



Bodenbericht 2009

Volkswirtschaftsdirektion
Amt für Landwirtschaft und Natur
Bodenschutzfachstelle

Zollikofen, November 2009

**«Wir gehen auf ihm. Wir befahren ihn. Und wir stehen auf ihm.
Wir nutzen ihn. Wir bewirtschaften ihn. Und wir bauen auf ihm.
Kurz: Wir brauchen ihn, den Boden.»**

www.bodenschutz-lohnt-sich.ch

Vorwort

Seit 1900 ist der Anteil der in der Landwirtschaft Tätigen in der Schweiz von über 30 Prozent auf unter 3 Prozent gesunken. Gleichzeitig wurde eine Fläche von der Grösse des Kantons Thurgau überbaut. Trotzdem produziert die schweizerische Landwirtschaft heute doppelt so viele Nahrungsmittel. Diese enorme Leistungssteigerung der Produktion war nur möglich durch Intensivierung und Rationalisierung im Acker- und Futterbau. Bodenbearbeitungsgeräte und Erntemaschinen sowie Zugfahrzeuge wurden immer schlagkräftiger und schwerer. Die negativen Folgen sind Bodenbelastungen wie Schadverdichtung, Verschlämmung, Erosion oder Humusschwund.

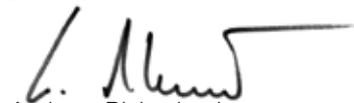
Der Boden ist unsere Lebensgrundlage. An der Schnittstelle zu Wasser und Luft wirkt er als Trinkwasserfilter, reguliert er den Wasserhaushalt, unterstützt er die Luftreinigung und dient er als Lebensraum für eine artenreiche Pflanzen- und Tierwelt. Auf Belastungen reagiert er oft mit Verzögerung. Viele Prozesse spielen sich im Verborgenen ab. So sind zum Beispiel Schadstoffe im Boden oder Unterbodenverdichtungen mit den menschlichen Sinnen nicht direkt wahrnehmbar. Geschädigter Boden erholt sich, wenn überhaupt, nur über sehr lange Zeiträume. Die Ressource Boden entsteht natürlich und ist technisch nicht herstellbar.

Die konventionelle land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung schränkt die Bodenfunktionen ein und verursacht Umweltprobleme, wie der IPCC-Report des UNO-Klimarats belegt. Die Agrarpolitik ist deshalb so auszugestalten, dass auch zukünftige Generationen von fruchtbaren Böden profitieren. Es geht darum, Menge und Qualität der Pflanzenerträge zu erhalten, ohne die vielfältigen vernetzten Aufgaben der Böden zu beeinträchtigen. Die nationale Agrarpolitik 2011 und die durch das Bundesamt für Umwelt und das Bundesamt für Landwirtschaft erarbeiteten Umweltziele Landwirtschaft konzentrieren sich auf einen nachhaltigen Umgang mit allen natürlichen Ressourcen. Der Kanton Bern fördert den Boden schonenden Ackerbau seit mehr als zehn Jahren. Er hat im Februar 2009 mit der Lancierung des «Förderprogramm Boden» ein breit abgestütztes Projekt zur Schonung der Ressource Boden geschaffen. Die darin enthaltenen Massnahmen zielen auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und einen geringeren Energieeinsatz ab. Sie leisten auch einen Beitrag zum Schutz der Gewässer und zur Luftreinhaltung.

Neben der Qualität ist wegen der anhaltenden Überbauung auch die Quantität der Ressource Boden gefährdet, d. h. die ausreichende mengenmässige Verfügbarkeit von fruchtbarem Boden. Insbesondere das ackerfähige Kulturland verdient mehr Gewichtung bei nutzungs- und schutzrelevanten Entscheiden. Um aber die verschiedenen Nutzungsansprüche an das Kulturland abzuwägen zu berücksichtigen, sind detaillierte Kenntnisse des Bodens, inklusive seiner dreidimensionalen Qualität, notwendig.

