boden. Genauso wie bei Wasser und Luft sind Zeitreihen erforderlich, um Beeinträchtigungen des Bodens frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmassnahmen in die Wege zu leiten.

Die «Bodenkompetenz» bündeln:

Der Erhalt fruchtbarer Böden in genügender Menge liegt im Interesse aller: Bodennutzer, Politik, Verwaltung und Forschung arbeiten zusammen und wägen Nutzungs- und Schutzansprüche gegeneinander ab. Die Öffentlichkeit wird für die Bedeutung der Lebensgrundlage Boden sensibilisiert und regelmässig informiert.

Résumé

Les sols naturels sont une ressource non renouvelable. Ils sont la base d'une production alimentaire saine, fournissent aussi du bois indigène, servent de filtre pour purifier l'eau potable, offrent des réserves de sable et de gravier, hébergent une très grande biodiversité et sont aussi des éléments marquants de

paysages attractifs. À l'interface de l'atmosphère avec l'hydrosphère et la lithosphère, les sols sont irremplaçables dans leurs fonctions écologiques et économiques. Par le présent quatrième rapport sur les sols, le Service de la protection des sols informe sur l'état des sols du canton de Berne.

Plus de 40 % du territoire bernois est utilisé par l'agriculture. À long terme, les tassements, l'érosion et les pollutions liées à l'intensification et la rationalisation de la production mettent en danger cette ressource vitale, sans oublier l'extension des constructions qui condamne de plus en plus de sols productifs des plaines.

Pour maintenir la qualité des sols à long terme, il faut les protéger tels qu'ils se sont développés localement et ne pas les soumettre à des charges qui pourraient compromettre leur fertilité. La production d'aliments et de fourrages de haute qualité dépend donc de la protection, dans leur environnement naturel, des sols comme ressource vitale. Dans le canton de Berne, ce but est poursuivi par le *Programme de promotion du sol du Canton de Berne* : pendant six ans, des systèmes de production durables avec couverture permanente du sol et prévention des tassements ont été établis grâce à des contributions financières et soutenu par de mesures de formation continue. Le problème des émissions d'ammoniac et la limitation des charges par essieu ont aussi fait l'objet d'une sensibilisation. Les agriculteurs participants (environ 20 % des agriculteurs bernois) ont ainsi contribué de manière importante à améliorer la structure des sols, à la reconstitution de la matière organique des sols et à la réduction des émissions d'ammoniac. La Confédération a repris de telles mesures sous forme de contributions à l'efficacité des ressources (CER) dans le cadre de la politique agricole (PA) 2014–2017.

Des systèmes cultureux ménageant le sol sont aussi un élément essentiel de prévention et de protection contre l'érosion, à côté d'une rotation adaptée des cultures incluant des engrais verts et des mesures visant à éviter les tassements du sol. Les agriculteurs prenant la responsabilité de mettre en œuvre ces mesures n'ont pas à craindre de subir des retenues sur leurs paiements directs, dont les nouvelles réglementations demandent d'éviter toute érosion due à l'exploitation.

Vingt ans d'exploitation sans labour changent un sol. C'est ce que montre la parcelle de suivi à long terme de l'*Oberacker* : Avec le semis direct, le sol n'est plus mélangé par le travail du sol, ce qui modifie ses propriétés chimiques, physiques et biologiques. Appliqué en continu, le semis direct augmente la disponibilité en nutriments dans la couche superficielle du sol, améliore l'aération des couches plus profondes, la disponibilité en eau pour les plantes ainsi que la diversité des vers de terre ou des champignons mycorrhiziens. Des rendements en partie plus élevés, un besoin en travail réduit ainsi que plusieurs soutiens financiers rendent le système du semis direct économiquement intéressant par rapport au système conventionnel basé sur le labour – en particulier mais pas exclusivement là où le risque d'érosion est élevé. Dans le cas de l'*Oberacker*, l'utilisation de l'herbicide glyphosate tend vers zéro grâce à des mélanges bien adaptés d'engrais verts. Les résidus dans les premiers 5 cm du sol ne sont ainsi qu'à peine plus élevés avec le semis direct.

Des tassements ne sont pas seulement provoqués par l'exploitation agricole mais aussi par les machines de construction quand elles sont utilisées sur des sols mouillés. Sur les chantiers, la protection des sols devrait être de règle, aussi lors de décapage, de stockage provisoire puis de réutilisation de sol. Selon les prescriptions légales récentes, le sol enlevé d'un chantier (couche supérieure et couche

sous-jacente) ne doit plus être mis en décharge mais être utilisé, non pollué, pour améliorer des sols dégradés et, sous la supervision d'un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers, permettre à ces surfaces de retrouver leurs qualités de terres d'assolement.

Les sols forestiers sont surtout en danger de tassement s'ils sont mouillés quand y circulent

de lourdes machines de récolte. Il faut alors autant que possible limiter les passages aux seules voies de débardage préparées. Là où les machines laissent des traces de leur passage, la porosité du sol diminue, ainsi que l'infiltration de l'eau. La communauté microbienne du sol s'en trouve modifiée, au détriment des champignons mycorhiziens et des bactéries aérobies. Une régénération microbienne a été démontrée dans la couche superficielle du sol, mais elle demande plusieurs années.

Maintenir la fertilité des sols tourbeux ayant été drainés et les utiliser de manière durable est un grand défi. En Suisse, de tels sols ont été rendus cultivables. Mais cela a pour conséquence une disparition progressive de la matière organique, ce qui fait que les sols tourbeux profonds perdent environ 0,5 cm d'épaisseur chaque année et qu'ils relâchent du CO₂ et du N₂O, des gaz à effet de serre. La distance à la nappe phréatique s'amointrit et la production est affectée par de l'eau stagnante. La fertilité diminue et, en bien des endroits, la qualité de ces surfaces d'assolement est compromise.

Des connaissances détaillées des propriétés et qualités des sols sont une condition à toutes les actions concernant les sols, que ce soit pour l'aménagement du territoire, pour les constructions, pour l'agriculture et la sylviculture, pour la protection des eaux et de la nature ou encore par rapport aux dangers naturels. Le canton de Berne ne possède pas encore de carte des sols couvrant tout son territoire. Là où elles sont disponibles, les cartes des sols ont été numérisées et elles sont maintenant disponibles via le géoportail du canton. De nouvelles informations sont sans cesse générées par divers projets, en particulier en relation avec la préservation des surfaces d'assolement, la carte indicative des sols et les améliorations des sols tourbeux ayant été drainés. Le besoin de coordination et d'uniformisation pour les informations liées aux sols est reconnu dans toute la Suisse et justifie le projet d'un centre national de compétences. Les informations rassemblées et gérées par le Système national d'information pédologique

Les autres axes de travail importants du Service de la protection des sols sont la direction stratégique du *Groupe technique Sol du Canton de Berne* (organe inter-directions), la sensibilisation du public et des acteurs, l'information de la politique et de l'administration.

L'humidité d'un sol est un critère décisif pour estimer s'il peut supporter des travaux de chantier ou des travaux agricoles ou forestiers. Un réseau de mesures automatiques par des tensiomètres permet une telle estimation et aide ainsi les entrepreneurs, les agriculteurs et les forestiers à prendre leurs décisions en tenant compte des exigences de protection des sols.

Plusieurs méthodes ont été développées et utilisées localement pour freiner la disparition de la tourbe tout en conservant ces sols pour la production agricole. Le recouvrement par du sable voire de la terre végétale ou le labour profond permettent d'obtenir un sol avec environ 10% de matière organique, ce qui est favorable au climat. L'amélioration de ces surfaces est compliquée par l'extrême hétérogénéité des sols organiques et de leurs régimes hydriques. Il faut donc toujours choisir et adapter les méthodes en fonction des conditions spécifiques au site.

(NABODAT) sert de base à des décisions politiques et administratives fondées, et favorise ainsi une gestion économe de la ressource sol.

Cette banque de données contient aussi des mesures chimiques, physiques et biologiques qui permettent d'évaluer l'état des sols et de prendre des mesures là où c'est nécessaire. Pendant plus de 20 ans, des relevés ont été faits sur 19 exploitations agricoles dans le cadre de la *Surveillance cantonale des sols* (KABO). La grande quantité de données obtenue a été analysée en tant que monitoring de l'efficacité des mesures dans le *Programme de promotion du sol du canton de Berne*. Son rapport final a été transmis pour information à la Confédération. Les données à long terme du KABO bernois sont uniques en Suisse. Elles permettent de repérer des évolutions problématiques et de juger de l'efficacité des mesures prises. Elles sont donc d'une importance capitale pour la protection et l'utilisation à long terme de nos sols.

L'importance du sol comme ressource finie et le besoin de ménager cette ressource sont ainsi l'objet d'informations graphiques, de films, d'exposés, d'articles, de fiches techniques et surtout de démonstrations sur le terrain.

Synthèse

La sécurité alimentaire n'est possible qu'avec des sols productifs, non pollués et ayant une structure stable. Ce sont là les conditions d'une utilisation durable. Pour atteindre ces buts, il faut tendre vers des systèmes de culture minimisant les intrants tout en maximisant l'efficacité des ressources – dont l'énergie. Il s'agit entre autres de reconsidérer les passages des machines et le travail du sol. Les sols agricoles ne sont pas les seuls qui demandent protection : les sols forestiers doivent aussi être ménagés. Une approche globale est nécessaire pour garder les fonctionnalités de nos sols tout en assurant la conservation des autres compartiments écologiques. Il faut donc concilier les impératifs du climat, du paysage, de la protection contre les dangers naturels, de la qualité des eaux et bien sûr ceux de la production de denrées alimentaires. À long terme, les démarches suivantes sont indispensables :

limiter la pression des passages sur le sol :

On peut éviter des tassements en profondeur en limitant la charge par roue à 5 tonnes, en augmentant la surface de contact des pneus et en tenant compte des conditions d'humidité en fonction de la teneur du sol en argile (modèle d'utilisateur *Terranimo*). Le travail de labour se fait «hors sillon», donc avec toutes les roues du tracteur sur la surface du sol, dont la portance est élevée grâce à la végétation et en particulier aux racines.

Réduire l'intensité du travail du sol :

Le travail de conservation du sol en continu devient la norme, de même que le semis direct qui permet d'éviter tout travail du sol. Si nécessaire, le labour se fait hors sillon. La profondeur de travail se limite à 15 centimètres et le lit de semences garde une structure grossière grâce au renoncement à des machines animées par la prise de force.

Régénérer le sol par la matière organique :

Les plantes ou leurs résidus recouvrent le sol en permanence ; elles l'enrichissent en humus. Les sols développent ainsi une structure stable, protégeant contre l'érosion. Ils sont fertiles et vivants, leur biodiversité est élevée. Pesticides et engrais ne passent pratiquement plus dans les eaux.

Cesser de polluer les sols :

L'utilisation des engrais de recyclage est optimisée, remplace celle des engrais minéraux – tout en plaçant l'azote dans le sol – et ne conduit pas à l'accumulation de métaux lourds ou de polluants organiques dans le sol. Des engrais verts qui dépérissent par le gel, le «désherbage électrique» et d'autres techniques en développement remplacent largement les pesticides. L'utilisation des compléments fourragers et des médicaments est minimisée.

Stopper les pertes des sols fertiles :

Une information territoriale complète sur les sols permet de prendre des décisions fondées et de protéger les terres les plus fertiles du bétonnage. Les sols dégradés par les activités humaines, en particulier les sols tourbeux drainés, sont améliorés avec du sol non pollué provenant de couches supérieures voire sous-jacentes. Cela assure leur utilisation comme surface d'assolement tout en réduisant les pertes de tourbe et les émissions de gaz à effet de serre.

Comprendre l'évolution des sols par des observations à long terme :

Des données récoltées sur de nombreuses années permettent d'appréhender des changements même dans un milieu évoluant lentement comme le sol. Comme pour l'eau ou l'air, il faut des séries chronologiques pour repérer les évolutions négatives et pouvoir ainsi prendre des contre-mesures.

Regrouper les «compétences sol» :

Conserver assez de sols fertiles est dans l'intérêt de tous : les utilisateurs du sol, la politique, l'administration et la recherche travaillent ensemble et arbitrent les conflits d'utilisation et de protection. Le public est sensibilisé et régulièrement informé de l'importance du sol comme base vitale.

Summary

Naturally grown soil is a scarce, non-renewable resource. It is the base for the production of healthy food and native wood, filter substrate for pure drinking water, mining area of sand and gravel, habitat of a huge biodiversity and design element of attractive landscapes. At

the interface of atmosphere, hydrosphere and lithosphere the soil fulfills indispensable ecological and economic functions. In this fourth Soils Report, the Soil Conservation Service of the canton of Berne presents the soil status.

In the canton of Berne over 40% of the total area is under agricultural use. Intensification, rationalization and in consequence soil compaction and erosion, pollutant inputs as well as ongoing great building development on the agricultural most productive soils in the Swiss midlands threaten our basis of life in the long run.

Soil conservation cropping systems are also a key element for effective erosion control: in combination with appropriate crop rotations including green manures and responsible handling of compaction risks, they are the most important measures for erosion prevention. Does a farmer apply these measures self-responsible, he will not suffer any deduction of the direct payments by the new regulations, even though erosion events might occur.

Against the background of the concerns for the quality of this finite resource, it is the aim to maintain soils in their site-specific structure, free of loads on a high fertility level. The production of high-quality food and feed has to be combined with the protection of soil, our basis of life and its environmental compartments. This objective has been realized with the *Canton of Berne's Soil Support Program*: sustainable cropping systems based on conservation tillage, permanent ground cover and soil-conserving undercarriages during six years with financial incentives and educational components. In addition, farmers were sensitized for the ammonia problematic and axle load limitations. About 20% of the Bernese farmers participated and substantially contributed to the improvement of soil structure, to the increase of soil organic matter and to the reduction of ammonia emissions. The Confederation deduced from this the resource efficiency contributions within the agricultural policy (AP) 2014–2017.

Studies of the long-term field experiment *Oberacker* show that soils will change after 20 years of no-till plant production. Lack of soil mixing under no-till leads to changes of chemical, physical, and biological soil properties. In a continuous long-term no-till system, nutrient availability in the topsoil, soil aeration in the subsoil, supply of plant available soil water and biodiversity of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi increased. Partially higher yields, labour saving and more frequent remunerations make the no-till system profitable. It has become an alternative to the traditional plough system – also, but not exclusively, in areas being prone to erosion. Due to appropriate green manure mixtures, Glyphosate use has been reduced towards zero. The detected residues were only slightly increased in the upper 5 cm of the no-till topsoil.

Not just in agricultural practice, but also in the construction industry the use of heavy machinery under moist conditions leads to soil compaction. On construction sites professional handling with soil should be the rule: soil has to be removed, stored temporarily and re-used carefully. According to the new legal requirements, unpolluted removed top- and subsoils should not anymore be disposed in the scarce landfills, but used for the quality improvement of degraded soils under the direction of a soil specialist in order to recuperate the quality of crop rotation areas.

In forest soils, soil compaction risks are high under moist conditions caused by heavy tree harvesting machinery. It is therefore recommended to use the prepared skid trails as they allow a controlled traffic in a limited space. In the tracks pore space and water conductivity are reduced, and the microbial communities alter to the disadvantage of mycorrhizal fungi and oxygen-loving aerobic bacteria. Evidently, after some years microbial regeneration takes place in the topsoil.

Soil humidity is an essential indicator for the risk assessment of soil compaction due to earthworks and soil-conserving machinery use in agriculture and forestry. A network of automatic tensiometer stations allows drawing

conclusions on the trafficability of soils and supports contractors, farmers, and forest wardens in their decision-making according to the requirements of soil protection.

It is a major challenge to maintain and sustainably use drained peat soils. In Switzerland these soils became available for agriculture. As a result, organic matter of the peat soils has been broken down to the climate-effective gases CO₂ and N₂O, and the deep peat soils slump every year by roughly 0.5 cm. The distance to the groundwater decreases and the production has been impaired by stagnant water. In many places these soils are endangered in their quality as crop rotation areas. In order to slow down peat degradation

and to profitably maintain peat soils, several soil improvement measures have been developed and applied punctually. By covering peat with a layer of sand or of excavated soil or rather by deep ploughing, a climate-favorable soil substrate can be established which consists of mineral and approximately 10% organic material. The extreme heterogeneity of organic land and the water regime stand for a certain difficulty as to soil improvement of cultivated land, which can be overcome by differentiated and site-specific procedures.

Detailed knowledge about soil properties and quality is a precondition for all soil-relevant actions, in land use planning, construction industry, agronomy, forestry and for prevention of water pollution, hazard prevention as well as nature conservation. An area-wide soil map is still lacking for the canton of Berne. Existing maps have been digitalized and are available this day at the geoportal of the canton of Berne. New soil information is constantly being elaborated project-related especially in the field of *crop rotation areas*, the *reference soil map* as well as *improvements of drained peat soils*. The need for coordination and uniformity of soil information is perceived throughout Switzerland and taken into account by the planned national competence center. The centrally stored and administered soil information in the *National Soil Database* (NABODAT) serves as a source for fact-based decision making in politics and

administration, and promotes the thrifty use of the resource soil.

The database also contains measured chemical, physical, and biological results which allow assessing the state of the soil in order to take suitable counteractions and to evaluate them. The extensive data obtained in over 20 years within the scope of the *Cantonal Soil Monitoring* (KABO) on 19 farms have been analyzed in line with the impact monitoring of the *Canton of Berne's Soil Support Program*. The Confederation was briefed on the results in the final report. The long-term series of measurements by means of the Bernese KABO are nationwide unique and of outstanding importance for conservation and sustainable use of our soils. Such time series of soil data help to point out problematic developments and consider the adopted measures to be taken.

Further areas of focus of the Soil Conservation Service will include the strategic leadership within the inter-directorate *Canton of Berne's Soil Working Group*, the raising public and stakeholder's awareness as well as the information of politics and administration. By

means of pictures, videos, presentations, publications and leaflets, but above all with field demonstrations attention is drawn to the high importance of the sustainable and conserving use of our finite resource – the soil.

Synthesis

Food security requires soils which are unpolluted, of stable structure and productive, in short – a sustainable soil use. With that goal in mind, crop production has to be transferred to a *low-input farming system* with maximum energy and resource efficiency by means of a minimum use of auxiliary substances. This calls for changes in the traffic on and tillage of soils – not only agricultural but also forest soils have to be used sparingly. To keep the functionality of our soils and to maintain further environmental compartments, a holistic approach is needed with some concerns that should be considered: climate protection, landscape conservation, reduction of natural hazards, clean waterways, and – last but not least – food production. In the long-term the following practices are essential therefor:

Limit soil pressure from traffic:

Subsoil compaction is avoided by limiting the wheel load to 5 tons, by maximizing the contact surface of the tyre and by considering soil moisture as a function of clay content (user model *Terranimo*). Soil inversion is carried out with an «on-land plough», i.e. all wheels run on the overgrown, rooted and thus stable soil surface.

Reduce soil tillage intensity:

Soil conservation tillage in the long-term and complete cessation of soil disturbance by no-till, respectively, becomes common practice. Is ploughing necessary, then it's done «on-land». Tillage depth is limited to 15 cm while PTO driven rotary tillers are not being used in order to reach a coarse seedbed.

Regenerate soil with organic material:

Plants and their residues cover the soil permanently and form humus. Such fertile, viable and structurally stable soils have a high biodiversity and ensure an effective protection against soil erosion. Pesticides and fertilizers hardly enter watercourses any more.

Avoid additional pollution of the soil:

In order to decrease accumulation of heavy metals and organic pollutants in soils and to close nutrient cycles, recycled instead of mineral fertilizers are optimally applied whereby nitrogen better be placed in the soil. Mixtures of green manure sensitive to frost, «electro-herbicide», and other innovations replace synthetic crop protection products to the greatest possible extent. Feed additives and pharmaceuticals will be minimized.

Stop the loss of fertile soil:

Area-wide soil information provides fact-based decision making and protects the most fertile soils from building development and sealing. Anthropogenic soil degradation affects especially drained peat soils, which recuperate the quality of crop rotation areas by means of unpolluted top- and sub-soils. This reduces peat depletion and greenhouse gas emissions.

Monitor soil changes in long-term observation studies:

Continuously collected data give information about the state of the sluggish medium soil in the long-term. Time series are needed, as for water and air, in order to discover early adverse effects on soil and to launch appropriate countermeasures.

Pooling «soil expertise»:

Preservation of fertile soils in sufficient quantities is in the interest of all: soil users, politics, administration and research work together and balance claims of use and for protection. Awareness on the importance of our livelihood soil is enhanced and the public kept informed.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Avant-propos	v
Impressum	vii
Zusammenfassung	xi
Synthese	xiii
Résumé	xv
Synthèse	xvii
Summary	xix
Synthesis	xxi
Inhaltsverzeichnis	xxiii
1 Bodenschutz im Kanton Bern	1
1.1 Gesetzliche Grundlagen, Auftrag und Zuständigkeiten	2
1.2 Partnerschaftliche Zusammenarbeit	3
1.3 Ausblick	3
2 Förderprogramm Boden Kanton Bern	5
2.1 Projektorganisation und Konzept	6
2.2 Projektziele und Zielerreichung	8
2.3 Wirkungsmonitoring	9
2.3.1 Boden	9
2.3.2 Wasser	9
2.3.3 Luft	9
2.3.4 Pflanzenschutz	10
2.4 Rückmeldungen der Projektteilnehmer	10
2.4.1 Rückmeldungen zum Gülleaustrag	10
2.4.2 Rückmeldungen zum Gesamtprojekt	11
2.5 Schlussfolgerungen	12
2.6 Ausblick	12
3 Kantonale Bodenbeobachtung (KABO)	13
3.1 Erst- und Zweiterhebung	14
3.2 Wirkungsmonitoring auf Basis der KABO	15
3.3 Zusammenfassung des Wirkungsmonitorings Boden	16
3.4 Schlussfolgerungen	19
3.5 Ausblick	19
4 Dauerbeobachtungsfläche Oberacker	21
4.1 Standort Oberacker	23
4.2 Bodenparameter und Erträge nach 20 Jahren Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016a) und MARTÍNEZ et al. (2016a)	24
4.2.1 Bodenphysikalische Kenngrössen	24
4.2.2 Bodenchemische Kenngrössen	24
4.2.3 Erträge	25
4.3 Bodenporosität und Gastransport nach 19 Jahren Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016b) und MARTÍNEZ et al. (2016b)	26
4.3.1 Lagerungsdichte	26
4.3.2 Durchlüftung des Bodens	26
4.4 Die maximal tragbare Radlast – eine zweckmässige Kenngrösse für die Praxis: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016c) und GUT et al. (2015)	28
4.4.1 Bodenfeuchte und Vorbelastung als bestimmende Kenngrössen	29
4.5 Direktsaat zahlt sich aus – Wirtschaftlichkeit von Direktsaat: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016d)	30
4.6 Glyphosat und AMPA im Boden: Zusammenfassung von IMHOF (2016)	31
4.7 Diversität arbuskulärer Mykorrhizapilze in Ackerkulturen bei Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von MAURER et al. (2014)	33
4.7.1 Artenzahl und Diversität	33
4.7.2 Einflussgrössen und Charakterarten	34
4.8 Schlussfolgerungen	34

4.9	Laufende Projekte	35
4.10	Ausblick	36
5	Erosionsschutz in der Region Frienisberg – eine Erfolgsgeschichte	37
5.1	Grundlagen des Erosionsvollzugs	38
5.2	Langjährige Erosionsschadenskartierungen	39
5.3	Bodenabtragsraten in Abhängigkeit von Bewirtschaftung und Kultur	40
5.4	Deutliche Abnahme der Bodenerosion in den letzten Jahren	40
5.5	Schlussfolgerungen	41
5.6	Ausblick	42
6	Bodeninformation	43
6.1	Erarbeiten von Bodeninformation	44
6.2	Einheitliche Grundlagen	46
6.3	Zentrale Ablage	46
6.4	Digitalisierung bestehender Bodeninformation	47
6.5	Erheben neuer Bodeninformation	48
6.5.1	Ergänzung des Inventars der Fruchtfolgeflächen (FFF)	48
6.5.2	Hinweiskarte Boden	49
6.5.3	Boden- bzw. Kulturlandaufwertung im <i>Grossen Moos</i>	51
6.6	Zukunft der Bodeninformation	51
6.7	Nationales Kompetenzzentrum	52
6.8	Schlussfolgerungen	53
6.9	Ausblick	53
7	Entwässerte Torfböden	55
7.1	Grosses Moos	57
7.1.1	Ausgangslage	57
7.1.2	Kulturlandaufwertung	58
7.1.3	Erfahrungen mit Kulturlandaufwertungen	58
7.1.4	Wirkungsbeurteilung von Kulturlandaufwertungen: Zusammenfassung von KÖNIG (2015)	63
7.1.5	Schlussfolgerungen	67
7.2	Gürbetal	68
7.2.1	Ausgangslage	68
7.2.2	Torfkartierung: Zusammenfassung von CASPERS (2013)	68
7.2.3	Schlussfolgerungen	69
7.3	Ausblick	69
8	Boden und Bauen	71
8.1	Bodenaufbau und Begriffe	72
8.2	Bodenkundliche Baubegleitung erstellt Bodenschutzkonzept	73
8.3	Verwertung von abgetragenen Ober- und Unterboden	74
8.4	Schlussfolgerungen	75
8.5	Ausblick	75
9	Regeneration von Fahrspuren in Waldböden	77
9.1	Physikalischer Bodenschutz im Wald	78
9.2	Typisierung vorhandener Fahrspuren	79
9.3	Fahrspurkartierung auf Lotharflächen	79
9.4	Befahrungsversuch zur Spurbildung	81
9.5	Schlussfolgerungen	83
9.6	Ausblick	83
10	Bodenfeuchte im Praxisalltag	85
10.1	Saugspannung des Bodens	86
10.1.1	Einsatzgrenzen bei Raupenfahrzeugen	86
10.1.2	Einsatzgrenzen bei Pneufahrzeugen	87
10.1.3	Einsatzgrenzen bei Bewässerung	87
10.2	Tensiometermessnetz der Kantone	88
10.3	Schlussfolgerungen	89
10.4	Ausblick	89
11	Öffentlichkeitsarbeit	91
11.1	Wege der Kommunikation	92
11.1.1	Kalender «Faszination Boden»	92

11.1.2	Audiovisuelle Medien	93
11.1.3	Veranstaltungen	93
11.1.4	Publikationen und Merkblätter	94
11.1.5	Diplomarbeiten	94
11.2	Schlussfolgerungen	94
11.3	Ausblick	94
12	Boden – eine Ämter übergreifende Herausforderung	95
12.1	Organisation der Fachgruppe Boden	96
12.2	Bodenrelevante Themen	97
12.3	Schlussfolgerungen	97
12.4	Ausblick	97
	Verzeichnisse	99
	Abkürzungsverzeichnis	100
	Verzeichnis der Gesetze und Verordnungen	102
	Verzeichnis der Normen, Richtlinien und Merkblätter	103
	Literaturverzeichnis	105
	Anhang	113
	Anhang 1: Erosionsvöllzug ab 2017 in Eigenverantwortung und mit Selbstdeklaration	115
	Anhang 2: Profile in Gampelen (ZIHLMANN 2015)	117
	Profil a: tieftorfige Halbmoor-Referenz	117
	Profil b: flachtorfige Halbmoor-Referenz	117
	Profil c: flachtorfige Halbmoor-Referenz	118
	Profil d: übersandetes tieftorfiges Halbmoor	119
	Profil e: übersandetes tieftorfiges Halbmoor	119
	Profil f: übersandetes tieftorfiges Halbmoor	120
	Anhang 3: Profile in Witzwil (ZIHLMANN 2015)	121
	Profil a: anmoorige Fluvisol-Referenz	121
	Profil b: anmoorige Fluvisol-Referenz	121
	Profil c: anmoorige Fluvisol-Referenz	122
	Profil d: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol	123
	Profil e: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol	123
	Profil f: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol	124
	Anhang 4: Profile in Ins (ZIHLMANN 2015)	125
	Profil a: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten	125
	Profil b: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten	126
	Profil c: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten	127
	Profil d: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten	128
	Profil e: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten	129
	Profil f: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten	130

1 Bodenschutz im Kanton Bern



Saftige Wiese auf staufeuchter Kalkbraunerde

1 Bodenschutz im Kanton Bern

Das Ziel des Bodenschutzes in der Schweiz und im Kanton Bern ist es, den Boden auf lange Sicht in seiner standortspezifisch typischen Struktur und Fruchtbarkeit frei von Belastungen zu erhalten.

Die Arbeiten der Fachstelle Bodenschutz sind darauf ausgerichtet, die Produktion von hochwertigen Nahrungs- und Futtermitteln mit dem Schutz der Lebensgrundlage Boden und seiner Umweltkompartimente zu vereinbaren. Die Landwirtschaft ist gleichzeitig Verursacherin, Betroffene und Problemlöserin von Umwelt- und Klimaveränderungen. Die Agrarproduzenten

und Behörden nehmen die Herausforderungen an und leisten einen konkreten Beitrag für den Umwelt- und Klimaschutz; sie zeigen Lösungswege zur konsequenten Umsetzung der *Umweltziele Landwirtschaft* (BAFU und BLW 2008) und der *Klimastrategie Landwirtschaft* (BLW 2011) auf.

1.1 Gesetzliche Grundlagen, Auftrag und Zuständigkeiten

Der gesetzliche Auftrag dazu findet sich insbesondere im *Umweltschutzgesetz* (USG 1983), in der *Verordnung über Belastungen des Bodens* (VBBo 1998), im *Landwirtschaftsgesetz* (LwG 1998), in der *Geoinformations-Verordnung* (GeoIV 2008), in der *Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen* (VVEA 2015), im kantonalen *Baugesetz* (BauG 1985) sowie in der kantonalen *Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft* (LKV 1997).

Das USG verlangt die Etablierung einer Fachstelle. Die entsprechende Funktion erfüllt die Fachstelle Bodenschutz im Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT) der Volkswirtschaftsdirektion (VOL). Boden ist jedoch ein typisches sektor- und direktionsübergreifendes Querschnittsthema mit qualitativen und quantitativen Fragestellungen. So haben mehrere Ämter des Kantons in ihrem Arbeitsalltag einen relevanten Bezug zum Boden. Etwa bearbeitet in der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion (BVE) das Amt für Wasser und Abfall (AWA) Fragen des baulichen Bodenschutzes, und das Tiefbauamt (TBA) übernimmt Aufgaben im Bereich Boden bei grossen Bauprojekten wie Strassen etc. Das Amt für Wald (KAWA) betreut die Waldböden des Kantons Bern. Die Interessen des Bodenschutzes bei der Raumplanung werden vom Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR) in der Justiz-, Gemeinde- und Kirchendirektion (JGK) gewahrt. In der *Fachgruppe Boden Kanton Bern* kommen Vertreter all dieser Ämter regelmässig zusammen und gewährleisten, dass Informationen fliessen, die gemeinsa-

men Interessen koordiniert und Synergien genutzt werden.

Gemäss ihrem Auftrag überwacht die Fachstelle Bodenschutz Belastungen des Bodens und unterhält zu diesem Zweck ein Messprogramm: Erkannte Belastungen werden gemessen und beurteilt, Lösungsstrategien entwickelt und Massnahmen umgesetzt, um Schäden vorsorglich zu verhindern oder zu beseitigen (Abbildung 1-1). Für den Kanton Bern



Abbildung 1-1: Handlungsstrategie des qualitativen Bodenschutzes im Kanton Bern, umgesetzt auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen

als grösster Agrarkanton der Schweiz ist der Schutz landwirtschaftlicher Böden von hoher Bedeutung, was unter anderem in der jüngsten Revision der Baugesetzgebung mit einem stärkeren Schutz des Kulturlandes zum Ausdruck kommt. Gemäss VBBo müssen die Ergebnisse der Bodenüberwachung der Öffentlichkeit mitgeteilt und zugänglich gemacht werden; ge-

mäss LKV hat die Fachstelle Bodenschutz periodisch einen Bericht über den Zustand des Berner Bodens und die Massnahmen zu dessen nachhaltiger Nutzung zu erstellen. Der vorliegende 4. Bodenbericht kommt dieser Informationspflicht nach und gibt Auskunft über den Zustand des Bodens, vergangene und aktuelle Projekte sowie die Tätigkeiten der Fachstelle.

1.2 Partnerschaftliche Zusammenarbeit

Neben der Koordination des Bodenschutzes auf kantonaler Ebene erfordert die Arbeit der Fachstelle Bodenschutz auch die Zusammenarbeit mit zahlreichen Partnern von Bund, Gemeinden, Forschung, Praxis, Bildung und Beratung sowie von der Wirtschaft. So besteht ein reger Austausch mit den Bundesämtern für Landwirtschaft (BLW), Umwelt (BAFU) und Raumentwicklung (ARE), den Forschungsanstalten von Agroscope, dem Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Land-

schaft (WSL), den Eidgenössischen Technischen Hochschulen Zürich und Lausanne (ETHZ und EPFL), der Universität Bern, der Hochschule für Agronomie-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), den Fachstellen für Bodenschutz anderer Kantone, mit Ingenieurbüros, den landwirtschaftlichen Partnern INFORAMA, der Agro-Treuhand Rütli AG, dem Agrarinformationssystem GELAN, dem Schweizer und Berner Bauern Verband sowie mit IP-Suisse und den IP-Ringen Kanton Bern.

1.3 Ausblick

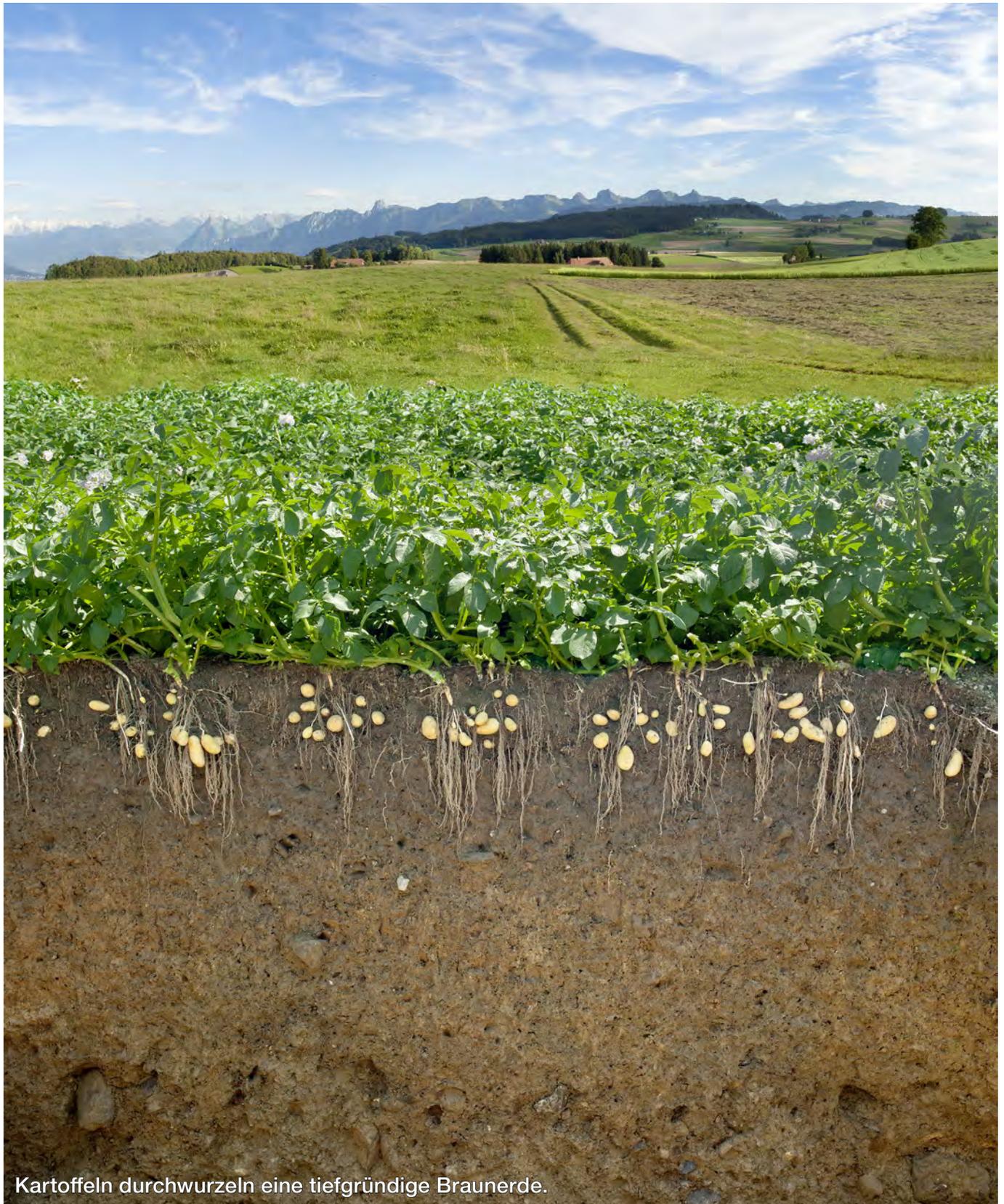
Anfang 2011 bewilligte der Bundesrat das Nationale Forschungsprogramm NFP68 *Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden* mit einem Umfang von CHF 13 Mio. Im Rahmen von 21 Projekten werden seither verschiedenste Aspekte untersucht. Die Projekte umfassen die drei Themenkreise (1) das System Boden besser erforschen, (2) Instrumente und Indikatoren zur Bewertung von Boden bereitzustellen und (3) Konzepte zu seiner nachhaltigen Nutzung entwickeln (DI GIULIO UND ZEYER 2013). Ziel ist es, «das Wissen über die Qualität verschiedener Böden [zu] verbessern und Strategien zur nachhaltigen Nutzung [zu] erarbeiten» (SNF (1) 2016).

Die Fachstelle Bodenschutz ist in einzelne Projekte eingebunden und wird für ihre zukünftige Arbeit wertvolle Anregungen erhalten (Kasten 1-1). In diesem Bericht wird in Informationskästen auf die NFP-Projekte hingewiesen und jeweils angedeutet, inwiefern der Bodenschutz davon betroffen ist. Das NFP68 wird bis Ende 2018 abgeschlossen sein.

Kasten 1-1: NFP68-Projekt Frühwarnsystem

Im Projekt *Frühwarnsystem* werden Instrumente für den Bodenschutz entwickelt, mit welchen gefährdete Böden frühzeitig erkannt und die Wirksamkeit von Massnahmen geplant und überprüft werden können.

2 Förderprogramm Boden Kanton Bern



Kartoffeln durchwurzeln eine tiefgründige Braunerde.

2 Förderprogramm Boden Kanton Bern

Intensive Bearbeitung und schwere Mechanisierung in Kombination mit extremen Wetterereignissen belasten zunehmend die Landwirtschaftsböden. Böden mit einer stabilen und funktionsfähigen Struktur zu erhalten, wird daher immer wichtiger und zu einer immer grösseren Herausforderung. Vor diesem Hintergrund wurde im Kanton Bern während sechs Jahren das *Förderprogramm Boden* umgesetzt. Projektziel war es, durch Förderbeiträge und Weiterbildung nachhaltige Anbausysteme mit konservierender Bodenbearbeitung, maximaler Bodenbedeckung und schonender Befahrung zu etablieren und damit einen Beitrag zur Verbesserung der Bodenstruktur, zum Aufbau organischer Bodensubstanz und zur Verminderung von Ammoniakemissionen zu leisten.

Bei vielen Massnahmen wurden die Zielvorgaben erreicht oder zum Teil übertroffen. Boden schonende Anbausysteme haben sich in der Berner Landwirtschaft etabliert. Es fand in der Praxis eine Sensibilisierung für die Ammoniakproblematik und die Notwendigkeit einer Achslastbegrenzung statt. Die Fördermassnahmen und die Projektvorgaben lösten einerseits technische und prozessuale Innovationen aus, andererseits aber auch Diskussionen rund um das Spannungsfeld zwischen Boden- und Pflanzenschutz.

Der Bund hat die Massnahmen *Direktsaat*, *Streifenfrässaat* und *Mulchsaat* sowie emissionsmindernde Ausbringverfahren in die Ressourceneffizienzbeiträge überführt. Aus Sicht der Fachstelle Bodenschutz müssten diese und weitere Einzelmassnahmen jedoch gesamtbetrieblich und ununterbrochen als Produktionssystembeiträge langjährig gefördert werden, um die Bodenfruchtbarkeit auf lange Sicht erhalten zu können.

Das Projekt *Förderprogramm Boden Kanton Bern* (FPB) wurde von innovativen Landwirten initiiert und in Zusammenarbeit mit Beratern und Bodenschutzfachleuten erarbeitet. Es stützt sich auf das Bundesprogramm zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen gemäss Art. 77a und b des *Landwirtschaftsgesetzes* (LwG 1998). Gestützt auf langjährige

Erfahrungen mit Boden schonenden Anbausystemen und im Bewusstsein, dass der Boden an der Schnittstelle von Wasser und Luft liegt, wurde die Palette der Fördermassnahmen breit angelegt; dies, um die landwirtschaftliche Produktion noch besser auf die *Umweltziele Landwirtschaft* abzustimmen (BAFU und BLW 2008).

2.1 Projektorganisation und Konzept

Als Trägerschaft für das FPB haben sich die Bernische Fachorganisation für den ökologischen Leistungsnachweis und für tierfreundliche Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere (BFO), die Fachgruppe Boden der Bio Suisse und das Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (LANAT) zusammengeschlossen.

Anlässlich einer Medienkonferenz wurde das Projekt am 23. Februar 2009 vom damaligen Volkswirtschaftsdirektor, Regierungsrat A. Rickenbacher lanciert (Abbildung 2-1). Am 10. Juli erfolgte die Vertragsunterzeichnung zwischen dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und der Trägerschaft. Gestartet wurde

das Projekt am 1. August 2009 und endete am 31. Juli 2015. Die gesamten Projektkosten beliefen sich auf CHF 56 Mio.; CHF 45 Mio. wurden durch das BLW und die übrigen Kosten durch das LANAT getragen. Die Restfinanzierung der Investitionsmassnahmen übernahmen die Landwirte. Für die Erfassung und Verwaltung der Daten der teilnehmenden Betriebe war das Projektteam zuständig. Die Auszahlungen erfolgten mit dem Agrarinformationssystem GELAN (Gesamtlösung EDV Landwirtschaft und Natur).

Das Konzept basierte auf den drei Säulen *Bildung & Beratung*, *Massnahmenkatalog* sowie *Monitoring & Kontrolle* (VOL 2009). Sämtliche Massnahmen konnten von den Landwirten auf freiwilliger Basis umgesetzt werden. Die zur Abgeltung dieser ökologischen Zusatzleistungen ausbezahlten Förderbeiträge sollten sie während sechs Jahren für die damit eingegangenen Risiken und einen allfälligen Mehraufwand entschädigen. Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der im FPB angebotenen Massnahmen inklusive der Fläche, auf der die Massnahmen umgesetzt wurden. Die Anzahl der beteiligten Betriebe stieg von 1469 (davon BIO: 167) im ersten Jahr auf 2522 (davon BIO: 294) im sechsten Jahr. Die Massnahmen *Körnerleguminosen* (Körnerleguminosen in der Fruchtfolge) sowie *Ammoniak reduzierende Massnahmen* (bauliche und andere Massnahmen zur Reduktion der N-Verluste) wurden erst ab 2011 angeboten.

In verschiedenen Veranstaltungen wurden einzelne Massnahmen wissenschaftlich und praktisch thematisiert (Abbildung 2-2). Diese *Berner Bodentage* dienten der Weiterbildung der teilnehmenden Landwirte. Im Berner Jura konnte dabei auf die Hilfe der Fondation Rurale Interjurassienne (FRI) zurückgegriffen werden, welche Maschinendemonstrationen, Flurbegehungen, Kurse und Infoveranstaltungen in französischer Sprache organisierte und durchführte. Als weitere wichtige Beiträge zur Aus- und Weiterbildung entstanden in Zusammenarbeit mit der AGRIDEA die Merkblätter *Regenwürmer: Gratisarbeiter im Untergrund* und *Bodenverdichtung vermeiden – so funktioniert's!*. Mit fachlicher Unterstützung durch die Fachstelle Pflanzenschutz des Kantons Bern entstanden die Merkblätter *Schadschnecken im Ackerbau*, *Glyphosat im Acker- und Futterbau*, sowie die Neuauflage des Merkblatts *Fusarien in Getreide*. Zudem wurde eine eigene Internetseite rund ums FPB eingerichtet (www.be.ch/bodenschutz, Register Förderprogramm) und als Beitrag zum Internationalen UNO-Jahr des Bodens der Film *Die Spatenprobe* realisiert (Abbildung 2-3). Dieser wurde auf YouTube bereits über 38 000 Mal angeklickt.



Abbildung 2-1: Alt-Regierungsrat Andreas Rickenbacher, Wolfgang G. Sturny und Marc Zuber im angeregten Gespräch (1. Berner Bodentag am 28. Mai 2010, INFORAMA Rütli in Zollikofen)

Tabelle 2-1: Summe der über sechs Jahre im Rahmen des Förderprogramms Boden Kanton Bern bewirtschafteten Fläche (ha) bzw. der Menge des ausgebrachten Mistkomposts (t) pro Massnahme

Massnahme	Bewirtschaftete Fläche [ha] bzw. [t]
Verschlauchung	246 629 ¹
Boden schonende Fahrwerke	149 739 ¹
Mistkompostierung	180 505 ²
Fruchtfolge	28 835
Mulchsaat	28 397
Streifenfrässaat oder Direktsaat	20 062
Winterbegrünung	19 018
On Land-Pflug	1 628
Körnerleguminosen ³	639
Herbizidverzicht	623
Untersaat	450

¹ Summe der mit Massnahme *Verschlauchung* und *Boden schonende Fahrwerke* bewirtschafteten Fläche (ha) mal Anzahl Gülle-Austräge (max. vier Gülle-Austräge pro Jahr waren beitragsberechtigt) in sechs Jahren

² Tonnen Mist

³ Die Massnahme *Körnerleguminosen* wurde nur vier Jahre angeboten

Bereits ab Sommer 2014 wurden die Landwirte regelmässig über einen möglichen nahtlosen Übergang vom FPB zu den Ressourceneffizienzbeiträgen (REB) des Bundes informiert.



Abbildung 2-2: Der Einsatz einer Direktsämaschine auf einem Getreidestoppelfeld wird kritisch beurteilt (2. Berner Boden(-halb)tag am 9. August 2012, INFORAMA Rütli in Zollikofen).



Abbildung 2-3: Die Demonstration des Bodenaufbaus anhand von Spatenproben stösst auf reges Interesse (2. Berner Boden(-halb)tag am 9. August 2012, INFORAMA Rütli in Zollikofen).

2.2 Projektziele und Zielerreichung

Für jede Massnahme wurde im Vertrag mit dem BLW eine Zielvorgabe definiert und am Schluss des Projekts mit den tatsächlich erreichten Werten verglichen.

Gut 20 % der Berner Landwirtschaftsbetriebe beteiligten sich am FPB. Diese Zahl entspricht ungefähr den Erwartungen der Trägerschaft. Die beteiligten Betriebe waren über den ganzen Kanton verteilt, französischsprachige ebenso wie biologisch wirtschaftende.

Sehr viele Betriebe setzten mehrere Massnahmen um. Im Bereich Boden schonende Anbausysteme wurde bei der *Mulchsaat* 90 % der angestrebten Fläche erreicht, bei der *Streifenfrässaat* oder *Direktsaat* lediglich 64 %. Bei letzterer wurden die zu tiefen Beiträge und die Anmeldung der gesamten Ackerfläche als Hinderungsgründe genannt. *On Land-Plug*, insbesondere in Kombination mit *Herbizidverzicht*, stiess in der Praxis auf wenig Begeisterung (Abbildung 2-4).

Im Bereich Bodenaufbau und Kulturmassnahmen wurden bei *Fruchtfolge* und *Winterbegrünung* die Zielwerte erreicht oder sogar leicht übertraffen. Die Förderung des *Körnerleguminosenanbaus*, der *Untersaaten* sowie des *Herbizidverzichts* war wenig beliebt. Mist wurde dagegen doppelt so häufig kompostiert wie angenommen.

Auch im Bereich Ammoniak reduzierende Ausbringsysteme wurden die Zielwerte sehr gut erreicht oder übertraffen. Die Beschränkung der Achslast auf 5 t wurde nach anfänglicher Skepsis akzeptiert. Bei den Investitionsmassnahmen wurden vor allem Güllegrubenabdeckungen und Futtersilos für die Phasenfütterung bei Schweinen unterstützt. Nachdem das BLW weitere Massnahmen nachträglich als nicht förderungswürdig eingestuft hatte, konnten nur knapp 200 der ursprünglich budgetierten 400 baulichen Massnahmen umgesetzt werden.



Abbildung 2-4: Wird im Direktsaatsystem vor der Wintergetreidesaat das hochwachsende und abfrierende Gründüngungsgemenge mit der Messerwalze abgelegt, bleibt der Boden permanent bedeckt und auf eine Glyphosat-Applikation kann verzichtet werden (2. Berner Boden(-halb)tag am 18. Oktober 2012, INFORAMA Rütli in Zollikofen).

2.3 Wirkungsmonitoring

Für das FPB wurde vom BLW ein Wirkungsmonitoring in den Bereichen Boden, Wasser und Luft verlangt. Die Fachstelle Pflanzenschutz erstellte zusätzlich ein Monitoring für pflanzenschutzrelevanten Fragestellungen. Das

Wirkungsmonitoring erfolgte über kantonale Messnetze, externe Studien und zum Teil Befragungen von Landwirten per Interview oder Online-Fragebogen.

2.3.1 Boden

Die Daten zur Wirkungsbeurteilung Boden stammten aus dem Messnetz der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO) und wurden auf

Landwirtschaftsbetrieben erhoben. Resultate und Schlussfolgerungen des Wirkungsmonitorings Boden sind in Kapitel 3 zusammengefasst.

2.3.2 Wasser

In der Gemeinde Walliswil bei Wangen wurden seit dem Jahr 2000 Messungen des Nitratgehalts im Wasser durchgeführt. Bis 2009 wurde versucht, mit geeigneten Fruchtfolgen und einer Umstellung auf Boden schonende Anbausysteme den Nitratgehalt dauerhaft unter $25 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ Wasser zu senken (LANAT 2010, BVE et al. 1996). Von den elf im Einzugsgebiet wirtschaftenden Landwirten machten

deren fünf im FPB mit. Der Nitratgehalt des Grundwassers pendelt zwar regelmässig um einen Wert von $30 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$, konnte aber nicht dauerhaft unter $25 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ gesenkt werden. Der Nitratgehalt der Quelle sinkt seit 2013 und lag im April 2016 unter $25 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$. Ob dies auf die getroffenen Massnahmen zurückzuführen ist, kann nicht beurteilt werden.

2.3.3 Luft

Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft nahmen im Kanton Bern zwischen 2007 und 2015 um 8 % ab (KUPPER und BONJOUR 2016). Neben der Verringerung der Tierbestände hat die Umsetzung emissionsmindernder Massnahmen im Rahmen des FPB hierzu beigetra-

gen, insbesondere die Phasenfütterung bei den Schweinen sowie die Anwendung emissionsreduzierender Verfahren beim Gülleaustrag.

Immissionsseitig zeigt sich ein schwacher, statistisch nicht signifikanter Trend zur Abnahme.

Die bisherigen Messreihen sind jedoch wegen der starken Witterungsabhängigkeit für eindeutige Aussagen noch zu kurz und sollten auch

nach Beendigung des FPB weitergeführt werden (VOL 2016).

2.3.4 Pflanzenschutz

Die Fachstelle Pflanzenschutz zog aus ihrem Wirkungsmonitoring gemäss Schlussbericht FPB folgendes Fazit:

Reduzierte Bodenbearbeitung erhöht zwar den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wie Herbiziden sowie die Mykotoxin-Belastung durch Ährenfusarien. Eine Zunahme der ausdauernden Unkräuter bei reduzierter Bodenbearbeitung konnte aber nicht festgestellt werden. Die reduzierte Bodenbearbeitung fördert auch nicht

zwingend die Verbreitung von Schädlingen wie Maiszünsler.

Es können auch in reduzierten Bodenbearbeitungssystemen Massnahmen getroffen werden, welche den Befall an Schädlingen und Krankheiten vermindern. Bei den Ährenfusarien ist beispielsweise zu empfehlen, auf die Vorfrucht Mais zu verzichten. Der Maiszünsler kann bekämpft werden, indem das Stroh fein gehäckselt wird (AGRIDEA-Merkblätter *Schadschnecken im Ackerbau, Glyphosat im Acker- und Futterbau sowie Fusarien in Getreide*).

Kasten 2-1: NFP68-Projekt Bodenbakterien

Natürlich im Boden lebende Bakterien können Pflanzenwurzeln besiedeln und die Pflanzen vor schädlichen Pilzen schützen. Sie werden durch Boden schonende Anbausysteme gefördert. Das Projekt *Bodenbakterien* sucht nach Möglichkeiten, die Bodengesundheit mit Hilfe von Bodenbakterien zu fördern.

Wichtig ist und bleibt ein ganzheitliches Produktionssystem, das die Herausforderungen in einem integralen Systemansatz angeht. Eine Aussage «weniger Bodenschutz – mehr Pflanzenschutz» würde hier zu kurz greifen (Kasten 2-1).

2.4 Rückmeldungen der Projektteilnehmer

2.4.1 Rückmeldungen zum Gülleausstrag

Eine Online-Umfrage mit ca. 30 % Rücklauf hat ergeben, dass beinahe alle beteiligten Landwirte Wert auf ein schonendes Befahren der Felder legen und eine Boden schonende Ausbringtechnik für Gülle verwendeten. Durch die Erfahrungen in den ersten Projektjahren konnten dafür klare Kriterien festgelegt werden (Tabelle 2-2). Achslasten >5 t werden dabei als generell bedenklich für die Bodenbelastung eingestuft (CHERVET et al. 2016c).

Im FPB wurde für höhere Achslasten ein Qualitätsnachweis verlangt (www.terranimio.ch). Betriebe im Hügelland bevorzugten die Mass-

nahme *Verschlauchung*, im Flachland dagegen kamen vermehrt Güllefässer mit Qualitätsnachweis zum Einsatz. Allgemein wurde im FPB unter den Beteiligten eine Diskussion über Boden schonendes Befahren und Boden schonenden Gülleausstrag angestossen. Durch den Einbezug von Händlern und Fabrikanten konnten die oben genannten Qualitätskriterien auch bei neuen Güllefässern berücksichtigt werden. Die am FPB beteiligten Landwirte erwarben bei Neuanschaffungen häufig Güllefässer mit eher kleinen Füllmengen (8–10 m³) und Tandemachsen oder sie rüsteten bestehende Güllefässer auf geringere Achslasten um (Abbildung 2-5).

Tabelle 2-2: Kriterien zum Qualitätsnachweis für Boden schonende Güllefassfahrwerke in Abhängigkeit von Anzahl Achsen und Fassinhalt

Anzahl Achsen	Fassinhalt [m ³]	Kriterien zum Qualitätsnachweis
1	< 4.5	Achslast < 5 t
	4.5–7	angepasste Bereifung (inkl. Reifeninnendruck)
	> 7	Qualitätsnachweis nicht möglich da Reifendruckanlage zu teuer
2	< 8.5	Achslast < 5 t
	8.5–12	angepasste Bereifung (inkl. Reifeninnendruck)
	12–15.5	Reifendruckanlage vorhanden
	> 15.5	Qualitätsnachweis nicht möglich da Fassinhalt zu gross



Abbildung 2-5: Mit innovativ umgerüsteten Fahrwerken (links: hydraulisch verstellbare Liftachse, rechts: Doppelpendelachse) wird das Gewicht von Güllefässern gleichmässig auf den Boden verteilt, was zu einem geringeren Bodendruck und damit zu einem schonenderen Befahren führt (1. Berner Bodentag am 28. Mai 2010, INFORAMA Rütli in Zollikofen).

2.4.2 Rückmeldungen zum Gesamtprojekt

Die nachfolgenden Aussagen sind eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Masterarbeit LAZZINI (2016).

Die Beweggründe zur Teilnahme am FPB waren einerseits ökologische Überlegungen, insbesondere die Erosionsbekämpfung, andererseits ökonomische Vorteile durch die Förderbeiträge. Die Motivation vieler Landwirte, Massnahmen umzusetzen, beruhte primär auf bereits in Vorgängerprojekten gesammelten Erfahrungen und der damit möglichen Risikoabschätzung. Allgemein wurden eher Massnahmen mit geringen Investitionskosten und kleinem betrieblichen Änderungsaufwand gewählt.

Aufgrund der auf ihrem Betrieb umgesetzten Massnahmen konnten die Landwirte Veränderungen insbesondere im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit wahrnehmen: weniger Erosionsereignisse, mehr Bodenlebewesen und eine bessere Strukturstabilität. Daneben wurde eine Verringerung der zeitlichen und finanziellen Aufwendungen durch Boden schonenden Anbau und insbesondere durch Direktsaat als positiv erkannt. Negativ dagegen war für einige Bewirtschafter die Veränderung hin zu einem höheren Glyphosateinsatz.