Boden ist wie Luft und Wasser umfassend rechtlich geschützt. In der Öffentlichkeit und der Politik geniesst die Erhaltung fruchtbarer Böden aber weniger Aufmerksamkeit – zu Unrecht. Denn unsere Wirtschaft und unser Wohlbefinden sind abhängig von einer nachhaltigen Entwicklung in Bezug auf alle Umweltbereiche. Damit unsere hohe Lebensqualität – ausreichende und qualitativ hoch stehende Ernährung, sauberes Trinkwasser, gesunde Luft, Schutz vor Klimaereignissen wie Überschwemmungen – auch in Zukunft gesichert ist, sind verstärkte Anstrengungen zu Gunsten des Bodens nötig.

Der Volkswirtschaftsdirektor



Andreas Rickenbacher
Regierungsrat

Impressum

Herausgeber

Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern (VOL)
 Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT)
 Bodenschutzfachstelle (BSF)
 Leiter: Wolfgang G. Sturny

Projektleiter Kantonale Bodenbeobachtung (KABO)

Andreas Chervet

Autorinnen und Autoren

Andreas Chervet	Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern (BSF)
Peter Hofer	
Claudia Maurer-Troxler	
Madlene Nussbaum	
Lorenz Ramseier	
Regula Schwarz	
Wolfgang G. Sturny	
Peter Trachsel	
Marc Zuber	Abteilung Strukturverbesserungen und Produktion (ASP)
Erich Linder	Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR)
Mario Andrini	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA)
Rudolf Kläy	
Adrian Lukas Meier	Amt für Wald des Kantons Bern (KAWA)
Stefan Schär	beco, Berner Wirtschaft
Fabio Wegmann	Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Stefan Zimmermann	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Franz Borer	Fachstelle Bodenschutz Solothurn
Gaby von Rohr	
Peter Weisskopf	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Täniken (ART)
Urs Zihlmann	
Roman Wyler	Geographisches Institut der Universität Bern (GIUB)
Werner Rohr	GEOTEST AG, Zollikofen
Andreas Leu	Inforama Rütli
Moritz Müller	Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL)
Judith Burri	KreaKOM kreative KOMMUNIKATION für natur+umwelt

Übersetzung

Pierre Vullioud (Französisch)	Trélex
Ted Wachs (Englisch)	Centre for Development and Environment (cde)

Korrektorat

Jürg Kötter	Bern
-------------	------

Gestaltung

aufdenpunkt.ch – Urs W. Flück	Langendorf
-------------------------------	------------

Druck

Druckerei ROS AG	Derendingen
------------------	-------------

Bezug

Dieser Bodenbericht kann bezogen werden bei:

Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern
Rütti
3052 Zollikofen
Tel. 031 910 53 30
Fax 031 910 53 49
karin.albisser@vol.be.ch

In elektronischer Form: www.vol.be.ch/site/home/lanat/landwirtschaft/bodenschutz.htm

Zitiervorschlag

VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2009. Bodenbericht 2009.

© VOL 2009

Bildnachweis

Vinzenz Maurer: Titelbild auf Umschlagfrontseite
Moritz Müller, SHL: Umschlagrückseite (Bild oben) und Seite 19 (alle drei Bilder)
Urs Vökt, soilcom: Umschlagrückseite (Bild Mitte) und Seite 13 (alle drei Bilder)
Marco Walser, WSL: Umschlagrückseite (Bild unten), Seiten 35 und 47
Gabriela Brändle, ART: Seiten 1 und 85 (Bild oben)
Hans Paul Käser: Seite 15 (beide Bilder)
Claude Kündig, SESA: Seite 23
Bundesamt für Umwelt, BAFU: Seite 25
Transitgas AG: Seite 26
Jean-Pierre Clément, BAFU: Seite 32 (Bild oben)
Hadorns Gülletechnik AG: Seite 51
Ueli Zobrist, Inforama Rütti: Seite 53
Rainer Maché, Flur und Furche, D: Seite 95
Hans Flückiger, AGR: Seite 100

Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern: alle weiteren Bilder

Titelbild

Umschlagfrontseite: Der Kot der Regenwürmer fördert den Aufbau der Bodenstruktur und ist sehr nährstoffreich: Gegenüber der umgebenden Erde enthält Regenwurm Kot fünfmal mehr pflanzenverfügbaren Stickstoff, siebenmal mehr löslichen Phosphor und elfmal mehr Kalium.
Umschlagrückseite: Bodenprofil eines landwirtschaftlich genutzten Torfbodens (Bild oben), einer landwirtschaftlich genutzten Braunerde (Bild Mitte) und einer forstwirtschaftlich genutzten Parabraunerde (Bild unten)

Zusammenfassung

In der heutigen, intensiv betriebenen Landwirtschaft muss immer mehr produziert werden – dies erfordert einen wachsenden Energieaufwand. So kommt es weltweit zu schädigenden Auswirkungen auf unsere Lebensgrundlagen.

Verschlammte und erodierte Böden, stehendes Wasser und tiefe Fahrspuren in Feld und Wald, Bodensackung durch Humusabbau sowie ausgeprägte Pflugsohlen sind untrügliche Zeichen dafür, dass der Boden durch unsachgemässen Pflugeinsatz und häufiges Befahren mit schweren Maschinen bei oft ungünstigen Bodenbedingungen verdichtet wird. Um die Tragfähigkeit der Böden zu erhöhen, fördert der Kanton Bern in seiner Lösungsstrategie Boden schonende, pfluglose Anbausysteme. Dank langjähriger Direktsaat werden Ackerböden so strukturstabil und belebt wie Wiesenböden. Zusammen mit Massnahmen im Bereich Humusaufbau und Hofdüngeraustrag werden seit dem 1. August 2009 im «Förderprogramm Boden Kanton Bern» neben dem Boden auch Luft und Wasser miteinbezogen. Damit werden die vom Bund postulierten Umweltziele aktiv und umfassend angegangen.

Die Landwirtschaft der Zukunft soll auf einer möglichst Ressourcen schonenden Nahrungs- und Futtermittelproduktion mit geringer Zufuhr an nicht erneuerbaren Energieträgern basieren. Dies gelingt nur mit einer Neuausrichtung in der Bodennutzung und einem sparsamen Umgang mit der Ressource Boden.

Auf eidgenössischer Ebene befinden sich die Rechtsgrundlagen für den qualitativen Bodenschutz im Umweltschutzgesetz (*USG 1983*) und in der entsprechenden Verordnung über Belastungen des Bodens (*VBBö 1998*). Die Bodenschutzfachstelle (BSF) im Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT) überwacht und beurteilt den Boden und trifft die erforderlichen Vorsorgemassnahmen gemäss der Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (*LKV 1997*).

Die Handlungsstrategie richtet sich aufgrund der im Kanton Bern stark differenzierten Nutzungsintensität der Böden auf ein problem-lösungsorientiertes, gesamtheitliches Vorgehen. Darauf bauen vier Konzeptschritte auf: Belastungen erkennen, Belastungen messen und beurteilen, Lösungsstrategien entwickeln und Massnahmen umsetzen.

Mit dem vorliegenden Bodenbericht 2009 werden Regierungsrat und Öffentlichkeit zum dritten Mal über den aktuellen Zustand des Bodens orientiert sowie die laufenden und geplanten Massnahmen diskutiert.

Verzeichnis der natürlichen Bodeneigenschaften im Kanton Bern

Der Verlust an fruchtbarem Boden durch die Ausdehnung der Siedlungsfläche ist schweizweit unvermindert hoch. Pro Sekunde gehen im dicht besiedelten Mittelland rund 1 m² bzw. 1 m³ landwirtschaftlich genutztes Ackerland unwiederbringlich verloren. Dies be-

einträchtigt unsere Nahrungs- und Trinkwassersicherheit und führt zu vermehrten Hochwassersituationen.

Um die Schutz- und Nutzungsansprüche in Zukunft sachgerecht abwägen zu können, ist

ein Verzeichnis der natürlichen Bodeneigenschaften von grossem Nutzen. Mittels Bodenkarten werden Qualität und Eigenschaften der Böden dargestellt. Die digital aufgearbeiteten Daten liefern die Grundlagen für das Ausscheiden von Fruchtfolgeflächen, für Bau- und Rekultivierungsarbeiten, das Aufwerten von degradierten, flachgründigen Böden, für Erosions- und Verdichtungsrisikokarten, Landumlegungen, für die Waldwirtschaft, den Naturschutz und die Gefahrenprävention etc.