Um den Aufwand so gering als möglich zu halten, sollte die Erfassung und Verwaltung über GELAN erfolgen. Die Höhe der Beiträge wurde mit Ausnahme der Direktsaat als gerecht empfunden und kann als Richtwert für weitere Anreize dienen. Auch die gesamtbetriebliche Verpflichtung für eine konsequente Umsetzung der

Massnahmen wurde als nötig und als agrarpolitisch zielführend beurteilt. Dagegen war die zeitliche Verpflichtung über die gesamten sechs Projektjahre für zahlreiche Bewirtschafter eine Einschränkung, da eine solche den heute oft kurzfristigen wirtschaftlichen und agrarpolitischen Änderungen nicht gerecht wird. Organisation und Beratung des FPB wurde als gut empfunden und die telefonische Betreuung als



Abbildung 2-6: Die Demonstration einer Farbinfiltration am Miniprofil veranschaulicht Bodenverdichtungen unter Fahrspuren (3. Berner Bodentag und 3. Schweizer Bio-Ackerbautag am 12. Juni 2014, Bio-Schwand in Münsingen).

hilfreich eingestuft. Die Möglichkeit zur Weiterbildung war wichtig und notwendig, das Weiterbildungsangebot ausreichend, vielseitig und gut organisiert (Abbildung 2-6). Die Umsetzung auf freiwilliger Basis war ein grosses Plus, ein mögliches Obligatorium wurde klar abgelehnt. Sehr wichtige Faktoren für Teilnahme und Massnahmenumsetzung waren Pioniere in der Region

sowie der Zugang zu Anschauungsbeispielen, Technik und Wissen durch Lohnunternehmer.

Generell liegt der Nutzen von Ressourcenprojekten darin, Anstösse zu erhalten, um bestehende Produktionstechniken im Hinblick auf eine ökologische Produktion zu überdenken.

2.5 Schlussfolgerungen

Das *Förderprogramm Boden Kanton Bern* bot die Möglichkeit, den Weg von traditionellen zu innovativen Bewirtschaftungsmethoden fachlich zu begleiten und finanziell zu unterstützen. BLW, kantonale Fachleute, Kontrollorganisationen und vor allem die Landwirte meisterten gemeinsam die zahlreichen neuen Herausforderungen, oft unter dem Motto «learning by doing». Die gewonnenen Erkenntnisse und Lerneffekte aller Projektbeteiligten sind als hoch einzuschätzen.

Bei vielen Massnahmen wurden die Zielvorgaben erreicht oder zum Teil übertroffen. Boden schonende Anbausysteme haben sich etabliert. Es fand eine Sensibilisierung für die Ammoniakproblematik statt: Gülleaustrag mit Schleppschlauch oder neu konzipierte Güllefässer mit Boden schonenden Fahrwerken wurden – nach anfänglicher Skepsis und Kritik – zum Standard. Die Projektvorgaben lösten technische und prozessuale Innovationen aus, aber auch Diskussionen rund um das Spannungsfeld zwischen Boden- und Pflanzenschutz. Das Förderprogramm Boden konnte als eines der ersten Ressourcenprogramme nach Art. 77a und b LWG

eine Pionierrolle übernehmen und gilt auch für das BLW, vor allem bei der schonenden Nutzung der Ressource Boden, als ein Vorzeigeprojekt (Hofer 2013).

Steuerungsausschuss und Projektteam waren stets darauf bedacht, den administrativen Aufwand über ein ziel- und lösungsorientiertes Projektmanagement möglichst tief zu halten. Die finanziellen Mittel kamen so praktisch vollumfänglich (zu 98 %) den Bewirtschaftern zu Gute. Stets wurde die Anwendung einer technischen Massnahme in den Vordergrund gestellt – es wurde der Einsatz der Maschinen gefördert und nicht deren Kauf – um Anreize zur Übermechanisierung möglichst zu vermeiden.

Die grosse Anzahl an Massnahmen wurde oft kritisiert; diese bewirkte jedoch, dass die Massnahmen durch die Betriebsleitung nach betriebspezifischen Ausrichtungen und Strategien zusammengestellt werden konnten. Nicht zuletzt bei der Reduktion des Herbizideinsatzes ist ein umfassender und an den jeweiligen Standort angepasster Produktionssystemansatz nur von Vorteil.

2.6 Ausblick

Mit der Einführung der Agrarpolitik 2014–2017 wurden die Massnahmen *Direktsaat*, *Streifenfrässaat* und *Mulchsaat* sowie emissionsmindernde Ausbringverfahren vom Bund in die *Ressourceneffizienzbeiträge* (REB) überführt. Diese sind jedoch pro Schlag auf ein Anbaujahr begrenzt und nicht wie im *Förderprogramm Boden Kanton Bern* auf einen langjährigen und gesamtbetrieblichen Ansatz ausgerichtet. Aus Sicht der Fachstelle Bodenschutz

wäre dies hingegen im Interesse des Bodenschutzes und der Erhaltung seiner Fruchtbarkeit auf lange Sicht notwendig, zusammen mit weiteren Massnahmen wie On Land-Pflug, Achslastbegrenzung und Reduktion des Pflanzenschutzmittel-Einsatzes. Die gesamtbetriebliche und ununterbrochene Anwendung der REB-Einzelmassnahmen müsste mittels Produktionssystembeiträgen langfristig gefördert werden können.

3 Kantonale Bodenbeobachtung (KABO)



3 Kantonale Bodenbeobachtung (KABO)

Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung des Wirkungsmonitorings Boden, das Gegenstand des Schlussberichts *Förderprogramm Boden Kanton Bern* ist. Mit der Übergabe dieses Schlussberichts an BLW und BAFU Ende 2016 wird auch der Informationspflicht gemäss VBBö gegenüber dem BAFU Rechnung getragen. Detaillierte Auswertungen und weiterführende Informationen finden sich unter www.be.ch/bodenschutz unter dem Register *Bodennutzung* bzw. *KABO*.

Im Rahmen der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO) überwacht und beurteilt die Fachstelle Bodenschutz den Boden, trifft die erforderlichen Vorsorgemassnahmen und informiert das Bundesamt für Umwelt (USG 1983, VBBö 1998). Seit 1994 misst sie in regelmässigen Abständen auf 19 Landwirtschaftsbetrieben des ackerbaulich intensiv genutzten Berner Mittel-

landes zahlreiche physikalische, biologische und chemische Messgrössen. Die erhobenen Daten werden periodisch ausgewertet. In den dazu erscheinenden Berichten wird über den Zustand der Berner Böden orientiert; darauf aufbauend werden geeignete Massnahmen zu deren nachhaltiger Nutzung vorgeschlagen (LKV 1998).

3.1 Erst- und Zweiterhebung

Der Schwerpunkt der Ersterhebung in der KABO BE lag bei der Erfassung des Ausgangszustandes sowie bei ersten Aussagen zu möglichen Auswirkungen landwirtschaftlicher Bodenbewirtschaftung, insbesondere von Bodenbearbeitungsmassnahmen, auf die

Bodenfruchtbarkeit. Dazu wurden an jedem Standort eine Naturwiese (NW) und eine nahe gelegene und pedologisch ähnlich aufgebaute Ackerfläche (AF) beprobt und miteinander verglichen (Abbildung 3-1). Die Beprobungen erfolgten gemäss den in der Methodensammlung der KABO (BSF 1996) beschriebenen Messgrössen. Durchgeführt wurden sie jeweils einmal pro Fruchtfolgeperiode im zweiten Hauptnutzungsjahr der Kunstwiese auf beiden Flächen (NW und AF). Die Messgrösse *Perkolationsstabilität* wird seit 1997, die *mikrobiellen Biomassen* und die *mikrobielle Bodenatmung* seit 1999 untersucht. Bei den Messgrössen *Nährstoffe* erfolgte 1998 ein Laborwechsel. Zwischen 1994 und 2000 wurden alle 19 KABO-Standorte beprobt. Die daraus gewonnenen Resultate sind in zwei Berichten vorgestellt und eingehend diskutiert worden (BSF 1997, VOL 2003). Bei Messwiederholungen wurden die Daten mit Hilfe der explorativen Statistik dargestellt (z. B. Mediane). Dabei stand der Vergleich der beiden Nutzungssysteme NW und AF bzw. der beiden Tiefenstufen 0–20 cm = Oberboden (OB) und 20–40 cm = Unterboden (UB) im Vordergrund.



Abbildung 3-1: KABO-Standort in Niederösch (BE): Im Vordergrund befindet sich die Naturwiese, im Hintergrund die pedologisch ähnlich aufgebaute Ackerfläche (Kunstwiese).

Die Zweiterhebung der Berner KABO-Standorte begann 2002 und konnte 2008 abgeschlossen werden. Sie erfolgte analog zur Ersterhebung an 17 der ursprünglich 19 KABO-Standorte; Spins und Frauenkappeln mussten wegen Bewirtschaftungsänderungen aufgegeben werden.

Neu wurden im Jahr 2002 die *Luftdurchlässigkeit* sowie Messgrößen zur Beschreibung der Strukturstabilität ins Untersuchungsprogramm aufgenommen (Abbildung 3-2). Weitere Laborwechsel erfolgten 2002 bei der *Lagerungsdichte* und den Messgrößen zur Beurteilung der Porosität sowie 2004 bei den mikrobiellen Messgrößen. In einem dritten Bericht konnten die Daten für die bodenkundlich interessierte Öffentlichkeit aufgearbeitet und diskutiert werden (VOL 2009). Neben den Nutzungssystemen NW und AF und den Tiefenstufen OB und UB wurden die Daten auch in Bezug auf die zeitliche Entwicklung zwischen den beiden Erhebungszyklen (erste und zweite Erhebung), die beiden Produktionsrichtlinien *Integrierte Produktion* (ÖLN) und *Biologischer Landbau* (BIO) sowie die zwei Anbausysteme *Direktsaat* (DS) und *Pflug* (PF) ausgewertet.



Abbildung 3-2: Beprobung des KABO-Standortes in Madiswil (BE) am 3. April 2012: Jeweils im Frühjahr des 2. Hauptnutzungsjahres der Kunstwiese erfolgt die Probenahme. Nach dem Ausheben einer Grube (links) werden die ungestörten Zylinderproben zur Bestimmung der Parameter *Lagerungsdichte*, *Luftdurchlässigkeit*, *Porenvolumen* und *Strukturstabilität* entnommen (rechts). Parallel dazu werden Infiltrationsmessungen vorbereitet (hinten).

3.2 Wirkungsmonitoring auf Basis der KABO

Bis auf den Standort Roggwil ist mittlerweile auch die seit 2008 laufende Dritterhebung abgeschlossen – seit 2010 unter Einbezug der Messgrösse *Mykorrhiza-Infektionspotential*. Zur Erweiterung der nach Produktionsrichtlinie BIO produzierenden Betriebe kamen mit Hindelbank und Kirchlindach zwei neue KABO-Standorte hinzu.

Die Daten dieser Erhebung der KABO wurden als Grundlage für das vom BLW geforderte Wirkungsmonitoring *Förderprogramm Boden Kanton Bern* verwendet (VOL 2008). Die Erst- und Zweiterhebungs-Resultate dienen der Beschreibung des Ausgangszustandes vor Programmbeginn. Dank den seit 1994 übermittelten Feldkalendereinträgen ist in der KABO die Wirkung der Bewirtschaftung langjährig erfasst und beurteilt worden. Um auf dieser Grundlage (langjährige Bodendaten und Feldkalendereinträge) die Wirkungsbeurteilung gezielt auf die im Förderprogramm Boden umgesetzten Massnahmen 1 bis 8 vornehmen zu können, wurden folgende fünf Hypothesen aufgestellt:

1. Wirkungsbeurteilung der **Boden schonenden Anbausysteme** *Mulchsaat* (Massnahme 1) und *Streifenfrässaat* oder *Direktsaat* (Massnahme 2):
Hypothese: Je weniger der Oberboden bearbeitet wird, desto besser sind Bodenstruktur und Bodenstabilität in die-

ser Schicht und desto grösser ist die Regenwurmpopulation.

2. Wirkungsbeurteilung der **On Land-Befahrung** mit den Boden schonenden Anbausystemen *Mulchsaat* (Massnahme 1), *Streifenfrässaat* oder *Direktsaat* (Massnahme 2) oder mit *On Land-Pflug* (Massnahme 3):

Hypothese: Je konsequenter flach oder gar nicht bearbeiteter Boden ausschliesslich mit On Land-Befahrung bewirtschaftet wird, desto besser sind Bodenstruktur und Bodenstabilität im Unterboden.

3. Wirkungsbeurteilung der **ganzjährigen Bodenbedeckung** mit *Winterbegrünung* (Massnahme 5) oder *Untersaat* (Massnahme 6):

Hypothese: Je konsequenter der Boden ganzjährig bedeckt und durchwurzelt ist bzw. je weniger der Boden bearbeitet wird, desto höher sind Humusgehalt, Perkolationsstabilität im Ober- und Unterboden, Biomasse und Aktivität der Bodenmikroorganismen im Oberboden.

4. Wirkungsbeurteilung des **Humus aufbauenden Acker- und Futterbaus** mit *Fruchtfolge* (Massnahme 4), *Winterbegrünung* (Massnahme 5), *Untersaat* (Massnahme 6) und *Mistkompostierung* (Massnahme 8):

Hypothese: Je mehr organisches Material vorhanden ist bzw. ausgebracht wird,



Abbildung 3-3: Im Jahr 2015 wurden schweizweit 34361 ha mit der Technik *Mulchsaat* angebaut (WYss 2016).

desto besser sind Nährstoffeigenschaften und Bodenstruktur und desto intensiver ist das Bodenleben.

- Wirkungsbeurteilung des **hilfsmittelarmen Acker- und Futterbaus** mit *Herbizidverzicht* (Massnahme 7) und in Folge des höheren Anreizes für die Produktionsrichtlinie BIO:
Hypothese: Je mehr Dünger und Pflanzenschutzmittel ausgebracht werden, desto höher ist auf diesen Standorten der Schadstoffeintrag an Schwermetallen und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe).

Im Rahmen eines Nachdiplomstudiums wurde der statistische Auswertungsweg für die KABO-Datenreihen unter Berücksichtigung der ausgearbeiteten Hypothesen evaluiert (NUSSBAUM 2014). Entsprechend dieser Evaluation wurden die Daten ausgewertet und im Kapitel 3.1.5 des Förderprogramm-Schlussberichts dargestellt (VOL 2016).

3.3 Zusammenfassung des Wirkungsmonitorings Boden

Im Vergleich zu pfluglos bewirkt konventionelles Pflügen eine geringere Lagerungsdichte und eine höhere Luftdurchlässigkeit im Oberboden, was zu schnellerer Keimung und Jugendentwicklung der Pflanzen führt. Gleichzeitig erhöht sich jedoch das Risiko einer Unterbodenverdichtung und später infolge Überlockerung auch im Oberboden. Beides ist für Wasser-

haushalt und Bodenaktivität ungünstig und kann langfristig zu Ertragsminderungen führen. Wie die Resultate der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* und weitere langjährig praktizierte Direktsaaten, Mulch- und Streifenfräsaaten zeigen, verbessern die Boden schonenden Anbausysteme die physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften deutlich. Der Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung gemäss Massnahmen 1 *Mulchsaat* (Abbildung 3-3) und 2 *Streifenfräsaat* (Abbildung 3-4) oder *Direktsaat* (siehe Kapitel 4) führt zu einem kontinuierlich entwickelten Porensystem: Die Infiltrationsleistung verbessert sich deutlich, das pflanzenverfügbare Wasser nimmt zu, Wasser- und Lufthaushalt sind ausgewogen. Dank der grösseren Regenwurmpopulation, insbesondere von tiefgrabenden Arten, sind unbearbeitete Böden biologisch aktiver und stabiler in ihrer Struktur. Die erhöhte Aktivität der Mikroorganismen in der wurzelnahen Zone von langjährig reduziert bearbeiteten Böden steigert die Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen. Eine Bodenbedeckung mit Ernterückständen oder Mulch schützt wirkungsvoll vor Erosion. Insbesondere der Unterboden ist daher weniger verdichtungsanfällig. In biologisch wirtschaftenden Betrieben, die auf den Pflug verzichten, sind wegen vermehrtem Beikrautdruck und verminderter Nährstoffnachlieferung Ertragseinbussen um durchschnittlich 8 % festgestellt worden. Boden schonende Anbausysteme sind jedoch wegen geringeren Produktionskosten wirtschaftlich attraktiv und stellen eine sinnvolle Alternative zum konventionellen Pflugeinsatz dar.



Abbildung 3-4: *Streifenfräsaat* von Mais in eine überwinternde Zwischenfruttermischung, welche mit einer max. Wirkstoffmenge von 1.5 l ha⁻¹ Glyphosat reguliert wurde. Im Jahr 2015 wurden schweizweit 7854 ha mit der Technik *Streifensa*at und 8796 ha mit der Technik *Direktsaat* angebaut (WYss 2016).

Neben dem vollständigen Verzicht auf Bodenwendung konnten auch mit der Massnahme 3 *On Land-Pflug* Verbesserungen der Unterbodenqualität erzielt werden (Abbildung 3-5). Sollte ein wendender Pflugeinsatz nötig sein, ist dieser mit der Technik des On Land-Pflugs zu bewerkstelligen, denn dabei laufen alle Traktorräder auf der bewachsenen, durchwurzelten und somit tragfähigen Bodenoberfläche. Ausserdem ist die Pflugtiefe auf 10–15 cm zu begrenzen.

Neben den eher physikalisch-mechanischen Massnahmen, mit denen die Bodenfruchtbarkeit insbesondere im Oberboden gefördert werden konnte, sind die Boden aufbauenden, Humus bildenden Massnahmen 4 *Fruchtfolge*, 5 *Winterbegrünung*, 6 *Untersaat* und 8 *Mistkompostierung* untersucht worden: Mit einer mindestens 6-jährigen Fruchtfolge, welche einen wenigstens zweijährigen Kunstwiesen- bzw. Leguminosenanteil beinhaltet; mit einer nahezu bis zur Frühjahrskultur dauernden Winterbegrünung, welche mindestens 30 % des Bodens abdeckt; mit einer zum Erntezeitpunkt der Hauptkultur sichtbaren, ganzflächigen Untersaat sowie mit einer Naturwiese können Humusgehalt und Mikroorganismenmenge und -aktivität im Oberboden erhöht werden. Im Unterboden konnten diese positiven Wirkungen nicht nachgewiesen werden.

Für viele wichtige Bodenfunktionen ist der Humus von zentraler Bedeutung. Nach ÖLN-Richtlinie bewirtschaftete Ackerflächen weisen einen höheren Humusgehalt auf als biologisch bewirtschaftete. Weil Bodenbearbeitung, insbesondere Pflügen, zu Humusabbau führt, ist der Zufuhr von organischem Material in BIO-, aber auch in ÖLN-Betrieben mit tiefwandelndem Pflugeinsatz hohe Aufmerksamkeit zu schenken. Bei den untersuchten ÖLN-Betrieben zeigen sich seit der Einführung des *ökologischen Ausgleichs* eine Extensivierung der Wiesenbewirtschaftung und damit eine Abnahme des Humusgehalts (Kasten 3-1). Dies und die im Vergleich zu den Naturwiesen tieferen pH-Werte auf Ackerflächen stellen ein Problem bezüglich der Nähr- und Schadstoffmobilität dar. Generell gilt: Je höher der Nährstoffeintrag, desto grösser die Auswaschung bzw. desto tiefer der pH-Wert. Weil der pH-Wert auf die Bodenbakterien einen starken Einfluss hat, ist seiner Regulierung besondere Bedeutung zu schenken (MACHÉ et al. 2012).

BIO-Ackerflächen bzw. generell die Unterböden von Ackerflächen sind strukturstabiler als ÖLN-Ackerflächen bzw. generell die Oberböden; diese verformen sich eher plastisch und verdichten somit rascher durch Druckbelastungen. Das Risiko von Verschlammung in Ackerflächen als Folge intensiver Pflugarbeit ist gross, zumal mit jedem tiefen Pflugeinsatz Bodenmaterial mit geringerem Humusgehalt



Abbildung 3-5: *On Land-Pflug* bei abgetrockneten Bodenverhältnissen: Alle Traktorräder – hinten doppelt bereift – laufen bei dieser Technik auf der unbearbeiteten, biologisch verbauten und damit tragfähigen Bodenoberfläche.

Kasten 3-1: NFP68-Projekte Kohlenstoffdynamik, Anfälligkeitsindikatoren und Kohlenstoffeintrag

Da die organische Bodensubstanz für zahlreiche Bodenfunktionen zentral ist und der Boden der grösste Kohlenstoffspeicher der Schweiz darstellt, will das Projekt *Kohlenstoffdynamik* abklären, ob Klimawandel und Landnutzungsänderungen die Dynamik des Kohlenstoffs im Boden verändern. Parallel dazu untersucht das Projekt *Anfälligkeitsindikatoren*, wie der Kohlenstoff in unterschiedlichen Böden auf die Störungen reagiert. Weiter beurteilt das Projekt *Kohlenstoffeintrag*, wie viel Kohlenstoff durch die Wurzeln von Ackerkulturen in den Boden gelangt. Dabei werden auch Anbausysteme beobachtet.



Abbildung 3-6: Mit dem Pflug wurde labil-aggregiertes Bodenmaterial an die Oberfläche befördert.



Abbildung 3-7: Gelege mit vier Eiern eines Kiebitz' (*Vanellus vanellus*) in einem Sonnenblumenfeld. Dieser eigentlich auf Marschwiesen und Weidelandschaften heimische Bodenbrüter findet überraschenderweise auch auf dem permanenten Direktsaatfeld des KABO-Betriebes von Landwirt Andreas Wyssbrod in Rubigen (BE) optimale Brutbedingungen. Der Kiebitz wurde 2015 auf die Internationale Rote Liste gefährdeter Vogelarten gesetzt.

Kasten 3-2: NFP68-Projekt Antibiotikaresistenz

Böden stellen vor allem als Folge der Ausbringung von Gülle eine mögliche Quelle für die Entwicklung von Resistenzen gegen Antibiotika dar. Das Projekt *Antibiotikaresistenz* will eine Wissenslücke schliessen und damit einen Beitrag zur Antibiotikapolitik leisten.

bzw. Bodenaggregate mit geringerem Lebendverbau aus dem Unterboden an die Oberfläche befördert wird (Abbildung 3-6).

Boden schonende und aufbauende Massnahmen wirken sich erosionsmindernd aus (Abbildung 3-7), was mit der Erfolgskontrolle anhand des Bewirtschaftungsfaktors in der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung nachgewiesen werden konnte. Mit den Methoden der Humusbilanzierung konnte dagegen keine Wirksamkeit erkannt werden.

Wiesenböden sind im Vergleich zu Weiden dichter gelagert. Die maschinelle Raufutterernte wirkt sich auf Wiesenböden belastender aus als Trittschäden von weidendem Vieh. Diese reduzieren hingegen das Infiltrieren des Wassers in die oberste Bodenschicht. Wiesen und Weiden unterscheiden sich in den untersuchten bodenbiologischen Summenparametern nicht. Dagegen erweisen sich molekularbiologische Methoden zur Messung der mikrobiellen Diversität als sehr geeignet, um den Einfluss von Bodennutzung, Bewirtschaftung und Bodenbelastung nachzuweisen, da die oberirdischen Vorgänge die unterirdische Diversität ständig verändern (MACHÉ et al. 2012).

Erste Erkenntnisse über die biologische Vielfalt landwirtschaftlich genutzter Flächen in der Schweiz konnten auch mit der Methode des *Mykorrhiza-Infektionspotentials* gesammelt werden (Abbildung 3-8); diese eignet sich wegen der hohen Kosten und des relativ grossen Laboraufwandes aber nur bedingt als Standardmethode für den Vollzug. Allgemein fördern pflugloser Anbau und eine abwechslungsreiche Fruchtfolge Bodenpilze und -bakterien (FISCH 2016, MACHÉ et al. 2012, WETZEL et al. 2014, ZAHANGIR 2005).

Ob mit der Massnahme 7 *Herbizidverzicht*, wie sie sich auch im finanziellen Anreiz zur Umstellung auf biologischen Landbau findet, der Eintrag von Schadstoffen in den Boden reduziert werden kann, ist mit dem vorliegenden Datensatz nicht abschliessend zu beurteilen. Der Vergleich der beiden Produktionsrichtlinien BIO und ÖLN zeigt aber, dass mit dem Verzicht auf mineralische Dünger, synthetische Pflanzenschutzmittel und Futtermittelzusätze deutlich weniger anorganische und organische Schadstoffe in den Boden und somit in die Gewässer gelangen (Kasten 3-2).

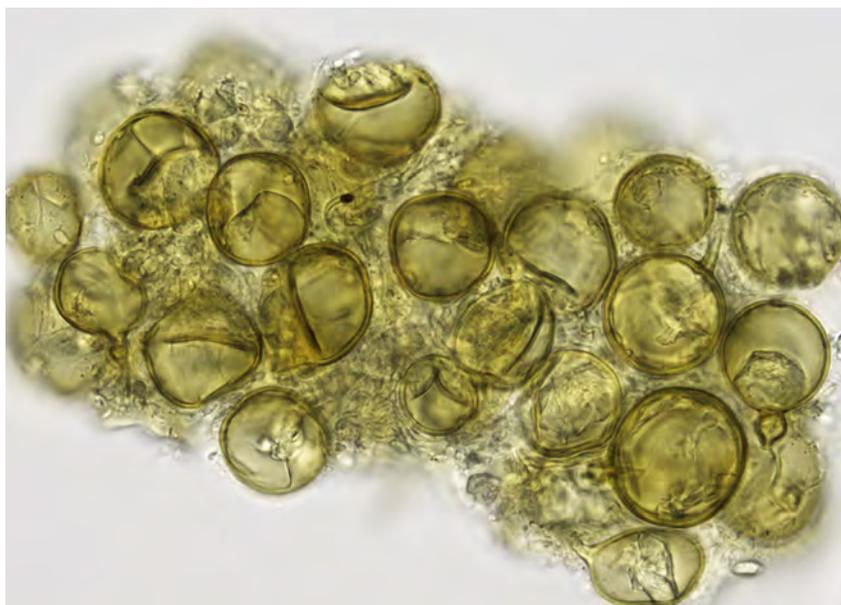


Abbildung 3-8: Mykorrhiza-Pilze leben in Symbiose mit Pflanzenwurzeln und sind ein Indikator für die Bodenfruchtbarkeit. Die hier abgebildete, neu entdeckte Art *Dominikia bernensis* stammt aus einem permanenten Direktsaatfeld des KABO-Betriebes von Landwirt Andreas Wyssbrod in Rubigen (BE).

3.4 Schlussfolgerungen

Die bodenphysikalischen und -biologischen Messreihen der Berner KABO sind schweizweit einzigartig und konnten deshalb als Grundlage für das vom BLW verlangte Wirkungsmonitoring im Bereich Boden herangezogen werden. Nur mit einem solchermassen langjährigen Datensatz können die langfristigen Auswirkungen der umgesetzten Massnahmen sowie neuen Techniken überhaupt beurteilt werden (Abbildung 3-9). Mit der Übergabe des Schlussberichts ans BLW und BAFU Ende 2016 wurde auch die vorgegebene Informationspflicht gegenüber dem BAFU erfüllt.

Insgesamt waren die im Förderprogramm umgesetzten Massnahmen zielführend, wenn auch nicht alle im gleichen Ausmass. Die positiven Auswirkungen auf den Boden sind kaum einer einzelnen Massnahme, sondern oft deren mehrjährigen Kombination zuzuschreiben. Die daraus abgeleiteten Ressourceneffizienzbeiträge (REB) des Bundes sind sinnvoll und aus der Sicht der Fachstelle Bodenschutz mit den Massnahmen *On Land-Pflug* und *Achslastbegrenzung* zu ergänzen.

3.5 Ausblick

Für den Schutz und die nachhaltige Nutzung unserer Böden sind langjährig zusammenhängend erhobene Daten von ausschlaggebender Bedeutung. Verglichen mit den Umweltkompartimenten Luft und Wasser ist die Dauerbeobachtung des Bodens eine junge Disziplin. Der Boden aber ist ein träges Medium; um problematische Entwicklungen nachweisen und getroffene Massnahmen beurteilen zu können, sind am gleichen Standort erhobene langjährige Datenreihen notwendig. Wegen des Eigentumsrechts sind Probenahmen zudem nur mit dem Einverständnis der beteiligten Landwirte möglich. Die vor über 20 Jahren abgeschlossenen Verträge konnten – zum Teil mit den Rechtsnachfolgern der ursprünglichen

Vertragspartner – im vergangenen Jahr verlängert werden. Damit wurde die Grundlage geschaffen, um mit den KABO-Untersuchungen weiterzufahren.

Seit der Einführung der *Geoinformationsgesetzgebung* (GeoIV 2008) gelten KABO-Daten als Geobasisdaten. Diese können in Zukunft kostenlos in der nationalen Bodendatenbank NABODAT (der Kanton Bern ist dem NABODAT-Verbund im Juni 2013 beigetreten; siehe Kapitel 6.3) abgelegt werden und stehen interessierten Nutzern grösstenteils zur Verfügung. Die mittlerweile über drei Erhebungszyklen erfolgten Untersuchungen umfassen sowohl pedologische wie auch agronomische

Grössen. Je grösser die Zeiträume über die sich zusammenhängende Datenreihen erstrecken, desto wertvoller werden sie, um auf zukünftige problematische Entwicklungen reagieren zu können.

Von jeder Beprobung wird in einer am kantonalen Gewässer- und Bodenschutzlabor (GBL) stationierten Pedothek Bodenmaterial archiviert – ein wichtiger Fundus für künftige Fragen mit bodenchemischem Bezug. Die Erfassung biologischer und physikalischer Parameter liefert zudem wichtige Grundlagen für die Erarbeitung von Vollzugshilfen im Bodenschutz.



Abbildung 3-9: Die Technik entwickelt sich weiter: Mit dieser neuartigen, an Schweizer Verhältnisse angepassten Einzelkornsämaschine, wird selbst feinkörniges Zuckerrübensaatgut in mit abgefrorenen Pflanzenresten bedeckten, unbearbeiteten Boden exakt abgelegt – gleichzeitig werden Flüssigdünger in sowie Schneckenköder auf und in die Saatreihe ausgebracht (Bild rechts). Elektronisch gesteuerte, hochpräzise arbeitende Säelemente mit stufenlos einstellbaren Strohräumern, Andruckrollen und Hilfsstoff-Dosiergeräten kombiniert, machen dies möglich (Bild links). Bei dieser Direktsämaschine werden Mechanik (Saatguttransport), Hydraulik (präzise Kraft- und Positionssteuerung), Pneumatik (gedämpfte, stufenlos verstellbare Federung), Elektrik (Antrieb) sowie die Elektronik zur Vernetzung, Steuerung und Regelung der Baugruppen mit GPS-Unterstützung eingesetzt (LAUPER 2017; Dauerbeobachtungsfläche Oberacker, 17. März 2017).

4 Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker*



Erntereifer Mais auf der grundfeuchten Braunerde am Standort *Oberacker*

4 Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker*

Die 20-jährigen Untersuchungen auf der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* am INFORAMA Rütli in Zollikofen (BE) belegen, dass ein langjährig kontinuierliches Direktsaatsystem eine geeignete Alternative zum herkömmlichen Pflugsystem darstellt.

Gepflügte Oberböden schaffen zwar kurz nach der Saat bessere Keim- und Entwicklungsbedingungen, was insbesondere für Knollen- und Wurzelfrüchte von Vorteil ist. Gleichzeitig steigt jedoch im Unterboden, insbesondere bei nassen Bedingungen, das Verdichtungsrisiko. Die bei Direktsaat bessere Nährstoffversorgung im Oberboden, die bessere Durchlüftung des Unterbodens sowie das höhere Angebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser sorgen dagegen bei Leguminosen und Getreide für höhere Erträge. Die Kostenrechnung zeigt, dass Direktsaat auch im Vergleich zu anderen Anbausystemen dank Ertragssteigerung und vermehrten Abgeltungen wirtschaftlich ist. Zudem leistet sie einen wichtigen Beitrag zum Erosionsschutz. Eine Herausforderung besteht hingegen im Pflanzenschutz.

Eine für den Vollzug wichtige und einfache Kenngrösse ist die maximal tragbare Radlast. Lasten > 5 t führen insbesondere in nassen Anbaujahren dazu, dass Böden nur noch an wenigen Tagen ohne Risiko für Unterbodenverdichtungen befahren werden können.

In Zukunft wird ein Low-Input-Ackerbausystem auf der Basis von N- und P-Recyclingdüngern angestrebt.

Trotz grösserer Ausbringungsmenge bei Direktsaat als bei Pflug konnte weder mehr Glyphosat noch mehr AMPA im Boden nachgewiesen werden. Eine Tendenz zur Akkumulation wurde lediglich in den obersten 5 cm gefunden. Auch konnte keine Reduktion von Menge und Artenvielfalt an Regenwürmern und Mykorrhiza-Pilzen beobachtet werden.

Im Kanton Bern werden über 40 % der Gesamtfläche landwirtschaftlich genutzt. Die fortschreitende Intensivierung und Rationalisierung in der Landwirtschaft bedrohen die Qualität der Böden. Insbesondere die Bodenstruktur der offenen Ackerfläche leidet unter der hohen Eingriffsintensität und den grossen Radlasten, welche durch schwere Maschinen und Zugfahrzeuge entstehen. Die Folgen dieser steigenden physikalischen Bodenbeanspruchung sind zunehmende Verdichtung, Verschlammung und Erosion sowie Abschwemmung und Auswaschung von Nähr- und Hilfsstoffen. Dies ge-

fährdet langfristig die Produktionsgrundlage der Landwirte.

Vor diesem Hintergrund ist eine vermehrte Ausrichtung auf konservierende und praxistaugliche Anbausysteme anzustreben, welche die Ursachen der physikalischen Bodenbelastung reduzieren, die Bodenbiologie fördern sowie den ökonomischen und ökologischen Anforderungen genügen.

4.1 Standort Oberacker

Mit Hilfe der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* am INFORAMA Rütli in Zollikofen wird seit 1994 mit der Direktsaat (DS) ein konservierendes Anbausystem untersucht und weiterentwickelt (Abbildung 4-1). Dieses wird mit dem in der Praxis weit verbreiteten Anbausystem Pflug (PF) verglichen. Der Untersuchungsstandort in Zollikofen weist eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 1059 mm und eine durchschnittliche Lufttemperatur von 8.8 °C auf (METEOSCHWEIZ 2017). Der auf Seite 21 als Kapitelbild abgebildete schwach humose, sandige Lehmboden (18 % Ton, 23 % Schluff) ist als Braunerde klassifiziert (Eutric Cambisol, IUSS WORKING GROUP WRB 2006). Auf sechs 18 m breiten (je zur Hälfte DS- und PF-System), durch 3 m breite Dauergrünlandstreifen (DG) abgegrenzten Parzellen (Abbildung 4-2) werden im Rahmen einer Fruchtfolge sechs Kulturen mit der Low-Input-Strategie *Extenso* angebaut (seit 2007: Eiweisserbsen – Winterweizen – Ackerbohnen – Wintergerste – Zuckerrüben – Silomais). Zwischen den Kulturen werden so oft wie möglich Gründüngungsgemenge ange-sät (Kasten 4-1).

Bei PF wurde bis 2002 konventionell rund 25 cm tief gepflügt; seit 2003 wird ein On Land-Pflug eingesetzt. Seit 2006 wird nur noch 12–15 cm tief gepflügt und auf die Saatbettbereitung verzichtet; es wird lediglich ein Frontpacker zur Rückverfestigung benutzt. Bei der DS werden die Kulturen ohne vorangehende Bodenlockerung gesät. Mittels Scheibenscharen wird lediglich ein Säschlitz im Boden geöffnet und nach der Saatgutablage geschlossen.

Die Düngung erfolgt 3.75 m breit gemäss den Vorgaben der Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF, FLISCH et al. 2009) und 5.25 m breit für die Kinsey-Düngungstechnik (KINSEY und WALTERS 2014, COUNCIL ON SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS 1992). Der Pflanzenschutzmitteleinsatz beschränkt sich seit 2009 weitestgehend auf den Einsatz selektiver Herbizide.

Im Folgenden werden fünf publizierte Artikel zu langjährigen agronomischen, ökonomischen und pedologischen (bodenphysikalischen und -biologischen) Erhebungen sowie eine einmalige Untersuchung zu möglichen Rückständen von Glyphosat und seinem Abbauprodukt Aminomethylphosphonsäure (AMPA) zusammengefasst. Die Originalartikel finden sich auf der Internetseite www.be.ch/bodenschutz unter dem Register Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker*.



Abbildung 4-1: Direktsaat des Winterweizens in das noch blühende und frostempfindliche Gründüngungsgemenge aus Sonnenblumen und *Guizotia niger*. Dadurch werden Beikräuter/-gräser sowie Ausfallerntegut unterdrückt, und auf Glyphosat kann verzichtet werden.



Abbildung 4-2: Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* am INFORAMA Rütli in Zollikofen (BE); Luftaufnahme vom 29. Juni 2004.

Kasten 4-1: NFP68-Projekt Gründüngungen

Die Untersuchungen des Projekts *Gründüngungen* erweitern das Wissen über die Eigenschaften und den gezielten Einsatz von Zwischenkulturen, speziell in konservierenden Anbausystemen.

4.2 Bodenparameter und Erträge nach 20 Jahren Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016a) und MARTÍNEZ et al. (2016a)

4.2.1 Bodenphysikalische Kenngrößen

Bodenphysikalische Untersuchungen der beiden Anbausysteme zeigen einen grundsätzlich ähnlichen Kurvenverlauf von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand über ein Tiefenprofil von 50 cm. Das Anbausystem DS unterscheidet sich von PF durch die geringere Lagerungsdichte in den obersten Zentimetern und einen grösseren Eindringwiderstand sowie eine hö-

here Lagerungsdichte bis zum Unterboden; dies hängt mit den höheren C_{org} -Gehalten im obersten Oberboden (0–5 cm) und der fehlenden mechanischen Lockerung im Oberboden zusammen. Beim Anbausystem PF hingegen zeigt sich im Unterboden eine erhöhte mechanische Beanspruchung mit höherer Lagerungsdichte und grösserem Eindringwiderstand.

4.2.2 Bodenchemische Kenngrößen

Im Zuge der bodenchemischen Analysen wurde der pH-Wert [$CaCl_2$] untersucht. Im Unterboden weist er nur geringfügige Unterschiede zwischen den Anbausystemen auf. Hingegen besteht in den oberen Bodenschichten (10–30 cm) der DS ein ausgeprägter Gradient, welcher die pH-Werte von 5.0 auf 5.9 ansteigen lässt und mit der grösseren Menge an Pflanzenrückständen und Wurzelmasse begründbar ist: Der Oberboden hat einen höheren C_{org} -Gehalt

und demzufolge mehr NH_4^+ -haltige, d. h. sauer wirkende organische Abbauprodukte (Abbildung 4-3 A). In den letzten Jahren erfolgten auf den DS-Flächen weder P- noch Ca-Düngegaben; die fehlende Durchmischung und die konstante Nährstoffaufnahme in den oberflächennahen Schichten sowie der abwärts gerichtete Transport führten bei DS zu einem Konzentrationsmaximum dieser beiden Nährstoffe in 20–25 cm (Abbildung 4-3 B und C). Für K (Abbil-

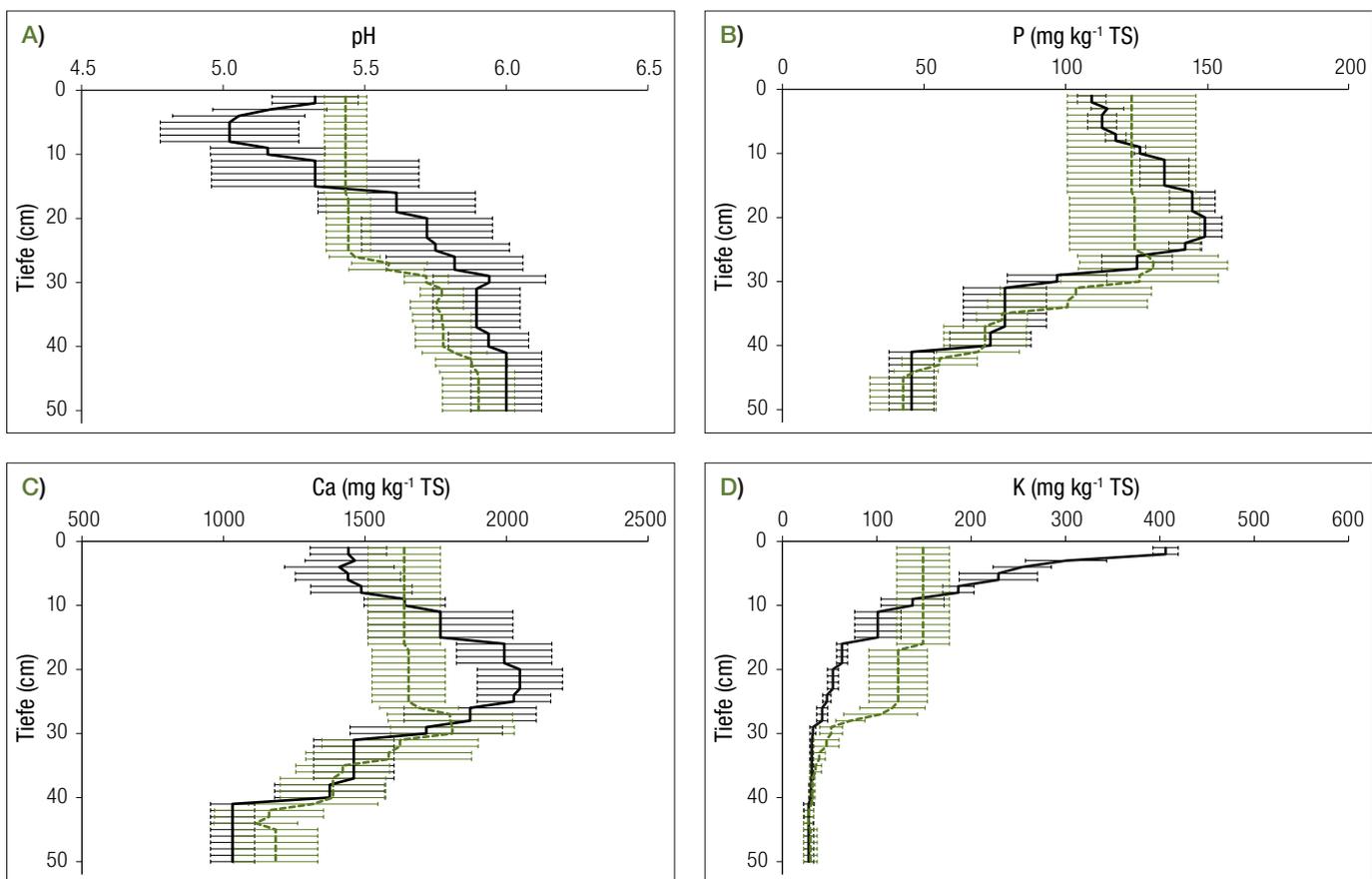


Abbildung 4-3: Kurvenverläufe des (A) Säuregrades (pH-Wert [$CaCl_2$]) und der (B) P-, (C) Ca- und (D) K-Konzentration in Abhängigkeit von Anbausystem und Bodentiefe. Schwarze Linien = Direktsaat, grüne Linien = Pflug. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte (TS = Boden-Trockensubstanz).

dung 4-3 D) und Mg (nicht dargestellt) ist eine Anreicherung in den obersten Bodenschichten bei DS festgestellt worden (Konzentration in 0–4 cm Tiefe 75 % höher als in 10–30 cm).

Trotz höheren Düngegaben im PF verhindert das Mischen des Oberbodens die Ausbildung eines ähnlichen Konzentrationsgradienten.

4.2.3 Erträge

Über alle Kulturen und die gesamten 20 Versuchsjahre betrachtet unterscheidet sich der durchschnittliche Relativertrag bei DS nicht signifikant von demjenigen bei PF (Tabelle 4-1); er ist jedoch tendenziell höher (102.6%). Trotz einer kontinuierlichen Anpassung der Herbizidstrategie mit markanter Reduktion des Glyphosateinsatzes konnten die Erträge bei DS auf ihrem hohen Niveau gehalten werden. Hingegen wirkt sich der dichter gelagerte Oberboden bei Wurzel- und Knollenfrüchten ungünstig aus und ist für signifikant geringere Kartoffelernten sowie tendenziell kleinere Zuckererträge verantwortlich. Auf den Anbau von Kartoffeln wird seit 2000 verzichtet, da das Direktmulchlegen noch nicht ausreichend weit entwickelt war. Bei den

Zuckerrüben wirkt sich bei DS die frühe Ernte zur Verminderung des Bodenverdichtungsrisikos ertragsmindernd aus. Bei Leguminosen und Getreide sind die Relativerträge bei DS dagegen signifikant höher als bei PF.

Diese Ergebnisse stützen die These, dass gepflügte Böden nicht zwangsläufig die besten Voraussetzungen für ein optimales Pflanzenwachstum bieten. Bei DS kann die höhere Lagerungsdichte durch eine bessere Nährstoffversorgung im Oberboden kompensiert werden. Zudem sorgt hier das höhere Angebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, welches die Kulturen auch in Trockenperioden kontinuierlich mit Wasser versorgt, für höhere Erträge.

Tabelle 4-1: Durchschnittserträge und Relativerträge (Pflug = 100 %) aller zwischen 1994 und 2014 angebauten Kulturen in Abhängigkeit vom Anbausystem. Ertragsangaben in dt ha⁻¹ (Getreide: 14 % H₂O, Leguminosen: 13 % H₂O, Mais: Trockensubstanz und Kartoffeln: Frischsubstanz) oder in t Zucker ha⁻¹ (Zuckerrüben). Werte mit unterschiedlichen Buchstaben markieren einen signifikanten Unterschied (p < 0.05).

Kultur	n	Ertrag		Relativertrag (PF = 100 %)
		DS	PF	
Wintergerste	20	65.9a	62.2b	105.9
Zuckerrüben	20	11.5	11.9	96.6
Silomais	20	199.9	198.7	100.6
Winterweizen	20	55.0a	51.9b	105.9
Sommereiwisserbsen	8	42.5a	37.3b	113.7
Sommerackerbohnen	6	30.9a	26.3b	117.3
Winterroggen	6	59.5	58.6	101.5
Wintereiwisserbsen	5	32.1a	26.6b	120.9
Kartoffeln	5	341.1b	399.5a	85.4
Kunstwiese ¹	2	-	-	-
Soja	2	26.3	29.4	89.7
Winterackerbohnen	1	23.6	29.0	81.2
Sommerweizen	1	60.5	49.7	121.5
Mittel aller Kulturen				102.6

n = Anzahl Versuchsjahre mit entsprechender Kultur; DS = Direktsaat, PF = Pflug

¹ Ertrag wurde nicht erhoben

4.3 Bodenporosität und Gastransport nach 19 Jahren Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016b) und MARTÍNEZ et al. (2016b)

Die Bodenstruktur – das Verhältnis zwischen festen Bodenbestandteilen und Hohlräumen – bestimmt wichtige bodenphysikalische Funktionen wie die Tragfähigkeit oder den Transport und die Speicherung von Wasser und Gas. Damit eng in Zusammenhang stehen die chemischen und biologischen Prozesse, wobei vor allem der Gastransport eine Schlüsselfunktion einnimmt. Er liefert Informationen zur Charakteristik von Porensystem und Durchlüftung, welche sich direkt auf das Wurzelwachstum und die Produktivität der Kulturen auswirkt. Zur Beurteilung der Bodenstruktur wurden ungestörte Zylinderproben entnommen und folgende Schlüsselfaktoren bestimmt: Lagerungsdichte, luftgefüllte Porosität, relative Gas-Diffusivität und Luftdurchlässigkeit.

Die Bodenstruktur – das Verhältnis zwischen festen Bodenbestandteilen und Hohlräumen – bestimmt wichtige bodenphysikalische Funktionen wie die Tragfähigkeit oder den Transport und die Speicherung von Wasser und Gas. Damit eng in Zusammenhang stehen die chemischen und biologischen Prozesse, wobei vor allem der Gastransport eine Schlüsselfunktion einnimmt. Er liefert Informationen zur Charakteristik von Porensystem und Durchlüftung, welche sich direkt auf das Wurzelwachstum und die Produktivität der Kulturen auswirkt. Zur Beurteilung der Bodenstruktur wurden ungestörte Zylinderproben entnommen und folgende Schlüsselfaktoren bestimmt: Lagerungsdichte, luftgefüllte Porosität, relative Gas-Diffusivität und Luftdurchlässigkeit.

4.3.1 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte im Oberboden ist bei PF verglichen mit DS signifikant geringer, im Unterboden dagegen leicht höher als bei DS. Zwischen Unter- und Oberboden sind die Unterschiede bei DS gering und bei PF signifikant. Die geringere Lagerungsdichte im Oberboden

bei PF ist weitgehend auf Poren mit Durchmesser $> 100 \mu\text{m}$ zurückzuführen; es handelt sich hierbei um Interaggregatporen (Hohlräume zwischen Bodenfragmenten, die bei der Bodenbearbeitung entstehen) oder Bioporen (Wurzelkanäle oder Regenwurmgänge).

4.3.2 Durchlüftung des Bodens

Die luftgefüllte Porosität ist im Oberboden bei PF signifikant grösser als bei DS und Dauergrünlandstreifen (DG). Im Unterboden jedoch sind die DS- und DG-Werte höher (Abbildung 4-4 A und B). Gute Keimbedingungen für die Pflanzen mit ausreichenden Porenvolumina sind im Oberboden von PF-Flächen bereits bei sehr feuchten Bedingungen erreicht, bei DS und DG hingegen erst bei abgetrocknetem Boden. Die relative Gas-Diffusivität im Oberboden zeigt bei PF höhere und im Unterboden geringere Werte als bei DS und DG (Abbildung 4-4 C und D). Somit werden kritische Zustände für die Bodendurchlüftung im Unterboden bei PF bereits bei nassen Bodenverhältnissen (= geringes Matrixpotential) erreicht, im Oberboden dagegen sind ausreichend aerobe Bedingungen gewährleistet. Die Luftdurchlässigkeit bei DS und DG zeigt im Vergleich zu PF geringere Werte im Oberboden und erhöhte Werte im Unterboden (Abbildung 4-4 E und F). Die fehlende Bodenbearbeitung, die dichtere Lagerung sowie die möglicherweise stärkere Windung des Porensystems (Tortuosität) könnten diese Unterschiede verursachen. Andererseits werden beim Pflügen die Porenkontinuität im Oberboden regelmässig unterbrochen und die Poren im Unterboden zusammengedrückt; dies erklärt die hier geringeren Werte. Trotz der unterschiedlichen Luftdurchlässigkeiten im Ober- und Unterboden zeigen die Volumina der Poren $> 100 \mu\text{m}$ bei PF keine Differenz. Dies bedeutet, dass die Tortuosität zwischen den beiden Schichten unterschiedlich sein muss. Jedoch wird, auch bei geringem Matrixpotential, weder im Ober- noch im Unterboden beider Anbausysteme eine unzureichende Bodendurch-

lüftung festgestellt. Untersuchungen zeigen einen negativen Effekt des Pflugeinsatzes auf die Regenwurmpopulation, während sich DS als positiv für die Populationsentwicklung und damit die Bildung von Bioporen im Unterboden herausstellt.

Da die Gastransporteigenschaften im Oberboden bei PF, verglichen mit DS und DG, grundsätzlich günstigere Bedingungen für das Wurzelwachstum darstellen, kann kurz nach der Saat auf generell geeignetere Wachstumsbedingungen bei PF geschlossen werden. Demgegenüber trocknet der Oberboden bei PF schneller aus, und wegen Unterboden-Verdichtungen und damit fehlender Kapillarität können hier Ertragsrückgänge entstehen. Bei DS und DG beschränken sich tiefe Gastransportkapazitäten auf den Oberboden und meist auf kurze Zeiträume nach Niederschlägen. Dies belegen die signifikant höheren DS-Erträge bei Gerste, Weizen, Ackerbohnen und Eiweisserbsen (siehe Kapitel 4.2.3). Umgekehrt könnten die tendenziell höheren Zuckerrüben-erträge durch die locker gelagerten PF-Oberböden erklärt werden. Bezüglich der Regenwurmbiomasse wurde nach zehn Versuchsjahren eine Abnahme von 50 % bei PF im Vergleich zu DS festgestellt. Besonders die tief grabende Art *Lumbricus terrestris* ist bei DS häufiger vertreten und kann zur Erklärung des im Unterboden erhöhten Bioporenvolumens herangezogen werden (Abbildung 4-5). Diese ausgedehnten Poren bleiben bei DS langjährig erhalten, erleichtern die Erschliessung des Unterbodens durch Pflanzenwurzeln und können bei einzelnen Kulturen zu signifikant höheren Erträgen bei DS beitragen.

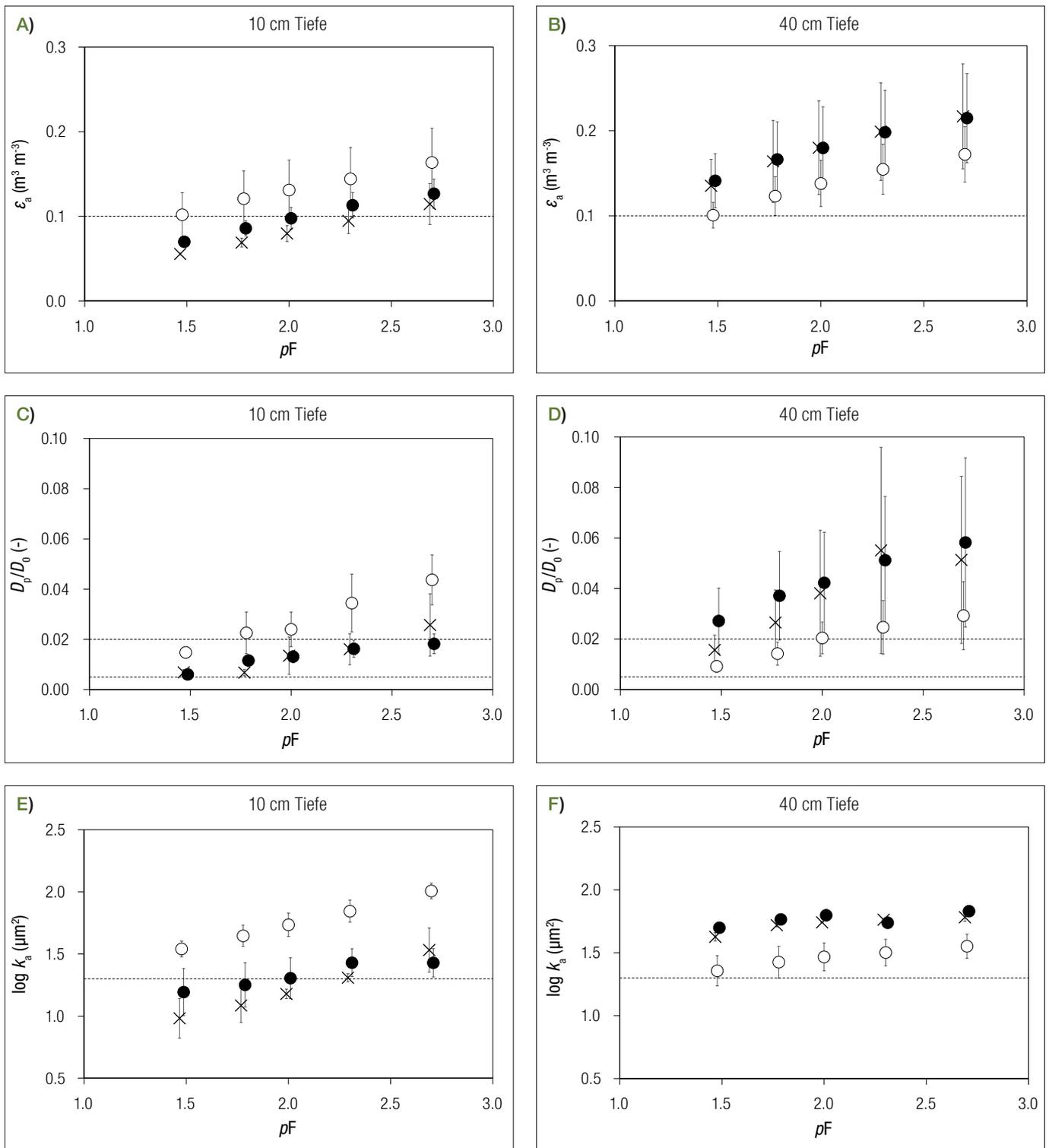


Abbildung 4-4: Luftgefüllte Porosität (ϵ_a ; A, B), relative Gas-Diffusivität (D_p/D_0 ; C, D) und Luftdurchlässigkeit (k_a ; E, F) in den zwei Anbausystemen Direktsaat (schwarze Kreise) und Pflug (weisse Kreise) sowie den Dauergrünlandstreifen (Kreuze) in 10 cm (A, C, E) und 40 cm Bodentiefe (B, D, F) als Funktion der Bodenfeuchte (pF = negativer Logarithmus des Matrixpotenzials). Die unterbrochenen Linien entsprechen den Grenzwerten für ϵ_a nach GRABLE und SIEMER (1968), für D_p/D_0 nach STEPNIIEWSKI (1980, 1981) bzw. nach SCHJØNNING et al. (2003) und für k_a nach FISH und KOPPI (1994). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler des Mittelwertes.



Abbildung 4-5: Regenwurmröhren entwässern den Boden. Tiefgrabende Regenwürmer tapezieren und stabilisieren mit ihrem Kot diese Röhren. Ähnlich der *Sagrada Família* errichtete hier ein Regenwurm an der Profilwand ein 17 cm hohes Filigranbauwerk.