Detaillierte Bodenkarten sind in der Schweiz sehr lückenhaft vorhanden. Im Kanton Bern sind erst 12% des Landwirtschafts- und Waldareals bodenkundlich kartiert, nur 4% in hoher Auflösung. Ein Vorschlag zur Bodenkartierung im Kanton Bern liegt seitens der BSF vor und könnte in vier Schritten erfolgen:

1. Zusammenstellung, Aufarbeitung und Digitalisierung vorhandener Grundlagendaten;
2. Erstellen eines Bodenkonzeptplans;
3. Ausscheiden der prioritär zu kartierenden Flächen;
4. Aufnahme neuer Bodendaten zur Erstellung der Bodenkarte.

Die Erarbeitung einer Bodenkarte ist ein langjähriges, Ressourcen intensives Projekt. Es bedingt eine fundierte Planung mit detaillierter Kostenschätzung gemäss den vier Schritten und ein gestaffeltes Vorgehen im Feld. Den hohen Kosten einer Bodenkarte steht jedoch ein ausserordentlich hoher Nutzen für zahlreiche Anwender gegenüber – zugunsten zukünftiger Generationen und im Sinne der nachhaltigen Entwicklung.

Torfsackung im «Grossen Moos»

Das «Grosse Moos» wurde dank zweier Juragewässerkorrekturen (1863–1885, 1962–1973) landwirtschaftlich nutzbar gemacht. Es ist heute der «Gemüsegarten» des Kantons Bern.

Die derart trocken gelegten Moor-Böden sackten als Folge des Wasserverlusts und des Humusabbaus in sich zusammen. Durch die intensive Nutzung beschleunigte sich der Abbau der organischen Substanz zusätzlich.

Seit der ersten Juragewässerkorrektur wurde auf dem Areal der Anstalten Witzwil im Berner Seeland eine maximale Sackung von bis zu zwei Metern beobachtet, was einer durchschnittlichen Sackungsrate von 0.75–1.43 cm pro Jahr entspricht. Heute beträgt sie immer noch 0.5 cm pro Jahr. Dies bedeutet CO₂-Emissionen von jährlich 7–18 t/ha Anbaufläche. Insbesondere Böden auf einem Untergrund aus Seekreide können nach vollständigem Torfverlust durch Oxidation kaum mehr acker- oder gemüsebaulich genutzt werden. Das Ausmass möglicher Nutzungseinschränkungen für das gesamte «Grosse Moos» kann wegen fehlender Bodendaten noch nicht abschliessend beurteilt werden.

Die starke Sackung der Böden belastet das Wasserreguliersystem und schränkt den Gemüsebau – insbesondere bei Hochwasser – stark ein. Zudem führt die Mineralisierung der organischen Substanz zur Bildung von leicht auswaschbarem Nitrat und erhöht die Mobilität von Schadstoffen in den sonst schon durch die frühere Kehrrichtentsorgung belasteten Böden der Anstalten Witzwil.

Geeignete Massnahmen zum Erhalt des Berner «Gemüsegartens» und zur Minimierung von Luft- und Gewässerbelastung sind die Extensivierung des Ackerbaus, der Einsatz Bodenschonender, pflugloser Anbausysteme, die vermehrte Umstellung auf Grünlandnutzung bzw. die Nutzung als Naturschutzfläche, die Aus- und Weiterbildung der Bewirtschafter, die gezielte Regulierung des Grundwasserspiegels, die Überschüttung der Böden mit sauberem Bodenaushub sowie als Grundlage die detaillierte Kartierung im ganzen Gebiet des «Grossen Moos».

Physikalische Bodenbelastungen

Durch physikalische Belastungen geschädigte Böden sind in ihrer Fruchtbarkeit beeinträchtigt und erholen sich – wenn überhaupt – nur sehr langsam. Bei Bauarbeiten führen unsachgemässe Erdumlagerungen oder Befahrungen zu irreversiblen Gefügeschäden. Für den Maschineneinsatz und die Rekultivierung von Baustellen konnten erfolgreich Richtlinien ausgearbeitet und umgesetzt werden.

In der Landwirtschaft können der Hofdünger-austrag und die moderne Erntemechanisierung die Böden als Folge hoher Maschinengewichte bis in den Unterboden belasten. Insbesondere bei der Zuckerrüben-ernte ist die physikalische Belastung hoch. Eine Untersuchung zeigt, dass zwei- und sechsreihige Erntemaschinen gepflügte Böden bei zu feuchten Erntebedingungen bis in mindestens 60 cm Tiefe be-

einträchtigen, wobei insbesondere die obersten 30 cm verdichtet werden. Durch langjährige Direktsaat wird der Oberboden wesentlich strukturstabiler, und es treten kaum Gefügeschäden im Unterboden auf. Im Vordergrund steht deshalb die Verbesserung der Tragfähigkeit der Ackerböden durch möglichst wenige Bodeneingriffe. Massnahmen dazu sind die Umstellung auf pfluglose Anbausysteme, die Gewichtsreduktion im Feld, die Montage eines Regeldrucksystems mit optimaler Bereifung

sowie das Beachten publizierter Tensiometerwerte und Merkblätter beim Maschineneinsatz.

Auch bei Freizeitveranstaltungen, die kurzzeitig auf landwirtschaftlich genutzten Böden durchgeführt werden, kann es zu erheblichen Gefügeschäden kommen. Transportfahrzeuge mit für den Feldeinsatz unangepasster Strassenbereifung können Schadverdichtungen insbesondere im Unterboden verursachen.

Versauerung und Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden im Kanton Bern

Rund 31 % der Gesamtfläche des Kantons Bern sind bewaldet. Seit Jahren leidet der Wald unter den Folgen übermässiger Stickstoff-Einträge: Der Waldboden versauert, wodurch Schwermetalle leichter löslich, Nährstoffe gegen toxisches Aluminium ausgetauscht und zusammen mit dem überschüssigen Nitrat ins Trinkwasser ausgewaschen werden. Mangelernährte Bäume liefern weniger Holz, werden krank und anfällig für Windwurf.

Eine von der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Auftrag der BSF durchgeführte Auswertung der Bodendaten von 238 Waldstandorten zeigt, dass die meisten Waldböden empfindlich auf eine weitere Versauerung reagieren. Viele sind bereits natürlicherweise stark versauert. Eine geringe Basensättigung und Kationenaustauschkapazität weist auf eine gestörte Nährstoffversorgung hin. Auch das Verlagerungsrisiko für Schwermetalle wird in stark sauren Böden grösser. Die Belastung mit Schwermetallen ist zwar nicht flächendeckend, einzelne erhöhte Werte oder Richtwertüberschreitungen finden sich jedoch auf jeder vierten untersuchten Fläche.

Diese punktuellen Daten und Aussagen sind nicht auf die gesamte Waldfläche übertragbar, weil ein flächendeckendes Verzeichnis der Waldbodeneigenschaften fehlt. Für die Abschätzung des zeitlichen Aspekts können die Zeitreihenmessungen des Instituts für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) im Rahmen der Walddauerbeobachtung – unter anderen auch auf Berner Standorten – hinzugezogen werden. Diese zeigen eine innerhalb kurzer Zeit messbare Versauerung und bestätigen die Vermutung, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den erhöhten Stickstoff-Depositionen und der Abnahme von Bodenfruchtbarkeitsparametern besteht. Insbesondere in sensiblen Ökosystemen wie dem Wald führt die fast flächendeckende Überschreitung der kritischen Eintragungswerte (Critical Loads) für Stickstoff zu der beobachteten beschleunigten Versauerung. Mit den zum Teil bereits eingeschlagenen und geplanten Massnahmen in den Bereichen Luftreinhaltung und Agrarökologie soll in Zukunft weniger Stickstoff via Luft in den Boden gelangen.

Stickstoff-Verluste aus der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft sind Stickstoff-Verluste in Form von Nitrat-Auswaschungen und Ammoniak-Emissionen trotz zahlreicher Anstrengungen nach wie vor ein Problem. Umfassende Massnahmen im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) trugen über kontrollierte Düngung und Zwischenkulturen zu einer Reduktion der Nitrat-Auswaschung bei. Trotzdem liegt im intensiv genutzten Berner Mittelland die Belastung von fast der Hälfte aller Trinkwasserfassungen über dem Anforderungswert (= Interventionswert) von 25 mg Nitrat/Liter Wasser. Gemäss den landwirtschaftlichen Umweltzielen des Bundes ist der Eintrag von Stickstoff in die Ge-