4.4 Die maximal tragbare Radlast – eine zweckmässige Kenngrösse für die Praxis: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016c) und GUT et al. (2015)

Bei Bodenbeanspruchungen mit hoher Befahrungsintensität und grossen Radlasten kann die Verdichtung zu massiven Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und der ökologischen Leistungen des Bodens führen. Als Folge ist mit eingeschränktem Wurzel- und Pflanzenwachstum sowie mit Ertragsverlusten zu rechnen. Als Messgrösse für die Bodenfestigkeit und damit für die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber einer Verdichtung wird die Vorbelastung verwendet. Entsteht ein vertikaler Druck, der grösser ist als die Vorbelastung, kommt es zu einer dauerhaften Verformung der Bodenstruktur und damit zu einer Schadverdichtung.

Um eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung zu gewährleisten, ist sorgsam darauf zu achten, dass der vertikale Bodendruck die Bodenfestigkeit nicht übersteigt. Diese Forderung führt zum Begriff der *maximal tragbaren Radlast*.

4.4.1 Bodenfeuchte und Vorbelastung als bestimmende Kenngrößen

Es wurden die saisonalen Veränderungen der maximal tragbaren Radlast für die beiden Anbausysteme DS und PF sowie für den zwischen den Versuchspartellen liegenden DG analysiert. Mit Hilfe der Kombination aus der im Feld gemessenen Bodenfeuchtigkeit (als Matrixpotential), der im Labor bestimmten Vorbelastung (Zylinderproben aus 35 cm Tiefe) und der aus einer Simulation errechneten Beziehung zwischen Radlast und vertikalem Bodendruck in 35 cm wurde die maximal tragbare Radlast im Jahresverlauf berechnet.

Diese zeigt einen ähnlichen saisonalen Verlauf wie die Bodenfeuchte. Aufgrund dessen kann von einem entscheidenden Einfluss ausgegangen werden, welcher unter niederschlagsarmen Bedingungen und bei wasserbedürftigen Kulturen zwar hohe Radlasten erlaubt, bei

nassen Bedingungen jedoch ein erhöhtes Verdichtungsrisiko bedeutet. Mit steigenden Radlasten nimmt die Anzahl verfügbarer Befahrungstage ohne Verdichtungsrisiko ab. Des Weiteren führen Lasten >5 t zu einer überproportionalen Reduktion der Befahrungstage. Beim Mährescher und selbstfahrenden Maishäcksler bleibt die Anzahl der Befahrungstage über die ganze Untersuchungsperiode gering. Der selbstfahrende sechsstufige Zuckerrübenvollernter kann sogar überhaupt nie ohne Risiko einer Bodenverdichtung eingesetzt werden. Zudem wirkt sich ein zu hoch eingestellter Reifennendruck negativ auf die maximal tragbare Radlast aus; deshalb wird eine Anpassung je nach Einsatzbedingungen unbedingt empfohlen und im folgenden Beispiel anhand von Abbildung 4-6 erläutert.

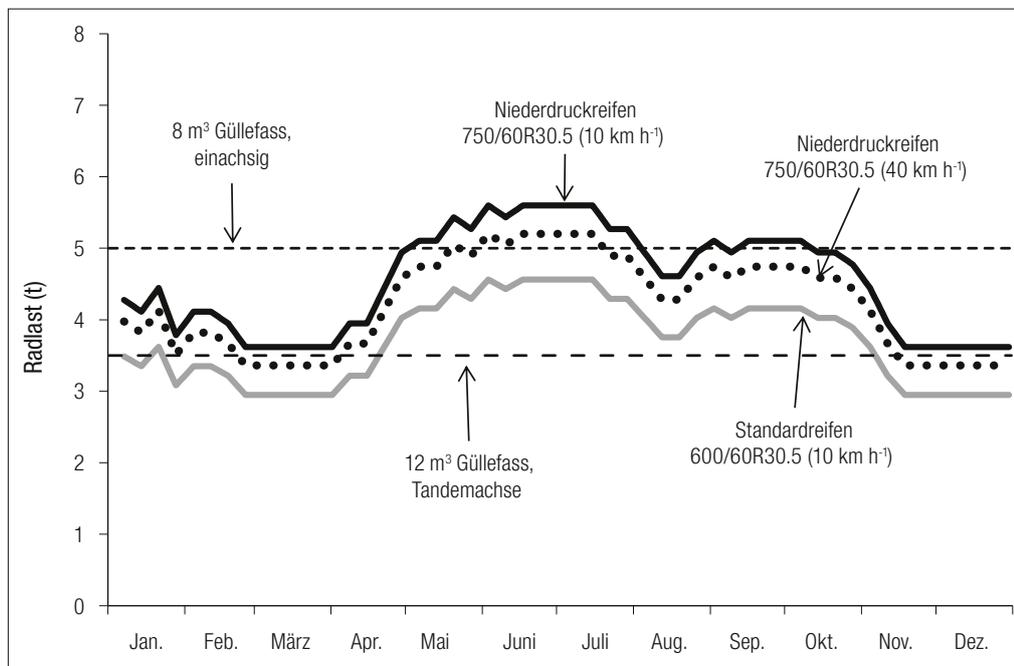


Abbildung 4-6: Die beim Anbausystem Direktsaat für die Jahre 2001 bis 2011 gemittelten maximal tragbaren Radlasten eines Standardreifens 600/60R30.5 (graue Linie) und eines Niederdruckreifens 750/60R30.5. Beim Niederdruckreifen erfolgten die Berechnungen bei den Fahrgeschwindigkeiten 10 km h^{-1} (schwarze durchgezogene Linie) bzw. 40 km h^{-1} (schwarze gepunktete Linie), jeweils mit dem vom Hersteller empfohlenen Reifennendruck. Die horizontalen Linien stehen für ein einachsiges Güllefass mit 8 m^3 Inhalt (Linie bei 5 t Radlast) bzw. eines Güllefasses mit Tandemachse und 12 m^3 Inhalt (Linie bei $3,5 \text{ t}$).

Der Einsatz eines einachsigen, mit Standardreifen ausgerüsteten Güllefasses (8 m^3 Inhalt) bedeutet eine Radlast von 5 t (Abbildung 4-6; durchgezogene horizontale Linie bei 5 t). Die maximal tragbare Radlast ist mit Standardbereifung im DS-Verfahren jedoch immer $<5 \text{ t}$ (graue Linie), weshalb der Anhänger nicht ohne erhebliches Verdichtungsrisiko einge-

setzt werden kann. Dasselbe Güllefass, aber mit Niederdruckreifen ausgerüstet, erreicht dagegen bei konstanter Auflast durchgehend höhere Werte für die maximal tragbare Radlast (schwarze durchgezogene Linie). Von Mai bis Juli sind sie sogar in einem günstigen Bereich von $>5 \text{ t}$. Werden jedoch die Niederdruckreifen am gleichen Fahrzeug mit einem Innen-

druck für das Befahren von Strassen versehen (entsprechend den Herstellerangaben für eine Fahrgeschwindigkeit von 40 km h⁻¹), wird dadurch auch die maximal tragbare Radlast reduziert (schwarze gepunktete Linie). Beim Einsatz eines Güllefasses mit 12 m³ Inhalt und einer gleichzeitigen Verlagerung des Gewichtes auf eine mit Niederdruckreifen ausgerüstete Tandemachse lassen sich die risikoarmen Befahrungstage ebenfalls deutlich erhöhen – die Radlast beträgt hier nur noch 3.5 t pro Achse (durchgezogene horizontale Linie bei 3.5 t).

Die Wahrscheinlichkeit von Unterbodenverdichtungen bei kleinen Radlasten und Niederdruck-

reifen kann mit optimalem Innendruck stark verringert werden. Neben dem nachgewiesenen Einfluss der technischen Möglichkeiten ist die Bodenfeuchte als wichtiger natürlicher Einflussfaktor zu berücksichtigen. Die maximal tragbare Radlast stellt eine einfach zu interpretierende und zweckmässige Kenngrösse dar, welche sich bei der Wirkungsüberprüfung von Fördermassnahmen (z. B. Radlastbeschränkung bei Güllefässern) oder im Hinblick auf das Vermeiden von Unterbodenverdichtungen bei nachhaltiger Bodenbewirtschaftung als sehr nützlich erweist (BLW und BAFU 2013).

4.5 Direktsaat zahlt sich aus – Wirtschaftlichkeit von Direktsaat: Zusammenfassung von CHERVET et al. (2016d)

Archivierte Aufzeichnungen der auf der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* ausgeführten Feldarbeiten und Erträge lieferten die Grundlagen zu Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Für jede Kultur wurden von 2009 bis 2014 die Direktkosten (Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmittel) sowie die Maschinenkosten und der Arbeitseinsatz Dritter erfasst. Feldarbeiten wie Bodenbearbeitung, Saat, Pflege und Ernte wurden mit kommerziellen Maschinen von Lohnunternehmern ausgeführt. Der Abzug dieser

Kosten vom Ernteerlös ergibt den Deckungsbeitrag I. Nach dem Hinzuzählen von ÖLN-, Extensio-, REB- (ohne Zusatzbeitrag *Herbizidverzicht*) und IP-Suisse-Beiträgen erhält man den Deckungsbeitrag II.

Die im Vergleich zu PF geringeren Bodenbearbeitungskosten und die leicht höheren Erträge bei DS ergeben in Kombination mit den REB-Beiträgen *Schonende Bodenbearbeitung* einen durchschnittlich um CHF 567

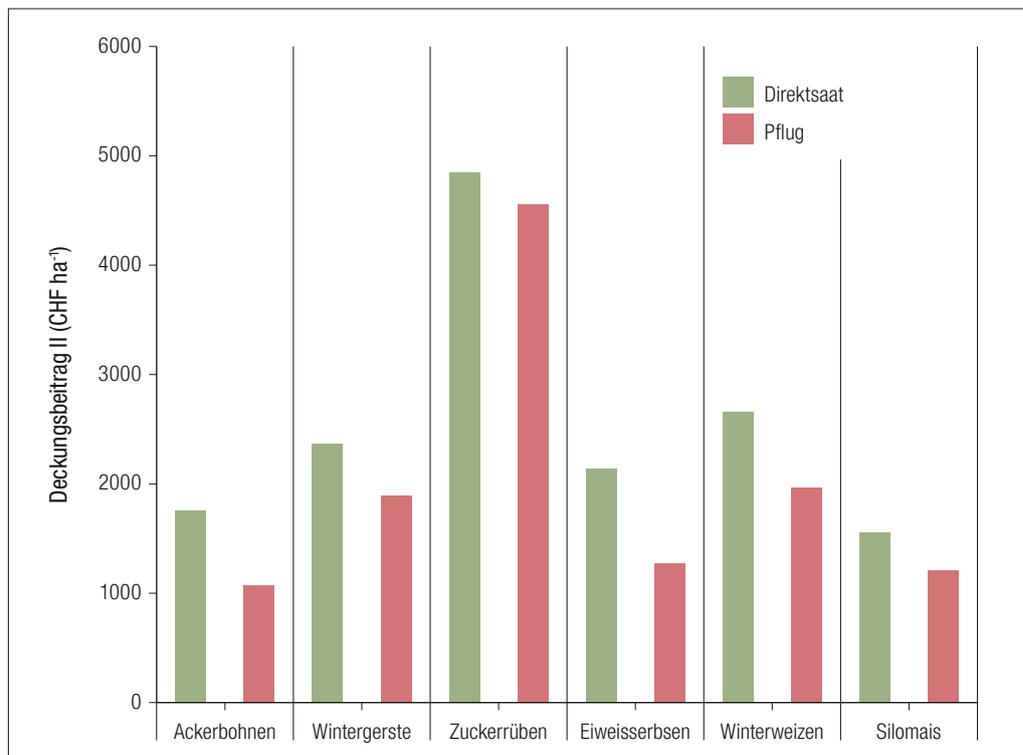


Abbildung 4-7: Mittlere Deckungsbeiträge II (CHF ha⁻¹) der zwischen 2009 und 2014 angebauten Kulturen in Abhängigkeit von den beiden Anbausystemen Direktsaat und Pflug. Deckungsbeitrag II = Ertrag minus Kosten plus Abgeltungen

pro ha und Anbaujahr höheren Deckungsbeitrag II (Abbildung 4-7). Damit in PF ein mit DS vergleichbarer Deckungsbeitrag II ausgewiesen werden könnte, müssten die PF-Erträge von Tabelle 4-1 bei der im Oberacker gewählten Low-Input-Strategie *Extenso* jährlich wie folgt ansteigen: Eiweisserbsen +22 dt ha⁻¹, Winterweizen +11 dt ha⁻¹, Acker-

bohnen +20 dt ha⁻¹, Wintergerste +12 dt ha⁻¹, Zuckerrüben +736 kg Zucker ha⁻¹ und Silomais +29 dt TS ha⁻¹.

Mit der Direktsaat lassen sich im Sinne der Nachhaltigkeit mit geringem Arbeitsaufwand ein wirkungsvoller Erosionsschutz umsetzen und einkommenssichernde Erträge erwirtschaften.

4.6 Glyphosat und AMPA im Boden: Zusammenfassung von IMHOF (2016)

Das nicht selektive Herbizid Glyphosat wird weltweit häufig verwendet. Sowohl der Wirkstoff als auch sein wichtigstes Abbauprodukt AMPA führen bezüglich vermuteter Humantoxizität und negativer Umweltwirkungen, insbesondere auf aquatische Ökosysteme, zu kontroversen Diskussionen (Kasten 4-2). Dank dem auf der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* angesäten, sehr konkurrenzkräftigen Gründüngungsgemenge konnte bei DS der Glyphosat-Einsatz in den letzten Jahren schrittweise gegen null reduziert werden (Abbildung 4-8). Falls notwendig, erfolgten sowohl bei PF (Be-

kämpfung der Quecke *Agropyron repens*) als auch am Parzellenrand beider Anbausysteme (infolge des vom DG hineinwachsenden Beikrauts) begründbare Glyphosat-Einsätze. Dieses situationsbezogene Vorgehen führte über alle sechs Parzellen zu differenzierten Glyphosat-Austrägen (Tabelle 4-2).

Im Rahmen eines Masterprojekts (IMHOF 2016) wurden im Frühjahr 2016 auf der hierfür ausgewählten Parzelle II Bodenproben entnommen. Diese unterschieden sich in ihrem Anbausystem (DS, PF), ihrer Entnahmetiefe (0–5 cm,

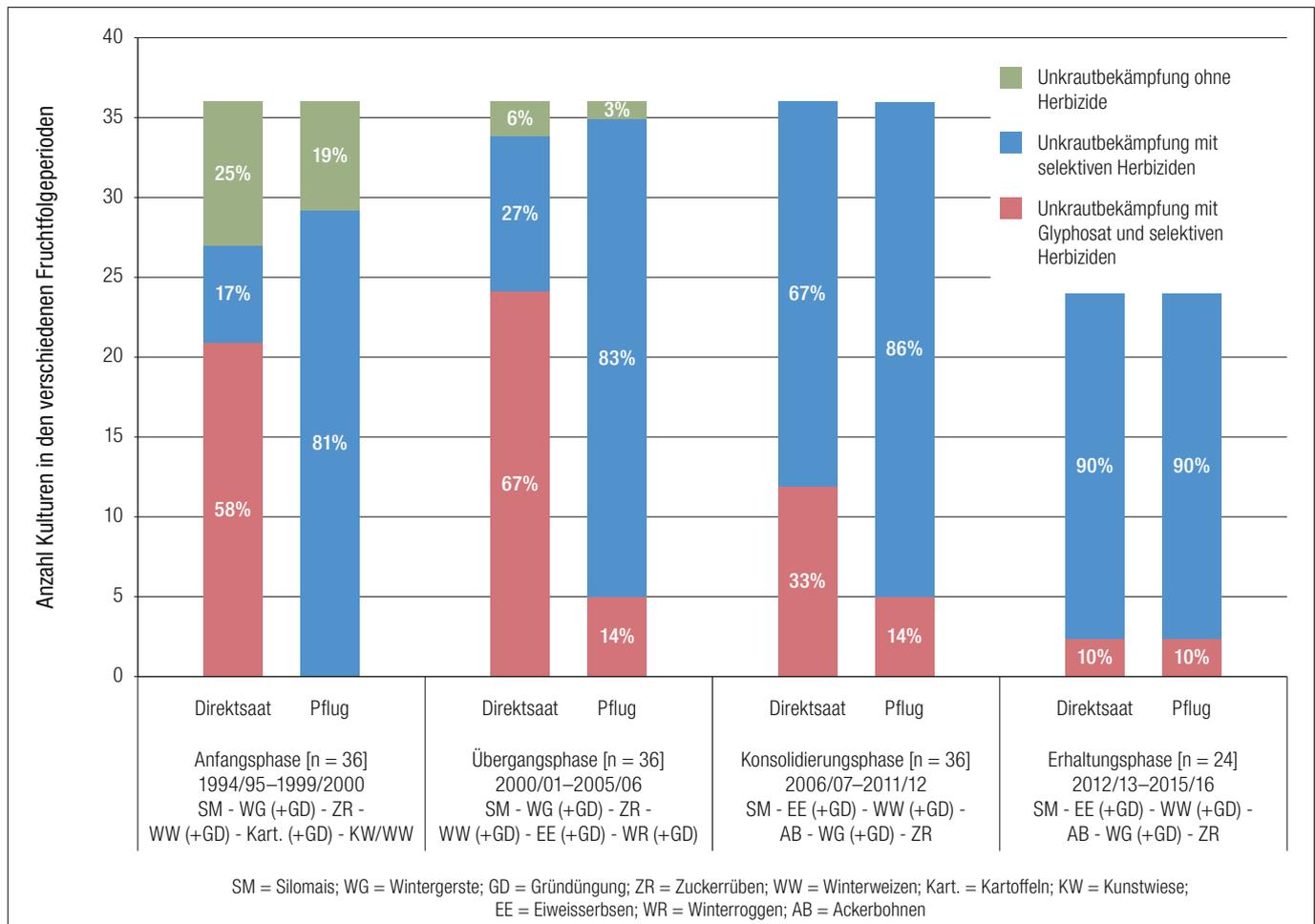


Abbildung 4-8: Herbizidstrategie 1994-2016 für die verschiedenen Fruchtfolgeperioden bei Direktsaat und Pflug

Tabelle 4-2: Menge des zwischen 1994–2016 eingesetzten Glyphosats (l ha⁻¹ Wirkstoff) auf der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker. Die parzellenscharfe Auflösung unterscheidet nach Anbausystem (Direktsaat = DS, Pflug = PF) und Behandlungsfläche.

Parzelle	I		II		III		IV		V		VI	
	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF
Ganzflächige Behandlung	16.2	5.0	12.6	-	25.6	3.6	18.4	4.7	13.7	1.4	21.2	4.7
Total aus ganzflächiger und Randbehandlung	27.0	10.4	30.6	7.2	38.2	12.6	32.8	11.9	28.1	8.6	32.0	10.1



Abbildung 4-9: Mais-Direktsaat in eine vorgängig mit Glyphosat regulierte Kunstwaiese: Bei dieser in der Schweiz bewilligten Vorsaats-Anwendung wird korrekterweise zwischen Applikation und Saat eine Wartezeit von 14 Tagen eingehalten; Kulturpflanze und Wirkstoff kommen nie in direkten Kontakt.

Kasten 4-2: Die Schweizer Glyphosat-Zulassungsaufgaben werden u. a. durch das GVO-Moratorium bestimmt.

Nur im Ausland bewilligt ist eine Glyphosat-Applikation auf beinahe erntereife Kulturpflanzen. Nach einem solchen, in der Schweiz verbotenen, *Vorernteinsatz* (Sikkation) wird der Wirkstoff bis zur Ernte kaum mehr vollständig abgebaut und kann in Nahrungs- und Futtermittel gelangen. Gleichzeitig werden im Ausland gentechnisch veränderte Organismen (GVO) mit einem Glyphosat-Resistenzgen als Nahrungs- und Futtermittelpflanzen angebaut. Erst dadurch wird eine Glyphosat-Applikation im *Nachsaateinsatz* möglich. Wegen des vom Bundesrat beschlossenen, bis 2021 gültigen GVO-Anbaumoratoriums gelangt auch diese Praxis in der Schweiz nicht zum Einsatz.

Werden hingegen die Zulassungsaufgaben für Glyphosat von der landwirtschaftlichen Praxis korrekt umgesetzt, gelangt Glyphosat – im Gegensatz zu fast allen selektiven Herbiziden – kaum in direkten Kontakt mit in der Schweiz produzierten Nahrungs- und Futtermittelpflanzen: Beim bewilligten *Vorernteinsatz* ist nach einer Glyphosat-Applikation und vor der Ansaat der nächstfolgenden Kultur eine Wartezeit von 14 Tagen einzuhalten (Abbildung 4-9). Wird darüber hinaus auch das AGRIDEA-Merkblatt *Glyphosat im Acker- und Futterbau* korrekt umgesetzt, ist nach heutigem Wissensstand nicht mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu rechnen.

0–20 cm) sowie der Menge des von 1994 bis 2015 applizierten Glyphosats. Im Labor wurden die Oberboden-Konzentrationen von Glyphosat und AMPA analysiert. Zusätzlich versuchte man, mit dem Modell FOCUS das Abbauverhalten von Wirkstoff und Metabolit zu simulieren (FOCUS 2006).

Bei DS wurden Glyphosat-Konzentrationen von 110 bzw. 21 µg kg⁻¹ Boden TS (Parzellenrand bzw. -mitte) gefunden, bei PF entsprechend 86 bzw. 10 µg kg⁻¹ Boden TS, wobei der Unterschied zwischen den Anbausystemen nicht signifikant ist. Für AMPA wurden 737 bzw. 229 µg kg⁻¹ Boden TS bei DS und 369 bzw. 108 µg kg⁻¹ Boden TS bei PF gemessen. Die Resultate zeigen, dass trotz höherer Ausbringungsmenge bei DS prozentual weniger Glyphosat-Rückstände zu finden sind als bei PF, nämlich ungefähr 12% weniger. Über die Zeit ist keine signifikante Anreicherung des Abbauprodukts AMPA zu sehen. Bei DS wurde eine Tendenz zur Anreicherung von Glyphosat und AMPA in den obersten 5 cm des Bodens festgestellt. In dieser Schicht findet sich zwei bis vier Mal mehr Glyphosat als in der Schicht 0–20 cm. Labormessungen und das Modell FOCUS lassen darauf schliessen, dass die längste Glyphosat-Halbwertszeit in der Literatur möglicherweise unterschätzt wird.

4.7 Diversität arbuskulärer Mykorrhizapilze in Ackerkulturen bei Direktsaat und Pflug: Zusammenfassung von MAURER et al. (2014)

Bodenorganismen spielen insbesondere für den Erfolg des Anbausystems DS eine zentrale Rolle: Neben den Regenwürmern, welche die Bodenstrukturbildung und den Abbau organischer Substanzen wesentlich mitbestimmen, sind Bakterien und Pilze die «Drehscheibe» für Pflanzenernährung und -gesundheit. Rund 80 % aller Pflanzen nutzen die Vorteile einer Partnerschaft mit Wurzelpilzen: Diese sogenannten Mykorrhizapilze bieten den Pflanzen leichteren Zugang zu Nährstoffen, insbesondere P, aber auch N und Wasser, indem sie den Boden mit ihren Hyphen bis in kleinste, von den Pflanzenwurzeln nicht mehr erreichbare Poren erschliessen (Abbildung 4-10). Im Gegen-

zug geben die Pflanzen den Pilzen assimilierte Kohlenhydrate ab.

Die meisten Acker- und Wiesenpflanzen leben in relativ unspezifischer Symbiose mit arbuskulären Mykorrhizapilzen (AM-Pilze). Ihr Vorkommen wird hauptsächlich von der Bodenbeschaffenheit und der Bewirtschaftungsform bestimmt. Ziel der Untersuchung war, die Diversität der AM-Pilze in langjährigen Direktsaat- mit derjenigen von Pflugparzellen zu vergleichen, Kultureffekte zu bestimmen und Indikatorarten zu bezeichnen.

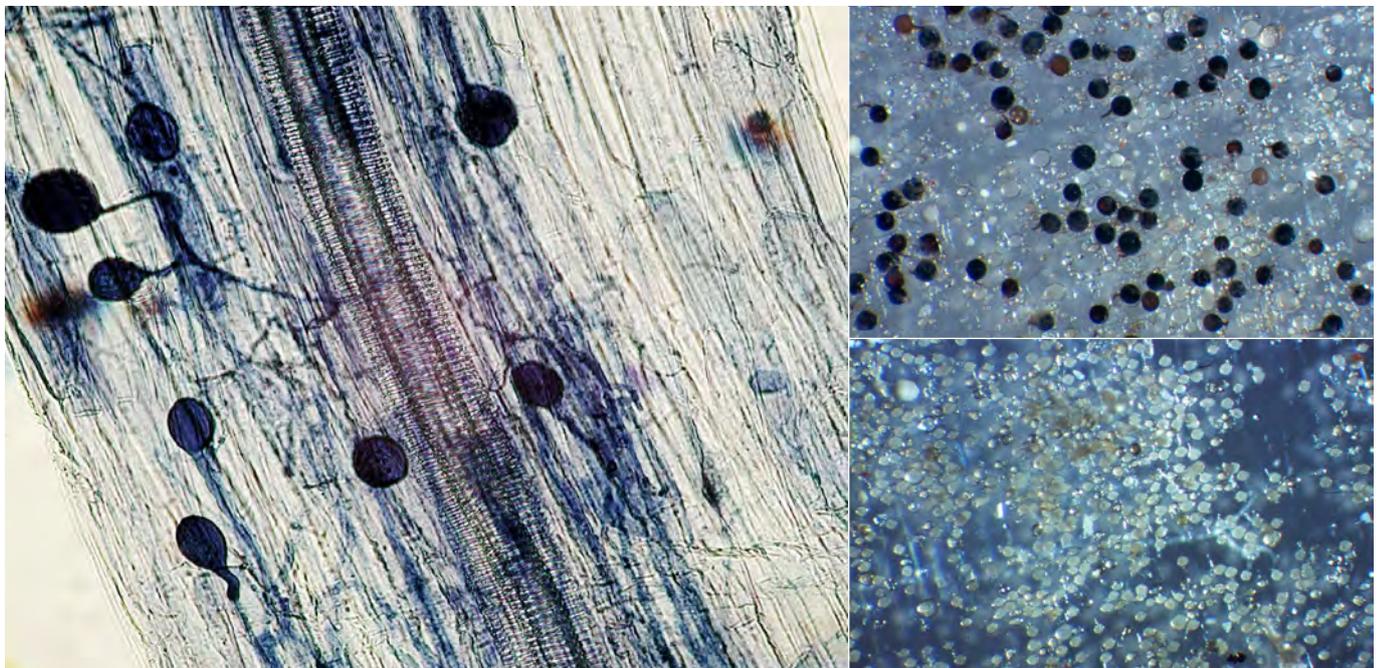


Abbildung 4-10: Eine mit Mykorrhiza-Pilzen besiedelte Pflanzenwurzel. Die eingefärbten Pilzstrukturen – Hyphen (Fäden) und Vesikel (Kugeln) – werden erst unter dem Mikroskop sichtbar (links). Im Gewächshaus vermehrte Sporenpopulationen vom Direktsaatboden (oben rechts) und Pflugboden (unten rechts); letzterer ist deutlich artärmer und einheitlicher.

4.7.1 Artenzahl und Diversität

Insgesamt wurden 39 AM-Pilzarten identifiziert, davon 38 Arten beim Direktsaat- und 25 beim Pflugsystem (Tabelle 4-3). Die Anzahl identifizierter Arten in den verschiedenen Kulturen schwankte bei DS zwischen 15 und 21, bei PF zwischen 10 und 17; der Vergleich der Mittelwerte über alle Kulturen ist signifikant. Bei Wintergerste und Winterweizen zeigten sich tendenziell niedrigere Artenzahlen von AM-Pilzen als in den zwischenbegrünten Parzellen (Gründerdüngungsgemenge, Vorerntesaat).

Neben der Anzahl Arten ist auch deren Häufigkeit bzw. die Sporendichte zur Beschreibung der Diversität wichtig. Auch hier zeigte der Vergleich der Mittelwerte über alle Kulturen eine höhere Diversität bei DS als bei PF ($\bar{\alpha}$ Diversitätsindex $H = 2.49$ bzw. 2.17 , Tabelle 4-3), allerdings mit einer geringen Signifikanz ($p < 0.10$). Die kulturspezifischen Werte lagen bei DS höher als bei PF und sind mit Werten aus früheren Studien in Mitteleuropa für biologischen Anbau oder Graslandstandorte vergleichbar.

Tabelle 4-3: Anzahl identifizierter arbuskulärer Mykorrhiza-Pilzarten sowie Diversitätsindex (H) nach Shannon-Weaver, Dauerbeobachtungsfläche Oberacker

Kultur	Anbausystem	Anzahl AM-Pilzarten		Shannon-Weaver Diversitäts-Index (H)	
		Direktsaat	Pflug	Direktsaat	Pflug
Wintereiweisserbsen		21	17	2.86	2.56
Winterweizen (WW)		17	15	2.46	2.51
Wintergerste (WG)		15	11	2.12	2.05
Gründüngungsgemenge nach WW		17	14	2.56	2.24
Gründüngungsgemenge nach WG		21	12	2.45	1.91
Vorerntesaat in Zuckerrüben		20	10	2.49	1.77
Total aus allen Kulturen		37	25		
Mittelwert über alle Kulturen		18.5 a	13.2 b	2.49 a	2.17 b
P (T-Test)		0.005 ($p < 0.01$)		0.080 ($p < 0.1$)	

4.7.2 Einflussgrößen und Charakterarten

Organischer Kohlenstoff (C_{org}), pH-Wert und mikrobielle Biomasse beeinflussen die Zusammensetzung der AM-Pilzgemeinschaften. Der Einfluss des Anbausystems zeigt sich indirekt über diese Parameter, insbesondere über den höheren Gehalt an organischem Kohlenstoff in der obersten Bodenschicht (0–10 cm) bei DS. Die hier höhere AM-Pilzdiversität kann sich positiv auf die Nährstoffaufnahme der Pflanzen, insbesondere von P, auswirken.

Etwa ein Drittel der identifizierten Arten konnte regelmässig in beiden Anbausystemen nachgewiesen werden. Die Mehrheit der Arten jedoch wurde vornehmlich oder ausschliesslich bei Direktsaat gefunden und ist für eine extensive

Bewirtschaftung, konservierende Bodenbearbeitung oder Graslandstandorte typisch. Lediglich zwei Arten wurden ausschliesslich in den gepflügten Parzellen gefunden. Als Charakterarten können für die langjährig direkt gesäten Parzellen der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker *Septoglo mus constrictum*, für die gepflügten Felder *Funneliformis caledonius* ausgewiesen werden.

Nutzungsart und Bewirtschaftungsintensität haben einen grossen Einfluss auf die AM-Pilzgemeinschaften in Landwirtschaftsböden: Wiesen haben generell eine höhere Vielfalt als Äcker, extensive Bewirtschaftung erhöht die Artenzahl, intensive reduziert sie. Mit dem Pflugverzicht konnten sich in den Direktsaatparzellen ein höherer Artenreichtum und eine höhere Diversität von AM-Pilzen ausbilden. Mehrere Arten sind charakteristisch für den pfluglosen Anbau und manche typisch für Wiesenstandorte.

Ein funktionierendes Direktsaatsystem ist auf einen fruchtbaren, belebten Boden angewiesen (Kasten 4-3). Die Förderung spezifischer Mykorrhizapilzgemeinschaften könnte einen wesentlichen Beitrag leisten für wasser- und nährstoffeffiziente Anbausysteme.

Kasten 4-3: NFP68-Projekte Mykorrhiza und Nematoden

Das Projekt *Mykorrhiza* soll aufzeigen, welche Bedeutung eine hohe Mykorrhiza-Vielfalt in Agrarökosystemen spielt und klären helfen, ob es sich lohnt, diese gezielt anzuregen, um Pflanzenproduktivität, Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit in Schweizer Bodensystemen zu steigern. Das Projekt *Nematoden* analysiert eine Vielzahl von Bodenorganismen unter Feldbedingungen. Es soll aufzeigen, inwieweit sich Bodenqualität und Ertrag durch den Einsatz von entomopathogenen Nematoden verbessern lassen.

4.8 Schlussfolgerungen

Die fehlende Oberbodendurchmischung bei direkt gesäten Böden führt zu einer veränderten Nährstoffverteilung. Die unterschiedliche Bodenstruktur wirkt sich auch auf den Ertrag aus: Langjährig direkt gesäte Leguminosen und Getreide weisen signifikant höhere Erträge auf, demgegenüber sind Wurzel- und Knollenfrüchte in gepflügten Böden tendenziell bzw. signifikant im Vorteil. Über alle Kulturen gerechnet ist Direktsaat im Vergleich zu Pflug dank

Ertragssteigerung und vermehrten Abgeltungen wirtschaftlich und leistet einen wichtigen Beitrag zum Erosionsschutz.

Gepflügte Oberböden sind grundsätzlich überlockert: Geringe Lagerungsdichten und hohe Luftdurchlässigkeiten schaffen zwar kurz nach der Saat bessere Keim- und Entwicklungsbedingungen für die Pflanzen, gleichzeitig ist jedoch das Risiko für Unterbodenverdichtun-

gen – insbesondere bei hoher Bodenfeuchte – stark erhöht. Dadurch werden Wasserhaushalt und Bodenaktivität gestört, was zu Ertrags-einbussen führt.

Die *maximal tragbare Radlast* stellt für Vollzug und Beratung eine einfache Kenngrösse zur Wirkungsüberprüfung dar. Lasten >5 t führen insbesondere in nassen Anbaujahren dazu, dass Böden fast nie ohne Risiko für Unterbodenverdichtungen befahren werden können.

In den ersten drei Fruchtfolgeperioden wurde bei Direktsaat mehr Glyphosat appliziert als bei Pflug. Trotzdem weist der Boden bei Direktsaat,

verglichen mit Pflug, eine prozentual geringere Glyphosat-Konzentration auf. Eine Wirkstoffakkumulation in der Schicht 0–5 cm wurde für Glyphosat bei Direktsaat belegt, für AMPA sind keine entsprechenden Tendenzen nachweisbar. In den hitzig geführten Diskussionen um unerwünschte Glyphosatrückstände in der Umwelt geht oft vergessen, dass bei einer korrekten Anwendung von Glyphosat nicht mit Rückständen im Erntegut zu rechnen ist. Trotz höheren Glyphosatanwendungen bei Direktsaat konnten weder bei den Regenwürmern noch bei den Mykorrhiza-Pilzen eine Reduktion von Menge und Artenvielfalt beobachtet werden.

4.9 Laufende Projekte

Im Bereich Bodenphysik dienen die Auswertungen der von 2000–2016 von Agroscope durchgeführten Luftdurchlässigkeits- und Drucksetzungs-Messungen dazu, das Anwendertool *Terranimo* (www.terranimo.ch) zu erweitern und zu verfeinern. Im Vordergrund steht dabei das Abschätzen des Verdichtungsrisikos bei Anbausystemen ohne Bodenbearbeitung, d. h. Dauergrünland und Direktsaat (siehe Kapitel 10; Kas-ten 10-1).

Die N-Versorgung der beiden Anbausysteme DS und PF erfolgt seit 2008 im CULTAN-Verfahren mit flüssigem Ammoniumsulfat (Ausnahme: Zuckerrüben). Dieser Recycling-Dünger wird aus Klärschlamm gewonnen (FUSCH et al. 2013). Im Vergleich zu einer N-Düngung mit Nitrat liefert eine ammoniumbasierte N-Versorgung ertragreichere Pflanzenbestände bei tieferen Klimawirkungen (weniger CO₂- und N₂O-Ausstoss) und höherer N-Effizienz.

Mit der anstehenden Auswertung der seit 2009 regelmässig durchgeführten Nährstoffanalysen (Boden, wachsende Pflanzen, Erntegut) kann eine Nährstoffbilanz berechnet werden, was den heutigen Wissensstand betreffend Düngung eines Ackerbausystems ohne Bodenbearbeitung erweitert. Dies mündet möglicherweise in eine Ergänzung der bisher nur für Dauergrünland und gepflügte Ackerflächen gültigen GRUDAF-Düngungsrichtlinien (ab 2017 GRUD) mit pfluglosen Anbausystemen.

Auf Teilflächen erfolgt die Nährstoffversorgung der Kulturen seit 2010 nach den Regeln des US-amerikanischen Kinsey-Düngekonzepts. Dabei wird auf ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis im Boden geachtet, welches im Sinne einer Optimierung sowohl das Gesetz des Minimums als auch des Maximums berücksichtigt. Die Auswertung der Nährstoffanalysen (Boden, Pflanzensaft, Erntegut) steht ebenfalls an. Anschliessend wird geprüft, ob sich dieses Dün-

gekonzept auch für die Schweizer Landwirtschaft eignet.

Wie viele andere Mittelland-Böden weist auch die Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* eine P-Übersorgung aus. Seit 2010 wird beobachtet, wie lange das heute noch hohe Ertragsniveau ohne P-Düngung aufrechterhalten werden kann. Ist der P-Vorrat im Boden einmal aufgebraucht, erfolgt die P-Düngung autark, d. h. nicht mehr mit importierten Düngemitteln, sondern ausschliesslich mit phosphorhaltigen Recyclingdüngern aus der Klärschlammverwertung.

Heute werden in beiden Anbausystemen die selektiven Herbizide in etwa identischem Um-



Abbildung 4-11: Dieses Gründüngungsgemeinde deckt die Ackeroberfläche im Herbst vollständig ab, so dass im darauffolgenden Frühjahr die Saat direkt in den abgefrorenen und unkrautfreien Boden abgelegt werden kann.

fang eingesetzt. Mit der seit 2010 erfolgten Aussaat von Gründüngungsgemengen mit mindestens acht verschiedenen Arten werden die Eigenschaften verschiedenster Pflanzen kombiniert. Die Auswahlkriterien waren rasches Auflaufen und vollständige Bodenbedeckung, hoher Wuchs, Fixieren von Stickstoff, tiefes und lockerndes Bewurzeln des Bodens (Pfahlwur-

zeln), Bildung von Symbiosen mit Mykorrhizapilzen sowie Abfrieren im Winter (Abbildung 4-11). Mit solchen Gemengen konnte der Einsatz von Glyphosat bei DS seit dem Anbaujahr 2014 auf null gesenkt werden (Ausnahme: gezielter Einsatz am Parzellenrand zur Unterbindung des vom Grünlandstreifen hineinwachsenden Beikrauts.)

4.10 Ausblick

Im Hinblick auf Massnahmen des *Aktionsplans Pflanzenschutzmittel* (PSM) des Bundes (Kasten 4-4), zu dem der Regierungsrat des Kantons Bern Ende Oktober 2016 Stellung genommen hat, soll der PSM-Einsatz in beiden Anbausystemen weiter reduziert werden (BLW, in Vorbereitung). Mit Hilfe von Gründüngungs-

gemengen, molekularbiologischen Diversitätsanalysen und dem in beiden Anbausystemen identisch umgesetzten Vergleich der Düngekonzepte Kinsey vs. GRUDAF wird untersucht, inwiefern mit Biodiversität (Gründüngung, Bodenleben, weite Fruchtfolge) und ausgewogener Nährstoffversorgung die Pflanzengesundheit gefördert und gleichzeitig der Beikrautdruck auf tiefem Niveau gehalten werden kann. Ziel wird sein, auf der Basis von N- und P-haltigen Recyclingdüngemitteln und konservierenden Anbausystemen ein ökologisches Low-Input-Ackerbausystem zu entwickeln; in erster Priorität ohne Glyphosat, Insektiziden und Fungiziden und in zweiter Priorität ganz ohne PSM (allenfalls mit «Elektroherbizid», Abbildung 4-12). Ein solches Low-Input-Ackerbausystem soll mit geringen Kosten und hohen Erträgen auch den ökonomischen Ansprüchen genügen und gegebenenfalls als Produktionssystem über die Direktzahlungen des Bundes gefördert werden können. Es wird noch ein geeigneter Partner aus dem Umfeld des biologischen Landbaus gesucht, um das Pflugsystem in Richtung BIO-Landbau mit konservierender Bodenbearbeitung weiterzuentwickeln.

Kasten 4-4: Aktionsplan Pflanzenschutzmittel

«Der Bundesrat hat das Eidgenössische Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung (WBF) beauftragt, in Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Departement des Innern (EDI) und dem Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) einen Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu erarbeiten. Der Aktionsplan soll messbare Ziele vorgeben, konkrete Massnahmen festlegen und Indikatoren zur Überprüfung der Zielerreichung definieren. Dabei sind die drei Ziele *Schutz der Kulturen*, *Schutz des Menschen* und *Schutz der Umwelt* zu berücksichtigen. Die Auseinandersetzung mit Zielkonflikten ist bei der Erarbeitung von tragfähigen Lösungen unumgänglich. Deshalb soll die Ausarbeitung des Aktionsplans iterativ erfolgen. Zuerst sollen Themen mit grossem Handlungsbedarf und grosser Wirkung angegangen werden».



Abbildung 4-12: Eine neue Technologie aus Brasilien, basierend auf Elektrizität, soll in Zukunft die Unkrautbekämpfung mit Herbizidverzicht – namentlich ohne Glyphosat – ermöglichen.

5 Erosionsschutz in der Region Frienisberg – eine Erfolgsgeschichte



Zuckerrüben durchwurzeln die an den Standort verfrachtete Braunerde bis auf einen Meter Tiefe.

5 Erosionsschutz in der Region Frienisberg – eine Erfolgsgeschichte

Die strukturellen Entwicklungen in der Landwirtschaft führten zu tiefgreifenden Änderungen in der Bewirtschaftung der Böden. Im Ackerbau wird die Boden-erosion zunehmend ein Problem. Seit dem 1. Januar 2017 ist der Erosionsvollzug in der *Direktzahlungsverordnung (DZV)* neu geregelt. Der Kanton Bern baut in erster Linie auf die Eigenverantwortung der Bewirtschafter. Dabei wird auf das seit über 20 Jahren aufgebaute Vertrauensverhältnis in der Erosionsprävention, insbesondere mit Boden schonenden Anbausystemen, gesetzt.

Das langjährige Monitoring zur Erosionsschadenskartierung bestätigt die positive Wirkung von präventiven Massnahmen: Boden schonende Anbausysteme, geeignete Fruchtfolgen und ein verantwortungsvoller Umgang mit der Ressource Boden beugen Erosionsereignissen vor.

Erosion ist der teilweise Abtrag der Oberbodenschicht durch Wasser oder Wind. Eine intensive landwirtschaftliche Bodennutzung, verbunden

mit dem systematischen Entfernen natürlicher Schranken wie Bäume, Hecken und Bodenunebenheiten, beschleunigt diesen Vorgang.

Kasten 5-1: NFP68-Projekt Bodenstabilität

Das Projekt *Bodenstabilität* untersucht den Einfluss von Pflanzen und Pilzen auf die Bodenstabilität. Es werden Indikatoren entwickelt, die auf drohende Erosion und Rutschungen hinweisen.

Auf ungeschützten, schlecht strukturierten Böden, insbesondere in Hanglagen, fliesst das Niederschlagswasser oberflächlich ab und schwemmt Feinerde, Pflanzennährstoffe und Pflanzenschutzmittel in die Gewässer (Kasten 5-1).

5.1 Grundlagen des Erosionsvollzugs

Gemäss Umweltrecht (USG, VBBo) sind Bewirtschafter verpflichtet, zur langfristigen Erhaltung gesunder Böden Verdichtung und Erosion zu vermeiden (LwG, DZV). Für den Vollzug dieser Vorgabe sind die Kantone zuständig. Die Hilfsmittel zur Umsetzung sind die Vollzugshilfe *Bodenschutz in der Landwirtschaft*, die *Erosionsrisikokarte* (ERK2, Abbildung 5-3A), die *Ressourceneffizienzbeiträge* (REB) der *Agrarpolitik* (AP 2014–2017) und der *Massnahmenplan Erosion* von AGRIDEA, eine Anleitung zum Erosionsvollzug.

Die Vollzugshilfe *Bodenschutz in der Landwirtschaft* erläutert und konkretisiert die gesetzlichen Grundlagen im Bereich Erosion und strebt einen schweizweit koordinierten und einheitlichen Vollzug an (BLW und BAFU 2013). Im Fokus steht die Überwachungspflicht der Kantone bezüglich Erosion auf Ackerflächen und Wei-

den. Dabei wird zwischen witterungs-, infrastruktur- und bewirtschaftungsbedingter Erosion unterschieden.

Die vom BLW publizierte ERK2 (geo.admin.ch 2017a, Abbildung 5-3A) bildet das potentielle Erosionsrisiko der landwirtschaftlich genutzten Flächen der Schweiz ab (PRASUHN et al. 2014). Aufgrund von Niederschlagsmenge, Bodenverhältnissen, Gebietsgrösse und Hangneigung werden mit einem Ampelsystem die potentielle Erosionsgefährdung und davon abgeleitet das Abschwemmrisko in Gewässer dargestellt. Die ERK2 ist damit ein wichtiges Hilfsmittel sowohl bei der Erosionsprävention für die Sensibilisierung der Landwirte als auch bei der Überwachung der Erosion.

In Risikogebieten können die Beiträge der im Rahmen der AP 2014–2017 neu geschaffenen

REB *Schonende Bodenbearbeitung* geltend gemacht werden. Diese Förderbeiträge schaffen einen wirtschaftlichen Anreiz, um auf frei-

williger Basis das Risiko von bewirtschaftungsbedingter Erosion mittels Mulch-, Streifen- und Direktsaaten markant reduzieren zu können.

5.2 Langjährige Erosionsschadenskartierungen

Seit Oktober 1997 wird von Agroscope in der Region Frienisberg im Kanton Bern ein Langzeitmonitoring zur Bodenerosion auf Ackerflächen durchgeführt. In den fünf Teilgebieten Lobsigen, Seedorf, Suberg, Frienisberg und Schwanden werden auf insgesamt 203 Ackerparzellen mit 265 ha Fläche regelmässig Erosionsschadenskartierungen durchgeführt. Damit liegen insgesamt 97 einheitlich erhobene, flächendeckende Kartierungen vor. Diese stellen einen in der Schweiz und Europa einzigartigen homogenen Datensatz zur Entwicklung der Bodenerosion dar.

Bei linearen Erosionsformen (Rillen und Rinnen) werden mittlere Tiefe und Breite sowie Länge der Erosionsform gemessen und kartiert. Daraus wird das Abtragsvolumen ermittelt. Bei flächenhafter Erosion werden das Ausmass (schwach, mittel, stark) und der betroffene Flächenanteil visuell erfasst. Anhand früherer Messdaten zur flächenhaften Erosion wird anschliessend der Bodenabtrag abgeschätzt. Zur Ursachenanalyse und Interpretation der Daten werden zusätzlich zahlreiche weitere Parameter erfasst: Kulturen und Bodenbearbeitungsverfahren; Ort und Ausmass der Akkumulation; Übertritte (Off-Site-Effekte) in Gewässer, andere Ackerflächen, Strassen oder Feldwege; mögliche Ursachen bzw. Auslöser wie

Fremdwasserzufluss, Fahrspuren, Ackerrandfurchen, Geländemulden etc. Sämtliche Daten sind in einer Datenbank mit inzwischen 2237 Einträgen abgelegt. Alle Kartierungen wurden digitalisiert und liegen als Karten vor.

Bodenerosion ist ein zeitlich sehr variabler Prozess. Das Zusammenspiel erosionsrelevanter Faktoren wie Niederschlagsmenge, Boden (Bodenart, -bedeckung, -struktur, -feuchte etc.), Bewirtschaftung und Topografie bestimmen das Ausmass des Bodenabtrags in einem Gebiet massgeblich. Entsprechend gibt es grosse jährliche Schwankungen (Abbildung 5-1). Um zu repräsentativen Aussagen zu gelangen und mögliche Trends aufzuzeigen, sind langjährige Messungen notwendig. Im vorliegenden Projekt sollen deshalb zwei 10-Jahresperioden miteinander verglichen werden. Die Daten der ersten zehn Jahre (Oktober 1997 bis September 2007, Periode 1) wurden vertieft ausgewertet und deren Ergebnisse publiziert (PRASUHN 2012). Die zweite Periode wird im September 2017 abgeschlossen sein. Die Daten ab Oktober 2007 sind daher noch nicht detailliert analysiert. Entsprechend beziehen sich die nachfolgenden Resultate überwiegend auf die erste Periode.

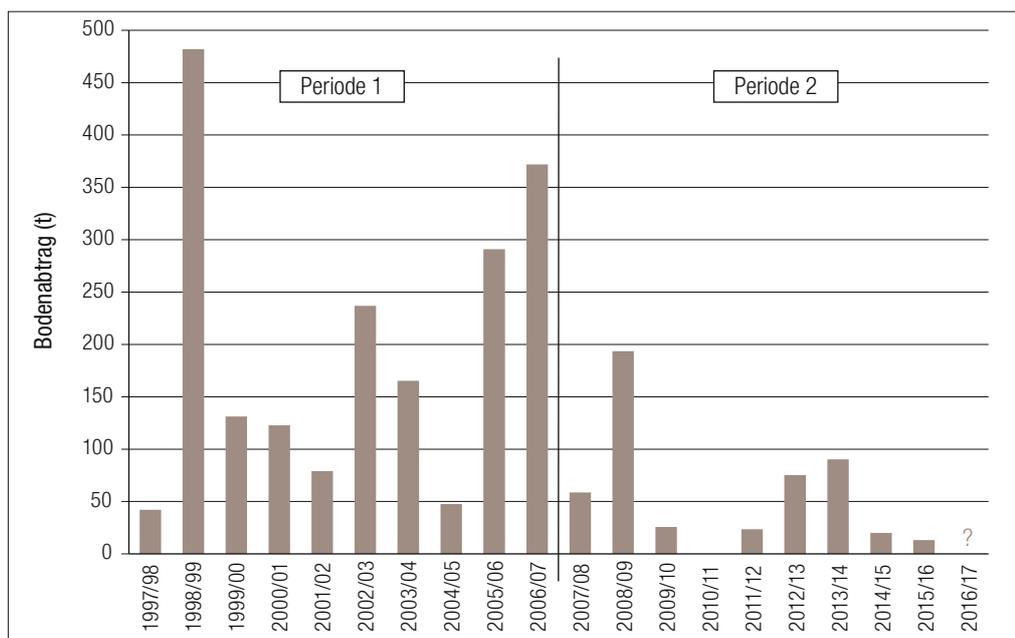


Abbildung 5-1: Aufsummierter Bodenabtrag pro Anbaujahr von 1997/98 bis 2015/16 im Gesamtgebiet Frienisberg (BE)

5.3 Bodenabtragsraten in Abhängigkeit von Bewirtschaftung und Kultur

Das Gleichgewicht zwischen natürlicher Erosion und Bodenreuebildung wird in der gesetzlichen Regelung der VBBo bei 2 bzw. 4 t ha⁻¹ und Jahr festgelegt (Boden-Mächtigkeit ≤ 70 cm bzw. > 70 cm). Der mittlere Bodenabtrag aller Parzellen – inklusive Parzellen ohne Erosion – betrug in der ersten Periode 0.75 t ha⁻¹ und Jahr. Der maximale Bodenabtrag einer einzelnen Parzelle bei einem Ereignis lag bei 96 t ha⁻¹. Insgesamt 14 Parzellen (= 7 % aller Parzellen) überschritten die Richtwerte der VBBo von 2 bzw. 4 t ha⁻¹ und Jahr im langjährigen Mittel.

88 % aller Fälle von Bodenabtrag stammten von Parzellen mit dem Bodenbearbeitungsverfahren Pflug (PF). Der mittlere Bodenabtrag lag hier bei 1.24 t ha⁻¹ und Jahr, wogegen auf Parzellen mit konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren (Direktsaat, Streifenfrässaat, Mulchsaat mit >30 % Mulchbedeckung) lediglich 0.1 t ha⁻¹ und

Jahr erodierten. Mit konservierender Bodenbearbeitung lässt sich demnach der Bodenabtrag um mehr als einen Faktor 10 reduzieren.

Den höchsten kulturspezifischen Bodenabtrag mit 2.87 t ha⁻¹ und Jahr verzeichneten Kartoffelfelder; sie wurden am häufigsten von Erosion betroffen. Auch Felder mit Brachen (Stoppel- oder Schwarzbrache) hatten hohe mittlere Bodenabtragsraten. Bei Mais und Zuckerrüben waren diese vergleichsweise niedrig. Beide Kulturen wurden im Untersuchungsgebiet häufig mit konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren angebaut.

Vorgewende, Fahrspuren und Ackerrandfurchen waren oft Auslöser von Bodenerosion. Talwege in Geländemulden führten zu den grössten Abtragsraten und Off-Site-Schäden.

5.4 Deutliche Abnahme der Bodenerosion in den letzten Jahren

Der mittlere Bodenabtrag im Gesamtgebiet lag über die ersten zehn Jahre bei knapp 200 t pro Jahr, über die folgenden neun Jahre bei lediglich 56 t pro Jahr (Tabelle 5-1). Zwischen den beiden Perioden zeigt sich somit eine markante Abnahme um mehr als zwei Drittel. Die Anzahl grosser Erosionsschäden hat deutlich abgenommen, obwohl es auch in der zweiten Pe-

Tabelle 5-1: Durchschnittlicher Bodenabtrag pro Anbaujahr der Perioden 1 und 2 im Gesamtgebiet Frienisberg (BE)

Periode	Abtrag (t Feinerde pro Anbaujahr)
1	Ø 196.9
2	Ø 55.6



Abbildung 5-2: Flächenhaft-lineare Erosion und Akkumulation in Wintergetreide (10. Januar 2008, links); Wassereintritt in Kartoffeln (16. Mai 2015, rechts)

riode auf einzelnen Parzellen zu gravierenden Schäden kam (z. B. 59 t ha⁻¹ bei Triticale im Winter 2008/09 oder 12 t ha⁻¹ im Mai 2015 bei Kartoffeln; siehe Abbildung 5-2).

Die Ursachen für diese Abnahme in der zweiten Periode sind noch nicht analysiert. Folgende Erklärungen sind denkbar: Im Laufe der 19 Jahre führten Betriebsleiterwechsel zu Änderungen bei Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsverfahren – zwei der wichtigsten erosionsrelevanten Faktoren. So wurde z. B. der Kartoffelanbau auf mehreren stark erosionsgefährdeten Flächen, auf denen es immer wieder zu grossen Erosionsschäden gekommen ist, nach einem Betriebsleiterwechsel vor einigen Jahren aufgegeben; allerdings werden neu Gemüsekulturen angebaut, die als erosionsanfällig gelten (Karotten, Zwiebeln, Randen). Beim Faktor Bodenbearbeitung stieg vermutlich der Anteil an konservierenden Verfahren seit 2007 weiter an; wobei dieser bereits in der ersten Periode stark zugenommen hatte und sich schon 2007 mit rund 50 % (Hauptkulturen mit pfluglosem Anbau) auf einem hohen Niveau befand. Weitere Massnahmen zur Bodenstrukturverbesserung, wie das Aufkalken und der Austrag von organischem Material, könnten

geholfen haben, das Erosionsrisiko weiter zu vermindern. Die Sensibilisierung der Bewirtschafter durch einen in der Landwirtschaft praktizierenden Mitarbeiter der Fachstelle Bodenschutz sowie einen innovativen Lohnunternehmer im Gebiet dürfte einen wesentlichen Einfluss gehabt haben. Auch die zahlreichen wissenschaftlichen Aktivitäten (permanente Erosionskartierungen durch Agroscope, regelmässige Untersuchungen sowie Befragungen der Bewirtschaftenden durch das Geographische Institut der Universität Bern) dürften dazu geführt haben, dass die Landwirte im Untersuchungsgebiet sorgfältiger mit dem Boden umgehen. Dies bedeutet aber zugleich, dass die für die Erosionsgebiete der Region Frienisberg aufgezeigte Entwicklung nicht *per se* auf die ganze Schweiz übertragen werden darf. Die Resultate zeigen jedoch, dass ein massiver Rückgang der Bodenerosion möglich ist – auch unter realen Praxisbedingungen; bewirtschaften doch die rund 50 Landwirte, die mindestens eine Parzelle im Untersuchungsgebiet haben, ihre Parzellen nach ihren Vorstellungen, Kenntnissen und Möglichkeiten. Es befinden sich keine Versuchspartellen im Gebiet, und es wurde keine spezielle Erosionsberatung durchgeführt.

5.5 Schlussfolgerungen

Bodenerosion ist wegen des Verlusts von Feinerde und Nährstoffen sowie der Abschwemmung von Schadstoffen nicht nur ein ökologisches Problem, sondern führt auch zu ökonomischen Nachteilen, wie verminderten Erträgen und Folgekosten für Nachbarschaft und Allgemeinheit. Langjährige Erosionsschadenskartierungen erlauben es, verlässliche Aussagen über Entwicklungen, Trends und Handlungsempfehlungen zu formulieren.

Der Einsatz der neu geschaffenen Ressourceneffizienzbeiträge (REB) *Schonende Bodenbearbeitung*, eine auf Bodenart und Hangneigung abgestimmte Fruchtfolge sowie ein strukturfördernder Umgang mit dem Boden führen zu weniger und deutlich geringeren Erosionserscheinungen.

Befinden sich Erosions- und Akkumulationsbereich bei einem Ereignis auf derselben Parzelle, spricht man von On site-Erosion. Leidtragender bleibt der Landwirt. Wird hingegen das Bodenmaterial über die Parzellengrenze hinaus verlagert, entstehen Off site-Schäden mit weiteren entsprechend hohen Kosten. LEDERMANN (2012) berechnete für die Schweiz Gesamtkosten von CHF 50 Mio. pro Jahr, wobei die Kosten ausserhalb der Parzelle zwei bis vier Mal höher sind als diejenigen auf der geschädigten Parzelle (Kasten 5-2). Neben den Kosten besteht auch ein hohes Risiko, dass erodier-

tes Bodenmaterial in die Gewässer transportiert wird und diese mit Schadstoffen belastet. Die Gewässeranschlusskarte (ALDER et al. 2013) zeigt auf, wo dieses Risiko besteht und wie hoch es ist (Abbildung 5-3). Damit ist die Karte eine weitere wichtige Grundlage für gezielte Massnahmen.

Kasten 5-2: Off site-Schäden: Zitat einer durch Bodenerosion geschädigten Privatperson

«Die Geduld ist am Ende. Jetzt gibt es zwei Fronten: Der Landwirt fühlt sich da ganz alleine gelassen und ist nur noch in der Verteidigungsstellung. Und nachher hat es die Dorfbevölkerung, Landwirte und Nicht-Landwirte; Betroffene, welche langsam genug haben. Wir probieren schon das Möglichste. Ich denke, so lange es uns gut geht, spielt es auch nicht so eine Rolle. Ich denke aber, wenn nachher die Gebäudeversicherung wirklich einfach sagt, jetzt haben wir vier- bis fünfmal bezahlt, jetzt ist fertig – ich denke, dann werden sich bei uns die Fronten auch verhärten.»

(LEDERMANN et al. 2010)

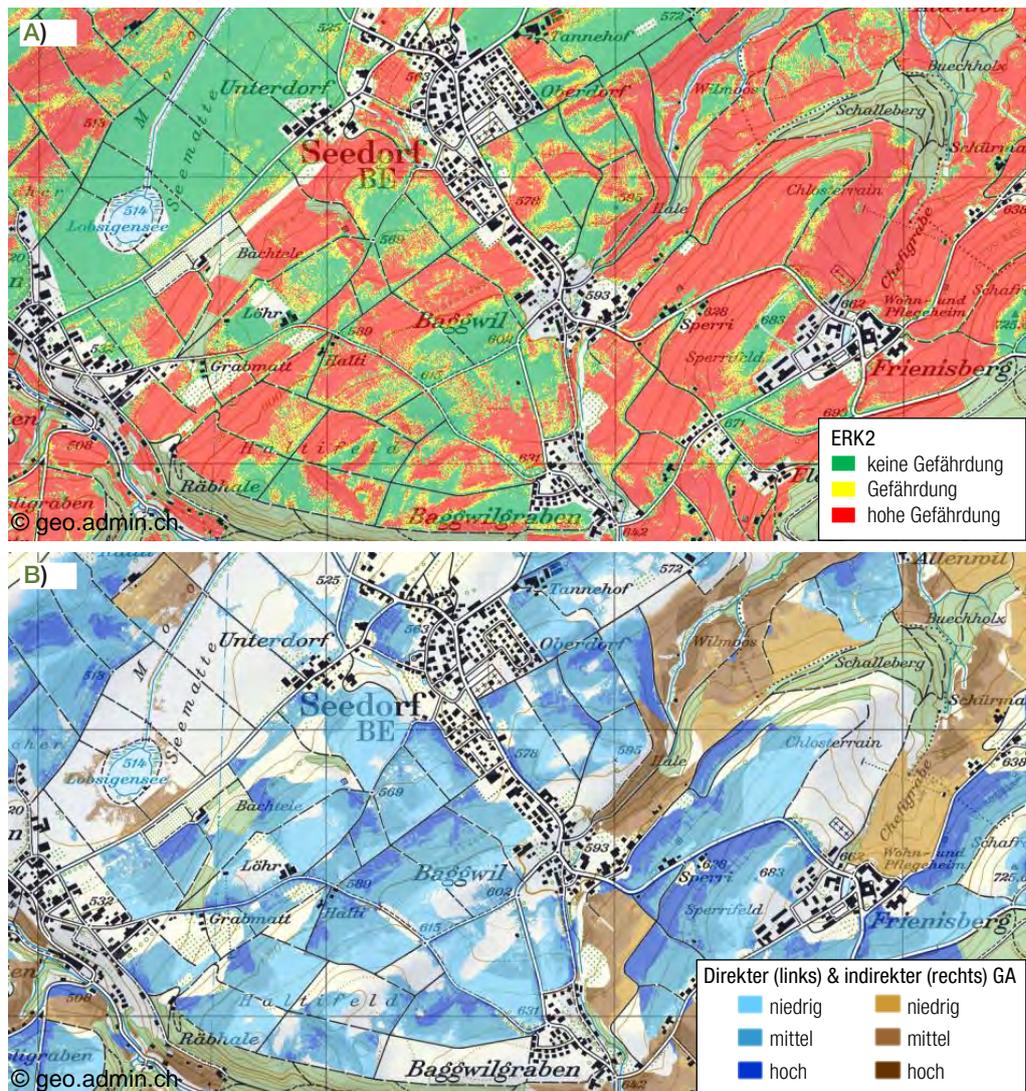


Abbildung 5-3: Ausschnitt Friesenberg (BE) aus der Erosionsrisikokarte ERK2 (A) bzw. Gewässeranschlusskarte GAK (B) (geo.admin.ch 2017b)

5.6 Ausblick

Seit dem 1. Januar 2017 hat der Bund den Erosionsvollzug neu geregelt. Setzt der Landwirt nach einem bewirtschaftungsbedingten Erosionsereignis geeignete Massnahmen um, werden die Direktzahlungen weiter ausbezahlt. Andernfalls drohen ihm Direktzahlungskürzungen.

Der Kanton Bern setzt in erster Linie auf die Eigenverantwortung der Bewirtschaftenden und nutzt damit das seit über 20 Jahren aufgebaute Vertrauensverhältnis in der aktiven Erosionsprävention. Die ERK2, die REB und der *Massnahmenplan Erosion* von AGRIDEA sind dabei die massgebenden Hilfsmittel. Erosionsereignisse müssen der Fachstelle Bodenschutz als Selbstdeklaration gemeldet werden, damit man die Ursachen abklären und standortsangepasste Vorbeugemassnahmen ergreifen kann (Anhang 1). Dadurch soll einerseits der Vollzugsaufwand optimiert werden; andererseits besteht so die Möglichkeit, die knappen

personellen und finanziellen Ressourcen für die voraussichtlich wenigen Uneinsichtigen einsetzen zu können.

Neben dem faktischen Erosionsvollzug werden laufend neue Instrumente entwickelt und geprüft, um Erosion zu messen und zu quantifizieren. Bei unbedeckten Bodenflächen ist es in absehbarer Zeit möglich, auf der Basis von Luftbildaufnahmen mittels Drohnen den Bodenabtrag exakt zu berechnen.

6 Bodeninformation



Karotten in entwässertem, anmoorigem Torfboden

6 Bodeninformation

Der Bedarf an Bodendaten ist weiter steigend, sei dies in der Raumplanung, Bau-, Land- oder Forstwirtschaft sowie beim Gewässer-, Gefahren- oder Naturschutz. Schweizweit wurden und werden nach einheitlichen Erhebungsregeln Bodendaten erfasst, in der Nationalen Bodendatenbank (NABODAT) zentral abgelegt und verwaltet. Bestehende Bodenkarten sind inzwischen digitalisiert und im Geoportal des Kantons Bern öffentlich zugänglich gemacht worden.

Die Schaffung zusätzlicher Bodeninformation erzeugt einen breiten Nutzen und ist von allgemeinem Interesse. In den kommenden Jahren werden deshalb in bodenrelevanten Projekten, insbesondere in den Bereichen *Fruchtfolgeflächen*, *Hinweiskarte Boden* sowie *Aufwertungen entwässerter Torfböden*, weitere Bodendaten erhoben. Um Kosten zu sparen und schneller zu den Grundlagendaten zu gelangen, soll die klassische Kartierung mit digitalen Bodendaten-Modellierungen (*Digital Soil Mapping*) verknüpft werden.

20 Jahre nach Aufhebung des landwirtschaftlichen Bodenkartierdienstes des Bundes an der Agroscope in Zürich ist das Bedürfnis nach Koordination und Einheitlichkeit beim Umgang mit Bodeninformation gross. In einem noch aufzubauenden nationalen Kompetenzzentrum sollen u. a. Standards zur Erfassung und Klassifizierung von Bodendaten festgelegt, Methoden für die Bewertung der Bodeneigenschaften erarbeitet, Bodendaten harmonisiert sowie die Kantone bei der Bodenkartierung unterstützt werden.

Flächendeckend nutzbare Bodeninformation ist die Grundlage für sachlich-fundierte Entscheide und ermöglicht eine präzisere Beantwortung von Fragen zu Raumentwicklung, Klimawandel, Gefahrenschutz und Ernährungssicherheit sowie vielen anderen Politikbereichen. Sie fördert den haushälterischen Umgang mit der Ressource Boden auch für zukünftige Generationen.

Fruchtbare Böden sind unsere Lebensgrundlage. Durch bauliche Tätigkeiten gehen nach wie vor grosse Flächen dieser endlichen Ressource für immer verloren. Meist sind die landwirtschaftlich produktivsten Böden im Flachland davon betroffen. Dies schränkt unsere Versorgung mit einheimischen Nahrungs- und Futtermitteln sowie mit Trinkwasser ein und ver-

schärft die Hochwasserproblematik. Detaillierte Kenntnisse über Eigenschaften und Qualität der Böden sind eine Voraussetzung, um die Versiegelung der besten Böden zu vermindern. Im Kanton Bern fehlt eine flächendeckende Bodenkarte, punktuell wird Bodeninformation projektbezogen erarbeitet.

6.1 Erarbeiten von Bodeninformation

Bodeninformation wird durch grossflächiges Erfassen der Bodentypen, des Wasserhaushalts und anderer wichtiger Boden-

kennwerte erarbeitet. Einerseits werden mit Hilfe von Handbohrungen Flächen mit ähnlicher Qualität und vergleichbaren Eigenschaf-

ten abgegrenzt und als Polygone mit dazugehörigem Datensatz auf einer digitalisierten Karte eingezeichnet (= Flächendaten). Andererseits werden an repräsentativen Standorten Bodenprofile geöffnet, um die verschiedenen Bodenhorizonte detailliert zu erfassen. Diese Beschriebe (= Punktdaten) werden auf einem Profilblatt festgehalten und können heute in Datenbanken gespeichert bzw. abgerufen werden. Sie dienen bei der Feldarbeit als Referenzgrößen.

Solchermassen erarbeitete Bodeninformation liefert die notwendigen Kenntnisse und hilft, die oftmals konkurrierenden Schutz- und Nutzungsansprüche gegeneinander abzuwägen. Um derart ausgewogene Entscheidungen zu treffen, um z. B. die Hochwassergefährdung an einem Standort abschätzen zu können, die land- und forstwirtschaftlichen Erträge zu optimieren oder notwendige Anpassungsstrategien an den Klimawandel ausarbeiten zu können, braucht es adäquate Bodeninformation

Kasten 6-1: Vision der nationalen Bodenstrategie Schweiz (BAFU 2016b)

Die Funktionen des Bodens sind langfristig zu erhalten, damit auch zukünftige Generationen die endliche, nicht erneuerbare Ressource Boden für ihre Bedürfnisse nutzen können. Daraus lassen sich folgende übergeordnete Ziele ableiten:

- ◆ **weniger Boden verbrauchen**
- ◆ **Bodenverbrauch und -nutzungen basierend auf Bodeninformation lenken**
- ◆ **Boden vor schädlichen Belastungen schützen**
- ◆ **degradierte Böden wiederherstellen**
- ◆ **den internationalen Bodenschutz stärken**
- ◆ **die Wahrnehmung von Wert und Empfindlichkeit des Bodens verbessern**

(Kasten 6-1). Diese gewährleistet eine nachhaltige Raumnutzung.

Im Gegensatz zu anderen Kantonen verfügt der Kanton Bern über keine flächendeckende Bodenkarte (VOL 2009; VOL 2003). Mit der Verankerung des Bodenschutzes in der Umweltschutzgesetzgebung und mit diversen Re-

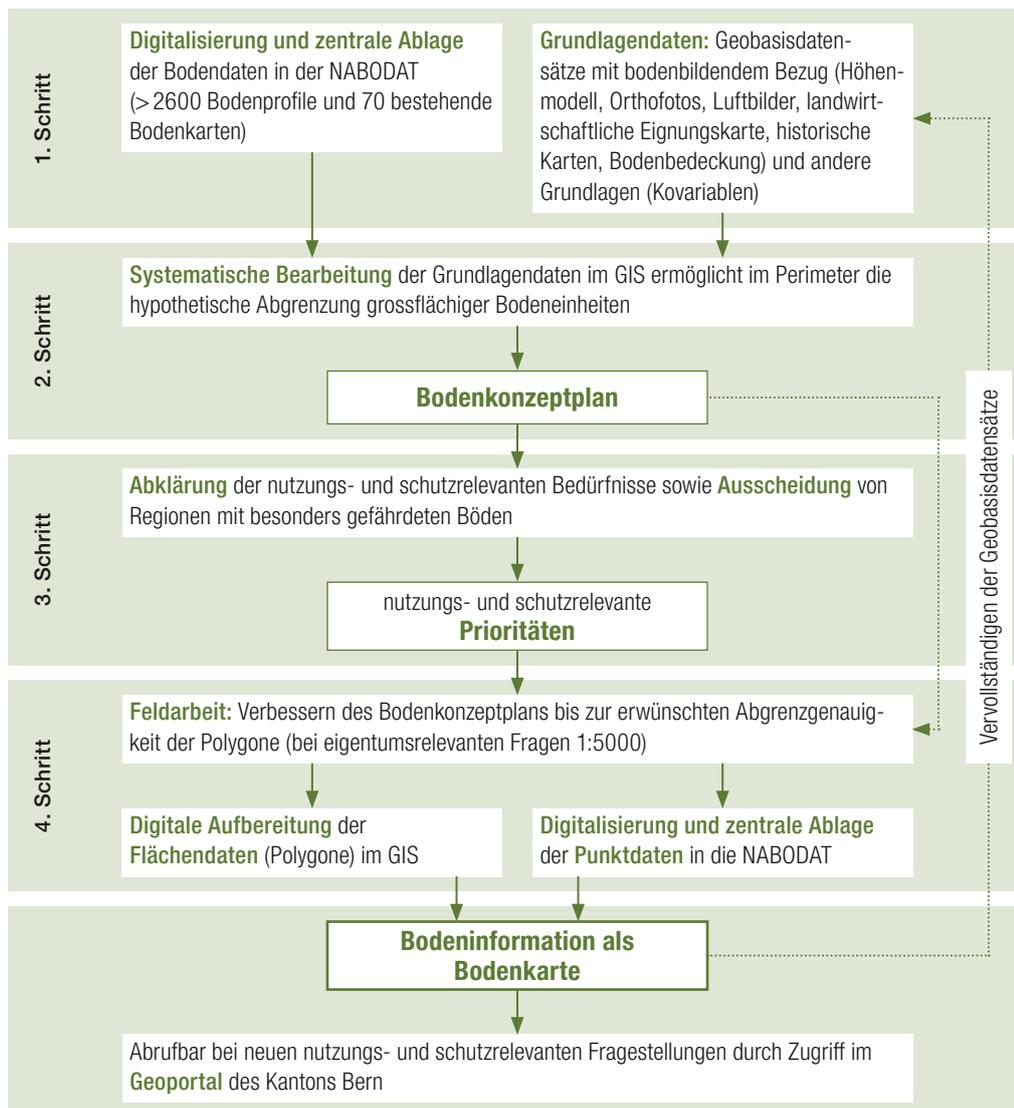


Abbildung 6-1: Konzept zur schrittweisen Erarbeitung von Bodeninformation im Kanton Bern (VOL 2009, modifiziert)

visionen des Raumplanungsgesetzes ist der Bedarf an Bodeninformation gestiegen, denn nur was man kennt, kann man schützen und nachhaltig nutzen. Daher bestehen schon seit längerer Zeit intensive Bestrebungen, solche Bodendaten von allen Kulturland- und Schutz-

waldböden zu erfassen. Im letzten Bodenbericht (VOL 2009) wurde ein Konzept zu ihrer Beschaffung vorgestellt (Abbildung 6-1). Seither wurde es weiterentwickelt und analog vorhandene Bodeninformation digital aufgearbeitet.

6.2 Einheitliche Grundlagen

Die Bodenkartierung – d. h. die Beschaffung von Bodeninformation – ist seit den 1990er Jahren Aufgabe der Kantone. Die Erarbeitung einheitlicher Grundlagen sowie die Koordination über das weitere Vorgehen erfolgen jedoch in enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS).

Mit der dritten, korrigierten Auflage des Standardwerks *Klassifikation der Böden der Schweiz* (KLABS) wird sichergestellt, dass schweizweit die Böden nach ein und derselben Methode beschrieben und klassifiziert werden (BGS 2010). BAFU, Agroscope und die BGS stellen gegenwärtig den Bedarf an aktualisierten und ergänzten KLABS und Kartieranleitungen für Landwirtschafts- (FAL 1997) und Waldböden (BUWAL 1996) zusammen. Beide Grundlagen sollen für entwässerte Torfböden und alpine Böden weiterentwickelt werden.

Kasten 6-2: NFP68-Projekte Bodenkarten und Entscheidungsplattform

In drei Testgebieten der Kantone Zürich und Bern wurden Punktdaten aus früheren Bodenkartierungen (siehe Kapitel 6.3 und 6.4) und ein breites Set an räumlichen Daten wie Klimadaten, geologische Karten, hochauflösende Fernerkundungsdaten aus hyperspektralen Bildern (DIEK et al. 2016) und LiDAR-Höhendaten (light detection and ranging) herangezogen. Entsprechend dem ersten Schritt von Abbildung 6-1 wurden über 400 solcher Kovariablen zusammengestellt und für die Modellierung von Flächendaten genutzt. Mit statistischen Methoden werden anschliessend Bodeneigenschaften für die Flächen vorhergesagt, so dass an jedem Punkt sowohl ein berechneter Schätzwert als auch dessen Unsicherheit abgerufen werden kann. Mit diesem Vorgehen lassen sich hochauflösende Karten für Körnung, pH-Wert und andere Bodeneigenschaften herstellen (NUSSBAUM et al. 2017). Aus diesen Karten werden Bodenfunktionen abgeleitet (GREINER et al. 2016). Vereinfachte Bewertungsmethoden für Bodenfunktionen wurden erstmals von den geologischen Landesämtern in Deutschland entwickelt und als Karten in einem Katalog der Ad-hoc-AG Boden (2007) veröffentlicht. Sie werden in Deutschland sowie Österreich in der Raumplanung eingesetzt (GREINER et al. 2014, GERBER 2014). Bodenfunktionen nehmen eine zentrale Stellung im Entwurf der nationalen Bodenstrategie Schweiz ein (Kasten 6-1).

Im NFP-Projekt *Entscheidungsplattform* wird aufgezeigt, inwiefern der Raumplanung die Bodenqualität mit Hilfe dieser Bodenfunktionskarten in ihrer dritten Dimension – der Tiefe – vermittelt werden kann.

Darüber hinaus werden im Rahmen des *Nationalen Forschungsprogramms NFP68* von Forschern der ETH und Uni Zürich neue Techniken zur Schätzung von flächenhaften Bodeneigenschaften (*Digital Soil Mapping*) getestet (Kasten 6-2). Inwiefern zukünftig diese Werkzeuge die klassische Bodenkartierung unterstützen können, muss sich noch weisen.

6.3 Zentrale Ablage

Das BAFU stellt mit dem GIS-verknüpften und Web-basierten Bodeninformationssystem Nationale Bodendatenbank (NABODAT) ein Gefäss zur Verfügung, mit dem digitalisierte Punkt- und Flächendaten, die Daten zukünftiger Kartierungen und diejenigen der Bodendauerbeobachtung schweizweit einheitlich verwaltet werden können (Kasten 6-3; NABODAT 2014, BAFU 2013). Bundes- und kantonale Ämter benutzen NABODAT in einer Verbundlösung; der Kanton Bern trat diesem Verbund 2013 bei, seit Januar 2017 sind es 16 Kantone. Durch diesen Beitritt wurden viele definierte Standards

übernommen. Der Unterhalt der Berner Bodendaten wird für die Fachstelle Bodenschutz in Zukunft vereinfacht, ohne dass zusätzliche Kosten entstehen. Die Datenhoheit bleibt beim Kanton Bern.

Kasten 6-3: Geobasisdaten des Bundesrechts

Mit dem *Geoinformationsgesetz* (GeolG 2007) wurden auf nationaler Ebene bundesrechtliche Standards zu Erfassung und Austausch von Geodaten des Bundes, insbesondere von Geobasisdaten des Bundesrechts, festgelegt. In Anhang 1 der *Geoinformationsverordnung* (GeoIV 2008) wird das BAFU als zuständige Fachstelle des Bundes für die beiden Geobasisdatensätze 124 und 125 (Nationale und Kantonale Bodenbeobachtung) bezeichnet. Gemäss Art. 13 Abs. 3 der *Verordnung über Belastungen des Bodens* (VBBö 1998) wurde das BAFU demzufolge verpflichtet, für die beiden erwähnten Datensätze ein minimales Geodatenmodell (inkl. Darstellungsmodell) zu erstellen. Nach erfolgreicher Anhörung der Kantone und weiterer interessierter Kreise wird dieses Geobasisdatenmodell für den Boden voraussichtlich im Frühjahr 2017 in Kraft gesetzt. Beide Datenmodelle wurden auf Basis des Datenmodells NABODAT entwickelt, d. h. mit der Migration der kantonalen Bodendaten in NABODAT werden die Anforderungen betreffend dem minimalen Geodatenmodell (und GeoIV) automatisch erfüllt. Parallel dazu wurden weitere Geobasisdatensätze mit bodenbildendem Bezug nutzbar gemacht.

6.4 Digitalisierung bestehender Bodeninformation

Vor diesem Hintergrund und parallel dazu wurde mit Unterstützung der Agroscope die Digitalisierung der vorhandenen Bodeninformation in den Kantonen vorangetrieben. Die analog vorhandenen Bodendaten in den Archiven von Agroscope, kantonalen Fachstellen und privaten Institutionen wurden mit dem Ziel zusammengetragen, sie der Öffentlichkeit für bodenrelevante Abklärungen zur Verfügung zu stellen. Im Zeitraum von 1969 bis 2010 wurden im Kanton Bern >2600 Bodenprofile und 70 Bodenkarten, d. h. Bodeninformation im Wert von rund CHF 10 Mio., erarbeitet (Abbildung 6-2). Ein Grossteil dieser Erhebungen war Vorarbeit für Meliorations- und Landumlegungsprojekte und wurde vom Bodenkartierdienst der Agroscope (ehemals FAL bzw. FAP) durchgeführt. Seit den 1990er Jahren übernahmen private Ingenieurbüros im Auftrag der Kantone diese Kartierarbeiten.

Die analog vorliegenden Punktdaten wurden mit dem Projekt *Bodeninformation Schweiz* (BI-CH) der BGS und der finanziellen Unterstützung der Bundesämter BAFU, BLW und ARE digital aufgearbeitet und ihre Ablage, Verwaltung und Nutzung vorbereitet (BORER und KNECHT 2014, GROB et al. 2015). Aufgrund des langen Zeitraums der Datenerhebung hatte sich die zugrundeliegende Klassifikation mehrmals geändert, und es kamen elf verschiedene Datenschlüssel zum Einsatz. Zehn dieser Datenschlüssel waren überholt und mussten von Fachkräften in den aktuellen Datenschlüssel übersetzt (= migriert) werden. Anschliessend wurden die Daten durch die neu geschaffene Servicestelle NABODAT in das Datenmodell migriert und in das Bodeninformationssystem importiert.

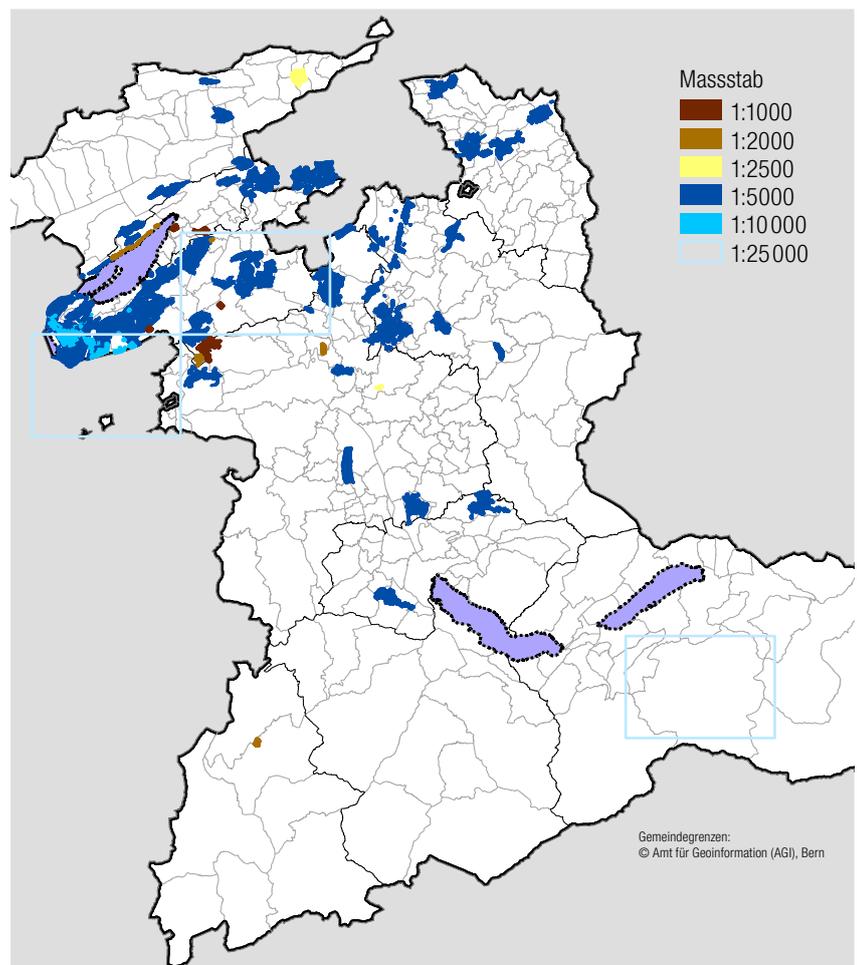


Abbildung 6-2: Verteilung der im Kanton Bern kartierten Flächen. Der Farbe entsprechend wurden die Bodenkarten in verschiedenem Detaillierungsgrad erarbeitet.



Abbildung 6-3: Der Bedarf an Bodeninformation ist ungestillt.

Auch die 70 kolorierten Bodenkartensätze in kleineren und mittleren Massstäben, wurden gescannt und mit Hilfe von GELAN (Gesamtlösung EDV Landwirtschaft und Natur der Kantone Bern, Freiburg und Solothurn) georeferenziert. Das anschließende Zurverfügungstellen der Bodenkartensätze erfolgte in Zusammenarbeit zwischen dem kantonalen Amt für Geoinformation (AGI) und der Fachstelle Bodenschutz. Da früher die Kartenlegenden jeweils den Anforderungen des entsprechenden Kartierprojekts angepasst wurden, wiesen viele Karten einen individuellen Legendensatz auf. Mit einem reduzierten Legendensatz (Informationen zu Bodentyp, Wasserhaushalt, Pflanzennutzbarer Gründigkeit und Eignungsklasse) sind die Karten im Geoportal des Kantons Bern vereinheitlicht und öffentlich zugänglich (www.geo.apps.be.ch); der originale Legendensatz ist bei der Fachstelle Bodenschutz auf Anfrage erhältlich. Mit der Migration der verschiedenen Legendensätze in eine einheitliche Form werden die Bodenkartensätze für eine Integration in NABODAT vorbereitet.

6.5 Erheben neuer Bodeninformation

Mit der Digitalisierung der Punkt- und Flächen-daten sowie dem Einlesen in die NABODAT ist im Kanton Bern der erste Schritt des Konzeptes zur Erarbeitung von Bodeninformation abgeschlossen (Abbildung 6-1). Zukünftig liegt der Fokus auf noch nicht kartierten Flächen (Abbildung 6-3). Werden im Rahmen von aktuellen

Projekten eigentumsverbindlich Entscheide gefordert, muss vorgängig neue Bodeninformation im Massstab 1:5000 erhoben werden (Tabelle 6-1). Ziel ist es, alte und neu erhobene Daten im Laufe der Zeit zu einem möglichst flächen-deckenden Kartenwerk zusammenzufügen.

6.5.1 Ergänzung des Inventars der Fruchtfolgeflächen (FFF)

Das Inventar der FFF aus den 1980er Jahren wurde im Kanton Bern anhand der *Landwirtschaftlichen Eignungskarte* (LWEK74) auf der Basis der drei hochwertigsten Kategorien für reinen Ackerbau sowie gemischten Acker- und Futterbau ausgeschieden. Als der Bund im *Sachplan Fruchtfolgeflächen* (ARE 2006) den durch den Kanton Bern zu bewahrenden Mindestumfang an FFF festlegte, war er davon ausgegangen, dass im Bereich der voralpinen Hügellzone weitere geeignete, vorwiegend als Dauergrünland genutzte Flächen im Umfang von ca. 6500 ha hinzugerechnet werden kön-

nen (BRP und BLW 1992). Er forderte deshalb vom Kanton Bern, das Inventar der FFF mit einer Zusatzerhebung zu ergänzen.

Vor diesem Hintergrund entwickelten das Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR) und das Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT) ein Verfahren, um zusätzliche Flächen, welche die Eignungskriterien des Bundes für eine Neuausscheidung von FFF erfüllen (Kasten 6-4), ermitteln zu können. Dazu wurden ausschliesslich digital vorhandene Daten verwendet: Die FFF-Karte der 1980er Jahre, die *Klimaeignungskarte*

Kasten 6-4: Sachplan Fruchtfolgeflächen – Vollzugshilfe 2006 (ARE 2006): Qualitäts- und Zusatzkriterien für Sonderfälle und Neuausscheidungen von Fruchtfolgeflächen

1. Qualitätskriterium	Klimazone	A / B / C / D1–4
2. Qualitätskriterium	Hangneigung	≤ 18 %
3. Qualitätskriterium	Pflanzennutzbare Gründigkeit	≥ 50 cm
4. Zusatzkriterium	Effektive Lagerungsdichte	≤ Richtwert gemäss Vorschlag BGS
5. Zusatzkriterium	Schadstoffe gemäss VBBo	≤ Richtwert
6. Zusatzkriterium	Zusammenhängende Fläche	≥ 1 ha und geeignete Parzellenform

des Bundes, die Bodenbedeckungsdaten der amtlichen Vermessung, die *Landwirtschaftliche Eignungskarte des Kantons Bern* von 1974, das Höhenmodell sowie Orthofotos. Das gewählte Vorgehen entspricht dem Bodenkonzeptplan (2. Schritt in Abbildung 6-1). Mit der anschließenden Gegenüberstellung von nutzungs- und schutzrelevanten Prioritäten konnten diejenigen Flächen eliminiert werden, welche nicht Teil der Landwirtschaftszone sind oder einem Kriterium von Kasten 6-4 widersprechen (3. Schritt in Abbildung 6-1). Da das FFF-Kriterium *Pflanzennutzbare Gründigkeit* bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden konnte, mussten auf einigen Beispiel-Flächen durch Begehungen die Richtigkeit der Zuordnung überprüft und das Verfahren verfeinert werden.

Schliesslich konnten 4976 ha FFF-Zusatzflächen provisorisch identifiziert und den betroffenen Gemeinden zur Überprüfung zugestellt werden. 3678 ha dieser Zusatzflächen wurden weder von den Gemeinden noch von kantonalen Fachstellen bestritten und konnten durch den Regierungsrat 2015 in das Inventar aufgenommen werden (RRB 1038/2015). Mit dieser Ergänzung des Inventars verfügt der Kanton Bern über rund 82 500 ha anrechenbare FFF (Stand 1. April 2015). Er kann damit den im *Sachplan Fruchtfolgeflächen* des Bundes vorgegebenen Mindestumfang (82 200 ha) erfüllen. Im RRB wurden AGR und LANAT beauftragt, die 1298 ha unbereinigten Zusatzflächen zu überprüfen (Abbildung 6-4). Dies bedingt eine erneute Begutachtung dieser Flächen und allenfalls bodenkundliche Feldarbeit.

Die Vernehmlassung zur zweiten Etappe der Revision des Raumplanungsgesetzes entkoppelt die Themen *Kulturlandschutz* und *FFF* von der Revisionsvorlage. Eine vom Bund einberu-

6.5.2 Hinweiskarte Boden

Mit der neuen *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen* (VVEA, Art. 18) besteht seit 1. Januar 2016 die Pflicht, sauberen abgetragenen Ober- und Unterboden von Baustellen möglichst vollständig auf Landwirtschaftsböden zu verwerten (siehe Kapitel 8). Damit soll sauberer Boden nicht mehr in die beschränkt vorhandenen Deponien gelangen, sondern möglichst für die Aufwertung von degradierten Kulturlandböden genutzt werden. Ein solchermassen gesteuerter Fluss von Bodenmaterial hilft zudem, den zweckentfremdeten Verkauf von Oberboden z. B. an Gartenbauunternehmen zu minimieren. Der Fokus liegt auf der Verbesserung der schon in den 1980er Jahren in das FFF-Inventar aufgenommenen Böden, deren Qualität anthropogen beeinträchtigt ist (Kasten 6-6). Hingegen sollen Kulturlandflächen, welche aufgrund ihrer natürlichen Topografie schwierig zu bewirtschaften

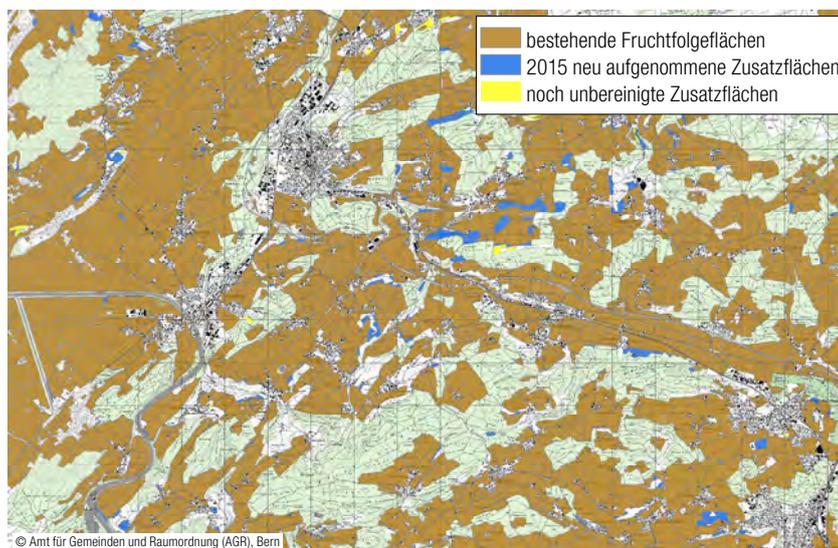


Abbildung 6-4: Kartenausschnitt Lyss und Umgebung zur Veranschaulichung der Verteilung bestehender Fruchtfolgeflächen, Zusatzflächen und unbereinigter Zusatzflächen. Weiss hinterlegt sind weitere Flächen wie Bauland; grün hinterlegt ist Wald.

Kasten 6-5: NFP68-Projekte Zersiedelung und Kompensation

Das Projekt *Zersiedelung* untersucht, welche Faktoren zur Zersiedelung und zum ungebremsten Bodenverbrauch beitragen und erarbeitet praxisreife Vorschläge zur Reduktion dieses Problems.

Das Projekt *Kompensation* entwickelt einen neuen Kompensationsmechanismus, der die Bodenqualität berücksichtigt und sich in die Methoden der Raumplanung integrieren lässt.

fene Expertengruppe hat bis 2018 Vorschläge für einen verbesserten *Sachplan Fruchtfolgeflächen* vorzulegen. Möglicherweise müssen auch bodenkundliche Aufnahmen in Betracht gezogen werden (Kasten 6-5).

sind (Senken, Mulden oder flachgründige, natürlich gewachsene Böden) sowie Flächen, die dem Naturschutz dienen, baulich nicht verändert werden.

Kasten 6-6: Anthropogen beeinträchtigte Böden

Anthropogen beeinträchtigte Böden wurden durch menschliche Tätigkeiten in ihrer standortspezifischen Fruchtbarkeit «verschlechtert». Es handelt sich dabei um:

- ◆ mangelhaft durchgeführte Terrainveränderungen
- ◆ mangelhaft durchgeführte Rekultivierungen
- ◆ schadstoffbelastete Flächen
- ◆ stark gesackte entwässerte, d. h. drainierte Torfböden
- ◆ steil aufgeschüttete, künstliche Böschungen (z. B. bei Strassenbauten)

In diesem Zusammenhang verlangt der *Kantonale Richtplan* von LANAT, AGR und AWA, Grundlagen für die Verwertung von sauberem abgetragenem Ober- und Unterboden zu erarbeiten (REGIERUNGSRAT DES KANTONS BERN 2016). Da mangels flächendeckender Bodeninformation keine Aussage über die Qualität von degradierten Kulturlandböden – insbesondere degradierten FFF – gemacht werden kann, wurde als Alternativlösung eine sog. *Hinweiskarte Boden* erstellt. Dazu wurde im Rahmen der Agrardatenerhebung vom Februar 2015 den Landwirten über GELAN ein entsprechender Fragebogen vorgelegt (Abbildung 6-5). Auf freiwilliger Basis konnten die Bewirtschafter ihre anthropogen beeinträchtigten Kulturlandböden benennen und diese auch für eine allfällige bauliche Aufwertung anmelden.

welche weder in der Bauzone noch in Zonen mit übergeordnetem Interesse wie Natur- und Landschaftsschutz liegen. Ebenfalls von Belang waren die einfache logistische Erreichbarkeit sowie die geografische Verteilung über den Kanton Bern.

In mehreren Abklärungsstufen wurden 174 Hinweise ausgewählt und durch ein Ingenieurbüro dahingehend geprüft, ob auf diesen Flächen tatsächlich eine bauliche Verbesserung angebracht ist. 26 der 174 untersuchten Hinweise wurden als geeignet befunden. Sobald das Einverständnis der Eigentümer vorliegt, werden sie auf der AWA-Website (www.bve.be.ch unter den Registern Umwelt > Boden > Terrainveränderungen) publiziert. Interessierte Eigentümer und Bauunternehmungen können sich so für ein gemeinsames Bauprojekt finden (siehe Kapitel 8). Bei Hinweisen ohne Bodeninformation ist diese im Rahmen des Baugesuches durch eine *Bodenkundliche Baubegleitung* im Bodenschutzkonzept zu erarbeiten.

Gesamthaft wurden 1250 Hinweise gesammelt und auf einer geografischen Karte als *Hinweiskarte Boden* dargestellt. In einem nächsten Schritt wurden diejenigen Flächen ausgewählt,

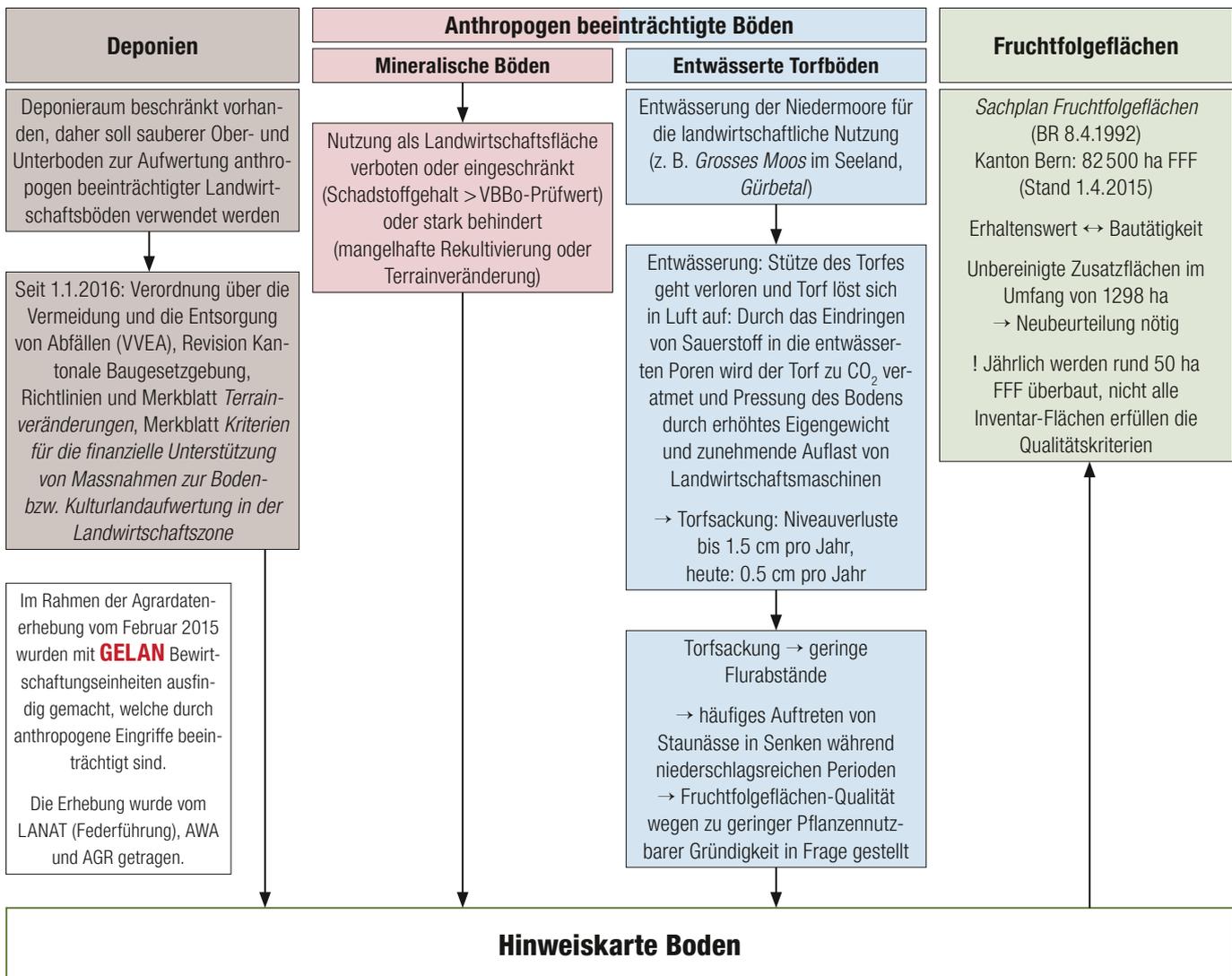


Abbildung 6-5: Zusammenhang zwischen der gesetzlichen Pflicht zur Bodenverwertung und der Aufwertung anthropogen beeinträchtigter Böden zu Fruchtfolgeflächen

Die restlichen 1076 Hinweise, die nicht als erste Auswahl geprüft wurden, stehen weiterhin für bodenkundliche Abklärungen zur Verfügung. Die Finanzierung dieser Abklärungen soll nicht mehr vom Kanton, sondern von den betroffe-

nen Akteuren über marktwirtschaftliche Mechanismen (z. B. nicht anfallende Deponiekosten) gesteuert werden. Dazu stehen heute auch bodenkundlich versierte INFORAMA-Mitarbeiter zur Verfügung (www.be.ch/bodenschutz).

6.5.3 Boden- bzw. Kulturlandaufwertung im Grossen Moos

Unabhängig von der Befragung durch GELAN ist in den letzten Jahren in der Region *Grosses Moos* die Besorgnis über die seit den Juragewässerkorrekturen fortlaufende Sackung dieser entwässerten Torfböden gestiegen (VOL 2009). Zunehmend stehendes Wasser nach Starkniederschlägen führt erneut zu einer Behinderung der Bewirtschaftung und zu einer Verschlechterung der Bodenfruchtbarkeit. Nun soll im Rahmen des Strukturverbesserungs-

projekts *Prognosekarte Grosses Moos/Seeland* der Interessensgruppe *Pro Agricultura Seeland* (PAC) die dringend notwendige Bodeninformation als Bodenkonzertplan im Massstab 1:10 000 systematisch aufgearbeitet werden, damit auf dieser Grundlage weitere Projekte zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit im Berner Seeland sowie in den angrenzenden Gebieten der Kantone Freiburg und Waadt priorisiert und durchgeführt werden können (siehe Kapitel 7).

6.6 Zukunft der Bodeninformation

Die KLABS und Kartieranleitungen wurden für mineralische Böden entwickelt. Für entwässerte Torfböden müssen Klassifikation und Anleitung entsprechend erweitert werden. Mit den Geobasisdaten stehen über das Geoportale digital aufgearbeitete Datensätze als GIS-Oberflächen zur Verfügung. Diese Daten können in Datenbanken gebündelt und miteinander vernetzt werden.

Das grossflächige Erfassen von Bodeninformation mit der klassischen Feldkartierung kann zukünftig gezielt mit einzelnen Instrumenten der digitalen Bodenkartierung (*Digital Soil Mapping*) ergänzt werden (Kasten 6-2). Setzt man Geobasisdatensätze mit bodenbildendem Bezug (Geologie, Höhenmodell, Orthofotos, Luftbilder etc.) mit bestehender Bodeninformation und weiteren Kovariablen zusammen, reduzieren sich sowohl der Aufwand für die Arbeiten im Feld (Bohrungen und Bodenprofile) als auch die dabei anfallenden Kosten. Drohnen oder Satelliten gestützte Luftbilder liefern neben der eigentlichen Bildinformation auch ein hochauflösendes Oberflächenprofil des Geländes. So kann sich der Bodenkartierer mit Hilfe von *Remote Sensing* einen besseren Überblick über die Oberfläche des Geländes und die repräsentativen Bohrpunkte im Gelände verschaffen. Jedoch gibt es keine *Remote Sensing*-Methode, die auch in die Tiefe der Böden vordringen kann. Um beispielsweise die *Pflanzennutzbare Gründigkeit* erfassen zu können, sind Feldarbeiten unabdingbar. Ferner stehen mit der georeferenzierten Ertragserfassung auf Landmaschinen per GPS heute weitere wertvolle Informationen zu Qualität und Heterogenität von Landwirtschaftsböden zur Verfügung.

Das Ergebnis dieses Zusammentragens ist der Bodenkonzertplan (Abbildung 6-1), wel-



Abbildung 6-6: Zur Erleichterung und Beschleunigung der Feldarbeiten wurde ein Quad mit einer angetriebenen Bohreinrichtung ausgerüstet.

cher einerseits Rückschlüsse über die Prioritäten der zu kartierenden Flächen ermöglicht und andererseits die Lage der im Feld zu erhebenden Bohrungen und Profile genauer eingrenzt. Zweck der Feldarbeiten ist vor allem das iterative, d. h. sich schrittweise annähernde Verbessern des Bodenkonzertplans bis zur erwünschten Abgrenzgenauigkeit (z. B.

im Kartenmassstab 1:5000) durch das Erfassen der Bodeneigenschaften in der dritten Dimension (Tabelle 6-1). Mit der Automatisierung der Bohrungen (Abbildung 6-6) und neuen foto-

technischen Auswertungen der Bohrkerne sollen die Feldarbeiten zusätzlich erleichtert und beschleunigt werden (BURGOS 2017).

Tabelle 6-1: In der Schweiz gebräuchliche Bodenkartenmassstäbe. Die Anwendungsbereiche wurden am Fallbeispiel eines Kartenausschnitts vom Areal der Anstalten Witzwil dargestellt (VOL 2009, modifiziert).

Massstabsbereich	1:200 000–1:500 000 = kleinmassstäblich	1:25 000–1:50 000 = mittelmassstäblich	1:2500–10 000 = grossmassstäblich
Darstellung	Landesweite Übersicht der Bodengesellschaften	Übersicht über die Böden einer Region	Bodeneigenschaften auf Parzellenstufe
1 cm ² auf der Karte entspricht in Wirklichkeit	400–2500 ha	6.25–25 ha (Betriebsgrösse)	0.6–1 ha (Parzellengrösse)
Detaillierungsgrad	nicht detailliert	halbdetailliert (generalisiert)	detailliert
Auflösung	nicht parzellenscharf	nicht parzellenscharf	parzellenscharf
Verbindlichkeit	nicht eigentumsverbindlich	nicht eigentumsverbindlich	eigentumsverbindlich
Planungsebene	überregional/kantonal	regional	kommunal
Anwendungsbeispiel	– Landschaftskonzept Schweiz	– Regionalentwicklung	– Schutzwald – Hoch- und Grundwasserschutz – land- und forstwirtschaftliche Eignung – Fruchtfolgeflächen – Raumplanung
Beispiel	Bodeneignungskarte der Schweiz (1980)	Bodenkarte Blatt Murten 1165 (1984)	Bodenkarte Güterzusammenlegung Ins-Gampelen-Gals (1970)
Massstab	1:200 000	1:25 000	1:5000



6.7 Nationales Kompetenzzentrum

Im Rahmen der Arbeiten zur Erfüllung des Bundesratsauftrages bezüglich des Postulats WALTER (2010) erstellte die Arbeitsgemeinschaft AMBIO GmbH (2016) den Bericht *Bedürfnisabklärungen Bodeninformation*. Das Bedürfnis nach Koordination und Einheitlichkeit beim Umgang mit Bodeninformation ist essentiell und zunehmend eng mit hydrologischen Fragestellungen verknüpft. Vor dem Hintergrund einer Anpassung an den Klimawandel ist eine detaillierte Bodeninformation als Flächenaussage inkl. ihrer dritten (Gründigkeit) und vierten Dimension (Zeit) sehr erwünscht (Abbildung 6-7). Die vom BLW (2011) veröffentlichte *Klimastrategie Landwirtschaft* zieht unter anderem eine ähnliche Schlussfolgerung: Bodenkarten bieten wichtige Entscheidungsgrundlagen und sind deshalb in weiteren Gebieten zu erarbeiten.

Nachdem 1996 der landwirtschaftliche Bodenkartierdienst an der heutigen Agroscope in Zürich-Reckenholz aufgehoben wurde (GROB et al. 2015), gibt es in der Schweiz keine nationale Stelle mehr, die in der gesamten Prozesskette – von der Klassifikation der Böden, der Erfassung von Bodendaten über deren Verwaltung in einer Datenbank bis hin zur Erstellung von flächenhaften Anwenderkarten – den erforderlichen einheitlichen Referenzstandard erarbeitet und betreut.

Die Motion MÜLLER-ALTERMATT (2012) zielte darauf ab, eine «zentrale, unabhängige Verwaltungs- und Koordinationsstelle für Bodeninformation zu schaffen». Diese Motion wurde 2013 im Nationalrat angenommen. Die Annahme im Ständerat erfolgte 2014. Das Budget zur Umsetzung soll jährlich CHF 2–3 Mio. betragen.

In einem nationalen Kompetenzzentrum sollen u. a. Standards zur Erfassung und Klassifizierung von Bodendaten festgelegt und weiterentwickelt, Methoden für die Bewertung der Bodeneigenschaften erarbeitet, Bodendaten harmonisiert und verwaltet sowie die Kantone bei der Bodenkartierung unterstützt werden. Somit sollen von Bundesseite her Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die Bodenkartierung in den Kantonen zielgerichtet voranzutreiben und effizienter zu gestalten. Auf diese Weise können zukünftig die nötigen Bodendaten erhoben und verfügbar gemacht werden, um die wichtigen anstehenden Aufgaben in Bezug auf Bodenaufwertung, Bewertung von Zusatzflächen für das FFF-Inventar, Hinweise zu degradierten Böden und Qualität der entwässerten Torfböden zu lösen. Weitere Fachbereiche wie Raumentwicklung, Klimawandel und Hochwasserschutz sowie Ernährungssicherheit werden davon profitieren. Damit können Fachstellen und Kantone auf denselben einheitlichen Grundlagen arbeiten (BAFU 2016a), was insgesamt zu einer Effizienzsteigerung führen wird. Entscheidend ist eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen Bund und Kantonen.



Abbildung 6-7: Der Blick in die Tiefe offenbart Horizonte mit wechselnden Eigenschaften. Erst die Gesamtheit dieser Informationen ergibt Aufschluss über die Bodenqualität.

6.8 Schlussfolgerungen

Innerhalb einer bundesweiten Koordination war die Digitalisierung und Harmonisierung von Bodendaten sowie weiterer Geobasisdatensätze mit bodenbildendem Bezug in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher schweizweiter und kantonaler Bemühungen. Heute steht die

bisher im Kanton Bern erhobene Bodeninformation zur Verfügung. Weitere Anstrengungen sind erforderlich, um die ungenügende Flächenabdeckung mit Bodeninformation zu verbessern.

6.9 Ausblick

Erst Kartierungen und Bodenuntersuchungen machen Informationen über den Boden sichtbar und lassen Entscheidungen über Schutz und Nutzen für eine nachhaltige Planung überhaupt zu (Abbildung 6-7). Um die zahlreich initiierten Projekte, namentlich Bodenaufwertungen von bzw. zu Fruchtfolgeflächen fachgerecht umsetzen zu können, ist die vorgängige Beschaffung der notwendigen Bodeninformation dringlich. In aktuellen Projekten wie die *Prognosekarte Grosses Moos/Seeland* werden neue Bodendaten generiert. Für diese entwässerten Torfböden müssen vorgängig eine detaillierte Klassifikationsmethodik und die geeignete Kartiermethode entwickelt werden.

auch zukünftig unerlässlich bleiben. Projekte des NFP68 und andere werden zeigen, inwiefern die klassische Bodenkartierung mit Instrumenten des *Digital Soil Mapping* ergänzt werden kann. Die Überarbeitung der klassischen Kartiermethode unter Einbezug von Luftbildern und Computermodellierungen verhelfen zu einer effizienten Umsetzung, ebenso wie die koordinierte Datenablage und -verwaltung in der NABODAT. Der rasche Aufbau des nationalen Kompetenzzentrums ist in diesem Kontext zentral.

In Zukunft richtet sich der Fokus auf die Erhebung neuer projektbezogener Bodendaten und auf die Effizienz der Bodenkartierung. Im Allgemeinen wandelt sich das Kartieren von Böden und Erfassen ihrer Daten in eine digitale Richtung. Felderhebungen werden aber

7 Entwässerte Torfböden



Eiweisserbsen auf anthropogen beeinflusstem, tiefgepflügtem und drainiertem Moorboden

7 Entwässerte Torfböden

Torfböden sind aufgrund ihrer Entstehung sehr unterschiedlich aus organischen und mineralischen Schichten zusammengesetzt. In der Schweiz wurden solche Böden entwässert und für die Landwirtschaft nutzbar gemacht. Im Kanton Bern sind das *Grosse Moos* zwischen Bieler-, Neuenburger- und Murtensee sowie das *Gürbetal* die grössten ehemaligen Moorgebiete, die heute intensiv genutzt werden (v. a. für Gemüseanbau).

Durch Entwässerung und Nutzung sackten und sacken die Torfböden in sich zusammen. Das organische Material wird zu CO₂ abgebaut und entweicht in die Luft. Jährlich verlieren diese Böden heute etwa 0.5 cm an Niveau, wodurch der Flurabstand verringert und die landwirtschaftliche Nutzung durch Wiedervernässung beeinträchtigt wird.

Um den Torfschwund zu bremsen, wurden verschiedene Bodenaufwertungsmassnahmen punktuell umgesetzt. Eine Erfolgskontrolle von drei unterschiedlich aufgewerteten Torfböden im *Grossen Moos* zeigt, dass für eine dauernde landwirtschaftliche Nutzung die verschiedenen möglichen Massnahmen – Tiefpflügen oder Durchmischen, Übersanden oder Überschütten, Planieren, Drainieren – als Einzelmassnahme oder kombiniert standortangepasst durchzuführen sind. Neben baulichen Bodenaufwertungen ist jedoch auch ein Umdenken bezüglich Bewirtschaftungsintensität notwendig. Zur erfolgreichen Umsetzung von Aufwertungsmassnahmen braucht es eine sorgfältige Planung, eine fachgerechte Ausführung sowie eine standortangepasste Folgebewirtschaftung. Zuvor muss aber die zwingend notwendige Bodeninformation bezüglich Wasserhaushalt und Zusammensetzung der Torfböden erhoben werden.

In der Ebene zwischen Bieler-, Neuenburger- und Murtensee liegt das *Grosse Moos*, das grösste Niedermoorgebiet der Schweiz (DUBLER 2010). Nach dem Rückzug des Rhonegletschers am Ende der Würmeiszeit vor rund 12 000 Jahren schränkten Endmoränen in der Gegend von Wangen an der Aare den Wasserabfluss aus dem Dreiseengebiet ein. Dies führte zu einem Anstieg der Seespiegel und zu einer Versumpfung der Ebene (LÜDI 1935). Zudem änderte die in der Ebene mäandrierende Aare oft ihr Flussbett und floss zeitweise in den Neuenburgersee. Seespiegel sowie Verlauf von Aare und ihrer Nebenarme bestimmten den Transport und die schichtweise Ablagerung

des mineralischen Materials sowie die einsetzende Torfbildung: Kalk- und sandreiche Seesedimente (in Seenähe auch Strandwälle aus Sand) wurden an vielen Stellen mit dem von der Aare angeschwemmten, meist lehmigen Material und mehr oder weniger mächtigen Torfschichten überlagert.