wässer gegenüber 1985 um 50 %, derjenige von Ammoniak gegenüber dem Stand 2000 um 43 % zu reduzieren. Griffige Massnahmen basieren auf rechtlich abgestützten Grundlagen: Auf Bundesebene sind dies der neu geschaffene Art. 77a/b des Landwirtschaftsgesetzes und auf Kantonsebene die revidierte Ausführungsverordnung LKV (Art. 2) zum kantonalen Landwirtschaftsgesetz. Im Rahmen des «Förderprogramms Boden Kanton Bern» können mit einer Anreizstrategie Massnahmen zur Reduktion von Nitrat- und Ammoniak-Verlusten umgesetzt werden.

Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) – zwei Beprobungszyklen im Vergleich

Im Rahmen der KABO werden seit 1994 an 16 Standorten physikalische, biologische, chemische und agronomische Erhebungen durchgeführt. Nach Abschluss der Zweitbeprobung ist insbesondere der Vergleich mit der Erstbeprobung und damit die Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit von zentralem Interesse. Zudem fanden in den vergangenen 15 Jahren zahlreiche Bewirtschaftungsänderungen wie die zunehmende Nutzung der Naturwiesen als ökologische Ausgleichsflächen, die Umstellung auf Direktsaat an vier Standorten sowie teilweise die Reduzierung des Nutztierbestands statt. Zusätzlich zum Zeitfaktor werden die Nutzung als Naturwiese bzw. Ackerfläche, die Produktion gemäss ökologischem Leistungsnachweis (ÖLN) bzw. biologischem Landbau (BIO) sowie die Anbausysteme Direktsaat und Pflug miteinander verglichen.

Naturwiesenböden sind im Allgemeinen stabiler strukturiert als Ackerflächen. Dies zeigt sich in höheren Gesamtporenvolumina, höheren gesättigten Wasserleitfähigkeiten und niedrigeren Lagerungsdichten. Insbesondere die höheren Humusgehalte wirken sich positiv auf die Bodenparameter und Nährstoffe aus.

Regelmässig gepflügte Ackerflächen neigen insbesondere in den Unterböden zu einer dichten Lagerung und damit zu einem stark eingeschränkten Wasser- und Lufthaushalt. Es wurden hier vermehrt Richtwertüberschreitungen ausgewählter physikalischer Bodenparameter – gemäss dem Vorschlag der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) – festgestellt. Insbesondere das beim Pflügen im Furchengrund laufende

Traktor(hinter)rad – verbunden mit dem üblichen Schlupf – übt hohe physikalische Belastungen auf den Boden aus.

Mit dem Verzicht auf die Bodenbearbeitung kann sich dank langjähriger Direktsaat auch auf den Ackerflächen eine mit Naturwiesen vergleichbare, stabile Bodenstruktur mit grossen Regenwurmpopulationen, vielen Grobporen, hohen Wasserleitfähigkeiten und Luftdurchlässigkeiten aufbauen. Mit der Direktsaat kann das Ziel einer Erhöhung der Tragfähigkeit von Ackerböden erreicht werden. Dies ist umso wichtiger in Anbetracht der Tatsache, dass 50 % der Feldeinsätze bei ungünstigen Bodenbedingungen durchgeführt werden und ein Ackerboden mehr als doppelt so häufig wie eine Naturwiese, nämlich 6.8-mal pro Jahr, flächendeckend überfahren wird.

Nach BIO Richtlinien bewirtschaftete Flächen sind weniger gut mit Nährstoffen versorgt als ÖLN Flächen. Der geringere Humusgehalt wirkt entsprechend mindernd auf gewisse gemessene physikalische und biologische Parameter. Dagegen werden in biologisch bewirtschafteten Böden wegen des Verzichts auf chemische Hilfsstoffe keine Schadstoffanreicherungen festgestellt. Offensichtlich wirkt sich dies indirekt über die Biologie positiv aus, indem die Wasseraufnahme und die Krümelstabilität in den Oberböden höher sind als in den nach ÖLN bewirtschafteten Böden.

Die vorliegenden Resultate der KABO dienen der Beurteilung des Ausgangszustands für das Wirkungsmonitoring im Rahmen des «Förderprogramms Boden Kanton Bern».