7.1 Grosses Moos

7.1.1 Ausgangslage

Mit der ersten Juragewässerkorrektur (1863–85) wurde das bis dahin kaum produktive Sumpfland im *Grossen Moos* entwässert (Abbildung 7-1) und landwirtschaftlich nutzbar gemacht (PRESLER et al. 1989). Auf den drainierten Flächen entstand der bedeutendste «Gemüsegarten» der Schweiz. Jedoch führte die Entwässerung auch dazu, dass die ursprünglich sehr locker gelagerten, im Wasser liegenden Torfschichten ihre Stütze verloren und in sich zusammensackten (= Torfsackung). Gleichzeitig drang Luft in die entwässerten Poren ein und Abbauprozesse begannen den Torf zu zersetzen und CO_2 in die Atmosphäre abzugeben (= Torfschwund). Die zurückbleibenden mineralischen Beimengungen im Torf erhöhten das Gewicht des Oberbodens, so dass tieferliegende Torfschichten zusammengedrückt wurden und sich die Bodenoberfläche weiter absenkte. Häufige Lockerung durch Bodenbearbeitung intensiviert sowohl die Sauerstoffzufuhr und damit den Abbau des organischen Materials als auch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse. Setzung, Torfschwund und Schrumpfung lassen sich unter dem Begriff *Torfsackung* zusammenfassen. Im *Grossen Moos* summierten sie sich zu deutlichen Boden- und Niveauverlusten (Abbildung 7-2). Der Flurabstand zum Grundwasser wurde jährlich um ca. 1.5 cm geringer und der Wasserabfluss zusehends schlechter. Das machte eine zweite Juragewässerkorrektur notwendig.



Abbildung 7-1: Baumstämme auf entwässelter Moorfläche (nicht datierte Aufnahme, Archiv der Anstalten Witzwil)

Diese von 1963–73 vorgenommene Korrektur der Erstentwässerung löste wiederum denselben Zyklus aus: Entwässerung, Setzung, Torfschwund und Schrumpfung. Mit der Zweitentwässerung wurde dieser Zyklus sogar beschleunigt (KUNTZE 1983, GÖTLICH 1990). Obwohl das Gebiet seit den 1970er Jahren zusätzlich mit Pumpwerken entwässert werden kann, behindern der Boden- und Niveauverlust – vor allem nach Starkniederschlägen in Senken – heute erneut Infiltration und Wasserabfluss (Kasten 7-1). Hinzu kommt, dass Bodenverdichtungen, verursacht durch die zunehmend hohen Gewichte der Landmaschinen, den Setzungsprozess vor allem in tieftorfigen Bodeneinheiten verstärken und zusätzlich die Wasserversickerung hemmen. Eine Erhöhung der Pumpleistung würde diese Situation nicht



Abbildung 7-2: Früher dienten in der Schweiz Briketts von Torfstichen als Heizmaterial. Im *Grossen Moos* trugen solche Torfstiche zu Niveauverlust und Heterogenität der ursprünglich tieftorfigen Flächen bei (nicht datierte Aufnahme, Archiv der Anstalten Witzwil).

Kasten 7-1: Torfsackungsprozesse bedingen neue Bodeninformation

Inbesondere auf tief- und flachtorfigen Böden können die anfangs der 1970er Jahre erstellten Bodenkarten von FREI et al. (1972) wegen der Torfsackungsprozesse weder die heutige landwirtschaftliche Nutzungseignung noch die aktuelle Bodenfruchtbarkeit beschreiben. Die damals verwendete pedologische Methodik beschrieb nur den obersten Meter des Bodens, womit auf den tieftorfigen Flächen der mineralische Untergrund nicht erfasst wurde. Bei einem Untergrund aus Lehm ist jedoch eine für die Landwirtschaft geeignete sekundäre Bodenbildung schwierig, bei Seekreide fast unmöglich. In Gebieten mit sandigem Untergrund ist diese Gefahr geringer, sofern die Entwässerung kein Problem bereitet (VOL 2009).



Abbildung 7-3: Die Heterogenität der Böden im *Grossen Moos* aus der Vogelperspektive (Blick vom Mont Vully nach Norden): hell gefärbt sind Kuppenlagen nach Torfschwund, dunkel gefärbt torfhaltige Flächen und Senken. Diese an der Oberfläche deutlich sichtbare Kleinräumigkeit besteht auch in der Tiefe und erschwert Planung und Ausführung von Kulturlandaufwertungen (Bildaufnahme vom 21. April 2007).

Kasten 7-2: NFP68-Projekt Moorböden

Das Projekt *Moorböden* untersucht, wie sich die bisherige Nutzung auf entwässerte Torfböden ausgewirkt hat und welche Nutzungsalternativen sich bieten. Das Projekt wird aufzeigen, wie Nutzungsänderungen eingeführt werden können und mit welchen Auswirkungen Landwirtschaftsbetriebe bei der Nutzungsumstellung zu rechnen haben.

Kasten 7-3: NFP68-Projekt Lachgas (N₂O)

Das Projekt *Lachgas* untersucht, welche Rolle Bodenmikroorganismen bei Produktion und Abbau von Lachgas im Boden spielen und wie die landwirtschaftliche Bewirtschaftung diese Mikroorganismen beeinflusst.

entspannen, da der Wasserfluss durch zunehmende Niveauunterschiede im Gelände gestört wird; das Drainagesystem zeigt nach einer 50-jährigen Betriebszeit altersbedingte Schwächen und sollte an einigen Stellen erneuert werden (Abbildung 7-3).

Auf dem Areal der Anstalten Witzwil wurde auf (ehemals) tieftorfigen Flächen ein maximaler Boden- und Niveauperlust von 2.3 m festgestellt (JAMPEN und MÖRI 2006, zit. in VOL 2009). Dies entspricht an einigen Stellen beinahe der bei der ersten Juragewässerkorrektur vorgenommenen Seespiegelabsenkung von 2.5 m (Kasten 7-2). Heute unterliegen die entwässerten Torfböden in Witzwil einer jährlichen Sackungsrate von rund 0.5 cm (FENNER 2007).

Durch diesen fortschreitenden Boden- und Niveauperlust ist die Bodenfruchtbarkeit massiv beeinträchtigt und die Fruchtfolgeflächen (FFF)-Qualität gefährdet (Kasten 6-4). Die Niveauunterschiede zwischen den stabilen Strassen und den gesackten Ackerflächen führen zu steilen Feldein- und -ausfahrten.

Mit der Entwässerung verändert sich auch der Stickstoffhaushalt der Torfböden (PRESLER et al. 1989). Es werden grosse Mengen von organisch gebundenem Stickstoff mineralisiert und als Nitrat ins Kanal- und Grundwasser verfrachtet oder – wie das CO₂ – als klimawirksames Gas in Form von Lachgas (N₂O) in die Atmosphäre freigesetzt (Kasten 7-3).

7.1.2 Kulturlandaufwertung

Der durch die Torfsackung stark ansteigende Leidensdruck der Landwirte führte zum Verlangen nach Kulturlandaufwertungen (Abbildung 7-4). Damit Terrainveränderungsprojekte (siehe Kapitel 8.3) zur Boden- und Kulturlandaufwertung

auch ökologisch beurteilt werden können, muss auf Grundlage der notwendigen Bodeninformation ein Konzeptplan mit entsprechendem Bodenschutzkonzept erarbeitet werden (siehe Kapitel 6.5.2/3 und 8.2; Kasten 7-4).

7.1.3 Erfahrungen mit Kulturlandaufwertungen

In der Vergangenheit kam es zu verschiedenen Versuchen, organische Schichten vor einer Torfsackung zu schützen (Tabelle 7-1, zit. in PRESLER et al. 1989). Die Wirkung dieser Massnahmen ist jedoch nie umfassend beurteilt worden. 2014 wurde im Rahmen einer Masterarbeit eine entsprechende Erfolgskontrolle bei drei un-

terschiedlich aufgewerteten Torfböden vorgenommen (KÖNIG 2015):

- ein übersandeter Torfboden in der Gemeinde Gampelen
- ein tiefgepflügter Torfboden auf dem Areal der Anstalten Witzwil
- ein mit lehmigem Aushubmaterial überschütteter Torfboden in der Gemeinde Ins

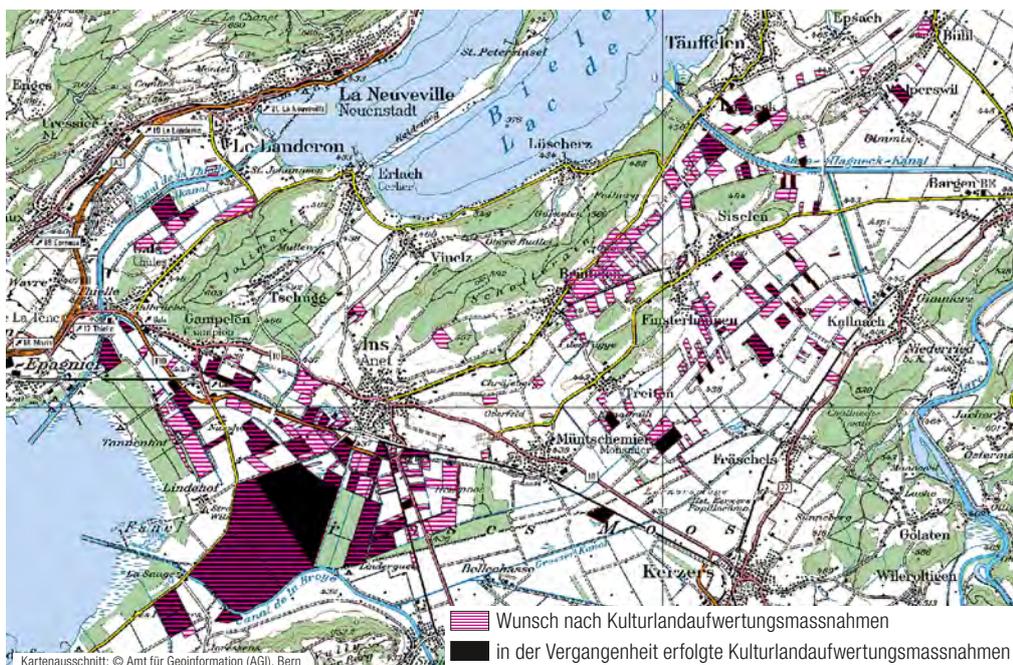


Abbildung 7-4: Die von Landwirten im Grossen Moos eingegangenen Hinweise zu durchgeführten sowie gewünschten Kulturlandaufwertungsmaßnahmen (siehe Kapitel 6.5.2)

Die aufgewerteten Flächen wurden jeweils mit benachbarten, ursprünglichen Torfboden-Referenzen verglichen (ZIHLMANN 2015). Mit je drei Profilaufnahmen und Bodenanalysen aus einer horizontbezogenen Beprobung wurden die aufgewerteten Böden mit den Referenzböden verglichen. Die Ergebnisse der Bodenanalysen wurden jeweils über die drei Profile gemittelt.

Wichtige Grössen bei der Bodenbeurteilung waren Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden (C_{org}), Lagerungsdichte, Zusammensetzung der mineralischen Feinerde, pH-Wert, Kationenaustauschkapazität, Stickstofftotalgehalt (N_{tot}) sowie Gehalt an weiteren Nährstoffen (Mg, K, P). Zusätzlich wurden die Bewirtschafter über Anlass, Ausführung inkl. Folgebewirtschaftung und Ergebnis der Aufwertungsmaßnahmen befragt.

Kasten 7-4: Projekte zur Boden- bzw. Kulturlandaufwertung in der Landwirtschaftszone

Gemäss der geltenden *Agrarpolitik* und der *Strategie Strukturverbesserungen 2020* fördern Bund und Kanton Projekte zur Boden- bzw. Kulturlandaufwertung, sofern die Vorhaben ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind und es sich um Aufwertungsprojekte von anthropogen beeinträchtigten Böden im Fruchtfolgeflächen-Inventar handelt (siehe Kapitel 6.5.1 und Kasten 6-6). Im Merkblatt *Kriterien für die finanzielle Unterstützung von Massnahmen zur Boden- bzw. Kulturlandaufwertung in der Landwirtschaftszone* sind die Eckpfeiler zur Beurteilung von Beitragsgesuchen aus dem Kanton Bern zusammengefasst. Die Kriterien der *Abteilung Strukturverbesserungen und Produktion* des LANAT können unter www.vol.be.ch mit dem Suchbegriff »Kulturland-Verbesserung« gefunden werden.

Tabelle 7-1: Kulturlandaufwertungsmaßnahmen bei entwässerten Torfböden (zit. in PRESLER et al. 1989 und Fachstelle Bodenschutz Zürich 1996)

Massnahme	Beschreibung	Ziel
Tiefpflügen	Umwenden der horizontalen Bodenschicht (mind. 0.6 m tief) und Planieren. Anteil organische Substanz in der neuen Bearbeitungsschicht maximal 15 Gewichts% (Volumen: ein Teil mineralisch und ein Teil organisch)	Konservieren der organischen Substanz durch obere Schicht mit geringem Anteil an organischem Material → Schutz vor Austrocknung und Luftkontakt. Drainagewirkung durch schrägstehende mineralische Schichten
Übersanden/Sanddeckkultur	Auftrag von Sand aus dem Untergrund (oder ortsfremd). Keine Vermischung mit den darunterliegenden Schichten, um effektive Schutzschicht zu erzeugen	Austrocknung der obersten organischen Schicht verhindern und diese konservieren. Sackungsprozesse verzögern, Trittfestigkeit und Befahrbarkeit verbessern und Unkrautdruck vermindern
Überschütten	Aufbringen und Einmischen von mineralischem Bodenmaterial (meist von Baustellen)	Niveau-Erhöhung. Besseres Substrat im Bearbeitungshorizont

A) Torfboden-Referenz



Tieftorfiger Boden: seit 1971 geschätzter Niveaulverlust plus Restsackung aufgrund eines im obersten Horizont 5.8 mal höheren Humusgehalts bei **A)** und einer 1.8 mal höheren Lagerungsdichte bei **B)**.

6.9
26.6
0.7
22, 23, 55

6.7
68.5
0.3

6.9
57.0
0.5

pH
H (Gew. %)
LD (g cm⁻³)
S, U, T (%)

B) Kulturlandaufwertung Übersanden



7.8
4.7
1.3
83, 9, 8

7.1
33.4
0.6

6.8
72.4

6.9
38.7
0.3

6.6
78.8

Abbildung 7-5: Bodenprofilbeispiele von **A)** Torfboden-Referenz und **B)** Kulturlandaufwertung **Übersanden**. Dargestellt sind der für die Zeitperiode 1971 bis 2014 geschätzte Niveaulverlust inkl. zukünftige Restsackung (siehe Kasten 7-5) sowie horizontspezifische Bodenkennwerte (die Bilder und ausführlichen Beschreibungen aller sechs Profile: Anhang 2).

Kasten 7-5: Lesebeispiel zu Abbildungen 7-5, 7-6 und 7-9

Beträgt die jährliche Sackungsrate auf den Torfboden-Referenzen (jeweils linkes Bild = **A**) rund 0.5 cm (FENNER et al. 2007), ergibt sich in der Zeitperiode 1982 bis 2014 (= Beispiel *Tiefpflügen*) ein Niveaulverlust von rund 16 cm. Die geschätzten Bodenverluste der Kulturlandaufwertungen (jeweils rechtes Bild = **B**) sind geringer. Ihre Quantifizierung ist jedoch schwierig: Einerseits reduziert sich durch die entsprechende Aufwertungsmassnahme der Kontakt zwischen Torf und Sauerstoff, was die Abbauprozesse reduziert; andererseits erhöht sich das Eigengewicht der oberflächennahen Bodenschichten, was die Last auf die tiefer gelegenen torfigen Horizonte erhöht und vorübergehend zu höherer Setzung führt.

pH = Säuregrad nach H₂O-Methode: 3.9–5.2 = stark sauer, 5.3–5.8 = sauer, 5.9–6.7 = schwach sauer, 6.8–7.2 = neutral, 7.3–7.6 = schwach alkalisch, 7.7–8.2 = alkalisch, >8.2 stark alkalisch

H = Humus oder organische Substanz: 2–5 Gew. % = schwach humos, 5–10 Gew. % = humos, 10–20 Gew. % = humusreich, 20–30 Gew. % = sehr humusreich, >30 Gew. % = organisch

LD = Lagerungsdichte: 0.8–1.2 g cm⁻³ = sehr porös, 1.2–1.4 g cm⁻³ = leicht verdichtet, 1.4–1.6 g cm⁻³ = ziemlich stark verdichtet

S = Sand, U = Schluff, T = Ton

Zusammensetzung der Feinerde: IS = lehmiger Sand (0–50 % Schluff, 5–10 % Ton), L = Lehm (0–50 % Schluff, 20–30 % Ton), tL = toniger Lehm (0–50 % Schluff, 30–40 % Ton), IU = lehmiger Schluff (50–90 % Schluff, 10–30 % Ton), tU = toniger Schluff (50–70 % Schluff, 30–50 % Ton)

Übersanden

Das 1971 realisierte Übersanden wurde mit Material einer nahegelegenen, 6 m hohen Sanddüne ausgeführt. Am Abtragsort kam es dadurch zu einer Geländeneivellierung. Am

Auftragsort wurde der Torfboden mit einer ca. 35 cm mächtigen Sandschicht bedeckt. Der Sand wurde mit Schürfkübelraupen verteilt und grob planiert. Auf eine Durchmischung mit

den darunterliegenden organischen Schichten wurde verzichtet. Ziel war es, den Torfboden zu konservieren, die Sackungsprozesse zu verzögern, die Befahrbarkeit zu verbessern und den Unkrautdruck zu vermindern.

Bis drei Jahre nach dem Übersanden war die fehlende Tragfähigkeit der aufgetragenen Sandschicht ein grosses Problem. Nicht zuletzt wegen der Zufuhr von Stallmist verbesserten sich Bodenstruktur und Tragfähigkeit jedoch relativ rasch. Grundsätzlich ist der Bewirtschafter mit dem Übersanden zufrieden. Da der Sand nicht für die ganze Parzelle reichte, ist der übersandete Teil bezüglich Pflanzenschutz und Bewässerung anders zu bewirtschaften als die verbliebene Torfboden-Referenz. Ersterer trocknet

rasch ab und kann nach Niederschlägen schnell wieder bearbeitet und befahren werden, muss aber in Trockenperioden intensiver bewässert werden als der Torfboden.

An Bodenprofilen sind die ausgeführten Massnahmen noch heute gut erkennbar (Abbildung 7-5, Kasten 7-6 und Anhang 2). Die Torfboden-Referenz weist einen locker gelagerten Bearbeitungshorizont von 30 cm auf (Abbildung 7-5 A). Unterhalb der Sandschicht befindet sich der 20 cm mächtige, durch Raupenfahrzeuge und/oder vom Gewicht des aufgetragenen Sandes verdichtete, ehemalige Bearbeitungshorizont (Abbildung 7-5 B). Mit 85 cm tief reichenden Grubberzinken wurde versucht, die Verdichtung zu lockern.

Tiefpflügen

Diese Parzelle war vor dem Tiefpflügen wegen einer mächtigen, schlecht durchlässigen Lehmschicht unterhalb des anmoorigen Oberbodens als Ackerland kaum mehr nutzbar (Abbildung 7-6 A). Die ungenügende Wasserinfiltration führte zu häufiger Staunässe und in der Folge zu schlechtem Pflanzenwachstum und Schäden an erntereifen Kulturen. Zudem schränkte die schlechte Tragfähigkeit die Bestell-, Pflege-

und Erntearbeiten oft stark ein oder verunmöglichte sie ganz.

1982 wurde ein Teil der beprobten Parzelle 90 cm tief gepflügt (Abbildung 7-6, Kasten 7-5 und Anhang 3). Dabei wurden die ursprünglich horizontal gelagerten Bodenschichten (Abbildung 7-6 A) mit einem eigens aus Nordrhein-Westfalen eingeführten Spezialpflug um

A) Torfboden-Referenz



Anmooriger Boden: seit 1982 geschätzter Niveauverlust plus Restsackung aufgrund eines im obersten Horizont 8.4 mal höheren Humusgehalts bei **A)** und einer 1.8 mal höheren Lagerungsdichte bei **B)**.

6.5
42.1
0.7
9, 68, 23

7.5
3.6
1.3

8.2
3.3
1.4

8.5
4.4

pH
H (Gew. %)
LD (g cm⁻³)
S, U, T (%)

B) Kulturlandaufwertung Tiefpflügen



7.6
4.9
1.3
19, 61, 20

7.8
11.2

humusreich:
7.2

41.5

0.5

tonreich:
7.9

5.2

schluffreich:
8.1

7.7

1.3

9.0

6.1

Abbildung 7-6: Bodenprofilbeispiele von A) Torfboden-Referenz und B) Kulturlandaufwertung *Tiefpflügen*. Dargestellt sind der für die Zeitperiode 1982 bis 2014 geschätzte Niveauverlust inkl. zukünftige Restsackung (siehe Kasten 7-5) sowie horizontspezifische Bodenkennwerte (die Bilder und ausführlichen Beschreibungen aller sechs Profile: Anhang 3).



Abbildung 7-7: Tiefpflug: Der Fahrer im hintersten Raupenfahrzeug reguliert während dem Einsatz die Arbeitstiefe des Pflugs (Mischverhältnis: ein Volumenteil organischer Torf und ein Volumenteil mineralischer Untergrund).

Kasten 7-6: Erläuterung zum Titelbild Kapitel 6 «Bodeninformation» (Seite 43)

Dieser entwässerte Torfboden weist drei deutlich abgegrenzte Horizonte auf: Die obersten 30 cm bestehen aus etwa 40 % Humus, gefolgt von einer 30 cm mächtigen Lehmschicht mit ca. 80 % Ton und Schluff sowie einer mächtigen Sandschicht mit ca. 95 % Sand. Der anmoorige Bearbeitungshorizont verliert an Mächtigkeit. Die Lehmschicht im Untergrund ist kaum wasserdurchlässig und trägt zur Stauwasserbildung bei. Ein 90 cm tiefes Durchmischen dieser drei Schichten wäre eine nachhaltige und sinnvolle Lösung zur Aufwertung zu Fruchtfolgeflächen-Qualität. Humusgehalt und Körnung wären ausgewogen, Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt entsprächen den Bedürfnissen der Pflanzen.



Abbildung 7-8: Ein lehmiger Untergrund bzw. hydrophobe Torfschichten behindern die Wassereinsickerung: Nach Starkniederschlägen führt dies in Senken zu Staunässe (Bildaufnahme vom 7. Mai 2015).

ca. 120° überkippt. Weil im neu gemischten Bearbeitungshorizont (0–25 cm) ein Humusgehalt von 10–15 % angestrebt wurde (PRESLER et al. 1989), musste die Pflugtiefe (max. 220 cm) laufend an die unterschiedliche Mächtigkeit der zu mischenden mineralischen und organischen Schichten angepasst werden (Abbildung 7-7). Sehr tieftorfige Flächen, die kaum mineralisches Material enthielten, wurden nicht tiefgepflügt.

Die lehmige Schicht wurde bis knapp zur Drainage aufgebrochen (Abbildung 7-6 B), so dass sich bei Starkniederschlägen in Senken erneut Wasser sammelte und mehr oder weniger lang stehen blieb. Hingegen führte das Vermischen der an die Oberfläche gepflügten Materialien zu einem humusreichen, lehmig-schluffigen Bodensubstrat. Dieser neu geschaffene «Oberboden» eignet sich sehr gut für Futterbau und mässig gut für Ackerbau. Ob die FFF-Qualität auch in den wassersammelnden Senken gewährleistet ist, müsste noch abgeklärt werden (Kasten 7-6).

Tiefpflügen führt nur zu einer verbesserten Wasserinfiltration, wenn die Lehmschicht bis zum darunterliegenden sandigen Material oder bis zur Drainage aufgebrochen und gewendet wird.

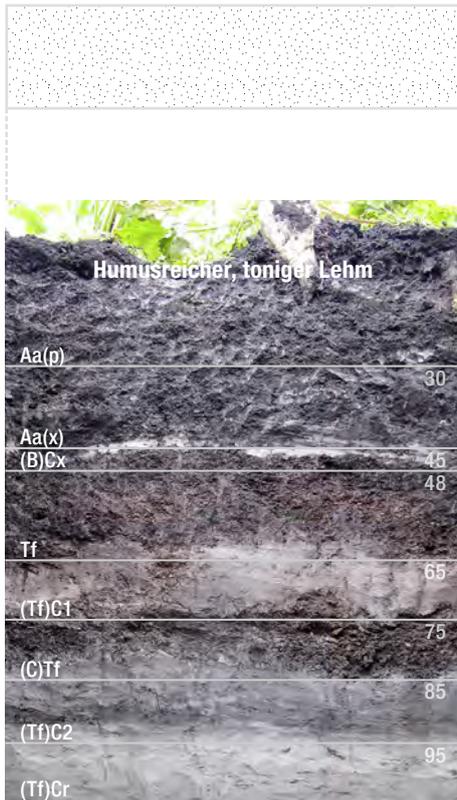
Überschütten

Eine weitere Massnahme zur Aufwertung von entwässerten Torfböden ist das Überschütten. Um den Flurabstand zu vergrössern, wurde die untersuchte Parzelle mit lehmigem Material überschüttet. Diese Fläche war nicht drainiert und liegt an einer der tiefsten Stellen im Seeland. Da hier der Haupt- in den Broyekanal mündet, ist sie daher besonders von Hochwasser betroffen (Abbildung 7-8).

Die untersuchte Parzelle wurde in zwei Etappen 1994 und 2000 mit abgetragenem Boden sowie unverwittertem, meist lehmigem und tonigem Material von Baustellen überschüttet (Abbildung 7-9). Dieses wurde verteilt und mit dem vorhandenen Oberboden vermischt, so dass ein rund 70 cm mächtiger «Komplexhorizont» entstand. Zur Nachbesserung wurden entstandene Senken 2008 aufgefüllt.

Der eingemischte anmoorige Oberboden sowie grosse Mengen Stallmist und Kompost ermöglichten auf der überschütteten Parzelle schon nach wenigen Jahren wieder eine normale landwirtschaftliche Nutzung. Abbildung 7-9 und Anhang 4 zeigen die Profile der Torfboden-Referenz (Abbildung 7-9 A) und des Überschüttens (Abbildung 7-9 B, Kasten 7-5). Der Flurabstand ist jedoch immer noch (zu) gering. Grössere Hochwasserereignisse können nach wie vor zu Bewirtschaftungsschwierigkeiten führen. Darüber hinaus sind die ehemals als Lehme eingestufteten Böden durch das

A) Torfboden-Referenz



Anmooriger Boden: seit 1994 geschätzter Niveaulverlust plus Restsackung aufgrund eines im obersten Horizont 1.5 mal höheren Humusgehalts bei **A**) und einer 1.2 mal höheren Eigen- gewichts bei **B**).

7.1
16.3
0.8
48, 26, 26

30
7.0
33.9
0.8

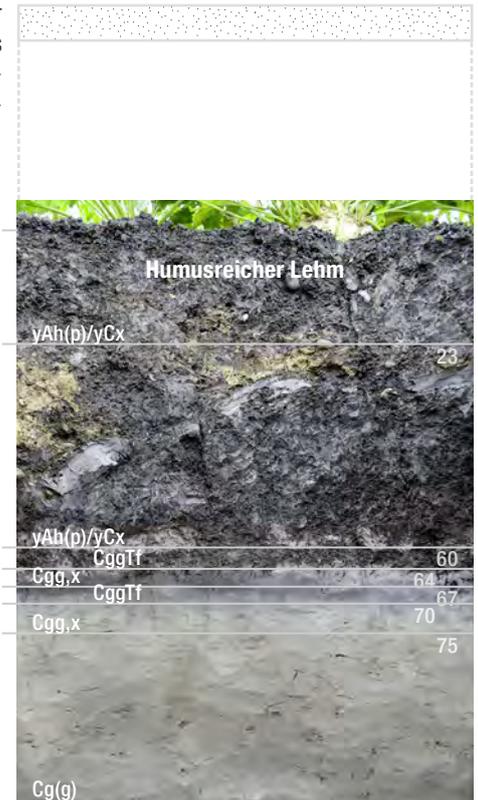
45
48
5.4
90.1

65
75
4.9
24.6

85
95
7.5
6.2

pH
H (Gew. %)
LD (g cm⁻³)
S, U, T (%)

B) Kulturlandaufwertung Überschütten



7.3
11.0
1.2
22, 42, 36

Aa-Material:
6.7
23.6
0.9

B(C)-Material:
7.6
2.3

yAb(p)/yCx

CggTf

Cgg,x

CggTf

Cgg,x

75

Cg(g)

23
60
64
67
70

Abbildung 7-9: Bodenprofilbeispiele von A) Torfboden-Referenz und B) Kulturlandaufwertung Überschütten. Dargestellt sind der für die Zeitperiode 1994 bis 2014 geschätzte Niveaulverlust inkl. zukünftige Restsackung (siehe Kasten 7-5) sowie horizont- spezifische Bodenkennwerte (die Bilder und ausführlichen Beschreibungen aller sechs Profile: Anhang 4).

Überschütten tonreicher geworden und damit schwieriger zu bearbeiten. Demgegenüber wird mit pflugloser Bewirtschaftung und reich-

lich organischem Dünger die Strukturbildung gefördert.

7.1.4 Wirkungsbeurteilung von Kulturlandaufwertungen:

Zusammenfassung von KÖNIG (2015)

Massnahmen zur Aufwertung von organischen Böden haben zum Ziel, die Torfsackung und den Abbau der organischen Substanz zu bremsen und damit den Flurabstand durch Tiefpflügen zu halten oder durch Übersanden bzw.

Überschütten zu erhöhen. Darüber hinaus sind günstige physikalische und chemische Bodeneigenschaften anzustreben. Dies gewährleistet auf lange Sicht eine uneingeschränkte landwirtschaftliche Nutzung (Abbildung 7-10).

Bodenparameter

Da organisches Material eine viel geringere Lagerungsdichte besitzt als mineralisches, wird im neu hergestellten Oberboden der Aufwertungsfläche eine annähernd doppelt so hohe Lagerungsdichte gemessen wie im entsprechenden Referenz-Torfboden (Tabelle 7-2). Mit $\leq 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ liegen die Werte in einem für die landwirtschaftliche Nutzung günstigen Bereich und sind mit den Lagerungsdichten mineralischer Böden vergleichbar (siehe Kapitel 3). In den unteren organischen Horizonten der überschütteten Flächen nimmt die Lagerungsdichte geringfügig zu, weil das organische Material durch die erhöhte Auflast zusammengedrückt

wird und sackt. Die geringen Lagerungsdichten in den am tiefsten und oft noch im Grundwasser liegenden organischen Schichten weisen darauf hin, dass hier noch Sackungspotential besteht.

Die Wasserleitfähigkeit in Torfböden ist witterungsabhängig: Bei Trockenheit entstehen schnell Schrumpfrisse, die zu einer hohen Wasserleitfähigkeit führen. Bei Regenwetter ist der Boden rasch gesättigt und leitet demzufolge das Wasser schlecht, was zu Staunässe führt. Da die Bodenproben am Ende einer Trockenperiode entnommen wurden, leiteten die organischen Horizonte und allgemein die Torf-



Abbildung 7-10: Spatenproben von fünf entwässerten Torfböden mit derselben Entstehungsgeschichte, aber unterschiedlicher Nutzung bzw. menschlicher Beeinflussung (von links nach rechts): kaum humifizierter Torf aus einer Windschutzhecke (ca. 95 % Humus); ackerbaulich genutzter Boden mit einem 30 cm mächtigen anmoorigen, stark humifizierten Bearbeitungshorizont (ca. 40 % Humus); tiefgepflügter, ackerbaulich genutzter Boden mit 33 cm humusreichem, neu hergestelltem Bearbeitungshorizont (12 % Humus, >33 cm 45 % Humus); übersandeter, ackerbaulich genutzter Boden (unvollständig abhumusiert, 23 cm übersandet, aufhumusiert) mit ca. 20 cm mächtigem, sehr humusreichem Bearbeitungshorizont (ca. 40 % Humus); nach unsachgemäßer Überschüttung mit skeletthaltigem Bodenaushub (verunreinigt mit Bauschutt) ackerbaulich genutzter Boden (unvollständig abhumusiert, 28 cm überschüttet, aufhumusiert) mit 15 cm mächtigem gemischtem Bearbeitungshorizont (ca. 40 % Humus)

böden (Ausnahme: oberer Horizont der tiefgepflügten Fläche) das Wasser schneller ab als die mineralischen und diejenigen der Aufwertungsflächen (Tabelle 7-2). Es ist anzunehmen, dass in einer Regenphase die Wasserleitfähigkeit in den mineralischen Horizonten langsamer abnimmt als in den organischen.

Während in der Bearbeitungsschicht der Torfböden-Referenzen sehr hohe N-Gehalte festzustellen sind (1.2 % bzw. 1.4 %), hat sich durch das zugeführte bzw. hochgepflügte mineralische Material der N_{tot} -Gehalt im Oberboden der Aufwertungsflächen massiv auf 0.2–0.4 % verringert (Tabelle 7-3). Trotzdem sind in Witzwil und Ins die N-Gehalte im Oberboden noch immer deutlich höher als in den mineralischen Böden der KABO-Ackerstandorte (Ø KABO-Standorte 0.2 %, siehe Kapitel 3). Entsprechend ist auch die N-Mineralisation im neu hergestellten Bearbeitungshorizont der Aufwertungsflächen deutlich geringer als in den N-reichen Referenz-Torfböden. Dies führt zu weniger Torfschwund (CO_2) und einer bere-

chenbaren, verlustärmeren N-Versorgung der Kulturen.

Der pH-Wert befindet sich an allen drei Standorten im neutralen bis alkalischen Bereich (Tabelle 7-2). Er ist sowohl in den Ober- als auch in den Unterböden der Aufwertungsflächen leicht höher als in den Referenz-Torfböden. Die beim Abbau des organischen Materials freigesetzten organischen Säuren senken den pH-Wert. Der Anstieg des Kalkgehalts durch Zufuhr von eher basischem Material auf den Aufwertungsflächen hat zu einer Erhöhung des pH-Wertes um eine halbe bis eine ganze Einheit geführt (Tabelle 7-2) und liegt in einem für die landwirtschaftliche Nutzung günstigen Bereich (Ø KABO-Standorte pH 6.5, siehe Kapitel 3). Die Nährstoffanionen N und P dagegen finden sich im neu hergestellten Bearbeitungshorizont in geringerer Menge als in den Referenz-Torfböden – analog zum Rückgang des Gehalts an organischem Material und höheren pH-Wert (Tabelle 7-3).

Tabelle 7-2: Medianwerte verschiedener Bodenparameter aus jeweils drei Profilbeprobungen an den Standorten Gampelen, Witzwil und Ins aus Ober- (0–30 cm) und Unterboden (30–50 cm) für die drei Kulturlandaufwertungen ÜS = Übersanden, TP = Tiefpflügen, ÜT = Überschütten und ihren Torfboden-Referenzen = TR
 ↓ = Richtung der relativen Veränderung (V) zwischen Referenz (TR = 100 %) und Kulturlandaufwertung
 h = humusreicher, t = tonreicher, s = schluffreicher Bereich des tiefgepflügten Unterbodens am Standort Witzwil

	Tiefe	Gampelen ¹			Witzwil ²			Ins ³					
		TR	ÜS	V (TR = 100 %)	TR	TP	V (TR = 100 %)	TR	ÜT	V (TR = 100 %)			
pH-Wert [H ₂ O]	0–30 cm	6.9	7.6	10	↑	6.9	7.6	10	↑	7.1	7.6	7	↑
	30–50 cm	6.8	7.1	4	↑	7.5	h: 7.2 t: 8.0 s: 8.1	-4 7 8	↓ ↑ ↑	6.9	6.7	-3	↓
Humusgehalt [%]	0–30 cm	15.4	2.7	-82	↓	22.9	6.3	-72	↓	12.4	6.4	-48	↓
	30–50 cm	40.7	19.4	-52	↓	2.0	h: 24.1 t: 3.0 s: 3.3	1105 50 65	↑ ↑ ↑	19.7	13.7	-30	↓
Kalkgehalt [%]	0–30 cm	0.0	1.0		↑	0.0	1.2		↑	0.1	0.3	200	↑
	30–50 cm	0.0	0.0	-		1.7	h: 0.1 t: 0.5 s: 1.4	-94 -71 -18	↓ ↓ ↓	0.0	0.1		↑
Lagerungsdichte [g cm ⁻³]	0–30 cm	0.7	1.3	86	↑	0.7	1.3	86	↑	0.8	1.2	50	↑
	30–50 cm	0.3	0.6	100	↑	1.3	h: 0.5 t: - s: 1.3	-62 - -	↓	0.8	0.9	13	↑
Gesättigte Wasserleitfähigkeit (pK _{sat}) [cm/d]	0–30 cm	351.8	38.0	-89	↓	137.1	622.7	354	↑	557.9	237.4	-57	↓
	30–50 cm	939.4	544.3	-42	↓	94.5	h: 198.1 t: - s: 110.1	110 - 17	↑	429.5	291.6	-32	↓
Sand %	0–30 cm	49.0 ⁴	79.6 ⁴	62	↑	20.4 ⁴	26.3	29	↑	32.8	36.7	12	↑
Schluff %		15.0 ⁴	9.5 ⁴	-37	↓	51.2 ⁴	58.2	14	↑	36.1	36.3	1	↑
Ton %		36.0 ⁴	10.9 ⁴	-70	↓	28.4 ⁴	15.5	-45	↓	31.1	27.0	-13	↓
Sand %	30–50 cm	26.5 ⁴	12.7 ⁴	-52	↓	18.3 ⁴	h: 30.6 t: 28.7 s: 38.7	67 57 111	↑ ↑ ↑	32.0	12.7	-60	↓
Schluff %		63.5 ⁴	36.0 ⁴	-43	↓	61.5 ⁴	h: 48.2 t: 54.7 s: 55.3	-22 -11 -10	↓ ↓ ↓	34.7	46.7	35	↑
Ton %		10.0 ⁴	51.3 ⁴	413	↑	20.3 ⁴	h: 21.3 t: 16.7 s: 6.0	5 -18 -70	↑ ↓ ↓	33.3	40.7	22	↑

¹ bei Profil d und f wurde der dünne Zwischenhorizont yAC zwischen erstem und drittem Horizont nicht beachtet, bei Profil d, e und f sind die Werte der beiden Horizonte Aa,p,b,x und Thf(x) gemittelt (Anhang 2)

² bei Profil d und e wurden die zwei Horizonte Ahp1 und Ahp2, bei Profil f die drei Horizonte Ahp1, Ahp2 und A(B)C(p) für den Oberbodenwert gemittelt (Ausnahmen: Lagerungsdichte und gesättigte Wasserleitfähigkeit), bei Profil a, b und c wurden die zwei Horizonte [Ah]/(B)Cg,x (von Profil a und c) Aa,p/[(B)Cg,x] (von Profil b) und (B)Cg für den Unterbodenwert gemittelt (Anhang 3)

³ bei Profil d und e wurde der dünne Zwischenhorizont yAh/yCx zwischen erstem und drittem Horizont nicht beachtet (Anhang 4)

⁴ Mittelwert von zwei Profilen

Tabelle 7-3: Medianwerte verschiedener Bodenparameter aus jeweils drei Profilbeprobungen an den Standorten Gampelen, Witzwil und Ins aus den beiden obersten Horizonten für die drei Kulturlandaufwertungen ÜS = Übersanden, TP = Tiefpflügen, ÜT = Überschütten und ihren Torfboden-Referenzen = TR
 ↓ = Richtung der relativen Veränderung (V) zwischen Referenz (TR = 100%) und Kulturlandaufwertung

	Horizont	Gampelen			Witzwil			Ins		
		TR	ÜS	V (TR = 100%)	TR	TP	V (TR = 100%)	TR	ÜT	V (TR = 100%)
Stickstofftotalgehalt N _{tot} [%]	1	1.2	0.2	-83 ↓	1.4	0.4	-71 ↓	1.2	0.4	-66 ↓
	2	2.2	0.1	-95 ↓	0.2	0.3	50 ↑	1.4	0.7	-50 ↓
Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis C:N	1	13.0	12.0	-8 ↓	17.0	13.0	-24 ↓	14.0	16.0	14 ↑
	2	16.0	1.0	-94 ↓	11.0	21.0	91 ↑	15.0	14.0	-7 ↓
Magnesiumtotalgehalt Mg _{tot} [%]	1	0.95	0.73	-23 ↓	0.67	1.10	64 ↑	0.96	1.28	33 ↑
	2	0.22	0.79	259 ↑	1.39	1.17	-16 ↓	0.86	1.16	35 ↑
Phosphortotalgehalt P _{tot} [%]	1	0.12	0.10	-17 ↓	0.15	0.10	-33 ↓	0.15	0.09	-40 ↓
	2	0.06	0.08	33 ↑	0.08	0.09	13 ↑	0.15	0.10	-33 ↓
Kaliumtotalgehalt K _{tot} [%]	1	0.98	1.34	37 ↑	1.00	1.12	12 ↑	1.47	1.76	20 ↑
	2	0.16	1.37	756 ↑	1.61	1.09	-32 ↓	1.33	1.64	23 ↑
Kationenaustauschkapazität KAK (KAK ohne H ⁺) ² [meq pro 100 g Boden]	1	34.8 (20.5)	3.6 ¹ (2.7)	-90 ↓ (-87) ↓	33.7 (20.8)	8.4 ¹ (6.1)	-75 ↓ (-71) ↓	31.3 ¹ (17.3)	9.8 ¹ (7.0)	-69 ↓ (-60) ↓
	2	62.1 (32.6)	20.8 ¹ (2.0)	-67 ↓ (-94) ↓	4.0 (4.0)	6.4 ¹ (5.4)	60 ↑ (35) ↑	41.2 ¹ (19.0)	15.6 ¹ (10.5)	-62 ↓ (-45) ↓

¹ Mittelwert von zwei Profilen

² H⁺ = Protonen

Tabelle 7-4: Bewertung (B) der Nutzungseignung (modifiziert nach FAL 24, 1997) der drei Kulturlandaufwertungen ÜS = Übersanden, TP = Tiefpflügen, ÜT = Überschütten und ihren Torfboden-Referenzen = TR
 Die Notenspanne der Bewertung reicht von 1 bis 3, das maximale Punktetotal beträgt 21.

	Gampelen				Witzwil				Ins			
	TR	B	ÜS	B	TR	B	TP	B	TR	B	ÜT	B
Wasserhaushalt ¹	G2	2	G1	3	G3	1	G3	1	G2	2	G2	2
Pflanzennutzbare Gründigkeit ²	mtg	1	mtg	1	mtg	1	mtg	1	mtg	1	mtg	1
Skelettgehalt ³ [Vol. %]	<10	3	<10	3	<10	3	<10	3	<10	3	<10	3
Gefüge ⁴	Kr, Sp	3	Ek, (Kr)	2	Kr, Sp	3	Kr, Sp	3	Kr, Sp	3	Po	2
Feinerde ⁵	L-tL	2	IS	2	tU	1	IU	2	L	3	L-tL	2
Humusgehalt ⁶ [Gew. %]	27.4	1	5.0	3	40.0	1	10.3	2	25.6	1	12.0	1
pH-Wert ⁷	6.9	3	7.7	3	7.0	3	7.6	3	7.1	3	7.6	3
Punkttotal		15		17		13		15		16		14

¹ Wasserhaushalt: G1 = grundfeucht (schwache Grundwasserzufuhr), G2 = schwach gleyig (Grundwassereinfluss ab 60 cm unter Terrain deutlich sichtbar), G3 = gleyig (Grundwassereinfluss zeitweise bis Oberfläche vorhanden)

² Pflanzennutzbare Gründigkeit: mtg = 50–70 cm (mässig tiefgründig)

³ Skelettgehalt: < 10 Vol. % = skelettfrei bis schwach skeletthaltig

⁴ Gefüge: Kr = Krümelgefüge, Sp = Subpolyederggefüge, Ek = Einzelkorngefüge, Po = Polyederggefüge

⁵ Zusammensetzung der Feinerde: IS = lehmiger Sand (0–50 % Schluff, 5–10 % Ton), L = Lehm (0–50 % Schluff, 20–30 % Ton), tL = toniger Lehm (0–50 % Schluff, 30–40 % Ton), IU = lehmiger Schluff (50–90 % Schluff, 10–30 % Ton), tU = toniger Schluff (50–70 % Schluff, 30–50 % Ton)

⁶ Humus oder organische Substanz: 2–5 Gew. % = schwach humos, 5–10 Gew. % = humos, 10–20 Gew. % = humusreich, 20–30 Gew. % = sehr humusreich, > 30 Gew. % = organisch

⁷ pH = Säuregrad nach H₂O-Methode: 6.8–7.2 = neutral, 7.3–7.6 = schwach alkalisch, 7.7–8.2 = alkalisch, > 8.2 stark alkalisch

Nutzungsseignung

Zur Überprüfung der landwirtschaftlichen Nutzungsseignung der Aufwertungs- und Referenz-Böden wurde das Beurteilungsschema für Landwirtschaftsböden (FAL 1997) weiterentwickelt. Dieses für mineralische Böden konzipierte Schema musste an organische Böden angepasst werden. Dabei wurden für verschiedene Bodeneigenschaften, je nach Fruchtbarkeitsstufe, Punkte vergeben: Je höher die Gesamtpunktzahl für einen Boden ausfällt, desto mehr Bodeneigenschaften liegen in einem für die landwirtschaftliche Nutzung günstigen Bereich (Tabelle 7-4).

Die meisten Bodeneigenschaften der verschiedenen Parzellen werden für die landwirtschaft-

liche Nutzung als gut befunden. Eine Ausnahme stellt der Humusgehalt der Torfböden dar: Dieser ist allgemein zu hoch und wird an allen Standorten mit 1 bewertet. Der optimale Humusgehalt liegt laut Bewertungsschema bei 2–10 % (FAL 1997). Diese schlechte Bewertung hängt mit den damit verbundenen negativen physikalischen Eigenschaften zusammen (Feinerde-Zusammensetzung und Gefüge). Im Fall Witzwil stellt die Gesamtheit der Massnahmen dennoch eine Verbesserung dar. Auf allen Parzellen ist die *Pflanzennutzbare Gründigkeit* klein; die durchgeführten Massnahmen haben in Bezug auf den Wasserhaushalt zu keiner Verbesserung geführt.

7.1.5 Schlussfolgerungen

Bei den beurteilten Bodenaufwertungen in Gampelen und Witzwil hat sich die landwirtschaftliche Nutzungsseignung verbessert, und diese können als erfolgreich betrachtet werden. Demgegenüber nahm bei der Überschüttung in Ins die landwirtschaftliche Nutzungsseignung aufgrund des Gefügebauaufbaus und der Zusammensetzung der Feinerde eher ab. Damit sich die finanziell hohen Aufwendungen lohnen, muss bei dieser Aufwertungsart die Mindestqualität des zugeführten Bodenaushubs von einer *Bodenkundlichen Baubegleitung* kontrolliert werden (Abbildung 7-11). Neben einer ausgewogenen, dem Verwertungsort angepassten Körnung muss der Bodenaushub frei sein von Schadstoffen oder Schadorganismen wie Erdmandelgras, Rübenkopffälchen oder Kohlhernie (siehe Kapitel 8.3).

Das Durchmischen von organischem mit mineralischem Bodenmaterial ermöglicht eine Verbesserung der Eigenschaften im neu hergestellten Bearbeitungshorizont und hilft, den Torf vor schnellem Abbau zu schützen. Anzustreben ist ein günstiges Verhältnis von mineralischen und rund 10 % organischen Teilen. Die Heterogenität der Flächen bezüglich Relief und Bodenzusammensetzung bleibt weiterhin bestehen und stellt ein Problem dar. Ebenso konnte der Wasserhaushalt nicht grundlegend verbessert werden.



Abbildung 7-11: Bei entwässerten Torfböden steht die langfristige Erhaltung der Fruchtfolgeflächen-Qualität im Zielkonflikt mit der wirtschaftlichen Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln. Landwirte und Bodenspezialisten bei der gemeinsamen Feldbegehung zur gegenseitigen Verständnissförderung (Areal der Anstalten Witzwil, 22. März 2016)

7.2 Gürbetal

7.2.1 Ausgangslage

Die südlich von Bern gelegenen Niedermoorflächen des *Gürbetals* wurden in den 1920er Jahren entwässert und für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung nutzbar gemacht. Auf den trockengelegten Flächen entwickelte sich eine intensive acker- und gemüsebauliche Nutzungsform: Das *Gürbetal* wurde zum «Chabisland». Entwässerung und landwirtschaftliche Produktion führten in den oberflächennahen

Schichten zu Setzungen und zum Abbau der organischen Bodensubstanz, was zu einer Erhöhung des volumenspezifischen Eigengewichts der obersten Bodenschicht führte. Daraus resultierte auf tieftorfigen Flächen ein Niveauverlust von rund 1 m und folglich ein immer geringer werdender Flurabstand. Grossflächige Vernässungen führen heute zu massiven Bewirtschaftungserschwernissen.

7.2.2 Torfkartierung: Zusammenfassung von CASPERS (2013)

Als Beratungsgrundlage wurde 2013 entlang von ausgewählten Transekten im Gebiet der Gemeinden Mühlethurnen, Kirchenthurnen und Kaufdorf eine kleinflächige Torfkartierung durchgeführt.

Der Untergrund dieser zwischen Belpberg und Längenberg gelegenen, wannenförmigen Mulde besteht aus kaum konsolidierten Seesedimenten, die mit bis zu 3.5 m mächtigen Torfschichten verzahnt und überlagert sind. Infolge der Entwässerung und intensiver landwirtschaftlicher Nutzung bildete sich aus der obersten Torfschicht ein bis zu 40 cm mächtiger, schluffiger und humusreicher Bearbeitungshorizont. In dieser feinkörnigen Schicht ist der Humusabbau weit fortgeschritten. Der Torf der tiefer gelegenen Schichten wurde hingegen wenig bis kaum abgebaut, was an seiner geringen Humifizierung ersichtlich ist (Abbildung 7-12).

Mit den Erkenntnissen aus der Torfkartierung wurden Vorschläge zur Verbesserung und Sicherung einer dem Standort angepassten landwirtschaftlichen Nutzung erarbeitet und den Landwirten, Planern und Behördenvertretern vorgestellt. Es stehen drei Szenarien zur Diskussion:

1. Dem geringen Flurabstand wird mit einer Tieferlegung der Drainage begegnet: Damit wird der Torf tiefgründiger entwässert, was mit weniger Auftrieb in den ehemals wassergesättigten Torfschichten und mit einer Erhöhung der Auflast auf den trockengelegten Torfkörper verbunden ist. So werden neue Sackungen in den kaum konsolidierten Torf- und den darunterliegenden Seesedimenten ausgelöst. Grundsätzlich bleibt die Tieferlegung der Drainage nur so lange eine Option, wie noch eine ausreichende Vorflut gegeben ist.



Abbildung 7-12: Bohrungen bringen es an den Tag: Während ihrer Entstehung haben sich im *Gürbetal* bis zu 3.5 m mächtige, locker gelagerte Torfschichten mit kaum konsolidierten Seesedimenten verzahnt.

2. Dem geringen Flurabstand wird mit einem Auftrag von unverschmutztem Ober- und Unterboden oder Sand begegnet: Wegen des höheren spezifischen Gewichts von Mineralboden erhöht dieses Vorgehen die oben beschriebenen Sackungen erheblich und könnte darüber hinaus bei grossen Aufschüttmengen zu lokalen Grundbrüchen führen. Die Folgen davon sind ungleiches Setzen des Untergrundes und dadurch unebene Oberflächen sowie Versinken des aufgetragenen Materials.
3. Die Reduktion der Torfsackung kann durch hohe Wasserstände erreicht werden: Je geringmächtiger die durchlüftete Torfschicht

ist, desto geringer ist die Sackung. Bei einem hohen Wasserstand muss die Bewirtschaftung extensiviert werden, wobei gewisse Flächen nur noch als Grünland genutzt werden können.

Die Studie empfiehlt, die eher in der Mitte des *Gürbetals* gelegenen, tieftorfigen Flächen mit weniger als 40 cm Schluffauflage als Dauergrünland zu nutzen (Tabelle 7-5). An den Talrändern hingegen befinden sich vor allem flachtorfige Flächen, die mit einer mächtigeren Auflage als 40 cm aus schluffigem Material von den Hängen überdeckt sind. Hier kann eine Nutzung als Ackerland weiterhin empfohlen werden.

Tabelle 7-5: Empfehlung für eine standortangepasste Bewirtschaftung der entwässerten Torfböden im Gürbetal

Schluffauflage an der Oberfläche	Nutzung	Bearbeitungstiefe	Bestellverfahren
20–29 cm	Dauergrünland	≤ 5 cm	nur Schlitzsaat
30–39 cm	Dauergrünland	≤ 13–15cm	flaches Pflügen oder Schlitzsaat
≥ 40 cm	Acker, Grünland	≤ 25 cm	Pflügen

7.2.3 Schlussfolgerungen

Durch Torfsackung haben sich die Standorteigenschaften der in den 1920er Jahren entwässerten und seither landwirtschaftlich genutzten, tieftorfigen Niedermoorflächen im *Gürbetal* negativ entwickelt. Eine Tieferlegung der Drainage stellt nur eine vorübergehende Massnahme zur Lösung dieses Problems dar und verkürzt die Nutzungsdauer dieser Flächen erheblich. Aufgrund der nicht konsolidierten Seesedimente und Torfe im Untergrund führt der Auftrag von mineralischem

Material in der obersten Schicht zu einer Erhöhung des Eigengewichts, was zu inhomogenen Setzungsprozessen und unebenen Oberflächen führt. Auf den tieftorfigen Flächen in der Talmitte scheint ein Umdenken bezüglich Bewirtschaftungsintensität angebracht zu sein: Die zukünftige Nutzung (Acker- bzw. Futterbau) sowie der Wasserstand sind abhängig von der Mächtigkeit der Schluffauflage über dem Torfkörper (Tabelle 7-5).

7.3 Ausblick

Anforderungen und Vorgehen für künftige Kulturlandaufwertungen auf entwässerten Torfböden sind komplex und bedürfen entsprechender Vorabklärungen. Entsprechend der Abbildung 6-1 ist die Grundlage sämtlicher Entscheidungen zu Bodenaufwertungen die exakt erhobene Bodeninformation: Mächtigkeit der Torfschicht, Abbaugrad des Torfes, Zusammensetzung des Untergrundmaterials sowie Flurabstand müssen für Eignungsabklärung, Planung und Durchführung bekannt sein.

Die heute empfohlenen Massnahmen zur Kulturlandaufwertung, inkl. deren Gefahren, sind in Tabelle 7-6 beschrieben. Alle aufgeführten Massnahmen können, je nach standörtlichen Gegebenheiten, als Einzelmassnahme oder kombiniert ausgeführt werden. Neben Bodenaufwertungsmassnahmen ist auf eini-

gen Flächen auch ein Umdenken bezüglich der Bewirtschaftungsintensität angebracht.

Das Konzept des Projekts *Bodennutzung zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Verbesserung des Wasserhaushaltes* (LANAT 2014) sieht nach Erhebung der Bodendaten in der Prognosekarte *Grosses Moos/Seeland* (siehe Kapitel 6.5.3) vier Kategorien vor:

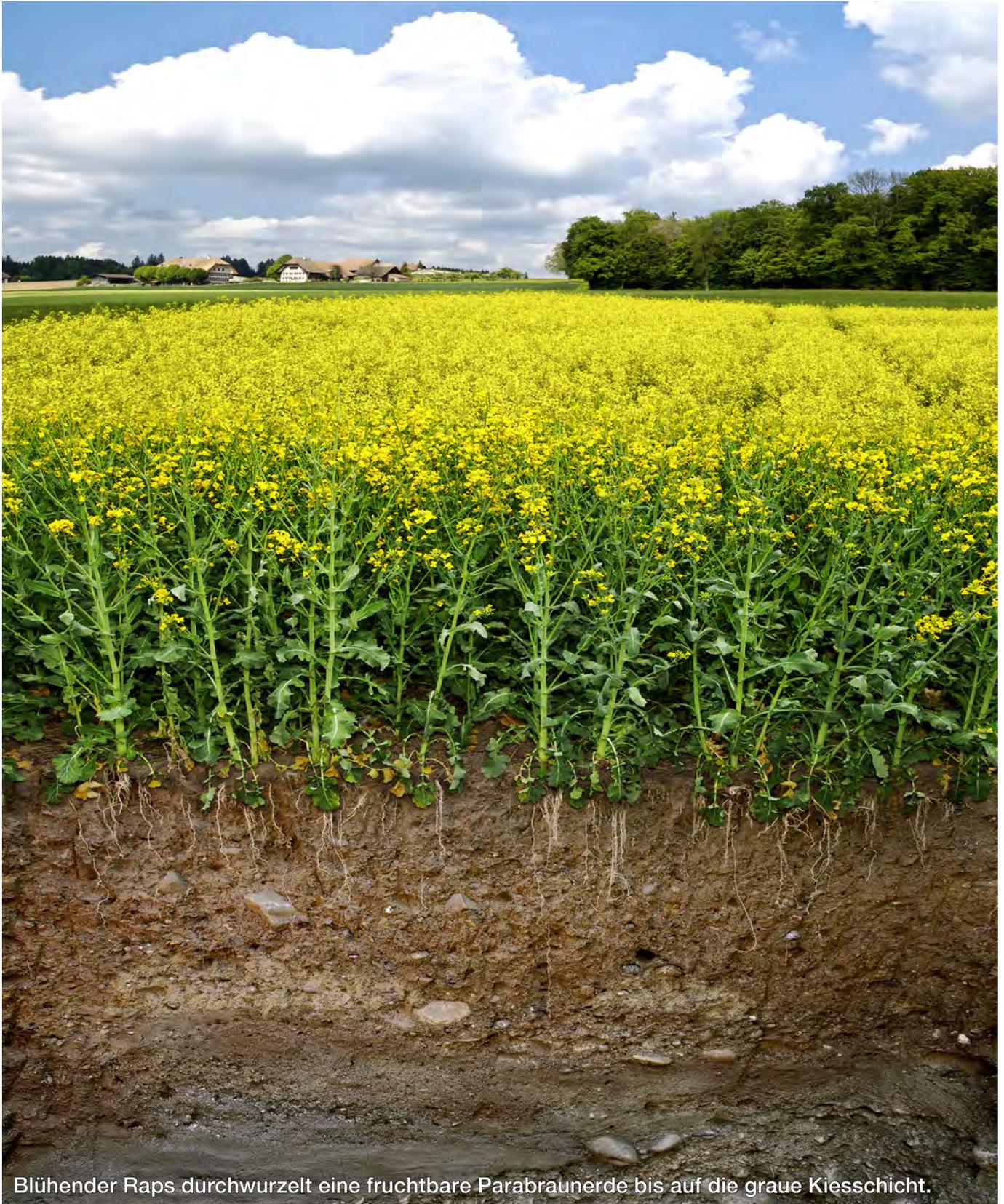
1. Keine Massnahmen notwendig; die Bodenfruchtbarkeit kann unter den aktuellen Bedingungen (Bewirtschaftungsintensität etc.) erhalten werden.
2. Verbesserungsmassnahmen sind gemäss Tabelle 7-6 angebracht.

- 3. Anpassung der Bewirtschaftung, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten oder zu fördern.
 - 4. Keine Massnahmen möglich; der Boden kann langfristig nicht für die intensive landwirtschaftliche Produktion genutzt werden.
- Nach der Abklärung der Schutz- und Nutzungsbedürfnisse und einer Kategorisierung könnten in Planung befindliche Projekte zur Boden- bzw. Kulturlandaufwertung in absehbarer Zeit umgesetzt werden.

Tabelle 7-6: Auf Basis von Tabelle 7-1 aktualisierte Zusammenstellung möglicher Kulturlandaufwertungsmassnahmen bei entwässerten Torfböden (Stand: Januar 2017). Je nach Standort sind diese als Einzelmassnahmen oder kombiniert in adäquater Reihenfolge umzusetzen. Im Falle einer Unterbodenverdichtung ist mit einem gezogenen Gerät eine Lockerung durchzuführen.

Massnahme	Beschreibung	Ziel	Einsatzprinzip, Probleme
Tiefpflügen oder Durchmischen	Durchmischen von mineralischem Untergrund mit organischem Oberbodenmaterial (sofern möglich Volumenregel: ein Teil mineralisch und ein Teil organisch)	Aufbrechen schlecht wasserdurchlässiger Schichten im Untergrund und Schutz vor Torfabbau im Oberboden, indem im Bearbeitungshorizont ein Bodensubstrat mit deutlich weniger organischer Substanz aufgebaut wird.	Einsatz den standörtlichen Gegebenheiten anpassen (v. a. Mächtigkeit, Zusammensetzung und Abfolge der organischen und mineralischen Schichten); evtl. wasserstauende Schicht zu mächtig oder zerstörte Drainage oder Verdichtungsgefahr infolge Überlockerung
Übersanden oder Überschütten	Auftragen von ortsfremd abgetragenen Bodenmaterial oder Sand, evtl. mit anschliessendem Durchmischen des vorhandenen Oberbodens (Torfs)	Niveau-Erhöhung (grösserer Flurabstand) sowie Anpassung und Schutz vor Torfabbau, indem ein neuer Oberboden bzw. Bearbeitungshorizont mit deutlich weniger organischer Substanz aufgetragen bzw. aufgebaut wird.	Einsatz den standörtlichen Gegebenheiten anpassen; evtl. Verdichtung infolge Materialzufuhr/-verteilung oder zerstörte Drainage oder Qualität des zugeführten Materials ungenügend
Planieren	Ausnivellieren der Bodenoberfläche zur Vermeidung wassersammelnder Senken (Syphonbildung), dadurch verbesserte Entwässerung	Auffüllen von wassersammelnden Senken mit (torfhaltigem) Bodenmaterial von erhöhten Stellen	Einsatz als Einzelmassnahme oft ungenügend, da Gefahr der Kumulierung von torfhaltigem Oberboden in aufgefüllten Senken; erst nach tiefem Durchmischen sinnvoll (aber Verdichtungsgefahr nach Überlockerung)
Drainieren	Neuanlage oder Erneuerung der Entwässerung	Verbesserung der Entwässerung durch Einlegen der «Sauger» in wasserführende Schicht und Aufheben der Syphonbildungen in Senken	Einsatz als Einzelmassnahme oft ungenügend; am Ende von Bodenaufwertungen meist unumgänglich

8 Boden und Bauen



Blühender Raps durchwurzelt eine fruchtbare Parabraunerde bis auf die graue Kiesschicht.

8 Boden und Bauen

Werden die Auflagen des Bodenschutzes auf grösseren Baustellen heute weitgehend umgesetzt, besteht bei kleineren Baustellen noch Handlungsbedarf. Sofern der Bodenschutz rechtzeitig in den Planungsprozess miteinbezogen wird, können Grossbaustellen die Auflagen in der Regel ohne grössere Bauverzögerung und ohne wesentliche Mehrkosten einhalten. Die neuen Schwerpunkte des baulichen Bodenschutzes liegen auf kantonaler Ebene bei der bestmöglichen Wiederverwendung des abgetragenen Ober- und Unterbodens. Um einen fachgerechten Umgang mit dem Boden sicherzustellen, wird auf den Einbezug einer *Bodenkundlichen Baubegleitung* auf der Baustelle und ein vorgängig erstelltes *Bodenschutzkonzept* gesetzt. Darin werden u. a. die bodenkundlichen Aufnahmen für die Erhebung des Ausgangszustandes festgehalten sowie die projektspezifischen Bodenschutzmassnahmen geplant und festgelegt. Auf Bundesebene werden dazu neue Vollzugshilfen ausgearbeitet.

Natürlich gewachsener Boden stellt eine knappe, nicht erneuerbare Ressource dar. Er ist Produktionsgrundlage für gesunde Nahrungsmittel und Holz, Filtersubstrat für sauberes Trinkwasser, Abbaustätte von Kies und Sand, Lebensraum einer grossen Biodiversität und Gestaltungselement attraktiver Landschaften; er erfüllt damit ökologische und ökonomische Funktionen.

Eine anhaltend grosse Bautätigkeit verbraucht unwiederbringlich natürlich gewachsene Böden. In Bevölkerung und Politik wächst der Ruf nach mehr Schutz: Revision des eidgenössischen Raumplanungsgesetzes, kantonale Kulturlandinitiativen, Revision der kantonal-bernerischen Baugesetzgebung und vermehrter Schutz des Kulturlandes im kantonalen Richtplan sind dafür die wichtigsten Eckpfeiler.

8.1 Bodenaufbau und Begriffe



Oberboden (A-Horizont):
oberste dunkle Bodenschicht mit grösster (mikro-) biologischer Aktivität, wurzelreich; Ort der stärksten Humus- und Strukturbildung, nährstoffreich

Unterboden (B-Horizont):
wenig durchwurzelt und belebt, geringer Humusanteil; geprägt von Verwitterungs- und Verlagerungsvorgängen. Die Mächtigkeit ist der entscheidende Faktor für den Wasser- und Lufthaushalt.

Untergrund (C-Horizont):
un- oder vorverwittertes Muttergestein, Ausgangsmaterial der Bodenbildung

Das Wissen um den Bodenaufbau gewinnt seit der Einführung des *Umweltschutzgesetzes* (USG 1983) an Bedeutung und wird gebräuchlich (VOL 2009). Inzwischen ist auf Grossbaustellen das Wissen verbreitet, dass bei Erdarbeiten die verschiedenen Horizonte getrennt abgetragen werden müssen: Ober- und Unterboden und danach der Untergrund. Diese Schichten sind unterschiedlich zusammengesetzt, erfüllen verschiedene Funktionen und sind daher als solche separat zu behandeln (Abbildung 8-1). Als Boden im Sinne des Umweltschutzes werden jedoch nur die obersten beiden Horizonte, der Ober- und Unterboden, verstanden. Diese Trennung ist sowohl beim Abtrag als auch beim Wiedereinbau für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit von grosser Bedeutung.

Auf Baustellen werden noch heute Begriffe wie «Bodenaushub» oder «Aushub» nicht immer eindeutig verwendet: «Bodenaushub» bezeichnet sowohl abgetragenen (abhumu-

Abbildung 8-1: Bodenprofil von einem Braunerde-Gley mit Beschreibung von Oberboden, Unterboden und Untergrund

sierten) Oberboden als auch abgetragenen Unterboden; mit «Aushub» hingegen sollte nur Untergrundmaterial bezeichnet werden (Tabelle 8-1). Der unterschiedliche Gebrauch der Begriffe führt immer wieder zu Missverständnissen. Um dies zu verhindern, wird nicht mehr von Bodenaushub, sondern von abgetragenen Ober- und Unterboden gesprochen. Dies wurde auch im Rahmen der neuen *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen* (VVEA 2015) in der Gesetzgebung verankert.

Tabelle 8-1: Bodenkundliche Begriffe der VBBo (1998) und entsprechende verwertungstechnische Begriffe der VVEA (2015)

Bodenkundlicher Begriff der VBBo	Verwertungstechnischer Begriff der VVEA
Oberboden (A-Horizont)	abgetragener Oberboden
Unterboden (B-Horizont)	abgetragener Unterboden
Untergrund (C-Horizont)	Aushubmaterial

8.2 Bodenkundliche Baubegleitung erstellt Bodenschutzkonzept

Die Bodenkundliche Baubegleitung (BBB) begleitet ein Bauprojekt von der Planungsphase bis zur Bauabgabe inkl. die Zeit der Folgebewirtschaftung (Kasten 8-1). Sie unterstützt die Bauleitung bei der Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen und dient innerhalb eines Bauprojekts als Beauftragter zur Umsetzung des Bodenschutzes. Dieser Prozess von der Projektentwicklung bis zur Rückgabe des temporär beanspruchten Bodens bzw. der wiederhergestellten Eingriffsflächen wurde im vom BAFU neu erstellten Umwelt-Wissen *Boden und Bauen* (2015) festgehalten. Die Aufgaben der BBB sind in einem Pflichtenheft definiert und im Merkblatt *Anforderungen an ein Pflichtenheft der Bodenkundlichen Baubegleitung BBB* des Cercle Sol der Nordwestschweiz (2016) geregelt.

Die Anliegen des Bodenschutzes müssen bereits in die Ausschreibungsunterlagen (Submission) eines Bauvorhabens integriert werden. Deshalb ist es nötig, die BBB bereits in der Planungsphase des Bauwerkes miteinzubeziehen. Die BBB erarbeitet u. a. ein an die Situation angepasstes *Bodenschutzkonzept*: Es werden die Eigenschaften des örtlich vorhandenen Bodens in einer Bodenkarte erfasst (Erhebung des Ist-Zustands) und die für die Planung relevanten Erdarbeiten beschrieben. Es sind dies z. B. das Anlegen der vorgängig geplanten Baupisten und Installationsplätze, der bodenschonende Ab- und Auftrag von Ober- und Unterboden, das fachgerechte Anlegen und Planen von Bodenzwischenlagern sowie die Wiederverwertung. Auch die Folgebewirtschaftung der frisch rekultivierten Fläche wird genau definiert.

Wird Boden verschoben, muss dieser vor physikalischen, chemischen und biologischen Veränderungen seiner natürlichen Beschaffenheit geschützt werden. Baugesuche mit Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) enthalten einen Umweltverträglichkeitsbericht (UVB). Darin ist im Bereich Boden immer häufiger ein *Bodenschutzkonzept* integriert. Diese Praxis hat sich

Kasten 8-1: Bodenkundliche Baubegleitung (BBB)

Bodenkundliche Baubegleitungen beraten Baufachleute von der Planung bis zur Bauabgabe. Sie werden in speziellen Kursen aus- und weitergebildet. Die BBB sorgt für einen Boden schonenden Umgang, um die Gefahr einer Abnahme der Bodenfruchtbarkeit zu verhindern.

etabliert, weil die Vorgaben an einen UVB klar definiert sind und die Projektplanung durch spezialisierte Ingenieurbüros umgesetzt wird.

In Baugesuchen ohne UVP fehlt häufig ein relevantes Konzept zum Bodenschutz. Dies führt dazu, dass Bodenschutzauflagen nachträglich erarbeitet und eingereicht werden müssen, was zu allfälligen Mehrkosten, Verzögerungen oder gar Vertragsänderungen zwischen Bauherrschaft und Bauunternehmen führen kann. Der Vollzug des Bodenschutzes wird daher oft als unverhältnismässig empfunden. Um der Bauherrschaft frühzeitig Unterstützung geben zu können, indem aufgezeigt wird, was ein *Bodenschutzkonzept* ist und welche Anforderungen damit verknüpft sind, ist anfangs 2015 das Merkblatt *Anforderungen Bodenschutzkonzept* herausgegeben worden. Dieses konnte 2016 durch das gemeinsame Merkblatt *Anforderungen an ein Bodenschutzkonzept* der Kantone der Nordwestschweiz und Luzern abgelöst werden, womit die Arbeit der BBB vereinfacht wird.

Bei grösseren Bauprojekten stehen den Mehrkosten der BBB direkt die fachliche Entlastung der Bauleitung und indirekt die langfristige Fruchtbarkeit des von der Baustelle betroffenen Bodens gegenüber. Dies betrifft sowohl die temporär beanspruchten Böden als auch den abgetragenen Ober- und Unterboden.

Ist das Bauwerk erstellt, beschreibt die BBB in einem Schlussbericht die Erdarbeiten sowie die erfüllten und allenfalls nicht erfüllten Auflagen und Bedingungen, wobei die nicht erfüllten bereits während des Baus mit der Fach-

stelle abgesprochen werden. Im Bericht werden alternative Vorgehensweisen ausformuliert und begründet sowie insgesamt die Erdarbeiten be-

urteilt. Auf diesen Schlussbericht kann bei Beschwerdeverfahren zurückgegriffen werden.

8.3 Verwertung von abgetragenen Ober- und Unterboden

Wegen der anhaltend intensiven baulichen Tätigkeit fallen grosse Mengen an verwertbarem, sauberem, abgetragenen Ober- und Unterboden an. Diese nicht erneuerbare Ressource wurde aus Ermangelung umsichtiger Lösungen bisher grösstenteils in Deponien entsorgt. Damit geht nicht nur Boden für immer verloren, sondern es wird auch teuer und knapper Deponieraum verschwendet. Mit dem Inkrafttreten der VVEA wird expliziter als bisher vorgeschrieben, dass der abgetragene Ober- und Unterboden möglichst vollständig verwertet werden muss, sofern dieser frei von Schad- und Fremdstoffen sowie invasiven und gebietsfremden Organismen ist. Seine Weiterbehandlung erfolgt gemäss *Verordnung über Belastungen des Bodens* (VBBo 1998) (Abbildung 8-2).

Bei der Verwertungspflicht von anfallendem Ober- und Unterboden sind primär anthropogene degradierte Böden mit ausgewiesenen Defiziten die aufzuwertenden Zielflächen. Die gewünschten Verbesserungen werden nur durch eine fachgerechte Ausführung der Terrainveränderungen erzielt. Aus diesem Grund setzten 2015 das Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR), das Amt für Wasser und Abfall (AWA) und das Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT) die Richtlinien *Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen* und das dazugehörige Merkblatt *Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung* in Kraft. Damit wurde die kantonale Bewilligungspraxis für landwirtschaftlich begründete Terrainveränderungen bzw. deren örtliche und bauliche Durchführung angepasst. Um die erwähnte fachgerechte Ausführung zu gewährleisten, müssen Terrainveränderungen mit einem erheblichen Einfluss auf die Bodenfunktionen ausserhalb der Bauzone ab 2000 m² von einer BBB begleitet werden. Diese erstellt das zusammen mit dem Baugesuch einzureichende *Bodenschutzkonzept* (Art. 34a BauV, ab 01.04.2017).

Der Umfang einer Terrainveränderung muss im Verhältnis zum vorhandenen Problem liegen (Verhältnismässigkeitsprinzip, schweizerischer Rechtsgrundsatz). Damit wertvoller abgetragener Ober- und Unterboden zielorientiert verwertet werden kann, sind entsprechende Projekte nur dann bewilligungsfähig, wenn ein bodenkundliches Problem vorliegt und durch die Terrainveränderung eine Bodenaufwertung zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung bzw. zur Erreichung der Fruchtfolgeflächen-Qualität resultiert.

Nach dem baulichen Eingriff reagieren frisch rekultivierte Flächen sehr empfindlich auf physikalische Belastungen. Damit solche Böden wieder tragfähig und damit uneingeschränkt landwirtschaftlich genutzt werden können, müssen sie über einige Jahre ihre Struktur stabilisieren und biologische Aktivität aufbauen. Dies geschieht über eine geeignete Folgebewirtschaftung.



Abbildung 8-2: Verwertung von abgetragenen Ober- und Unterboden: Der auf dem Untergrund stehende Bagger baut Unter- und Oberboden separat im Streifenverfahren ein.

8.4 Schlussfolgerungen

Der Flächenverlust von Kulturland muss im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung eingedämmt werden. Wenn gebaut wird, ist nur so viel Boden wie nötig zu beanspruchen. Dabei ist der Boden sorgsam abzutragen, zwischenzulagern und wiederzuverwenden.

Um den Verlust von Kulturland teilweise zu kompensieren, wird dank der neuen gesetzlichen Grundlage wertvoller abgetragener Ober- und Unterboden nicht mehr in Deponien entsorgt, sondern für die Aufwertung anthropogen

beeinträchtigter Böden verwertet. Fachgerecht durchgeführt, wird so fruchtbarer Boden gewonnen.

Als Grundlage für einen Boden schonenden Umgang bei der Ausführung aller Arbeitsschritte während der Bauphase dienen die neuen Richtlinien und Merkblätter. Wer Bauprojekte umsetzen will, muss den Bodenschutz bereits bei der Planung miteinbeziehen. Es bedarf dabei der Unterstützung einer BBB.

8.5 Ausblick

Die nächste grosse Herausforderung wird sein, eine zeitnahe und koordinierte Planung bzw. Ausführung zwischen anfallendem Ober- und Unterboden und geeigneter Terrainveränderung (Verwertung) zu erreichen. Zur praxistauglichen

Steuerung von Bodenangebot und -nachfrage ist das Vorhaben einer *Drehscheibe Böden* mit regionalen *Bodenumschlagplätzen* im Sinne einer Branchenlösung zusammen mit Partnern aus Wirtschaft und Verwaltung zu entwickeln.

9 Regeneration von Fahrspuren in Waldböden



9 Regeneration von Fahrspuren in Waldböden

Für eine effiziente Bewirtschaftung des Waldes sind schwere Maschinen unentbehrlich. Werden diese bei ungünstigen Bodenfeuchte-Verhältnissen eingesetzt, steigt das Risiko von Bodenverdichtungen. Dadurch werden Baumwachstum und Naturverjüngung eingeschränkt.

Als Indikator für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes im Wald dienen drei klar definierte Fahrspurtypen. Eine grossflächige Kartierung der Fahrspuren in einem Waldgebiet im Berner Mittelland lässt auf ein weitgehend schonendes Befahren, vornehmlich auf vorbereiteten Rückegassen, schliessen.

Eine europaweit einmalige Langzeitstudie sollte unter definierten Rahmenbedingungen den Grad der Bodenbeeinträchtigung sowie den Erfolg einer natürlichen Regeneration in den verdichteten Fahrspuren aufzeigen. Im Oberboden reduzierten sich Gesamtporenvolumen und Wasserleitfähigkeit bei sehr starker Verdichtung markant. Die natürliche biologische Regeneration zeigte sich in der Veränderung der mikrobiellen Lebensgemeinschaft: Mykorrhiza-Pilze und Sauerstoff liebende aerobe Bakterien wurden durch anaerobe Arten, welche klimaschädliches Lachgas und Methan produzieren, verdrängt. Acht Jahre nach dem Versuch erholten sich die Bakterien fast vollständig, bei den Mykorrhiza-Pilzen war dies jedoch noch nicht der Fall. Die Mikroorganismen erweisen sich damit als aussagekräftiger Indikator für die Beurteilung der Bodenqualität.

Eine effiziente Holzernte führt unweigerlich zu befahrenen Waldböden. Je nach Witterung wird dabei durch die Einsatzgewichte der Maschinen der Boden tiefgreifend und lang anhaltend verändert, wichtige Bodenfunktionen wie z. B. der Wasser- und Lufthaushalt, werden beeinträchtigt. Das Umweltschutzgesetz der Schweiz verlangt jedoch auch auf den Produktionsflächen im Wald die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (LÜSCHER et al. 2016). Der Boden

muss genügend durchlüftete Hohlräume enthalten, damit Mikroorganismen, Regenwürmer und andere Bodenlebewesen wirken, Wurzeln ungehemmt wachsen, Wasser versickern und Humus auf- bzw. abgebaut werden kann; der Stoffkreislauf bleibt damit geschlossen. Im Wald sollen Baumwachstum und Naturverjüngung nicht durch gehemmtes Wurzelwachstum und unzureichendes Keimbett gemindert werden.

9.1 Physikalischer Bodenschutz im Wald

Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht sollte der Begriff der *langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit nach physikalischer Belastung des Bodens* umschrieben werden (USG 1983, VBBo 1998). Für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes im Wald wären verbindliche, nachvollziehbare ökologische Vorgaben sinnvoll (Abbildung

9-1): Unterhalb dieses Schwellenwertes kann sich ein Waldboden nach physikalischer Belastung noch regenerieren und es entstehen keine dauerhaften Bodenschäden (LÜSCHER et al. 2016), oberhalb dieses Wertes wird keine natürliche Regeneration stattfinden (FREY und HARTMANN 2013).

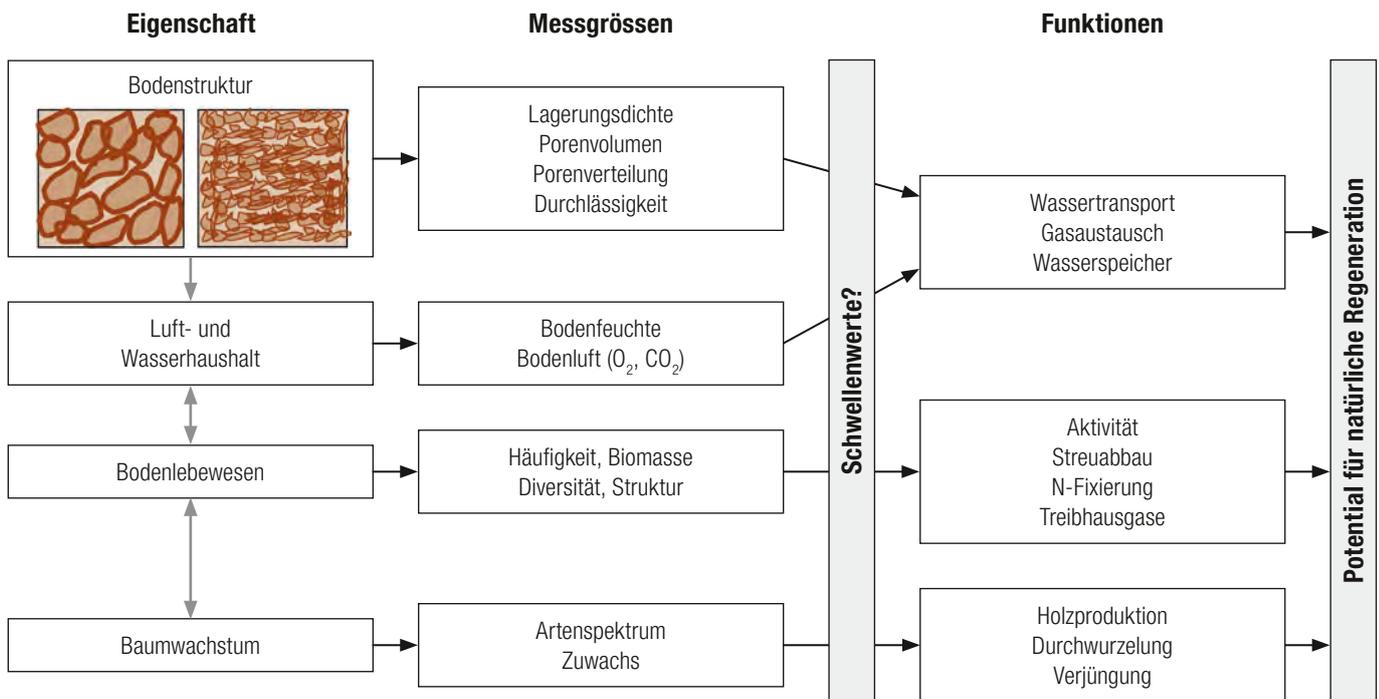


Abbildung 9-1: Zusammenhang zwischen standorttypischen Eigenschaften, entsprechenden Funktionen und die Art, wie sie durch mechanische Belastungen schwerer Forstmaschinen beeinflusst werden. Für die Charakterisierung von Bodenstrukturstörungen werden neben physikalischen Kenngrößen auch solche zum Bodenlufthaushalt, zu Bodenbiologie und Baumphysiologie verwendet. Das Ziel sind Schwellenwerte, oberhalb derer die Bodenfunktionen erhalten bleiben und somit Regenerationschancen bestehen.

9.2 Typisierung vorhandener Fahrspuren

Für die Kommunikation zum physikalischen Bodenschutz im Wald wurde eine einfach nachvollziehbare Typisierung vorhandener Fahrspuren anhand optisch gut erkennbarer morphologischer Merkmale erarbeitet (LÜSCHER 2010). Generell können die Fahrspuren in drei Kategorien eingeteilt werden (Abbildung 9-2 A): leicht (Spurtyp 1), mittel (Spurtyp 2 mit teilweise verschobenem Oberboden und einer Fahrrille von wenigen Zentimetern) und schwer (Spurtyp 3

mit komplett verschobenem Oberboden, einer Fahrrille von mehr als zehn Zentimetern und seitlichen Aufwölbungen). Diese Spurtypen sollen in der Waldbewirtschaftung als Indikatoren für den Bodenschutz dienen. Spurtyp 1 ist ein Warnzeichen, bei Spurtyp 3 muss saniert werden. Die Beurteilung einer Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit ist dadurch nachvollziehbar und einfach.

9.3 Fahrspurkartierung auf Lotharflächen

In unterschiedlichen Regionen des schweizerischen Mittellandes wurden auf Lotharflächen alle noch erkennbaren Fahrspuren im befahrbaren Gelände kartiert. Dies ermöglicht einen Einblick in die aktuelle Situation der Fahrspurdichte und Spurtypenanteile. Im Waldgebiet Forst *Heitere-Bruucherer* im Berner Mittelland wurden auf einer Fläche von 95 ha nach der Holzernte alle vorhandenen Fahrspuren kartiert (LÜSCHER et al. 2016). Die Resultate lassen auf ein schonendes Befahren schliessen (Abbildung 9-2 B), da hier der Waldboden seit längerem ziemlich systematisch nur auf angelegten Rückegassen befahren wird. Der mehrheitlich vorherrschende Spurtyp 1 (ca. 1.6% der Flä-

che) lässt darauf schliessen, dass dies meistens bei günstiger Bodenfeuchte geschah. Die an einzelnen Stellen ersichtliche Häufung von Fahrspuren der Typen 2 und 3 (ca. 1.2% der Fläche) ist auf die Ernte des geworfenen Holzes zurückzuführen. Hier wurden in kurzer Zeit grosse Holzmenngen über die gleiche Rückegasse bewegt, was bei einem Befahren bei ungünstigen Witterungsverhältnissen zu diesem Spurtyp führte.

Zur einfachen morphologischen Typisierung von Fahrspuren stehen bodenphysikalische Laboranalysen zur Verfügung (FREY et al. 2009, 2010). Zur besseren Charakterisierung

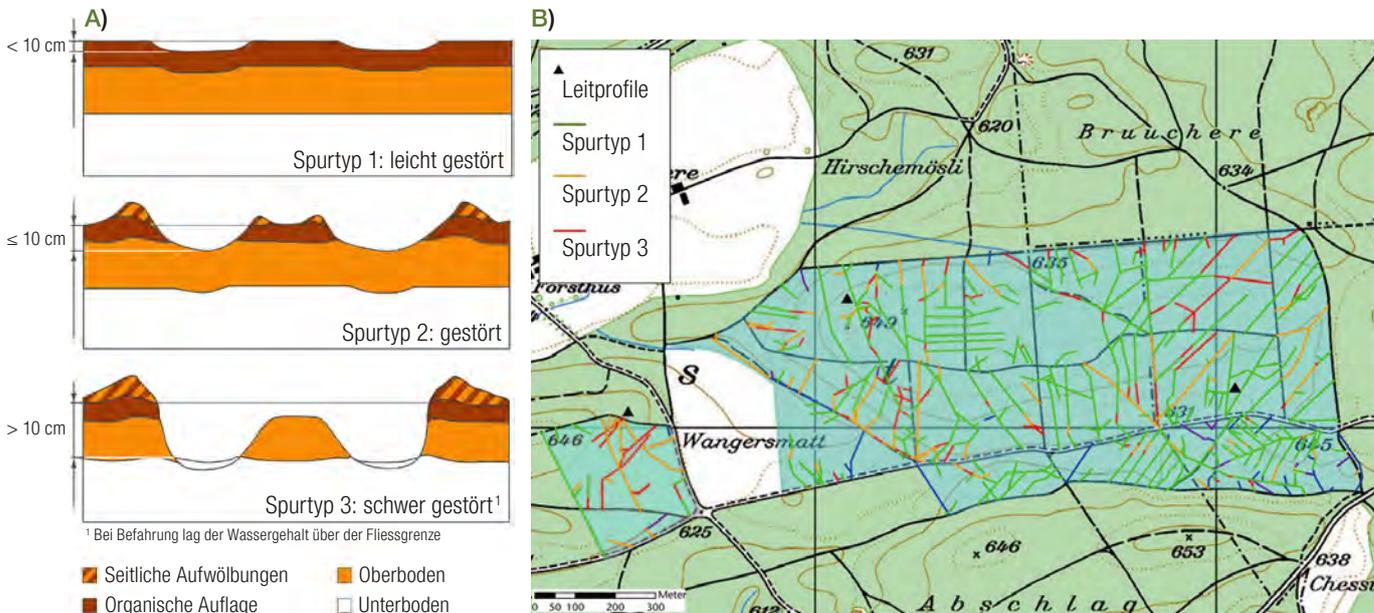


Abbildung 9-2: (A) Typisierung der durch Holzerntemaschinen entstandenen Fahrspuren. (B) Karte mit den verschiedenen Spurtypen auf der Lotharfläche Heitere-Bruucheren im Kanton Bern

der biotischen Konsequenzen der beobachteten Veränderungen der Bodenstruktur wurden zusätzlich Kenngrößen des Bodenlufthaushalts und der Mikrobiologie erhoben. Weil Bodenmikroorganismen wenig mobil sind, bilden ihre Gemeinschaftsstrukturen die lokalen Bedingungen sehr gut ab; sie gelten als exzellente Frühwarnsysteme bei Störungen im

Boden (FREY UND LÜSCHER 2008, FREY 2010). Die Auswertungen im Untersuchungsgebiet Heitere-Bruucheren zeigen, dass sich mikrobielle Lebensgemeinschaften unter den Fahrspuren mit starker Störung (Spurtyp 3) wesentlich von denjenigen in ungestörten oder wenig gestörten Bodenproben (Spurtyp 1, z. T. Spurtyp 2) unterscheiden (FREY et al. 2009).



Abbildung 9-3: (A) und (B) Befahrungsversuch mit der Forstmaschine HSM 805 D (ohne Last 14 t) in Heitere-Säget im Kanton Bern. (C) Die Situation acht Jahre nach dem Befahren: Durch die natürliche Regeneration (wechselfeuchte Bedingungen, Frostzyklen, Regenwurmaktivität, Wurzelwachstum etc.) hat sich die Bodenqualität in den verdichteten Fahrspuren stark verbessert.

9.4 Befahrungsversuch zur Spurbildung

Bei den in der Praxis zu findenden Fahrspuren lässt sich zwar der Spurtyp einigermaßen genau bestimmen, es ist jedoch selten bekannt, unter welchen Bedingungen dieser entstand. Auf einem schluffigen Sandboden wurden vor acht Jahren in einem Befahrungsversuch im Waldgebiet Forst *Heitere-Säget* die drei Spurtypen gezielt provoziert. Unter bekannten Rahmenbedingungen – Körnung bzw. Wassergehalt des Bodens, Radlasten, Reifennendruck und Anzahl Überfahrten – wurden mit einer 14 t schweren Forstmaschine auf fünf parallelen Fahrlinien von rund 30 m Länge die drei oben beschriebenen Spurtypen 1, 2 und 3 erzeugt (Abbildung 9-3 A und B). Hierzu sind entlang der Fahrlinien verschiedene Sektoren unterschiedlich bewässert und beim anschließenden Befahren die gewünschten Spurtypen entstanden. Aus praktischen Gründen wurde der Spurtyp 3 am nächsten zur Waldstrasse gelegt, da hier der Boden am stärksten bewässert werden musste. Der Forstbetrieb der *Burger-*

gemeinde Bern stellte die Versuchsfläche sowie die Forstfahrzeuge inkl. Maschinenführer zur Verfügung. Direkt vor und während acht Jahren nach dem Befahren wurden wiederholt Bodenproben in und neben den Fahrspuren entnommen (FREY et al. 2011, HARTMANN et al. 2014). Es stellte sich die Frage, ab welcher Belastung der Boden langfristig geschädigt wird und wie lange es dauert, bis sich der verdichtete Boden wieder natürlich regeneriert.

Die drei Spurtypen liessen sich auf den Fahrversuchsflächen recht gut erzeugen. Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zeigen deutliche Unterschiede sowohl zwischen den drei Spurtypen als auch gegenüber der unbefahrenen Referenzfläche. Das Gesamtporenvolumen reduziert sich durch das Befahren um bis zu einen Fünftel: Es sinkt in 5–10 cm Tiefe von 56% in der unbefahrenen Referenzfläche auf 43% im Spurtyp 3 (Abbildung 9-4 A). Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nimmt in dieser

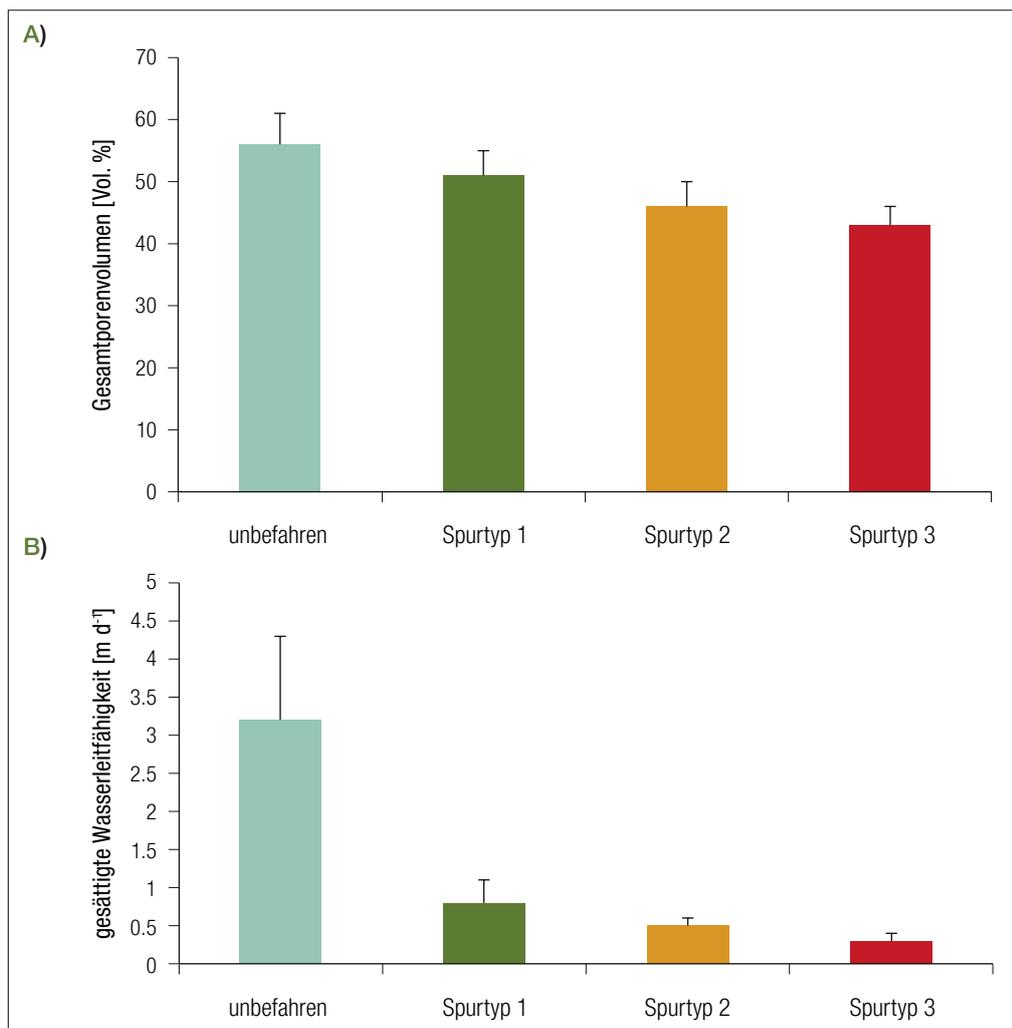


Abbildung 9-4: (A) Gesamtporenvolumen und (B) gesättigte Wasserleitfähigkeit in 5–10 cm Tiefe der unbefahrenen Referenzfläche sowie der Spurtypen 1–3 der Versuchsfläche *Heitere-Säget* im Kanton Bern. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte.

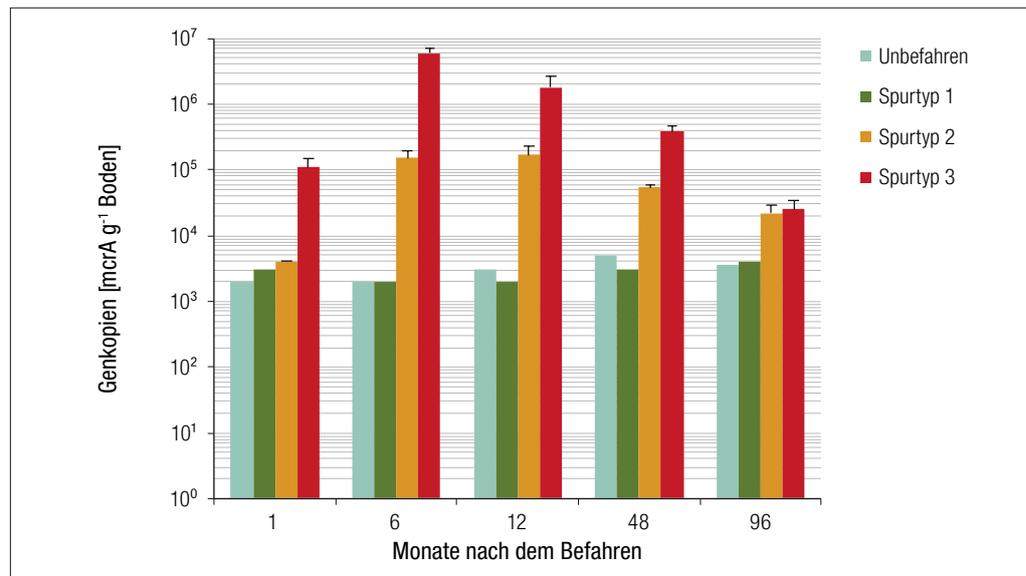


Abbildung 9-5: Häufigkeit Methan produzierender Mikroben 1, 6, 12, 48 und 96 Monate nach dem Befahren der Versuchsfläche *Heitere-Säget* im Kanton Bern. Die Häufigkeiten wurden mittels spezifischem, funktionellem Markergen *mcrA* untersucht. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte.

Tiefe deutlich ab (Abbildung 9-4 B): von *äusserst hoch* (>3 m pro Tag) auf der unbefahrenen Referenzfläche bis *mittel-gering* (<0.4 m pro Tag) nach dem Befahren. Sowohl Wasser als auch Luftbewegung nutzen den Grobporenraum. Die Durchlässigkeit für Wasser und Luft ist im bodenökologischen Sinn von zentraler Bedeutung. Mangelhafte Leitfähigkeiten führen zu Vernässung und ungenügender Durchlüftung, kurz- bis mittelfristig wird der Boden anaerob (sauerstoffarm) und damit lebensfeindlich (gehemmtes Wurzelwachstum).

Ebenfalls untersucht wurden Zusammensetzung und Veränderung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften. Die Beprobung erfolgte in den Fahrspuren vor und nach dem Befahren sowie in einem ungestörten Referenzboden ausserhalb der Versuchsfläche. Auch hier erlaubt eine Zeitreihe, mittels mikrobieller Zeiger wie Methan produzierenden Mikroben oder Mykorrhiza-Pilzen, den Grad der Bodenbeeinträchtigung sowie den Erfolg einer (natürlichen) Regeneration von verdichteten Fahrspuren abzuschätzen. Im Labor wurde aus den Bodenproben DNS extrahiert und mit molekularen Methoden analysiert. Insgesamt konnten anhand von Gensequenzen auf den Untersuchungsflächen rund 7000 Bakterien- und 2500 Pilzarten unterschieden werden. Die Untersuchungen zur Aktivität der Mikroorganismen

in den Fahrspuren zeigen, dass sich der Spurtyp 3 bodenbiologisch von den Typen 1 und 2 unterscheidet (Abbildung 9-5), indem sich im schwer gestörten Spurtyp die Zahl der anaeroben Mikroorganismen stark erhöht, der Boden also biologisch deutlich weniger aktiv ist (FREY et al. 2011, HARTMANN et al. 2014). Damit lassen sich die drei Spurtypen nicht nur aufgrund ihrer morphologischen (Abbildung 9-3 C) und physikalischen Ausprägung unterscheiden, sondern auch aufgrund ihrer Mikroorganismen-Zusammensetzung. Physikalische Bodenbelastungen begünstigen Arten, die an sauerstoffarme Verhältnisse (ungenügende Durchlüftung) angepasst sind, was zur Bildung von klimaschädlichem Lachgas und Methan durch denitrifizierende und Methan produzierende Mikroben führt (Kasten 9-1). Die stärksten Auswirkungen auf die Kleinstlebewesen im Boden waren 6 bis 12 Monate nach dem Befahren feststellbar, während die Werte nach acht Jahren mit denjenigen unbefahrener, gut durchlüfteter Böden vergleichbar waren (Abbildung 9-5). Bei sehr starker Verdichtung verschwinden nicht nur die Sauerstoff liebenden aeroben Bakterien, sondern auch die Mykorrhiza-Pilze, die in Lebensgemeinschaft mit den Baumwurzeln leben und für das Baumwachstum unentbehrlich sind. Je nach Bodenart geht man von Jahrzehnten aus, bis sich Böden nach starken physikalischen Belastungen wieder vollständig erholt haben.

Kasten 9-1: NFP68-Projekt Waldböden

Das Projekt *Waldböden* trägt zu einem besseren Verständnis von Waldböden als Quellen und Senken des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid bei.

9.5 Schlussfolgerungen

Die Klassierung der Fahrspuren ist ein praxis-tauglicher Indikator für den Grad der Bodenbeeinträchtigung. Die drei Spurtypen lassen sich nicht nur aufgrund morphologischer Ausprägungen unterscheiden, die Unterschiede sind auch mit Daten belegbar. Insbesondere bei Spurtyp 3 ist mit einer langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit zu rechnen.

Acht Jahre nach dem Fahrversuch hat sich der schluffige Sandboden jedoch mindestens in den obersten Zentimetern natürlich regeneriert, begünstigt durch seine Körnung sowie wechselfeuchte Bedingungen, Frostzyklen, Regenwurmaktivität und Wurzelwachstum. Stehendes Wasser nach Starkniederschlägen wurde in den verdichteten Fahrspuren nicht mehr beobachtet. Eine bessere Drainage be-

deutet gute Durchlüftung und gute Lebensbedingungen für Wurzelwachstum und Mikroorganismen.

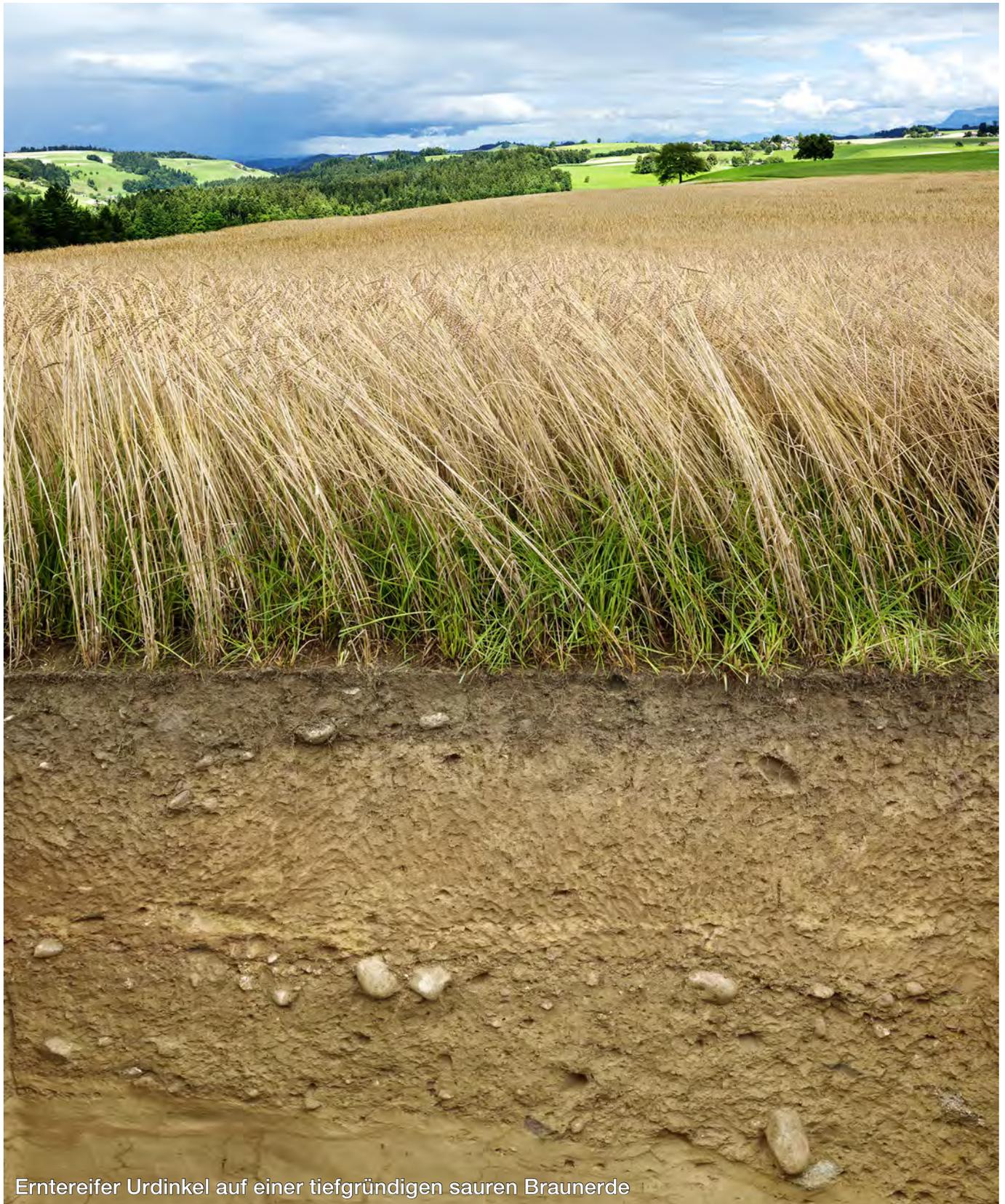
Die molekularbiologischen Diversitäts-Untersuchungen zeigen die beeinträchtigte Bodenfruchtbarkeit durch das massenhafte Vorkommen anaerober, Methan und Lachgas produzierender Mikroben – Zeiger für lebensfeindliche Bedingungen – zu Ungunsten von Sauerstoff liebenden Bakterienarten und Mykorrhiza-Pilzen. Einige der mikrobiellen Zeigerarten für schlecht durchlüftete Böden erholten sich wieder, wobei dies Bakterien schneller bewerkstelligten als Pilze. Insbesondere die Mykorrhiza-Pilze haben sich auch nach acht Jahren noch nicht vollständig erholt.

9.6 Ausblick

Diese europaweit einmalige Langzeitstudie konnte die Regenerationskraft der Mikroorganismenpopulationen in befahrenen Waldböden aufzeigen. Die Bodenschäden in den obersten 10–12 cm der verdichteten Fahrspuren waren zwar acht Jahre nach dem Fahrversuch optisch kaum mehr sichtbar, inwiefern sich jedoch das Porenvolumen im verdichteten Unterboden regeneriert hat, ist nicht geklärt und muss noch untersucht werden.

Anhand der Fahrspurtypen lässt sich auf den Grad der Bodenbeeinträchtigung schliessen. Eine fundiert angelegte Feinerschliessung der Waldbestände wird Bodenschäden auf minimale, genau festgelegte Flächen beschränken.

10 Bodenfeuchte im Praxisalltag



Erntereifer Urdinkel auf einer tiefgründigen sauren Braunerde

10 Bodenfeuchte im Praxisalltag

Mittels Tensiometern kann auf einfache Art und Weise auf die Befahr- und Bearbeitbarkeit des Bodens sowie auf das leicht pflanzenverfügbare Bodenwasser geschlossen werden. Mit einem schweizweit einheitlichen Messnetz, das über die aktuellen Saugspannungswerte Auskunft gibt, sowie dem Simulationsmodell *Terranimo* stehen den Akteuren in Land-, Forst- und Bauwirtschaft entscheidende Grundlagen zur Verminderung von Bodenverdichtungen zur Verfügung.

Je trockener der Boden, desto weniger Poren sind mit Wasser gefüllt. Damit steigt die Tragfähigkeit des Bodens. Trockener Boden hält hohen Druckbelastungen und schweren Maschinengewichten stand. Für den Praktiker

in Land-, Forst- und Bauwirtschaft ist es deshalb entscheidend, den richtigen Zeitpunkt – d. h. genügend abgetrocknete Bodenverhältnisse – für den Maschineneinsatz zu kennen.

10.1 Saugspannung des Bodens

An einem repräsentativen Standort wird die Saugspannung (Matrixpotential) eines Bodens

mittels Tensiometern gemessen. Es wird der Medianwert, d. h. der an der mittleren Stelle stehende Zahlenwert aus fünf Parallelmessungen ermittelt (Abbildung 10-1). Die Verdichtungsempfindlichkeit im Unterboden wird in einer Tiefe von 35 cm bestimmt. Die Saugspannung stellt dabei einen für alle Böden geeigneten, einheitlich interpretierbaren Parameter dar. Mit dieser einfachen Messtechnik können indirekt Rückschlüsse auf das Angebot an leicht pflanzenverfügbarem Bodenwasser und auf die Befahr- und Bearbeitbarkeit des Bodens gezogen werden. Die Handhabung des Tensiometers ist einfach und die Beurteilung der Einsatzgrenzen von schweren Maschinen bei richtiger Wartung zuverlässig (METEOTEST 2016).



Abbildung 10-1: Tensiometermessstation mit Handablesung: Der Medianwert von jeweils fünf Tensiometern erfasst die Heterogenität des Bodens.

10.1.1 Einsatzgrenzen bei Raupenfahrzeugen

Schon seit den frühen 1990er Jahren werden die zulässigen Einsatzgrenzen von Baumaschinen mit Raupen entsprechend der Formel *Einsatzgrenze [cbar] = Gesamtgewicht in t [beladen] × Bodenpressung [bar] × 1.25* mit

der Saugspannung berechnet (VSS 1999). Mittels Nomogramm wird ersichtlich, ob die Baumaschine bodenverträglich eingesetzt werden kann oder ob Vorsorgemassnahmen (z. B. Baggermatratzen) notwendig sind.

10.1.2 Einsatzgrenzen bei Pneufahrzeugen

Zur Berechnung der aktuellen Bodenverdichtungsgefährdung durch das Befahren mit Pneufahrzeugen wurde das Anwendermodell *Terranimo* (www.terranimodel.ch) entwickelt. Es vergleicht in 35 cm Tiefe die Bodenfestigkeit (Vorbelastung) mit dem Bodendruck (Bodenbelastung) eines bestimmten Fahrzeugs. Die Bodenfestigkeit ist abhängig von Saugspannung und Tongehalt des Bodens. Zur Ermittlung des Bodendrucks sind Angaben zu Radlast und Reifeninnendruck nötig. Nur wenn die Bodenfestigkeit grösser ist als der auf den Unterboden

ausgeübte Druck, besteht kein Verdichtungsrisiko. Optisch wird dies mit einem Ampelsystem – grün, gelb, rot – im Entscheidungsdiagramm dargestellt (Abbildung 10-2).

Mit *Terranimo* konnte ein wichtiger Baustein zum physikalischen Bodenschutz in der Land-, Forst- und Bauwirtschaft realisiert werden. In Anwendungsbereichen wie Direktsaat und Naturwiesen muss es noch verfeinert werden (Kasten 10-1).

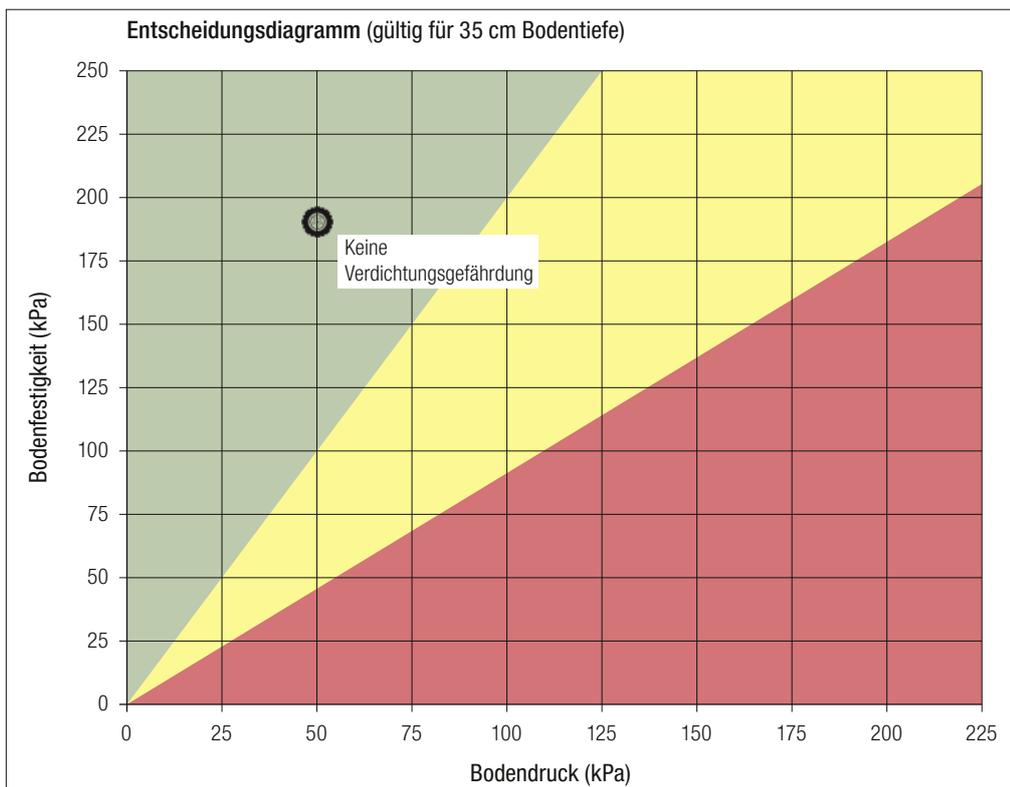


Abbildung 10-2: Ampelsystem im Entscheidungsdiagramm von *Terranimo*: Im grünen Bereich besteht kein Verdichtungsrisiko, im gelben und roten Bereich ist ein Verdichtungsrisiko bzw. ein hohes Verdichtungsrisiko vorhanden.

Kasten 10-1: NFP68-Projekt Bodenverdichtung

Aufgrund der Ergebnisse des Projekts *Bodenverdichtung* wird sich abschätzen lassen, wie verschiedene landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmassnahmen die Entwicklung der Bodenstruktur beeinflussen. Es wird damit möglich, das Risiko einer Bodenverdichtung realistisch zu beurteilen und Leitlinien für den physikalischen Bodenschutz zu entwickeln.

10.1.3 Einsatzgrenzen bei Bewässerung

Tensiometerwerte bieten den Vorteil, dass mit der Saugspannung das Abtrocknungsverhalten von Böden in der ganzen Komplexität wie Schichtung und Körnung erfasst wird. Ohne zusätzliche Angaben zur Porengrössenverteilung,

welche sich durch die Bewirtschaftung stetig verändert, kann bis in einen Messbereich von 80 cbar auch auf das leicht pflanzenverfügbare Bodenwasser geschlossen werden. Mit dieser Information können bewässerungsbe-



Abbildung 10-3: Wachsende Pflanzen nehmen die lebensnotwendigen Nährstoffe in gelöster Form über ihre Wurzeln auf. Das dazu erforderliche Lösungs- und Transportmittel ist Wasser. In den für die Kartoffelkultur aufgebauten Dämmen wird dieses in Trockenperioden knapp.

dürftige Kulturen wie Kartoffeln und Gemüse oder futterbaulich genutzte Böden mit geringer pflanzennutzbarer Gründigkeit rechtzeitig bewässert werden (Abbildung 10-3). Damit lassen sich Ernteausfälle oder Futtermangel in Trockenperioden vermeiden.

10.2 Tensiometermessnetz der Kantone

Die Saugspannung ist eine wichtige Beurteilungsgrösse zur Abschätzung des Verdichtungsrisikos sowohl in der Baubranche bei der Ausführung von Erdarbeiten mit Raupenfahrzeugen (siehe Kapitel 8) als auch beim Bodenverträglichen Maschineneinsatz mit Pneu-fahrzeugen in der Land- und Forstwirtschaft (siehe Kapitel 2 bzw. 9).

Aufgrund dieser Überlegungen wurden, in der Schweiz erstmalig, im Frühjahr 1996 auf sechs ausgewählten KABO-Standorten im Kanton Bern dauerhafte Tensiometermessstationen eingerichtet. Seither werden die an diesen Stationen erfassten aktuellen Saugspannungswerte von Naturwiese und Ackerfläche sowie die Niederschlagsmenge telefonisch übermittelt. Diese drei Mal wöchentlich erhobenen Daten werden seit 2000 unter www.be.ch/bodenschutz (Unterordner *Bodenzustand*) der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. WYLER (2010) verwendete die Daten zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden durch Befahren.



Abbildung 10-4: Erste automatische Tensiometermessstation im Kanton Bern: Die Inbetriebnahme erfolgte im Dezember 2016 auf der Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* in Zollikofen.

Im Laufe der Jahre erkannten auch andere Kantone die Bedeutung aktueller Tensiometerwerte und entschlossen sich, ein ähnliches Messnetz aufzubauen. Dem technischen Fortschritt entsprechend nahmen sie ab 2008 automatische Messstationen in Betrieb (Abbildung 10-4, www.bodenmessnetz.ch). Diese bieten gegenüber der Handablesung den Vorteil von kontinuierlicheren und aktuelleren Datenreihen, weniger Übertragungsfehlern und geringerem Koordinationsaufwand beim Aufschalten und Datenunterhalt. Demgegenüber verursachen die automatischen Stationen höhere Anschaffungs-, Unterhalts- und Erneuerungskosten.

10.3 Schlussfolgerungen

Mit dem Aufbau eines schweizweit einheitlichen Tensiometermessnetzes und somit stets aktuellen Saugspannungswerten ist eine wesentliche Grundlage zur Verminderung von Bodenverdichtungen gegeben. Die punktuellen Messungen können zur Einschätzung des Verdichtungsrisikos aufgrund der räumlichen Entfernung und der unterschiedlichen Boden-

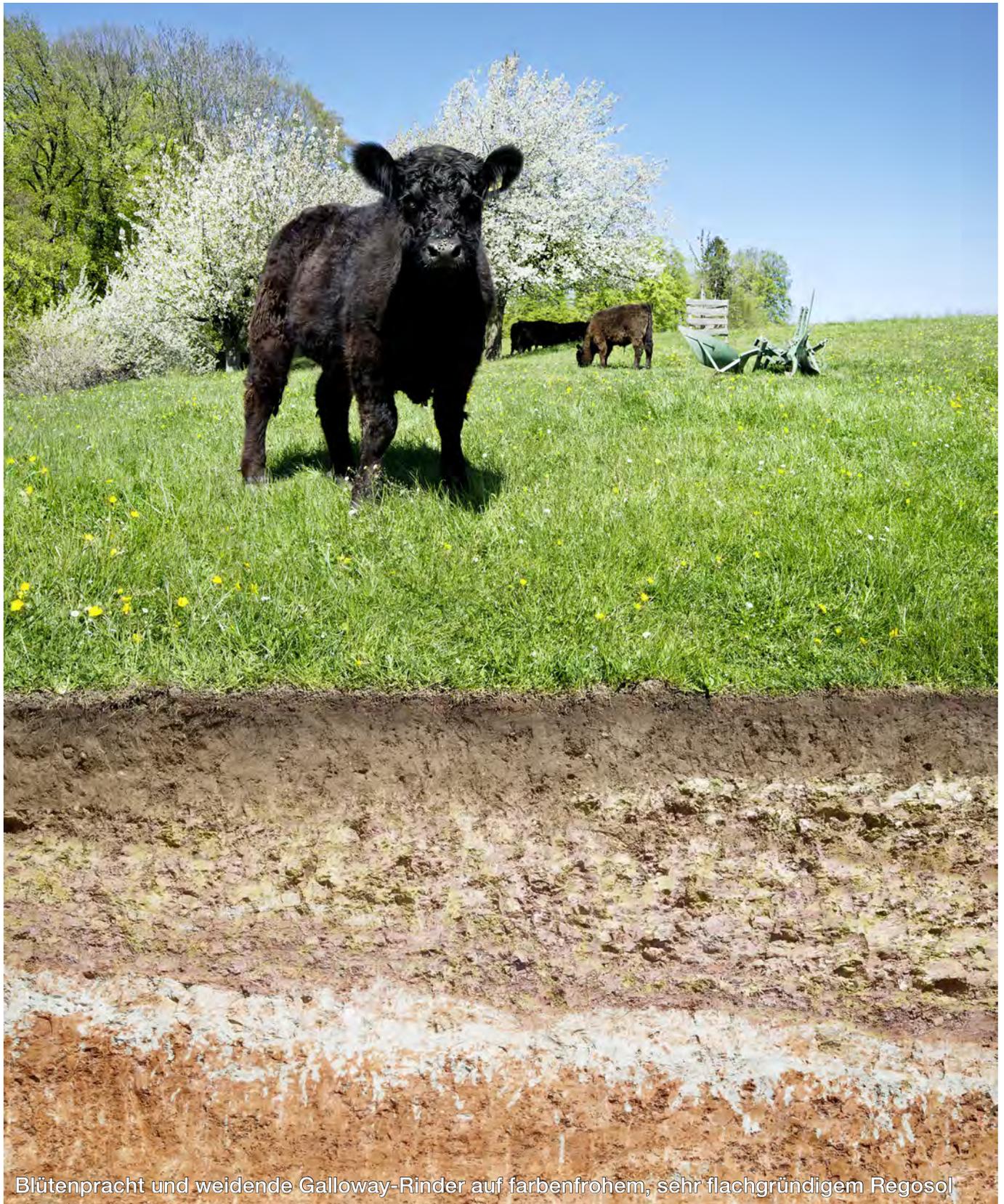
verhältnisse nicht eins zu eins auf den zu beurteilenden Standort übertragen werden, stellen jedoch einen wertvollen Anhaltspunkt dar. Fachleute der Land-, Forst- und Bauwirtschaft können sich mit diesen Informationen bereits im Vorfeld ihrer geplanten Tätigkeiten ein Bild zur aktuellen Bodenfeuchte machen und entsprechend angemessen handeln.

10.4 Ausblick

Im Verlaufe des Jahres 2017 werden alle sechs Messstationen des Kantons Bern von der Handablesung auf den automatisierten Standard umgerüstet. Dabei werden sämtliche Messkriterien (z. B. Anzahl eingebaute Sonden und Einbautiefe) der bereits mit solchen Stationen ausgerüsteten Kantone übernommen. Dies erlaubt eine einheitliche Interpretation der Daten.

Es wird eine gemeinsame Website im Sinne eines nationalen Einheits-Messnetzes aufgebaut. Damit stehen zahlreichen Nutzergruppen stets aktualisierte Saugspannungswerte kostenlos zur Verfügung. Ein engmaschigeres Messnetz wäre wünschenswert, um eine genauere Beurteilung vor Ort zu erhalten.

11 Öffentlichkeitsarbeit



Blütenpracht und weidende Galloway-Rinder auf farnefrohem, sehr flachgründigem Regosol

11 Öffentlichkeitsarbeit

Die Sensibilisierung der Öffentlichkeit für die Bedeutung des Bodens sowie die fachliche Weiterbildung der Bodennutzer in Land-, Forst- und Bauwirtschaft ist der Fachstelle Bodenschutz ein zentrales Anliegen. Damit verbreitet sie das Wissen um den Boden als vielfältigen und wertvollen Lebensraum, seine Funktionen und seinen zentralen Wert für das Überleben.

«Nur was man kennt, schützt man» – für den Boden ein doppelt schwieriges Motto; ist er doch meist nur zweidimensional sichtbar, auf den ersten Blick wenig attraktiv und als «dreckig» charakterisiert. Mit dem Aufzeigen seiner Schönheit und Vielfalt, mit Informationen

über seine qualitative und quantitative Gefährdung sowie mit der Darlegung von Zusammenhängen werden die Öffentlichkeit für die Thematik sensibilisiert und die Bodennutzer zu einem Boden schonenden Umgang mit dieser nicht erneuerbaren Ressource geführt.

11.1 Wege der Kommunikation

Mit Bildern, Filmen, Publikationen und Merkblättern, Veranstaltungen im Feld, z. T. mit Modellen, aber auch mit wissenschaftlichen Arbeiten

von Studierenden trägt die Fachstelle das Anliegen, die endliche Ressource Boden zu schonen, in die unterschiedlichsten Zielgruppen.

11.1.1 Kalender «Faszination Boden»

Nachdem 2013 der erste Bodenkalendar auf ein überwältigendes Echo stiess, wurde er für 2017 mit zum Teil neuen Bildern in 4000 Exemplaren nochmals aufgelegt. Darin werden zwölf landwirtschaftlich genutzte Berner

Böden mit der darauf wachsenden Nahrung und den umgebenden Landschaften gezeigt. Die in Zusammenarbeit mit Agroscope, HAFL und INFORAMA beschriebenen Bodenprofile machen Verborgenes sichtbar. Die Kalenderbilder wurden und werden an diversen Ausstellungen im Grossformat präsentiert (Olma, BEA etc.). In zahlreichen Tages- und Wochenzeitungen (Tagesanzeiger, Berner Bund, Berner und Basler Zeitung, Schweizer Familie etc.) sowie im GEO-Magazin erschienen sie mit begleitenden Artikeln. Die eindrücklichen Bilder zieren heute Internetseiten, Postkarten, Lehrbücher und Flyer. Zwei der aufgenommenen Böden hat die *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz* zur entsprechenden Präsentation des Bodens des Jahres ausgewählt.



Abbildung 11-1: Dreharbeiten zum Film *Die Spatenprobe*

11.1.2 Audiovisuelle Medien

Als Beitrag zum Internationalen UNO-Jahr des Bodens 2015 wurde der Film *Die Spatenprobe* realisiert (Abbildung 11-1). Anhand verschiedener Böden werden die Auswirkungen der menschlichen Bodennutzung auf Bodenschichtung, Struktur, Durchwurzelung und Biologie beurteilt. Dieser Schulungs-Film wurde auf YouTube bereits über 38 000 Mal angeklickt.

Im März 2016 orientierte die Fachstelle Bodenschutz in der SRF-Sendung *Kassensturz* zum Thema *Umstrittenes Glyphosat – Herbizidverzicht im Ackerbau* über den auf der Dauerbeobachtungsparzelle *Oberacker* umgesetzten Glyphosatverzicht bei Direktsaat (siehe Kapitel 4).

11.1.3 Veranstaltungen

Anlässlich des Jubiläums *150 Jahre landwirtschaftliche Bildung am Standort Rütli* fand 2010 in Zollikofen ein dreitägiger Anlass mit diversen Ausstellungen und Präsentationen statt, u. a. wurde dank einem permanent begehbaren Bodenprofil ein «Blick in den Boden» ermöglicht (Abbildung 11-2). Das Profil ist heute Teil des Landschaftsweges Zollikofen.

Im Rahmen des Förderprogramms *Boden Kanton Bern* wurden zwischen 2010 und 2015 zur themenspezifischen Weiterbildung der beteiligten Landwirte vier *Berner Bodentage* und ein Ammoniaktag organisiert (siehe Kapitel 2). 2014 fand der Bodentag zusammen mit dem 3. *Bio-Ackerbautag* und 2015 mit dem Jubiläum *20 Jahre Dauerbeobachtungsfläche Oberacker* statt.

2016 war der Auftakt für eine mit den Partnern HAFL und INFORAMA neu ausgerichtete Veranstaltungsreihe *Brennpunkt Boden*. Forschende, Vollzugsstellen von Bund, Kantonen und Gemeinden, Berater, Landwirte und weitere Interessierte diskutierten das Thema *Erosion* und suchten gemeinsam nach Lösungsansätzen. 2017 wird das Thema *Entwässerte Torfböden* im Zentrum stehen.

In den letzten sechs Jahren wurde an mehr als 140 Führungen über die Dauerbeobachtungsfläche *Oberacker* informiert. Insgesamt über 3400 Interessierte aus der Schweiz, Europa und vereinzelt aus Übersee konnten sich über Ideen, Ziele und deren Umsetzung direkt vor Ort informieren (siehe Kapitel 4). Rechnet man die Besucher der *Berner Bodentage* mit ein, so diente der *Oberacker* rund 5000 Personen als praxistaugliches Objekt für eine nachhaltige Landwirtschaft, unter anderem auch im Rahmen der Weiterbildungstage der *Bodenkundlichen Baubegleiter* 2010 und 2011 (Abbildung 11-3).

Jährlich findet eine Exkursion mit Studierenden der Abteilung Umweltwissenschaften der ETH Zürich im Seeland statt. 2010 wurde am selben Ort auch eine solche für die BGS organisiert.



Abbildung 11-2: «Grabe irgendwo in der Erde und du wirst einen Schatz finden»: Im Sinne von Khalil Gibran will man auch die kommenden Generationen die Lebensgrundlage *Boden* erfahren lassen.



Abbildung 11-3: Im Rahmen einer Weiterbildungsveranstaltung für *Bodenkundliche Baubegleiter* wurden einem interessierten Publikum das Erosionsmodell (links), die Regenwurmkästen (Mitte) und verschiedene Spatenproben (rechts) vorgeführt (Aufnahme vom 9. September 2011).

11.1.4 Publikationen und Merkblätter

Die im Rahmen der KABO und am Standort Oberacker erhobenen chemischen, physikalischen und biologischen Daten wurden von der Fachstelle Bodenschutz und Forschenden der Agroscope gemeinsam ausgewertet und publiziert. Es erschienen zahlreiche Artikel in der landwirtschaftlichen Fachpresse sowie in in- und ausländischen Fachjournalen: *UFA-Revue* der fenaco LANDI Gruppe (2016, 2012, 2010), *Agrarforschung Schweiz* (2016 und 2014), *Soil & Tillage Research* (2016), *Soil Use and Management* (2015), *TCS Techniques Culturelles Simplifiées* (2015), *LOP Landwirtschaft ohne Pflug*

(2013) sowie im Wissenschaftsverlag *Elsevier* (2010).

In den Jahren 2010–2016 wurden in unterschiedlichen Kooperationen sechs Merkblätter zu den folgenden Themen erarbeitet: *Schonende Bodenbearbeitung für Ressourceneffizienzbeiträge REB* (2015); *Bodenverdichtung vermeiden – so funktioniert's!* (2014); *Regenwürmer: Gratisarbeiter im Untergrund* (2012); *Glyphosat im Acker- und Futterbau* (2012); *Fusarien in Getreide* (2011, 2. Auflage); *Schadschnecken im Ackerbau* (2010). Die drei letztgenannten sind Teil des REB-Merkblattes.

11.1.5 Diplomarbeiten

Mit Diplomarbeiten können verschiedene Themen vertieft angegangen werden. Die Fachstelle Bodenschutz initiiert, unterstützt und begleitet deshalb regelmässig Bachelor-, Mas-

ter- oder Nachdiplomarbeiten sowie weitere Projekte von Studierenden. Diese sind u. a. in die Kapitel 2, 3, 4, 6 und 7 eingeflossen.

11.2 Schlussfolgerungen

Für die Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern ist die Sensibilisierung der Akteure – Landwirte, Forstwirte und Baufachleute –, aber auch der Verwaltung, Bildung und Beratung sowie der allgemeinen Öffentlichkeit für das

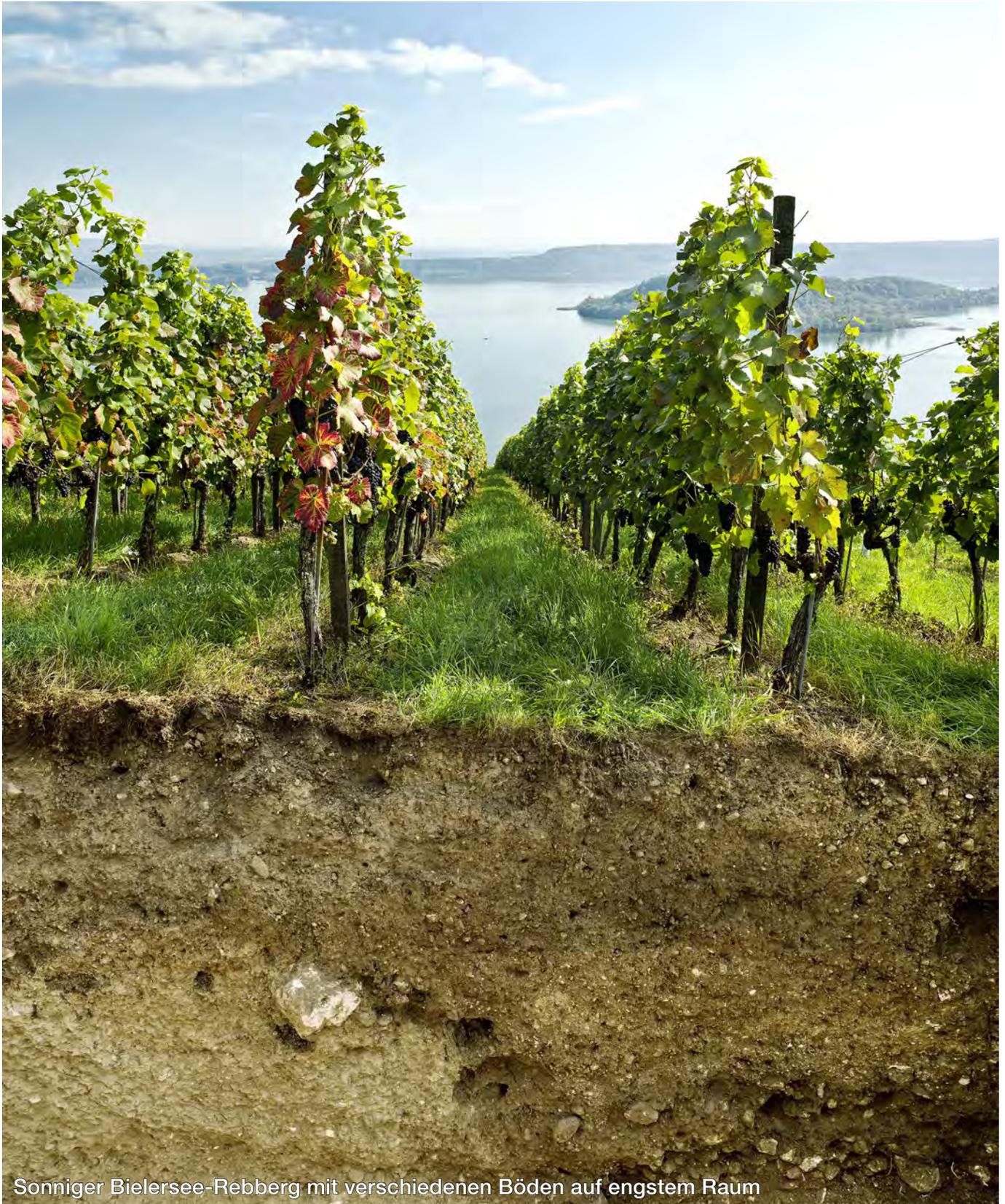
Thema Boden sehr wichtig. Neben der schriftlichen Information steht insbesondere das direkte Erleben des Bodens im Feld durch gut verständliche, anschauliche Präsentationen im Vordergrund.

11.3 Ausblick

Der Öffentlichkeitsarbeit wird auch in den kommenden Jahren grosse Bedeutung beigemessen. Zudem werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den NFP68-Projekten in die Vollzugsaufgaben des Bodenschutzes einfließen und praktisch umgesetzt. Damit wird ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Erreichung der *Umweltziele Landwirtschaft* (BLW und BAFU 2008) vollzogen sein.

Die Thematik der entwässerten Torfböden sowie die Möglichkeiten zu ihrer Aufwertung bzw. Nutzung sollen mit einem Film und einem Merkblatt erläutert werden sowie in die vom BAFU koordinierte Vollzugshilfe *Bodenschutz beim Bauen* einfließen.

12 Boden – eine Ämter übergreifende Herausforderung



Sonniger Bielersee-Rebberg mit verschiedenen Böden auf engstem Raum

12 Boden – eine Ämter übergreifende Herausforderung

Das Thema *Boden* und die damit verbundenen Vollzugaufgaben beschäftigen in der Berner Verwaltung verschiedene Direktionen und Ämter. Bei der Umsetzung von Ämter übergreifenden Fragestellungen übernimmt die *Fachgruppe Boden* als Austauschplattform eine thematisch koordinierende Beratungsfunktion. Ziel dieser Koordination ist es, den quantitativen und qualitativen Bodenschutz zu stärken und das Verständnis für die nicht erneuerbare Ressource *Boden* zu fördern.

Die unterschiedlichen und vielschichtigen Ansprüche an die Ressource *Boden* widerspiegeln sich in zahlreichen Rechtserlassen zu dessen Nutzung und Schutz. Das Thema *Boden*

wird auf allen föderalistischen Verwaltungsebenen behandelt und stellt damit ein typisches Querschnittsthema mit vielen Schnittstellen im Vollzug dar.

12.1 Organisation der Fachgruppe Boden

Vor diesem Hintergrund etablierte sich im Kanton Bern im Jahr 2009 die *Fachgruppe Boden* (VOL 2009). Als direktionsübergreifendes Gremium setzt sie sich aus Vertretern von Ämtern und Fachstellen mit Aufgaben und Interessen im Bereich *Boden* zusammen. Folgende Verwaltungsstellen sind involviert: Das Amt für Land-

wirtschaft und Natur (LANAT) ist mit den beiden Bereichen Strukturverbesserungen und Bodenschutz vertreten, wobei letztere als Fachstelle *Boden* gemäss USG den Vorsitz und das Sekretariat innehält (Abbildung 12-1). Weitere Mitglieder sind das Amt für Wasser und Abfall (AWA), das Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR), das Amt für Wald (KAWA) und das Tiefbauamt (TBA).



Abbildung 12-1: Wolfgang G. Sturny, seit 2001 Leiter der Fachstelle Bodenschutz, anlässlich der Übergabe des Schlussberichts *Förderprogramm Boden Kanton Bern* an die Bundesämter für Landwirtschaft und für Umwelt am Weltbodentag (Aufnahme vom 5. Dezember 2016).

Aufgaben, Zusammensetzung und Organisation der *Fachgruppe* sind in einem Pflichtenheft geregelt. Für die Behandlung von Ämter und direktionsübergreifenden Fragestellungen aus dem Bereich *Boden* übernimmt die *Fachgruppe* eine Beratungsfunktion. Der Vollzug selber obliegt den jeweiligen Ämtern bzw. Direktionen.

Neben der Koordination der kantonalen Aufgaben im Bereich *Boden* steht der fachliche Informations- und Wissensaustausch, die Beurteilung wesentlicher Boden Aspekte, die Früherkennung von Bodenproblemen sowie das Erarbeiten von Bodeninformation, gemeinsamen Richtlinien, Merkblättern und Arbeitshilfen im Vordergrund.

Plenums-Sitzungen mit allen *Fachgruppen*mitgliedern erfolgen in der Regel zwei Mal jährlich. Ausschuss-Sitzungen, zu denen themenbezogen auch Externe (BLW, Forschung, Berater, Planer etc.) beigezogen werden, finden je nach Bedarf statt. Informations-Sitzungen mit den betroffenen Amtsvorstehern werden in der Regel alle zwei Jahre einberufen.

12.2 Bodenrelevante Themen

In den letzten Jahren hat sich die *Fachgruppe Boden* mit folgenden Themen befasst:

Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb von Bauzonen wurden mit entsprechenden Richtlinien und einem Merkblatt reglementiert (siehe Kapitel 8).

Im Zusammenhang mit der Beschaffung von Bodeninformation (siehe Kapitel 6) erfolgten

zahlreiche Aktivitäten: der Beitritt des Kantons Bern zum NABODAT-Verbund, die Ermittlung von Zusatzflächen für das Fruchtfolgeflächen-Inventar im Rahmen der Revision des kantonalen Richtplans, die Ausarbeitung einer *Hinweiskarte Boden*, die Torfkartierung *Gürbetal* sowie die Erarbeitung von Grundlagen zu Kartierungsprojekten entwässerter Torfböden im Berner Seeland (siehe Kapitel 7).

12.3 Schlussfolgerungen

Die ursprünglich provisorisch für zwei Jahre eingesetzte *Fachgruppe Boden* erweist sich als zweckmässige Informations- und Koordinati-

onsplattform. Für die Klärung von Schnittstellen am runden Tisch bedarf es eines einheitlichen und effizienten Vollzugs.

12.4 Ausblick

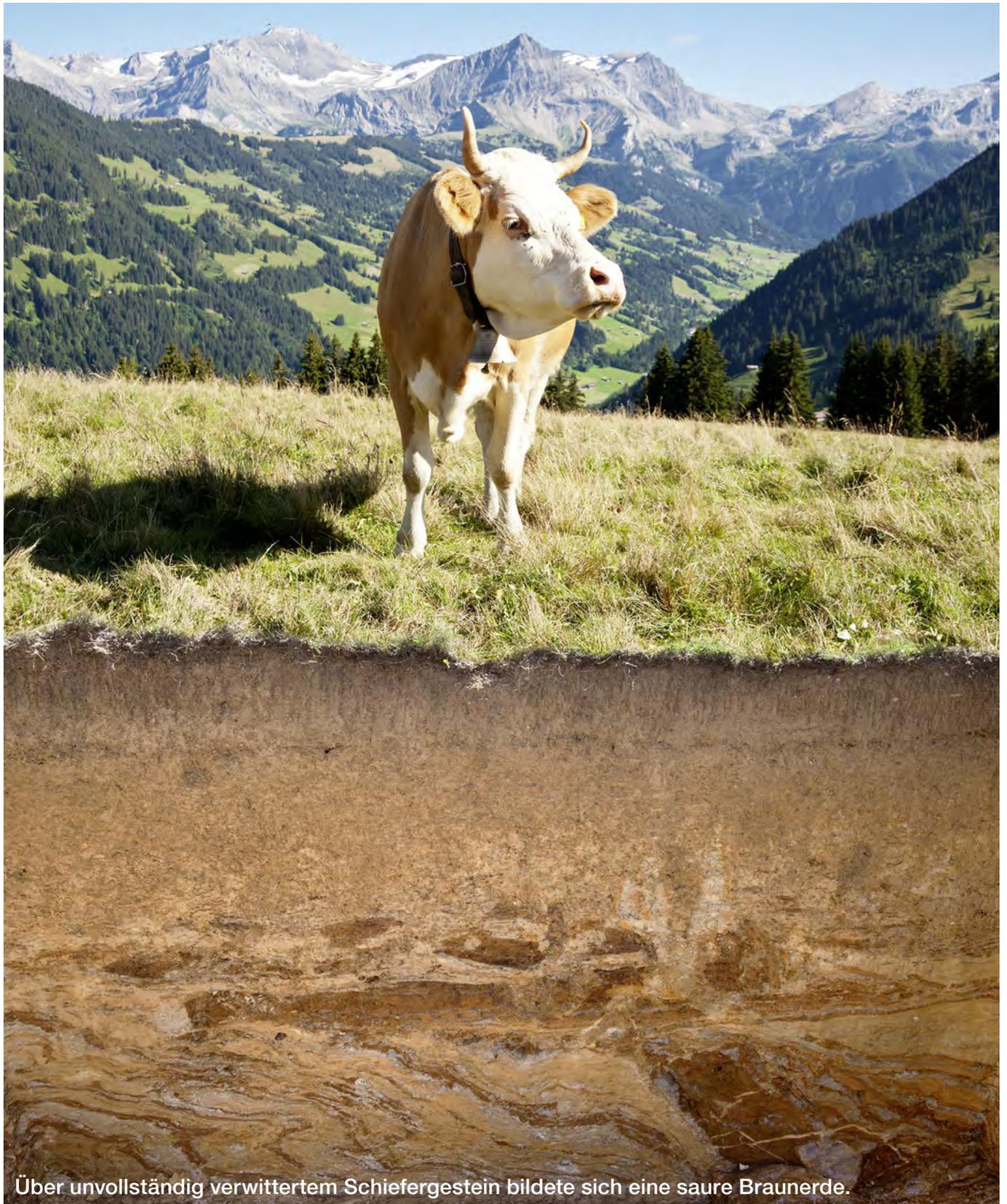
Das Umweltkompartiment *Boden* stellt an die Zusammenarbeit besondere Herausforderungen. Bodenrelevante Themen werden in der Schweiz auf drei Verwaltungsebenen – Bund, 26 Kantone, mehr als 2000 Gemeinden – in den jeweils dafür zuständigen Ämtern wie Raumplanung, Umwelt, Land- und Forstwirtschaft etc. behandelt. Dieses föderalistische System führt zu einer Verzettelung der Zuständigkeiten (Kasten 12-1). Erschwerend kommt hinzu, dass Boden im Gegensatz zu Luft und Wasser meist eigentumsabhängig zu regeln ist (siehe Kapitel 6, Tabelle 6-1).

Die Fragestellungen im Spannungsfeld zwischen Bodennutzung und Bodenschutz sind demnach vielschichtig und komplex, der durch viele Schnittstellen und externe Einflüsse geprägte Vollzug entsprechend anspruchsvoll. Es muss das Ziel sein, Bodenthemen in Zukunft auf jeder Verwaltungsebene noch umfassender anzugehen, um die verschiedenen Nutzungs- und Schutzansprüche an den Boden adäquat abwägen zu können.

Kasten 12-1: NFP68-Projekt Politikinstrumente

Das Projekt *Politikinstrumente* untersucht Instrumente für eine nachhaltige Raumentwicklung und den Bodenschutz und wirbt für ihre Akzeptanz in Politik und Gesellschaft.

Verzeichnisse



Verzeichnisse

Abkürzungsverzeichnis

AGI	Amt für Geoinformation des Kantons Bern
AGR	Amt für Gemeinden und Raumordnung des Kantons Bern
AMPA	Aminomethylphosphonsäure
AM-Pilze	Arbuskuläre Mykorrhizapilze
AP	Agrarpolitik
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
AWA	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BBB	Bodenkundliche Baubegleitung
BFO	Bernische Fachorganisation für den ökologischen Leistungsnachweis und für tierfreundliche Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere
BGS	Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
BI-CH	Bodeninformation Schweiz
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BVE	Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern
C	chem.: Kohlenstoff
CO ₂	chem.: Kohlendioxid
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
EDI	Eidgenössisches Departement des Innern
EPFL	École polytechnique fédérale de Lausanne
ERK	Erosionsrisikokarte
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Extenso	Extensive Produktion von Getreide, Sonnenblumen, Eiweisserbsen, Ackerbohnen und Raps
FBS	Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern
FFF	Fruchtfolgeflächen
FGB	Fachgruppe Boden der Bio Suisse
FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
FPB	Förderprogramm Boden Kanton Bern
FRI	Fondation rurale interjurassienne
GA	Gewässeranschluss
GAK	Gewässeranschlusskarte
GBL	Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern
GELAN	Gesamtlösung EDV Landwirtschaft und Natur; Agrarinformationssystem der Kantone Bern, Freiburg und Solothurn
GIS	Geografisches Informationssystem
GRUD	Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (ehemals: GRUDAF)
GRUDAF	Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
HAFL	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften
IP	Integrierte Produktion
IUSS	International Union of Soil Sciences
JKG	Justiz-, Gemeinde- und Kirchendirektion des Kantons Bern
K	chem.: Kalium
KABO	Kantonale Bodenbeobachtung
KAWA	Amt für Wald des Kantons Bern
KLABS	Klassifikation der Böden der Schweiz
LANAT	Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern
LiDAR	Light detection and ranging
LOP	Landwirtschaft ohne Pflug
LWEK	Landwirtschaftliche Eignungskarte
Mg	chem.: Magnesium
N	chem.: Stickstoff

N ₂ O	chem.: Lachgas
NABO	Nationale Bodenbeobachtung
NABODAT	Nationale Bodendatenbank
NFP	Nationales Forschungsprogramm
NFP68	Nationales Forschungsprogramm 68 «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden»
N _{tot}	chem.: Stickstoff-Totalgehalt
NWCH	Nordwestschweiz
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
P	chem.: Phosphor
PAC	Pro Agricultura Seeland
PSM	Pflanzenschutzmittel
REB	Ressourceneffizienzbeiträge der Direktzahlungsverordnung
RRB	Regierungsratsbeschluss
SNF	Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung
TBA	Tiefbauamt des Kantons Bern
TCS	Techniques Culturelles Simplifiées
UNO	United Nations Organisation
UVB	Umweltverträglichkeitsbericht
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VOL	Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
WBF	Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Verzeichnis der Gesetze und Verordnungen

BauG	Baugesetz vom 9. Juni 1985. BSG 721.0.
DZV	Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (<i>Direktzahlungsverordnung</i>) vom 23. Oktober 2013. SR 910.13.
GeolG	Bundesgesetz über Geoinformation (<i>Geoinformationsgesetz</i>) vom 5. Oktober 2007. SR 510.62.
GeolV	Verordnung über Geoinformation (<i>Geoinformationsverordnung</i>) vom 21. Mai 2008. SR 510.620.
LKV	Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft vom 5. November 1997. BSG 910.112.
LwG	Bundesgesetz über die Landwirtschaft (<i>Landwirtschaftsgesetz</i>) vom 29. April 1998. SR 910.1.
RPG	Bundesgesetz über die Raumplanung (<i>Raumplanungsgesetz</i>) vom 22. Juni 1979. SR 700.
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (<i>Umweltschutzgesetz</i>) vom 7. Oktober 1983. SR 814.01.
UVPV	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung vom 19. Oktober 1988. SR 814.011.
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998. SR 814.12.
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (<i>Abfallverordnung</i>) vom 4. Dezember 2015. SR 814.600.

Verzeichnis der Normen, Richtlinien und Merkblätter

AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Bodenverdichtung vermeiden – so funktioniert's!</i> 2014.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Erosion. Wie viel Erde geht verloren?</i> 2007.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Fusarien in Getreide.</i> 2011.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Glyphosat im Acker- und Futterbau.</i> 2012.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. <i>Massnahmenplan Erosion.</i> Eine Anleitung zum Erosionsvollzug. In Vorbereitung.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Regenwürmer: Gratisarbeiter im Untergrund.</i> 2012.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Schadschnecken im Ackerbau.</i> 2010.
AGRIDEA	Landwirtschaftliche Beratungszentrale für die Entwicklung der Landwirtschaft und des ländlichen Raums. Merkblatt: <i>Schonende Bodenbearbeitung für Ressourceneffizienzbeiträge REB 2014–2019.</i>
AWA	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern. Merkblatt: <i>Anforderungen Bodenschutzkonzept – durch umsichtige Planung den Boden bei Erdverschiebungen projektspezifisch und bestmöglich schützen.</i> 2015.
AWA, AGR & LANAT	Ämter für Wasser und Abfall, für Gemeinden und Raumordnung und für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Richtlinien: <i>Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen.</i> 2015.
AWA, AGR & LANAT	Ämter für Wasser und Abfall, für Gemeinden und Raumordnung und für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Merkblatt: <i>Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung.</i> 2015.
Cercle Sol NWCH	Bodenschutzfachstellen des Cercle Sol der Nordwestschweiz. Merkblatt: <i>Anforderungen an ein Bodenschutzkonzept.</i> 2016.
Cercle Sol NWCH	Bodenschutzfachstellen des Cercle Sol der Nordwestschweiz. Merkblatt: <i>Anforderungen an ein Pflichtenheft der Bodenkundlichen Baubegleitung (BBB).</i> 2016.
Extenso	Beitrag für die extensive Produktion von Getreide, Sonnenblumen, Eiweisserbsen, Ackerbohnen und Raps vom 11. Mai 2015. www.blw.admin.ch unter dem Suchbegriff <i>Produktionssystembeiträge.</i>
GRUD	Agroscope. Richtlinien: <i>Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz.</i> Wird 2017 publiziert.
GRUDAF	Forschungsanstalten Agroscope Changins-Wädenswil ACW und Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Richtlinien: <i>Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau.</i> 2009. Agrarforschung 16(2).
IP-Suisse	Richtlinien Getreide vom Mai 2015.

LANAT	Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Merkblatt: <i>Kriterien für die finanzielle Unterstützung von Massnahmen zur Boden- bzw. Kulturlandaufwertung in der Landwirtschaftszone</i> . 2016.
ÖLN	Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis vom 1. Januar 2017 aus KIP Richtlinien; Koordinationsgruppe Integrierte Produktion: Richtlinien Tessin und Deutschschweiz.
VSS	Schweizer Norm der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, 1999. Erdbau, Boden: Grundlagen. Erdbau, Boden: Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes. SN 640 581-583.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden, 2007. *Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Nutzungsfunktion «Rohstofflagerstätte» nach BBodSchG sowie der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Erosion und Verdichtung.* Ad-hoc-AG Boden des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO), Personenkreis «Grundlagen der Bodenfunktionsbewertung» (PK Bodenfunktionsbewertung). In Zusammenarbeit mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). 2. überarbeitete und ergänzte Auflage.
- 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.* Masterarbeit Geographisches Institut der Universität Bern (GIUB).
- Alder, S., Herweg, K., Liniger, H. P., Prasuhn, V., 2013. *Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2x2-Meter-Raster.* Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). Centre for Development and Environment (CDE) der Universität Bern.
- AMBIO GmbH, 2016. *Schlussbericht Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen.* Arbeitsgemeinschaft in angewandten Umweltwissenschaften, Zürich.
- ARE, Bundesamt für Raumentwicklung, 2006. *Sachplan Fruchtfolgeflächen FFF, Vollzugshilfe 2006.*
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2013. *Neue Chancen für den Bodenschutz.* Autorin: Mühlethaler B. Abrufbar unter www.bafu.admin.ch; Stichwort Dossiers > Boden: Dossiers.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2015. *Boden und Bauen. Stand der Technik und Praktiken.* Umwelt-Wissen Nr. 1508.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2016a. *Vorträge: «Bodenstrategie Schweiz» und «Kompetenzzentrum Boden» an der Aussprache zum Bodenschutz vom 31.05.2016, Bern.*
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2016b. *Ziele und Stossrichtungen für den nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Grundlagen der Bundesverwaltung im Hinblick auf die Erarbeitung einer nationalen Bodenstrategie.* Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Projektoberleitung: Gérard Poffet (BAFU), Bettina Hitzfeld (BAFU), Erwin Wieland (ASTRA), Stephan Scheidegger (ARE), Andreas Möri (swisstopo), Hans-Peter Nützi (BFE), Eva Reinhard (BLW).
- BAFU, Bundesamt für Umwelt und BLW, Bundesamt für Landwirtschaft, 2008. *Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen.* Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BGS, Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 2010. *Klassifikation der Böden der Schweiz KLABS.*
- BLW, Bundesamt für Landwirtschaft und BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2013. *Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft.* Umwelt-Vollzug Nr. 1313.
- BLW, Bundesamt für Landwirtschaft, 2011. *Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft.*
- Borer, F. und Knecht, M., 2014. *Bodenkartierung Schweiz. Entwicklung und Ausblick.* Hrsg.: Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Arbeitsgruppe Bodenkartierung.
- BRP, Bundesamt für Raumplanung und BLW, Bundesamt für Landwirtschaft, 1992. *Sachplan Fruchtfolgeflächen (FFF). Festsetzung des Mindestumfanges der Fruchtfolgeflächen und deren Aufteilung auf die Kantone.*
- Brügger, S., 2011. *Einfluss von Direktsaat- und Pflugsystem auf die Schneckenaktivität. Untersuchungen auf der Dauerbeobachtungsfläche «Oberacker» in Zollikofen unter Berücksichtigung der Düngesysteme Kinsey und GRUDAF sowie unterschiedlicher Kalkgaben.* Bachelorarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB).

- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, 1997. *Bodenbeobachtung im Kanton Bern: Ein physikalisch-biologisch-chemischer Ansatz.*
- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, 1996. *Methoden-Sammlung landwirtschaftlicher Dauerbeobachtungsstandorte (nicht publiziert).*
- Burgos, S., 2017. *Persönliche Mitteilung. HAFL Zollikofen.*
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1996. *Handbuch Waldbodenkartierung. Bearbeitung: Eidgenössische Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau, FAP.*
- BVE, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion, VOL, Volkswirtschaftsdirektion und GEF, Gesundheits- und Fürsorgedirektion des Kantons Bern, 1996. *Programm zur Ursachenbekämpfung der Nitratauswaschung im Kanton Bern 1989-1995. Schlussbericht. Fachkommission Nitratbekämpfung, Projektgruppe Nitrat.*
- Caspers, 2013. *Landwirtschaftliche Nutzung eines Niedermooses im Gürbetal, Schweiz. Fachstelle Bodenschutz, Zollikofen.*
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G., Zuber, M., Stettler, M., Weisskopf, P., Zihlmann, U., Martínez, I., Keller, T., 2016a. *Erträge und Bodenparameter nach 20 Jahren Direktsaat und Pflug. Agrarforschung Schweiz 5, 216–223.*
- Chervet, A., Sturny, W. G., Weisskopf, P., Sommer, M., Martínez I., Keller, T., 2016b. *Bodenporosität und Gastransport nach 19 Jahren Direktsaat und Pflug. Agrarforschung Schweiz 5, 224–231.*
- Chervet, A., Sturny, W. G., Gut, S., Sommer, M., Stettler, M., Weisskopf, P., Keller, T., 2016c. *Die maximal tragbare Radlast – eine zweckmässige Kenngrösse für die Praxis. Agrarforschung Schweiz 7–8, 330–337.*
- Chervet, A., Sturny, W. G., Tschannen, S., Fehr, M., Keller, T., 2016d. *Direktsaat zahlt sich aus. UFA-Revue, Fachzeitschrift der fenaco-LANDI Gruppe 7–8, 30–32.*
- Chervet, A., Sturny, W. G., Ott, S., 2013. *Wieviel Glyphosat benötigt ein Direktsaatsystem? Neue Strategien erprobt. Landwirtschaft ohne Pflug (LOP) 1/2, 23–26.*
- Council on Soil Testing and Plant Analysis, 1992. *Handbook on Reference Methods for Soil Analysis. The Council. University of Wisconsin, Madison.*
- Diek, S., Schaepman, M., de Jong, R., 2016. *Creating multi-temporal composites of airborne imaging spectroscopy data in support of digital soil mapping, Remote Sensing, 8(11).*
- Di Giulio, M., und Zeyer, J., 2013. *Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden. Nationales Forschungsprogramm (NFP68), Flyer.*
- Dubler, A., 2010. *Historisches Lexikon der Schweiz. Grosses Moos. Abrufbar unter www.hls-dhs-dss.ch.*
- FaBo ZH, Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 1996. *Abklärung des Handlungsbedarfs bezüglich der Nutzung von organischen Böden im Kanton Zürich.*
- FAL, Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 1997. *Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Schriftenreihe FAL 24.*
- Fenner, S., 2007. *Torfeigenschaften und Moorsackungsraten von landwirtschaftlich genutzten Böden im Gebiet Witzwil. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.*
- Fisch, F., 2016. *Mikroben: Die neuen Partner der Bauern. Horizonte – Das Schweizer Forschungsmagazin Nr. 110, 38–39.*
- Fish, A. N. und Koppi, A. J., 1994. *The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. Geoderma 63, 255–264.*
- Flisch, R., Zihlmann, U., Briner, P., Richner, W., 2013. *Das CULTAN-Verfahren im Eignungstest für den schweizerischen Ackerbau. Agrarforschung Schweiz 4, 40–47.*

- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R., Richner W., 2009. GRUDAF 2009, Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Forschungsanstalten Agroscope Changins-Wädenswil ACW und Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Agrarforschung 16.
- FOCUS, 2006. Guidance Document on Estimating Persistence and Degradation Kinetics from Environmental Fate Studies on Pesticides in EU Registration. The Final Report of the Work Group on Degradation Kinetics of FOCUS.
- Frei, E., Peyer, K., Jäggi, F., 1972. Verbesserungsmöglichkeiten der Moorböden des Berner Seelandes. Mitteilungen für die Schweizer Landwirtschaft 20 (11).
- Frey, B., 2010. Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 498–503.
- Frey, B. und Hartmann, M., 2013. Biodiversität von Waldböden – Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. Ber. 6.
- Frey, B., Niklaus, P. A., Kremer, J., Lüscher, P., Zimmermann, S., 2011. Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. Appl. Environ. Microbiol. 77, 6060–6068.
- Frey, B., Kremer, J., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P., 2010. Soil bacterial community structure reacts to compaction of forest soils with logging machinery. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS). Bulletin 30, 109–112.
- Frey, B., Kremer, J., Rudt, A., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. Eur. J. Soil Biol. 45: 312–320.
- Frey, B. und Lüscher, P., 2008. Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. LWF aktuell 67, 5-7.
- Das Geoportal des Bundes. BLW Bundesamt für Landwirtschaft. Boden, 2017. Abrufbar unter www.geo.admin.ch.
- Gerber, C., 2014. Funktionale Bodenbewertung Lyss. Die Erstellung von Bodenfunktionskarten für das Kartenblatt Lyss. Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB).
- Göttlich, K., 1990. Moor- und Torfkunde. 3. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Nägele und Obermiller, Stuttgart.
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., in Vorbereitung. Integrating of soil functions in the assessment of ecosystem services, To be submitted to Ecosystem Services.
- Greiner, L., Keller, A., Zimmermann, S., Papritz, A., 2014. Bodenfunktionsbewertung. Die Rolle des Bodens anderen Fachdisziplinen kommunizieren. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS). Bulletin 35, 23–28.
- Greiner, L., Schwab, P., Zimmermann, S., Nussbaum, M., Papritz, A., Keller, A., 2016. Bodenfunktionen bewerten: Anwendungsbeispiele Wasserhaushalt und Landwirtschaft. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS). Bulletin 37, 17–23.
- Grob, U., Ruef, A., Zihlmann, U., Klauser, L., Keller, A., 2015. Agroscope Bodendatenarchiv, Bodendaten aus Bodenkartierungen 1953–1996. Hrsg.: Agroscope. Umwelt, Agroscope Science 14. ISBN: 978-3-905667-99-8.
- Gut, S., Chervet, A., Stettler, M., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Lamandé, M., Schjønning, P., Keller, T., 2015. Seasonal dynamics in wheel load-carrying capacity of a loam soil in the Swiss Plateau. Soil Use and Management 31, 132–141.
- Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Lüscher, P., Widmer, F., Frey, B., 2014. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. ISME Journal 8, 226–244.

- Hofer, Ch., 2013. *Persönliche Mitteilung, BLW Bern.*
- Imhof, C., 2016. *Langfristige Glyphosat- und AMPA-Anreicherungen im Boden der Versuchsfläche Oberacker (BE). Masterprojekt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, Institute of Environmental Engineering.*
- IUSS Working Group WRB, 2006. *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Report No. 103. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.*
- Jampen, M. und Möri, Th., 2006. *Torfsackung im Seeland. Diplomarbeit an der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL).*
- Kägi, A., Loeu, F., Vogelsang, S., 2016. *Fusarien- und Mykotoxinuntersuchung. Förderprogramm Boden des Kantons Bern. Bericht Ernte 2014 und Zusammenfassung der fünf Studienjahre 2010–2014. Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften, Forschungsgruppe Ökologie von Schad- und Nutzorganismen.*
- Kinsey, N. und Walters, Ch., 2014. *Neal Kinseys Hands-on Agronomy. Der etwas andere Blick auf Bodenfruchtbarkeit und Düngung. Bayer Handelsvertretung York-Th. Bayer, Berlin.*
- König, D., 2015. *Erfolgskontrolle von Kulturlandverbesserungsmassnahmen im Grossen Moos, Kanton Bern. Masterarbeit am Departement für Umweltsystemwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich.*
- Kuntze, H., 1983. *Probleme bei der modernen landwirtschaftlichen Moornutzung. TELMA. Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde 13, 137–152.*
- Kupper, T. und Bonjour, C., 2016. *Berechnung der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft des Kantons Bern für die Jahre 2007 und 2015. Berner Fachhochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Bonjour Engineering GmbH.*
- LANAT, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, 2014. *Grosses Moos. Projektbeschreibung für die Ausarbeitung eines Konzeptes «Bodennutzung» zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Verbesserung des Wasserhaushaltes (nicht publiziert).*
- LANAT, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, 2010. *2000–2005: Nitrat-Pilot-Projekt; 2006–2009: Grundwasserschutz mittels bodenschonender Anbausysteme und angepasstem Stickstoff-Management. Gemeinde Walliswil bei Wangen. Schlussbericht. Bodenschutzfachstelle.*
- Lauper, Hp., 2017. *Persönliche Mitteilung, LANDAG Seedorf (BE).*
- Lazzini, M. V., 2016. *Eine Nachhaltigkeitsanalyse des Förderprogramms Boden Kanton Bern. Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB).*
- Ledermann, T., 2012. *Multiple Implications of Soil Erosion and Conservation on Arable Farm Land in the Swiss Midlands. Inauguraldissertation am Centre for Development and Environment (CDE) am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB).*
- Ledermann, T., Schneider, F., Herweg, K., Liniger, H. P., Hurni, H., Prasuhn, V., 2010. *Kosten der Bodenerosion in der Schweiz. Centre for Development and Environment (CDE) am Geographischen Institut der Universität Bern.*
- Lüdi, W., 1935. *Das Grosse Moos im westschweizerischen Seeland und die Geschichte seiner Entstehung. Verlag Huber, Bern.*
- Lüscher, P., Frutig, F., Thees, O., 2016. *Physikalischer Bodenschutz im Wald. Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1607.*
- Lüscher, P., 2010. *Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach mechanischer Belastung. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 504–509.*

- LWEK74: Die Landwirtschaftliche Eignungskarte des Kantons Bern, 1974. Planungsamt des Kantons Bern, Abteilung kantonale Pläne und Grundlagen. LANAT, Amt für Landwirtschaft und Natur, Bern.
- Maché R., Marcos, C., Leroy, A., Jensen, D., 2012. Auf Entdeckungsreise in den Boden. *FLUR UND FURCHE* 1, 14–18.
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Etana, A., Stettler, M., Forkmann, J., Keller, T., 2016a. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. *Soil & Tillage Research* 163, 141–151.
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Rek, J., Keller, T., 2016b. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. *Soil & Tillage Research* 163, 130–140.
- MeteoSchweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Schweiz. Klimanormwert 1981–2010. Abrufbar unter www.meteoschweiz.admin.ch; Stichwort climate-data.
- Meteotest, 2016. Evaluation Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Im Auftrag der Abteilung Boden und Biotechnologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Müller-Altermatt, S., 2012. Motion 12.4230 «Nationales Kompetenzzentrum Boden als Gewinn für Landwirtschaft, Raumplanung und Hochwasserschutz» von Nationalrat Stefan Müller-Altermatt vom 14. Dezember 2012.
- NABODAT, 2014. NABODAT Verbundwebseite. Abrufbar unter www.nabodat.ch
- NFP68, 2016: Das NFP68 «Ressource Boden» beginnt mit der Programmsynthese. Ressource Boden, Nationales Forschungsprogramm NFP68. Abrufbar unter www.nfp68.ch; Stichwort News.
- Nussbaum, M., 2014. Vorstudie zur Wirkungsbeurteilung des Förderprogramms «Boden» des Kantons Bern. Diplomarbeit im Nachdiplomstudium in angewandter Statistik am Institut für mathematische Statistik und Versicherungslehre der Universität Bern.
- Nussbaum, M., 2017. Digital soil mapping for Switzerland. Evaluation of statistical approaches and mapping of soil properties. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich.
- Oldenburg E., Kramer, S., Schrader, S., Weinert, J., 2008. Impact of the earthworm *Lumbricus terrestris* on the degradation of *Fusarium*-infected and deoxynivalenol-contaminated wheat straw. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 3049–3053.
- Prasuhn, V., Alder, S., Liniger, H. P., Herweg, K., 2014. Hoch aufgelöste Erosionsrisiko- und Gewässeranschlusskarten als Hilfsmittel für den Vollzug. 4. Umweltökologisches Symposium, Raumberg-Gumpenstein, 75–80.
- Prasuhn, V., 2012. On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil & Tillage Research* 120, 137–146.
- Presler, J. und Gysi, C., 1989. Organische Böden des schweizerischen Mittellandes. Dokumentation über Ausdehnung, Nutzung, Bewirtschaftung und Melioration (Bd. 28). Nationales Forschungsprogramm 22 «Nutzung des Bodens in der Schweiz», Programme de Recherche 22 «Utilisation du Sol en Suisse». Liebefeld-Bern. ISBN: 978-3-907086-20-9.
- Regierungsrat des Kantons Bern, 2016. Kantonaler Richtplan. RRB Nr. 1032/2015 vom 2. September 2015, genehmigt durch den Bundesrat am 4. Mai 2016.
- Regierungsrat des Kantons Bern, 2015. Inventar der Fruchtfolgeflächen. Ergänzung mit den Zusatzflächen 2015. RRB Nr. 1038/2015 vom 2. September 2015.
- Schjønning, P., Brūsen, I. K., Moldrup, P., Christensen, B. T., 2003. Linking soil microbial activity to water and air-phase contents and diffusivities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 156.

- Schrader, S., Kramer, S., Oldenburg, E., Weinert, J., 2009. Uptake of deoxynivalenol by earthworms from *Fusarium*-infected wheat straw. *Mycotox Res.* 25, 53–58.
- SNF (1), Schweizerischer Nationalfonds, 2016. NFP68, Ressource Boden, Portrait. Abrufbar unter www.nfp68.ch; Stichwort Portrait.
- SNF (2), Schweizerischer Nationalfonds, 2016. Nachhaltige Bewirtschaftung organischer Böden. Abrufbar unter www.nfp68.ch; Stichwort Projekte > Themenschwerpunkt 1.
- Stepniewsky, W., 1981. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. II. Oxygen diffusion coefficient. *Pol. J. Soil Sci.* 14, 3–13.
- Stepniewsky, W., 1980. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. I. ODR. *Pol. J. Soil Sci.* 13, 3–13.
- Thomas, F., Archambeaud, M., Waligora, C., Sturny, W.G., Chervet, A., 2015. Oberacker a fête ses 20 ans : bilans et perspectives. Dossier ressources, *Techniques Culturelles Simplifiées (TCS)* 85, 6–27.
- Tschumi, S., 2011. Auftreten von ausdauernden Unkräutern/Ungräsern in Abhängigkeit des Anbausystems Pflug – Direktsaat. *Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL)*.
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2016. Schlussbericht Förderprogramm Boden.
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2009. Bodenbericht 2009.
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2008. Förderprogramm Boden Kanton Bern; Gesuch an das BLW.
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2003. Bodenbericht 2003.
- Walter, H., 2010. Postulat 10.352 «Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderung» von Nationalrat Hansjörg Walter vom 17. Juni 2010.
- Wetzel, K., Silva, G., Matczinski U., Oehl, F., Fester, T., 2014. Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungal communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP. *Soil Biology & Biochemistry* 72, 88–96.
- Wolfarth, F., Schrader, S., Oldenburg, E., Brunotte, J., 2016. Mycotoxin contamination and its regulation by the earthworm species *Lumbricus terrestris* in presence of other soil fauna in an agroecosystem. *Plant Soil* 402, 331–342.
- Wolfarth, F., Schrader, S., Oldenburg, E., Weinert, J., Brunotte, J., 2011. Earthworms promote the reduction of *Fusarium* biomass and deoxynivalenol content in wheat straw under field conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1858–1865.
- Wyler, R., 2010. Ackerböden im Kanton Bern. Verdichtungsgefährdung durch Befahren. Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB).
- Wyss, E., 2016. Persönliche Mitteilung, BLW Bern.
- Zahangir, K., 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science* 85(1), 23–29.
- Zihlmann, U., 2015. Die sechs vereinfachten Bodenprofilbeschreibungen der Standorte Gampelen (Gyger), Witzwil (Burri) und Ins (Haslebacher), die NICHT in der Masterarbeit von Denise König enthalten sind. Aufgenommen im Oktober 2014, Bern (nicht publiziert).

Weitere Internetquellen

www.be.ch/bodenschutz unter dem Register Förderprogramm (Kapitel 2); Internetseite zum abgeschlossenen Förderprogramm des Kantons Bern.

www.be.ch/bodenschutz unter dem Register Bodenzustand bzw. KABO (Kapitel 3); Detaillierte Auswertung zum abgeschlossenen Förderprogramm Boden.

www.be.ch/bodenschutz unter dem Register Dauerbeobachtungsfläche Oberacker (Kapitel 4); Publierte Artikel zu langjährigen agronomischen, ökonomischen und pedologischen (Bodenphysik und Bodenbiologie) Erhebungen sowie eine einmalige Untersuchung zu möglichen Rückständen von Glyphosat.

www.be.ch/bodenschutz Liste der bodenkundlich versierten Personen des INFORAMA (Kapitel 6); Personen, die bei bodenkundlichen Problemen kleineren Umfangs beratend zur Seite stehen.

www.be.ch/bodenschutz unter den Registern Bodenzustand > Bodenfeuchte (Kapitel 10); Aktuelle Messwerte (Saugspannung und Niederschlag) an 6 ausgewählten Standorten im Kanton Bern.

www.blw.admin.ch unter dem Suchbegriff: Aktionsplan-Pflanzenschutzmittel (Kapitel 4); Internetseite des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW).

www.blw.admin.ch unter dem Suchbegriff Produktionssystembeiträge (Verzeichnis der Normen, Richtlinien und Merkblätter); Internetseite des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW).

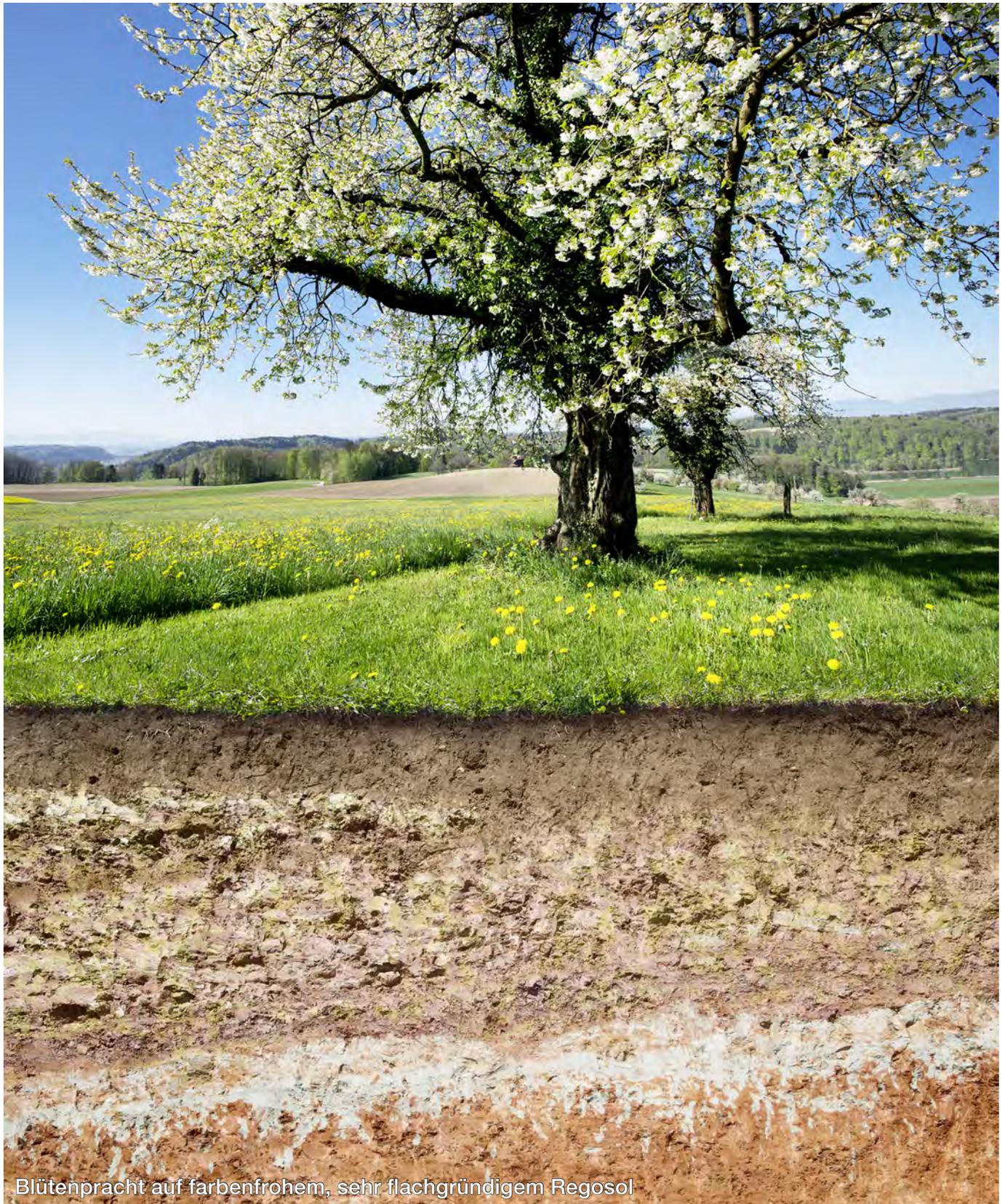
www.bodenmessnetz.ch (Kapitel 10); Internetseite der Nordwestschweizer Kantone, die Boden- und Meteoparameter anhand automatischer Messstationen publizieren.

www.bve.be.ch unter den Registern Umwelt > Boden > Terrainveränderungen (Kapitel 6); Hinweise zu Standorten mit degradierten Böden des Kantons Bern.

www.geo.apps.be.ch (Kapitel 6); Verfügbare Bodenkarten des Kantons Bern. Geoportal des Kantons Bern. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern. Amt für Geoinformation.

www.terranimmo.ch (Kapitel 2, 4, und 10); Simulationsmodell für die Berechnung des Bodenverdichtungsrisikos beim Einsatz von landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).

Anhang



Blütenpracht auf farbenfrohem, sehr flachgründigem Regosol

Anhang 1: Erosionsvollzug ab 2017 in Eigenverantwortung und mit Selbstdeklaration

Gemäss *Umweltschutzgesetz* (USG) und *Direktzahlungsverordnung* (DZV)

Für eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion muss Bodenerosion möglichst vermieden werden. Im neuen Erosionsvollzug gelten ab 2017 unten stehende Regelungen. Bund und Kanton plädieren für Eigenverantwortung bzw. Selbstdeklaration. Zur Überprüfung der Eigenverantwortung (A) und Selbstdeklaration (B) erfolgen risikobasierte Kontrollen übers Jahr verteilt.

(A) Für den in EIGENVERANTWORTUNG vorbeugend handelnden Landwirt bedeutet dies folgende konkrete Schritte:

1. Der Landwirt erkennt Risikostellen und beurteilt sie mittels der Erosionsrisikokarte ERK2.
2. Der Landwirt handelt, indem er evtl. mit Beratung Lösungsstrategien entwickelt und Massnahmen wie beispielsweise *Schonende Bodenbearbeitung* gemäss Ressourceneffizienzbeiträgen (REB) oder *Reduktion von Abschwemmungs-Einträgen* gemäss Vorgaben des Berner Pflanzenschutzprojekts umsetzt.
3. Der Landwirt dokumentiert die getroffenen Massnahmen im Feldkalender oder in anderen offiziell anerkannten Dokumentationen.

→ Erosionsschäden auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN)

(B) SELBSTDEKLARATION bei Erosionsereignis: Der Landwirt meldet den Bodenabtrag ($>2-4 \text{ t ha}^{-1}$ gemäss der *Verordnung über Belastungen des Bodens* VBBö) der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Bern (FBS) zur Abklärung der Gründe:
Ist er *natur-* oder *infrastrukturbedingt* bzw. *bewirtschaftungsbedingt*?

Zwei Möglichkeiten bei **bewirtschaftungsbedingter Erosion**:

1. Der Landwirt setzt eigenverantwortlich selbst Massnahmen um.
Ein wiederholtes Erosionsereignis kann gemäss Ziffer 2.2.6. f, Anhang 8 DZV Direktzahlungskürzungen von mindestens CHF 500 bis höchstens CHF 5000 pro Parzelle zur Folge haben.
2. Der Landwirt erstellt selbst oder mit Beratung einen **Massnahmenplan** und lässt ihn von der FBS genehmigen.
Ein wiederholtes Erosionsereignis verlangt eine Anpassung der Massnahmen und hat **keine** Direktzahlungskürzungen zur Folge.

→ Erosionsschäden ausserhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN)

(an Infrastruktur, Gewässerverschmutzung etc.) gemäss USG

- Es folgt der strafrechtliche Weg mit Anzeige und Busse.
- Zudem muss ein Massnahmenplan erstellt und genehmigt werden.

Erosionsereignissen, die durch Drittpersonen gemeldet werden, wird nachgegangen. In diesen Fällen gelten Eigenverantwortung und Selbstdeklaration durch den Landwirt als nicht wahrgenommen.

Während des Jahres aufgetretene, nicht gemeldete Erosionsschäden $>2-4 \text{ t ha}^{-1}$ (siehe Bilder AGRIDEA-Merkblatt Erosion: *Wie viel Erde geht verloren?*) werden als bewirtschaftungsbedingt eingestuft.

Weitere Informationen zu Erosion, möglichen Massnahmen und der aktuell geltenden Gesetzgebung finden sich unter www.be.ch/bodenerosion.

Zollikofen, 15. Februar 2017 / Fachstelle Bodenschutz (Tel.: 031 636 49 07)

Anhang 2: Profile in Gampelen (ZIHLMANN 2015)

Die Tiefenangaben der in Anhang 2, 3 und 4 folgenden Profilbeschreibungen beziehen sich auf den aufgestellten Doppelmeter. Die Linien sind als Lesehilfe gedacht und entsprechen insbesondere auf der linken Profilseite nicht in jedem Fall dem Beschriebenen.

Profil a: tieftorfige Halbmoor-Referenz (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 210 cm)



0–30 cm: Aa,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

55 % Ton, 23 % Schluff, 22 % Sand – 27 % Humus – pH 6.9

30–55 cm: Th – stark zersetzter Torfhorizont;

18 % Ton, 73 % Schluff, 9 % Sand – 70 % Humus – pH 6.8

55–70 cm: Thf(g) – mässig zersetzter Torfhorizont mit Holzeinschlüssen (Eiche?);

30 % Ton, 63 % Schluff, 7 % Sand – 67 % Humus – pH 6.6

70–85 cm: CgTf – mässig zersetzter Torfhorizont mit schluffreichen Beimengungen, Holzeinschlüsse (Eiche?);

37 % Ton, 43 % Schluff, 20 % Sand – 69 % Humus – pH 6.8

85–100 cm: (Cg)Tfl – mässig bis kaum zersetzter Torfhorizont mit wenig schluffreichen Beimengungen und Holzeinschlüssen (Eiche?);

16 % Ton, 36 % Schluff, 48 % Sand – 48 % Humus – pH 6.8

100–120 cm: Tlf – kaum zersetzter Torfhorizont;

12 % Ton, 37 % Schluff, 51 % Sand – 45 % Humus – pH 7.0

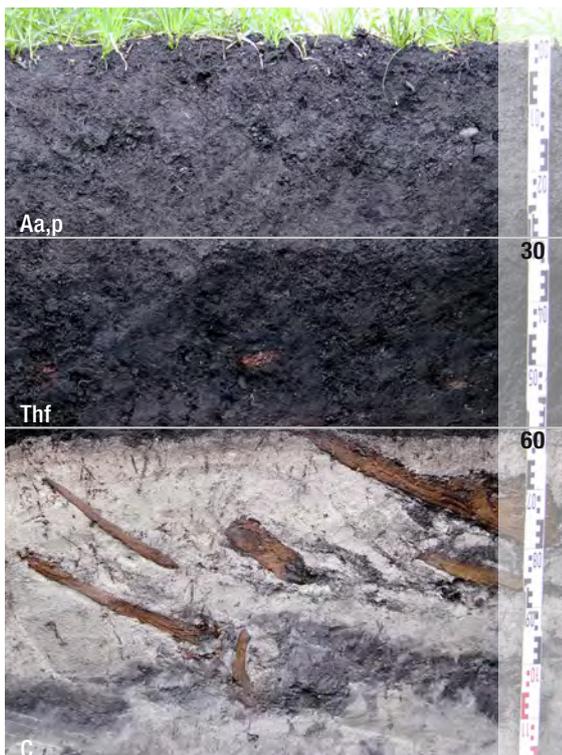
120–130 cm: CggTlf – kaum zersetzter Torfhorizont mit schluffreichen Beimengungen;

Körnung nicht beprobt

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 120 cm

unterhalb 130 cm: Cgg – feinsandige bis schluffreiche Schichten; Körnung nicht beprobt

Profil b: flachtorfige Halbmoor-Referenz (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 200 cm)



0–30 cm: Aa,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

1 % Ton, 24 % Schluff, 75 % Sand – 27 % Humus – pH 7.0

30–60 cm: Thf – stark bis mässig zersetzter Torfhorizont mit Holzeinschlüssen (Eiche?);

1 % Ton, 59 % Schluff, 40 % Sand – 60 % Humus – pH 6.8

unterhalb 60 cm: C – fein- bis mittelsandige und schluffreiche Schichten mit Holzeinschlüssen (Eiche?);

sandige Bereiche:

1 % Ton, 1 % Schluff, 98 % Sand – 0.5 % Humus – pH 7.2

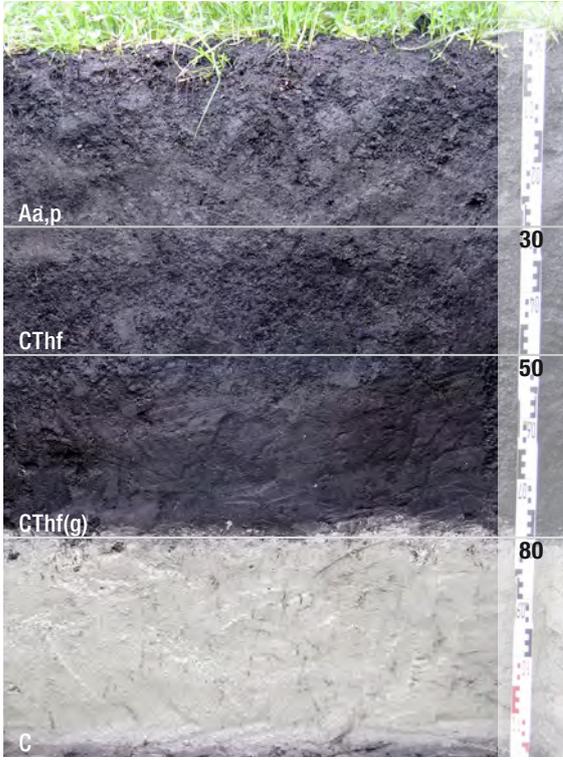
schluffige Bereiche:

1 % Ton, 19 % Schluff, 80 % Sand – 14 % Humus – pH 6.9

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 130 cm

unterhalb 125 cm: C – fein- und mittelsandige Schichten; Körnung nicht beprobt

Profil c: flachtorfige Halbmoor-Referenz (Profiltiefe: 120 cm; Bohrtiefe: 205 cm)



0–30 cm: Aä,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

17 % Ton, 7 % Schluff, 76 % Sand – 28 % Humus – pH 6.9

30–50 cm: CThf – stark bis mässig zersetzter Torfhorizont mit schluffreichen Beimengungen; z.T. Krümel- und Subpolyedergefüge;

2 % Ton, 54 % Schluff, 44 % Sand – 73 % Humus – pH 6.8

50–80 cm: CThf(g) – mässig bis stark zersetzter Torfhorizont mit schluffreichen Beimengungen;

1 % Ton, 79 % Schluff, 20 % Sand – 73 % Humus – pH 6.9

80–115 cm: C – mittelsandige Schicht;

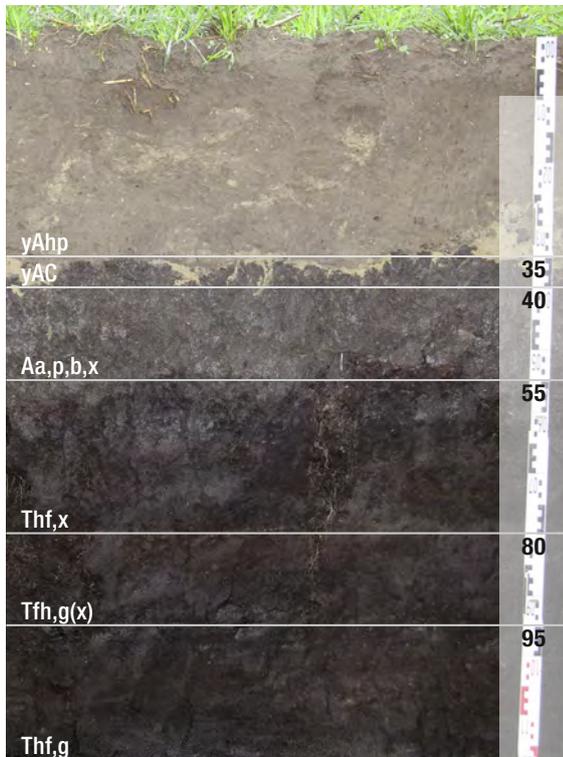
7 % Ton, 10 % Schluff, 83 % Sand – 0.4 % Humus – pH 8.0

115–125 cm: Cg – feinsandige und schluffreiche Schicht;

11 % Ton, 22 % Schluff, 67 % Sand – 5.0 % Humus – pH 7.6

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 125 cm

unterhalb 125 cm: C – fein- und mittelsandige Schichten;
Körnung nicht beprobt

Profil d: übersandetes tieftorfiges Halbmoor (Profiltiefe: 120 cm; Bohrtiefe: 190 cm)

0–35 cm: yAhp – humusarmer bis schwach humoser Bearbeitungshorizont (= Sanddeckschicht); Einzelkorn- und z. T. Krümelgefüge; 8 % Ton, 9 % Schluff, 83 % Sand – 4.7 % Humus – pH 7.8

35–40 cm: yAC – humusarme Sanddeckschicht; Einzelkorngefüge; 3 % Ton, 4 % Schluff, 93 % Sand – 3.6 % Humus – pH 8.5

40–55 cm: Aa,p,b,x – verdichteter, humusreicher, begrabener (= ehemaliger) Bearbeitungshorizont; Polyedergefüge; 61 % Ton, 31 % Schluff, 8 % Sand – 33.4 % Humus – pH 7.1

55–80 cm: Thf,x – stark bis mässig zersetzter, dichter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 50 cm); 43 % Ton, 48 % Schluff, 9 % Sand – 72.4 % Humus – pH 6.8

80–95 cm: Tfh,g(x) – mässig bis stark zersetzter, ziemlich dichter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 50 cm); 44 % Ton, 36 % Schluff, 20 % Sand – 38.7 % Humus – pH 6.9

95–140 cm: Thf,g – stark bis mässig zersetzter Torfhorizont; 29 % Ton, 41 % Schluff, 30 % Sand – 78.8 % Humus – pH 6.6

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 120 cm

unterhalb 140 cm: Cg – fein- und mittelsandige Schichten; Körnung nicht beprobt

Profil e: übersandetes tieftorfiges Halbmoor (Profiltiefe: 120 cm; Bohrtiefe: 180 cm)

0–35 cm: yAhp – schwach humoser Bearbeitungshorizont (= Sanddeckschicht); Subpolyeder-, Einzelkorn- und Krümelgefüge; 14 % Ton, 10 % Schluff, 76 % Sand – 5.2 % Humus – pH 7.6

35–47 cm: Aa,p,b,x – verdichteter, humusreicher, begrabener (= ehemaliger) Bearbeitungshorizont; Polyedergefüge; 46 % Ton, 33 % Schluff, 21 % Sand – 33 % Humus – pH 7.1

47–75 cm: Thf(x) – stark bis mässig zersetzter, ziemlich dichter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 65 cm); 47 % Ton, 44 % Schluff, 9 % Sand – 72 % Humus – pH 6.9

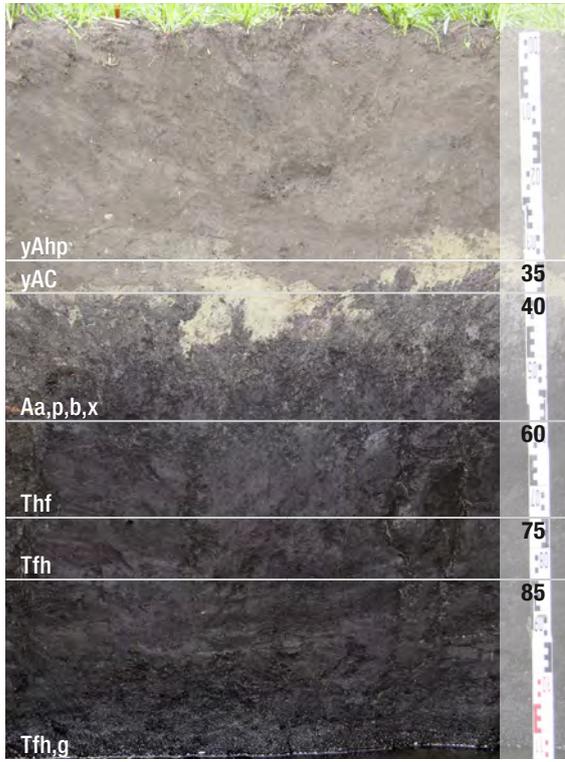
75–85 cm: Tfh(x) – mässig bis stark zersetzter, ziemlich dichter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 65 cm); 60 % Ton, 27 % Schluff, 13 % Sand – 78 % Humus – pH 6.9

85–145 cm: Thf – stark bis mässig zersetzter Torfhorizont; 28 % Ton, 52 % Schluff, 20 % Sand – 84 % Humus – pH 6.8

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 120 cm

unterhalb 145 cm: Cg – fein- und mittelsandige Schichten; Körnung nicht beprobt

Profil f: übersandetes tieftorfiges Halbmoor (Profiltiefe: 120 cm; Bohrtiefe: 185 cm)



0–30/35 cm: yAhp – schwach humoser Bearbeitungshorizont (= Sanddeckschicht); Einzelkorn-, Subpolyeder- und Krümelgefüge; 1 % Ton, 5 % Schluff, 94 % Sand – 4.5 % Humus – pH 7.4

30/35–35/45 cm: yAC – humusarme Sanddeckschicht; Einzelkorngefüge; 1 % Ton, 2 % Schluff, 97 % Sand – 4.4 % Humus – pH 6.8

35/45–60 cm: Aa,p,b,x – verdichteter, humusreicher, begrabener (= ehemaliger) Bearbeitungshorizont; Polyedergefüge; 1 % Ton, 13 % Schluff, 86 % Sand – 26 % Humus – pH 7.1

60–75 cm: Thf – stark bis mässig zersetzter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 50 cm); 1 % Ton, 68 % Schluff, 31 % Sand – 65 % Humus – pH 6.7

75–85 cm: Tfh – mässig bis stark zersetzter Torfhorizont (senkrechte, intensiv durchwurzelte Hohlräume durch Tiefenlockerung, Abstand ca. 50 cm); 23 % Ton, 76 % Schluff, 1 % Sand – 40 % Humus – pH 6.8

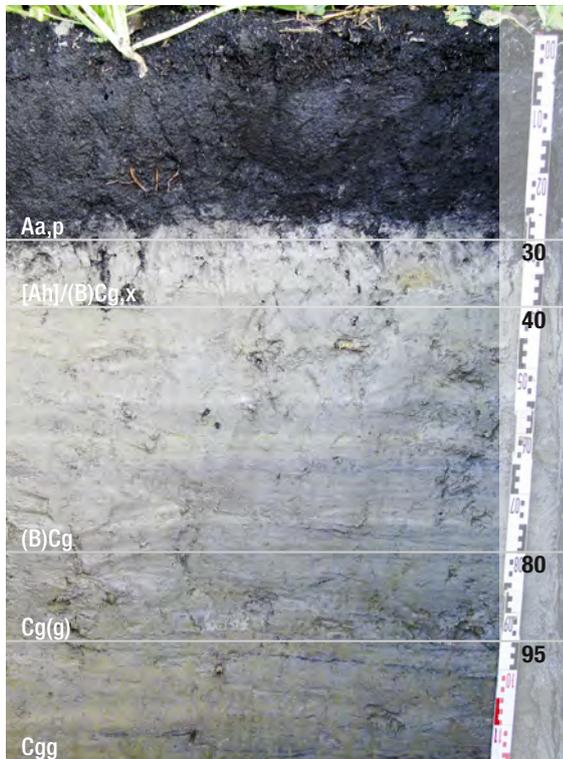
85–155 cm: Tfh,g – mässig bis stark zersetzter Torfhorizont; 1 % Ton, 71 % Schluff, 28 % Sand – 65 % Humus – pH: k. A.

Grundwasser-Stand am 09.10.2014: 110 cm

unterhalb 155 cm: Cg – fein- und mittelsandige Schichten; Körnung nicht beprobt

Anhang 3: Profile in Witzwil (ZIHLMANN 2015)

Profil a: anmoorige Fluvisol-Referenz (Profiltiefe: 125 cm; Bohrtiefe: 200 cm)



0–30 cm: Aa,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

34 % Ton, 35 % Schluff, 31 % Sand – 40 % Humus – pH 7.4

30–40 cm: [Ah]/(B)Cg,x – verdichteter, z. T. humushaltiger Horizont; Polyedergefüge;

31 % Ton, 48 % Schluff, 21 % Sand – 3.9 % Humus – pH 7.4

40–80 cm: (B)Cg – schluffreicher Horizont mit feinen Tonzwischenschichten; Kohärent- und Polyedergefüge;

12 % Ton, 61 % Schluff, 27 % Sand – 3.2 % Humus – pH 8.2

80–95 cm: Cg(g) – schluffreiche Schicht mit feinen Tonzwischenschichten;

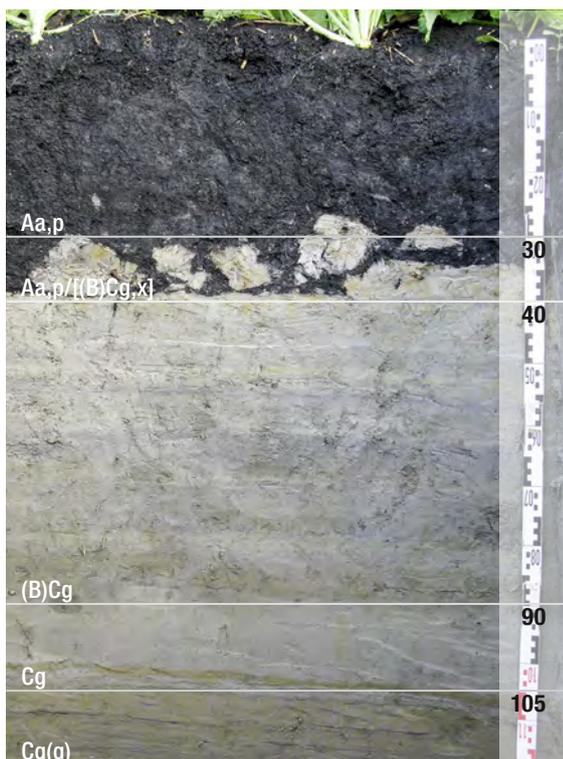
8 % Ton, 60 % Schluff, 32 % Sand – 3.1 % Humus – pH 8.4

unterhalb 95 cm: Cgg – schluffreiche Schicht mit feinen Tonzwischenschichten;

11 % Ton, 56 % Schluff, 33 % Sand – 4.4 % Humus – pH 8.2

Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 130 cm

Profil b: anmoorige Fluvisol-Referenz (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 190 cm)



0–30 cm: Aa,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

4 % Ton, 39 % Schluff, 57 % Sand – 38 % Humus – pH 6.9

30–40 cm: Aa,p/[(B)Cg,x] – verdichteter, z. T. humusreicher (Bearbeitungs-)Horizont; Polyedergefüge;

4 % Ton, 39 % Schluff, 57 % Sand – 2.3 % Humus – pH 7.2

40–90 cm: (B)Cg – schluffreicher Horizont mit feinen Tonzwischenschichten; Kohärent- und Polyedergefüge;

1 % Ton, 12 % Schluff, 87 % Sand – 4.4 % Humus – pH 7.4

90–105 cm: Cg – fein- und mittelsandige Schicht mit feinen Tonzwischenschichten;

1 % Ton, 11 % Schluff, 89 % Sand – 5.4 % Humus – pH 8.1

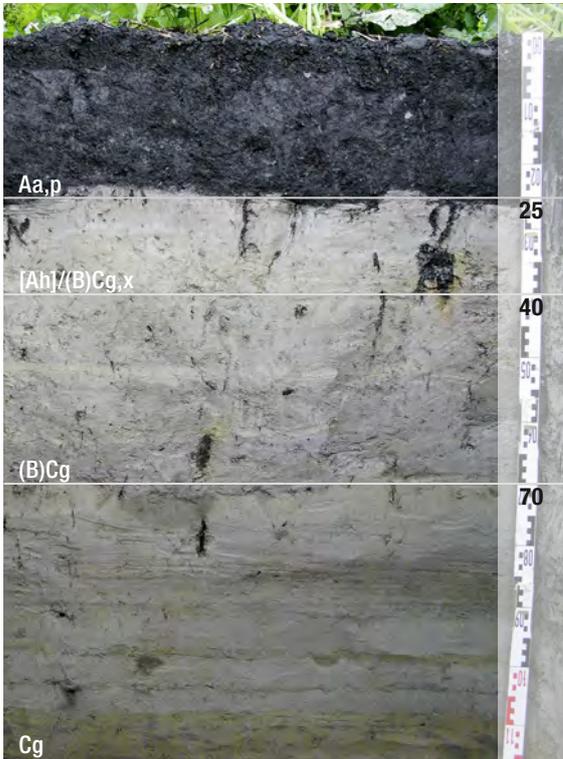
105–125 cm: Cg(g) – fein- und mittelsandige, z. T. schluffige Schichten mit feinen Tonzwischenschichten;

1 % Ton, 18 % Schluff, 82 % Sand – 5.9 % Humus – pH 8.0

Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 125 cm

unterhalb 125 cm: Cg – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten; Körnung nicht beprobt

Profil c: anmoorige Fluvisol-Referenz (Profiltiefe: 125 cm; Bohrtiefe: 200 cm)



0–25 cm: Aa,p – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

23 % Ton, 68 % Schluff, 9 % Sand – 42 % Humus – pH 6.5

25–40 cm: [Ah]/(B)Cg,x – verdichteter, z. T. humushaltiger Horizont; Polyedergefüge;

24 % Ton, 66 % Schluff, 10 % Sand – 3.6 % Humus – pH 7.5

40–70 cm: (B)Cg – schluffreicher Horizont mit feinen Tonzwischenschichten; Kohärent- und Polyedergefüge;

14 % Ton, 71 % Schluff, 15 % Sand – 3.3 % Humus – pH 8.2

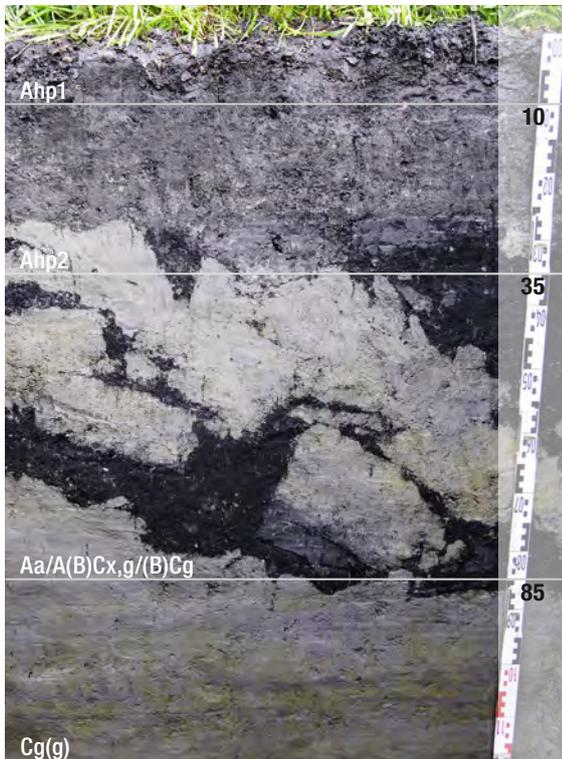
70–110 cm: Cg – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten mit feinen Tonzwischenschichten;

3 % Ton, 21 % Schluff, 76 % Sand – 4.4 % Humus – pH 8.5

unterhalb 110 cm: Cg(g) – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten mit feinen Tonzwischenschichten;

3 % Ton, 19 % Schluff, 78 % Sand – 2.0 % Humus – pH 8.5

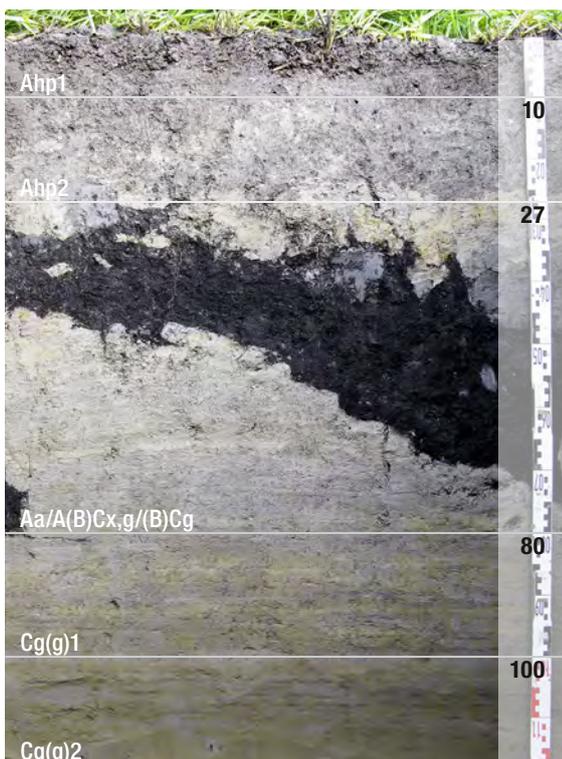
Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 135 cm

Profil d: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 180 cm)

- 0–10 cm: Ahp1 – humoser Bearbeitungshorizont (= Mulchsaatsystem); Krümel- und Subpolyedergefüge; 18 % Ton, 52 % Schluff, 30 % Sand – 11 % Humus – pH 7.4
- 10–35 cm: Ahp2 – humoser Bearbeitungshorizont; Subpolyedergefüge; 19 % Ton, 52 % Schluff, 29 % Sand – 14 % Humus – pH 7.6
- 35–85 cm: Aa/A(B)Cx,g/(B)Cg – Komplexhorizont infolge Tiefpflügens aus: ca. 30 % humusreichen Bereichen mit Subpolyedergefüge; 36 % Ton, 39 % Schluff, 25 % Sand – 31 % Humus – pH 7.4
ca. 5 % tonreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; 22 % Ton, 63 % Schluff, 15 % Sand – 3.9 % Humus – pH 8.0
ca. 65 % schluffreichen Bereichen mit Kohärent- und Polyedergefüge; 11 % Ton, 55 % Schluff, 34 % Sand – 5.6 % Humus – pH 8.4
- 85–120 cm: Cg(g) – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten mit feinen Tonzwischenschichten; 10 % Ton, 67 % Schluff, 23 % Sand – 7.3 % Humus – pH 8.1

Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 135 cm

- unterhalb 120 cm: Cg – fein- und mittelsandige und z. T. schluffige Schichten; 4 % Ton, 6 % Schluff, 90 % Sand – 8.5 % Humus – pH 8.8

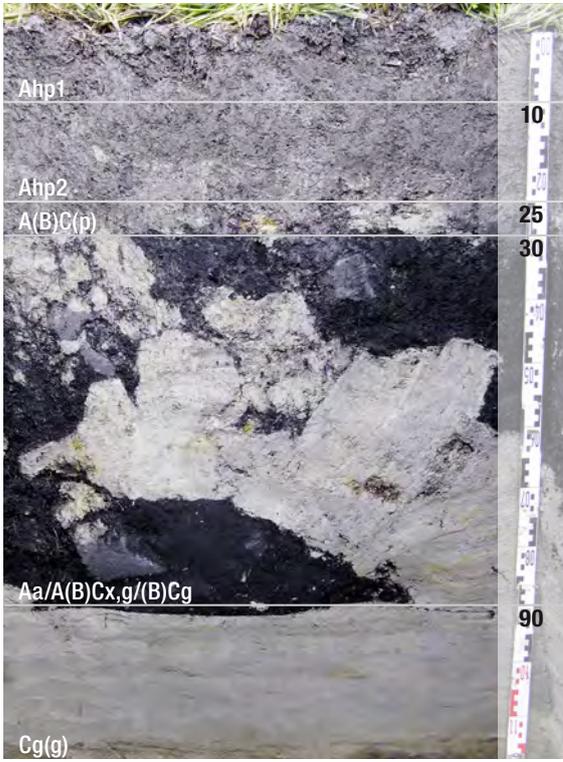
Profil e: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol (Profiltiefe: 125 cm; Bohrtiefe: 195 cm)

- 0–10 cm: Ahp1 – humoser Bearbeitungshorizont (= Mulchsaatsystem); Krümel- und Subpolyedergefüge; 17 % Ton, 59 % Schluff, 24 % Sand – 11 % Humus – pH 6.9
- 10–27 cm: Ahp2 – humoser Bearbeitungshorizont; Subpolyeder- und Polyedergefüge; 15 % Ton, 51 % Schluff, 34 % Sand – 8.4 % Humus – pH 7.3
- 27–80 cm: Aa/A(B)Cx,g/(B)Cg – Komplexhorizont infolge Tiefpflügens aus: ca. 25 % humusreichen Bereichen mit Subpolyedergefüge; 2 % Ton, 62 % Schluff, 36 % Sand – 46 % Humus – pH 7.2
ca. 5 % tonreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; 5 % Ton, 38 % Schluff, 57 % Sand – 7.1 % Humus – pH: k. A.
ca. 70 % schluffreichen Bereichen mit Kohärent- und Polyedergefüge; 1 % Ton, 49 % Schluff, 49 % Sand – 5.7 % Humus – pH 7.8
- 80–100 cm: Cg(g)1 – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten mit feinen Tonzwischenschichten; 1 % Ton, 31 % Schluff, 68 % Sand – 5.6 % Humus – pH 7.8

Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 135 cm

- unterhalb 100 cm: Cg(g)2 – fein- und mittelsandige und z. T. schluffige Schichten; 1 % Ton, 1 % Schluff, 98 % Sand – 2.2 % Humus – pH 8.2

Profil f: tiefgepflügter, ursprünglich anmooriger Fluvisol (Profiltiefe: 125 cm; Bohrtiefe: 200 cm)



0–10 cm: Ahp1 – humoser Bearbeitungshorizont (Mulchsaatsystem); Krümel- und Subpolyedergefüge;

19 % Ton, 61 % Schluff, 20 % Sand – 4.9 % Humus – pH 7.6

10–25 cm: Ahp2 – humoser Bearbeitungshorizont; Subpolyedergefüge; 20 % Ton, 63 % Schluff, 17 % Sand – 11.2 % Humus – pH 7.8

25–30 cm: A(B)C(p) – humushaltiger Übergangshorizont mit Polyedergefüge;

1 % Ton, 70 % Schluff, 29 % Sand – 11 % Humus – pH 7.6

30–90 cm: Aa/A(B)Cx,g/(B)Cg – Komplexhorizont infolge Tiefpflügens aus: ca. 36 % humusreichen Bereichen mit Subpolyedergefüge;

26 % Ton, 44 % Schluff, 30 % Sand – 41.5 % Humus – pH 7.2

ca. 8 % tonreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge;

23 % Ton, 63 % Schluff, 14 % Sand – 5.2 % Humus – pH 7.9

ca. 56 % schluffreichen Bereichen mit Kohärent- und Polyedergefüge;

6 % Ton, 61 % Schluff, 33 % Sand – 7.7 % Humus – pH 8.1

90–120 cm: Cg(g)1 – fein- und mittelsandige Schichten;

4 % Ton, 5 % Schluff, 91 % Sand – 6.1 % Humus – pH 9.0

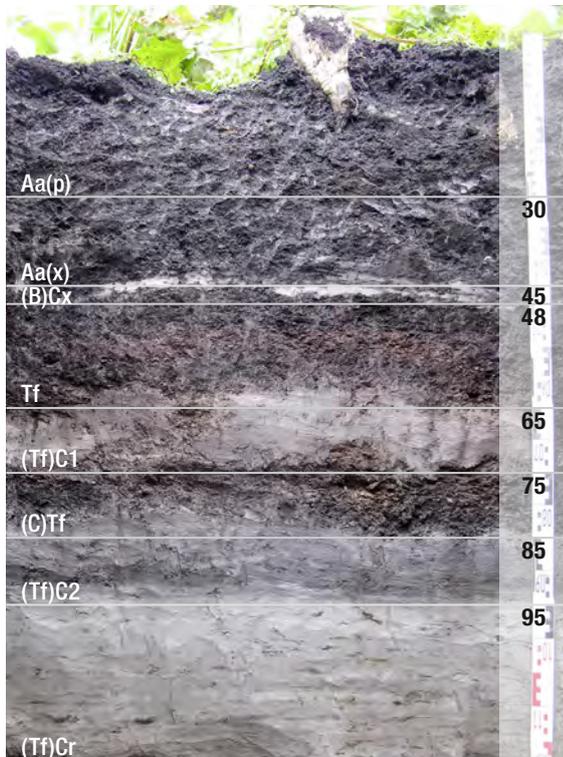
Grundwasser-Stand am 13.10.2014: 135 cm

unterhalb 120 cm: Cg(g)2 – fein- und mittelsandige und schluffige Schichten;

6 % Ton, 39 % Schluff, 55 % Sand – 7.9 % Humus – pH 8.3

Anhang 4: Profile in Ins (ZIHLMANN 2015)

Profil a: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 125 cm; Bohrtiefe: 220 cm)

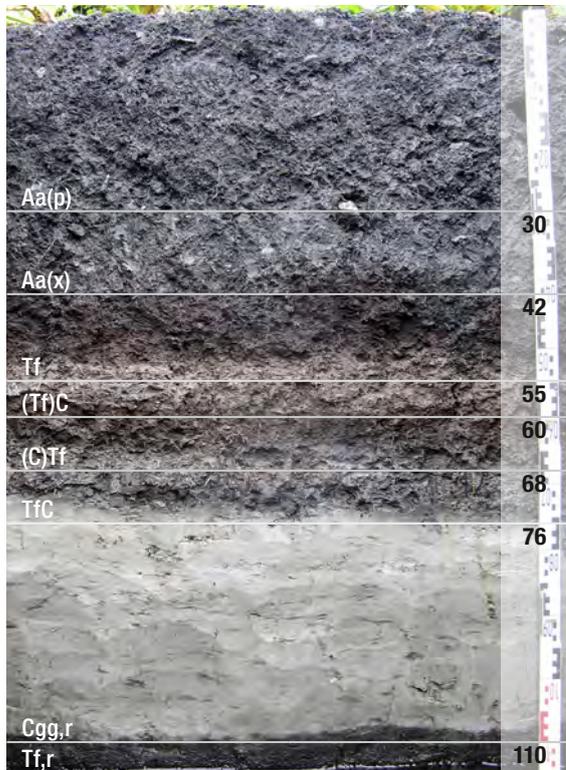


- 0–30 cm: Aa(p) – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;
26 % Ton, 26 % Schluff, 48 % Sand – 16 % Humus – pH 7.1
- 30–45 cm: Aa(x) – ziemlich verdichteter, humusreicher Horizont;
Polyedergefüge;
19 % Ton, 28 % Schluff, 53 % Sand – 34 % Humus – pH 7.0
- 45–48 cm: (B)Cx – stark verdichteter Horizont; Kohärentgefüge;
Körnung nicht beprobt
- 48–65 cm: Tf – mässig zersetzter Torfhorizont;
1 % Ton, 83 % Schluff, 16 % Sand – 90 % Humus – pH 5.4
- 65–75 cm: (Tf)C1 – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von
mässig zersetztem Torf;
60 % Ton, 31 % Schluff, 9 % Sand – 25 % Humus – pH 4.9
- 75–85 cm: (C)Tf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen
Beimengungen;
Körnung nicht beprobt
- 85–95 cm: (Tf)C2 – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von
mässig zersetztem Torf;
Körnung nicht beprobt
- 95–120 cm: (Tf)Cr – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von
mässig zersetztem Torf;
20 % Ton, 57 % Schluff, 23 % Sand – 6.2 % Humus – pH 7.5

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 112 cm

- 120–155 cm: Tf,r – mässig zersetzter Torfhorizont;
5 % Ton, 67 % Schluff, 28 % Sand – 43 % Humus – pH 5.2
- unterhalb 155 cm: Cr – tonig-schluffige Schichten;
Körnung nicht beprobt

Profil b: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 135 cm; Bohrtiefe: 220 cm)



0–30 cm: Aa(p) – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

26 % Ton, 35 % Schluff, 39 % Sand – 35 % Humus – pH 7.0

30–42 cm: Aa(x) – ziemlich verdichteter, humusreicher Horizont; Polyedergefüge;

25 % Ton, 38 % Schluff, 37 % Sand – 32 % Humus – pH 6.6

42–55 cm: Tf – mässig zersetzter Torfhorizont;

1 % Ton, 85 % Schluff, 14 % Sand – 66 % Humus – pH 6.2

55–60 cm: (Tf)C – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;

62 % Ton, 33 % Schluff, 5 % Sand – 21 % Humus – pH 5.7

60–68 cm: (C)Tf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;

Körnung nicht beprobt

68–76 cm: TfC – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;

Körnung nicht beprobt

76–110 cm: Cgg,r – tonig-schluffiger Horizont;

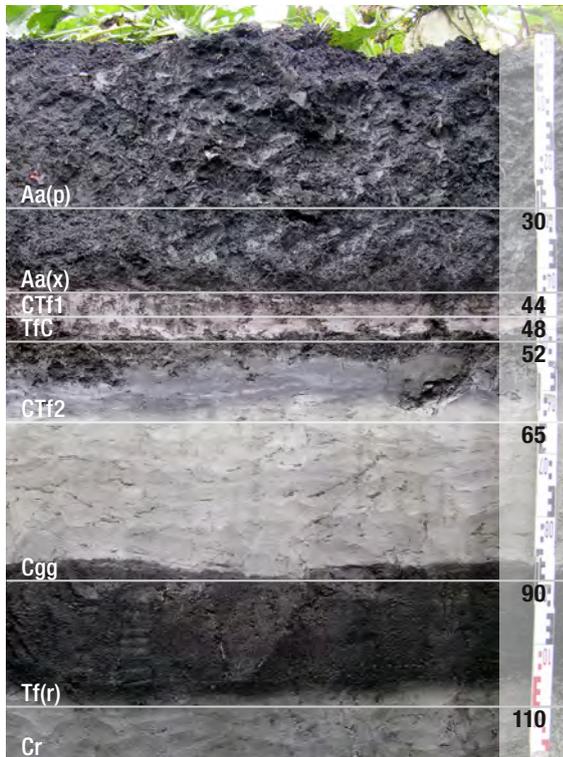
20 % Ton, 70 % Schluff, 10 % Sand – 8.8 % Humus – pH 7.7

110–145 cm: Tf,r – mässig zersetzter Torfhorizont;

5 % Ton, 87 % Schluff, 8 % Sand – 89 % Humus – pH 5.3

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 115 cm

unterhalb 145 cm: Cr – tonig-schluffige Schichten;
Körnung nicht beprobt

Profil c: anmoorige Buntgley-Referenz mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 225 cm)

0–30 cm: Aa(p) – humusreicher Bearbeitungshorizont; Krümel- und Subpolyedergefüge;

41 % Ton, 47 % Schluff, 12 % Sand – 21 % Humus – pH 7.4

30–44 cm: Aa(x) – ziemlich verdichteter, humusreicher Horizont; Polyedergefüge;

56 % Ton, 38 % Schluff, 6 % Sand – 35 % Humus – pH 6.9

44–48 cm: CTf1 – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;

Körnung nicht beprobt

48–52 cm: TfC – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;

68 % Ton, 30 % Schluff, 2 % Sand – 18 % Humus – pH 6.0

52–65 cm: CTf2 – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;

Körnung nicht beprobt

65–90 cm: Cgg – tonig-schluffiger Horizont;

19 % Ton, 59 % Schluff, 22 % Sand – 5.2 % Humus – pH 7.7

90–110 cm: Tf(r) – mässig zersetzter Torfhorizont;

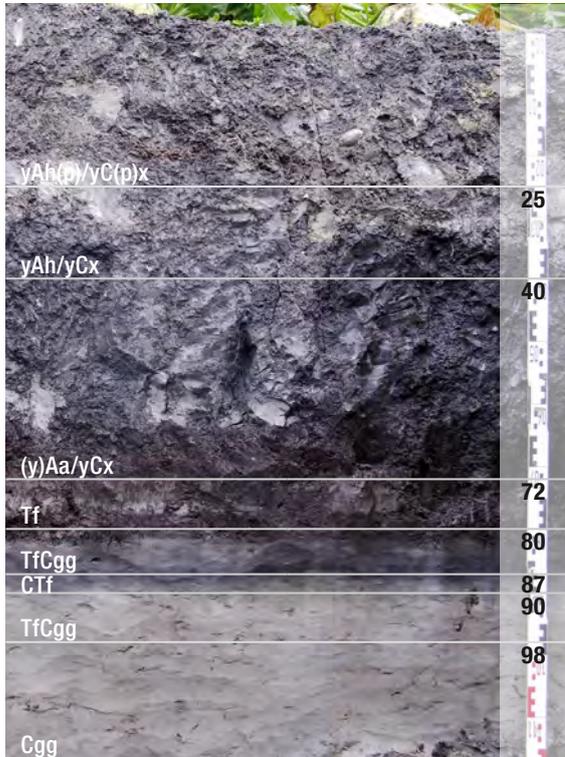
22 % Ton, 72 % Schluff, 6 % Sand – 75 % Humus – pH 5.8

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 115 cm

unterhalb 110 cm: Cr – tonig-schluffige Schichten;

12 % Ton, 55 % Schluff, 33 % Sand – 4.9 % Humus – pH 7.4

Profil d: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 215 cm)



0–25 cm: yAh(p)/yC(p)x – Komplexer Bearbeitungshorizont aus humushaltigen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; Überschüttung aus mineralischem (v. a. C-Material) und organischem Material (v. a. Kompost);
17 % Ton, 36 % Schluff, 47 % Sand – 11 % Humus – pH 7.6

25–40 cm: yAh/yCx – Komplexhorizont aus humushaltigen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; Überschüttung aus mineralischem (v. a. C-Material) und organischem Material (v. a. Kompost);
31 % Ton, 40 % Schluff, 29 % Sand – 18 % Humus – pH 7.1

40–72 cm: (y)Aa/yCx – Komplexhorizont aus humusreichen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; überschüttetes mineralisches (v. a. C-Material) und organisches Material (v. a. Kompost) vermischt mit dem humusreichen, einstmals obersten Bodenhorizont;
34 % Ton, 42 % Schluff, 24 % Sand – 13 % Humus – pH 7.0

72–80 cm: Tf – mässig zersetzter Torfhorizont;
42 % Ton, 47 % Schluff, 11 % Sand – 29 % Humus – pH 6.1

80–87 cm: TfCgg – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;
Körnung nicht beprobt

87–90 cm: CTf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;
42 % Ton, 47 % Schluff, 11 % Sand – 45 % Humus – pH 6.1

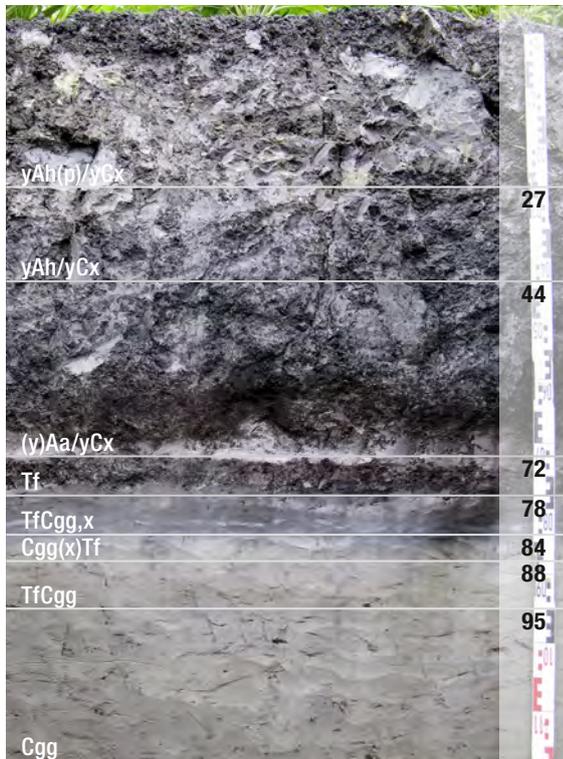
90–98 cm: TfCgg – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;
Körnung nicht beprobt

98–140 cm: Cgg – tonig-schluffiger Horizont;
18 % Ton, 69 % Schluff, 13 % Sand – 6.6 % Humus – pH 8.2

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 127 cm

140–170 cm: Tf(r) – mässig zersetzter Torfhorizont;
Körnung nicht beprobt

unterhalb 170 cm: Cr – tonig-schluffige Schichten mit Holzeinschlüssen;
Körnung nicht beprobt

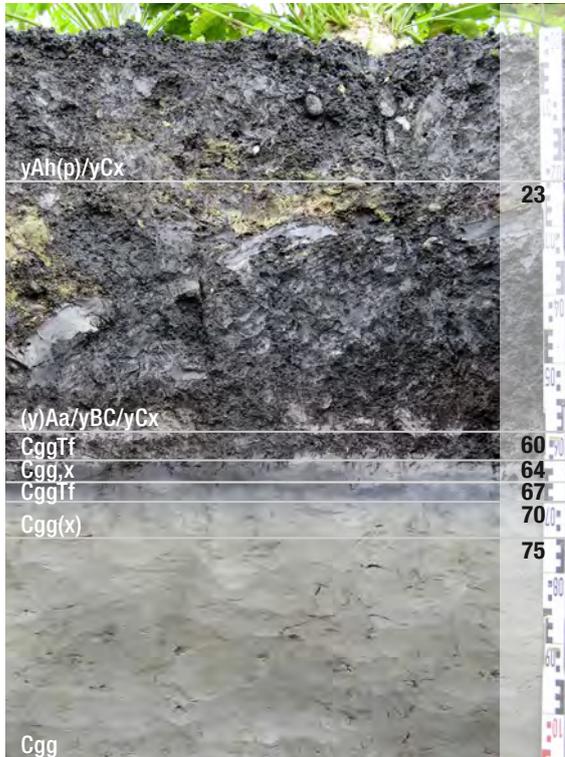
Profil e: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 130 cm; Bohrtiefe: 220 cm)

- 0–27 cm: yAh(p)/yGx – Komplexer Bearbeitungshorizont aus humushaltigen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; Überschüttung aus mineralischem (v. a. C-Material) und organischem Material (v. a. Kompost);
28 % Ton, 31 % Schluff, 41 % Sand – 13 % Humus – pH 7.6
- 27–44 cm: yAh/yCx – Komplexhorizont aus humushaltigen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; Überschüttung aus mineralischem (v. a. C-Material) und organischem Material (v. a. Kompost);
43 % Ton, 40 % Schluff, 17 % Sand – 5.5 % Humus – pH 7.4
- 44–72 cm: (y)Aa/yCx – Komplexhorizont aus humusreichen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; überschüttetes mineralisches (v. a. C-Material) und organisches Material (v. a. Kompost) vermischt mit dem humusreichen, einstmals obersten Bodenhorizont;
34 % Ton, 58 % Schluff, 8 % Sand – 28 % Humus – pH 6.5
- 72–78 cm: Tf – mässig zersetzter Torfhorizont;
Körnung nicht beprobt
- 78–84 cm: TfCgg,x – tonig-schluffiger dichter Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;
54 % Ton, 43 % Schluff, 3 % Sand – 23 % Humus – pH 5.8
- 84–88 cm: Cgg(x)Tf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen ziemlich dichten Beimengungen;
Körnung nicht beprobt
- 88–95 cm: TfCgg – tonig-schluffiger Horizont mit Beimengungen von mässig zersetztem Torf;
Körnung nicht beprobt
- 95–150 cm: Cgg – tonig-schluffiger Horizont;
17 % Ton, 76 % Schluff, 7 % Sand – 2.8 % Humus – pH 8.2

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 135 cm

- 150–180 cm: Tf(r) – mässig zersetzter Torfhorizont mit Holzeinschlüssen;
Körnung nicht beprobt
- unterhalb 180 cm: Cr – tonig-schluffige Schichten;
Körnung nicht beprobt

Profil f: überschütteter Buntgley mit Torfzwichenschichten (Profiltiefe: 120 cm; Bohrtiefe: 205 cm)



0–23 cm: yAh(p)/yCx – Komplexer Bearbeitungshorizont aus humushaltigen und ton-/schluffreichen, dichten Bereichen mit Polyedergefüge; Überschüttung aus mineralischem (v. a. C-Material) und organischem Material (v. a. Kompost);
36 % Ton, 42 % Schluff, 22 % Sand – 11 % Humus – pH 7.3

23–60 cm: (y)Aa/yBC/yCx – Komplexhorizont aus humusreichen und ton-/schluffreichen, dichten sowie sandig-lehmigen Bereichen mit Polyedergefüge; überschüttetes mineralisches (BC- und C-Material) und organisches Material (v. a. Kompost) vermischt mit dem humusreichen, einstmals obersten Bodenhorizont;

Aa-Material:

54 % Ton, 40 % Schluff, 6 % Sand – 24 % Humus – pH 6.7

BC-Material:

65 % Ton, 26 % Schluff, 10 % Sand – 2.3 % Humus – pH 7.6

60–64 cm: CggTf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;
Körnung nicht beprobt

64–67 cm: Cgg,x – tonig-schluffiger dichter Horizont;
Körnung nicht beprobt

67–70 cm: CggTf – mässig zersetzter Torfhorizont mit tonig-schluffigen Beimengungen;
Körnung nicht beprobt

70–75 cm: Cgg(x) – tonig-schluffiger ziemlich dichter Horizont;
Körnung nicht beprobt

75–130 cm: Cgg – tonig-schluffiger Horizont;
24 % Ton, 70 % Schluff, 6 % Sand – 5.9 % Humus – pH 7.9

Grundwasser-Stand am 28.10.2014: 125 cm

130–165 cm: Tf(r) – mässig zersetzter Torfhorizont mit Holzeinschlüssen;
Körnung nicht beprobt

unterhalb 165 cm: Cgg,r – tonig-schluffige Schichten;
Körnung nicht beprobt



flachtorfige Halbmor-Referenz



übersancnet



anmoorige Fluvisol-Referenz



tiefgepflügt



anmoorige Buntgley-Referenz



zweimalig überschüttet