Lösungsstrategien entwickeln zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit

Seit 1994 werden auf der Dauerbeobachtungsfläche «Oberacker» am Inforama Rütli in Zollikofen (BE) die beiden Anbausysteme Direktsaat und Pflug innerhalb einer Ackerfruchtfolge mit ausschliesslich mineralischer Düngung und ohne Bracheperiode miteinander verglichen und weiterentwickelt.

Die bisherigen Untersuchungen belegen, dass ein langjährig kontinuierliches Direktsaat-System eine Alternative zum herkömmlichen Pflug-System darstellt und in seiner agronomischen Anwendung praxisreif ist. Die fehlende Bodenbearbeitung erfordert eine ganzheitliche Strategie mit systemangepasster Fruchtfolge, dem Einbezug von Ernterückständen und Gründüngungen sowie dem ge-

zielten Einsatz chemischer Hilfsmittel. Mit dem Verzicht auf den Pflug wird der Boden biologisch aktiver und das Gefüge strukturstabiler. Wasser kann besser versickern, was das Erosionsrisiko verkleinert und eine gleichmässige Wasser- und Nährstoffversorgung garantiert. Der Humusgehalt im Oberboden erhöht sich, was eine kontinuierliche und während der Vegetationsperiode länger dauernde Stickstoff-Nachlieferung gewährleistet. Phosphor und Kalium liegen vermehrt in pflanzenverfügbarer Form vor. Nach sechs Jahren Umstellung konnten bei identischen Düngergaben im Direktsaat-System tendenziell höhere Erträge erzielt werden – und dies mit 10 % weniger Energieeinsatz und 20 % geringerer Ozonbildung.

Probleme wie steigende Energiepreise, Boden belastende Bewirtschaftungspraktiken, Stickstoff-Verluste und Klimaerwärmung verlangen nach dauerhaften Lösungen. Die Direktsaat kann dazu einen wesentlichen Beitrag leisten. Anpassungen in der Fruchtfolge und bei den

Gründungen, bei der Sätechnik und der Stickstoff-Düngung sowie beim Pflug-System der Wechsel auf den flach eingesetzten On Land-Pflug sollten zu einem optimierten Ackerbau beitragen.

Umsetzen Ressourcen schonender Massnahmen

Trotz Auflagen des ÖLN braucht es zusätzliche Massnahmen zur Verbesserung und Stabilisierung der Bodenstruktur, um Erosion zu vermindern und die Bodenfruchtbarkeit auf lange Sicht zu erhalten. Seit 1996 werden Landwirte für Boden schonende Anbausysteme sensibilisiert und während der Umstellungsphase finanziell gefördert. Heute wird im Kanton Bern rund 5 % der Ackerfläche direkt gesät. Der Wissenstransfer erfolgt bevorzugt am erfolgreichen Anschauungsobjekt und im Gespräch unter Anwendungsinteressierten.

Mit der Lancierung des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» durch Landwirte und Bodenfachleute wird ein ganzheitlicher und nachhaltiger Lösungsansatz zur Schonung der Ressource Boden an der Schnittstelle zu Wasser und Luft verfolgt. Er basiert auf einer

freiwilligen Teilnahme und ermöglicht finanzielle Anreize für die Umsetzung verschiedener Massnahmen in den Bereichen Boden schonende Anbausysteme (Mulchsaat, Streifenfräs- oder Direktsaat, On Land-Pflug), Bodenaufbau und Kulturmassnahmen (Fruchtfolge, Winterbegrünung, Untersaat, Herbizidverzicht, Mistkompostierung) sowie Ammoniak reduzierende Gülleaustragsysteme (Verschlauchung, Boden schonende Fahrwerke). Dieser Massnahmenkatalog ist Teil des Programmkonzepts, zusammen mit dem Teil Bildung und Beratung unter der Leitidee «Von Bauern für Bauern» sowie dem Teil Wirkungsmonitoring, das auf der KABO inklusive Pflanzenschutz und den Immissionsmessungen des beco basiert. Nach Ablauf des Projekts 2015 sollen die Massnahmen ohne weitere Anreize wirtschaftlich tragbar sein und weiter verfolgt werden.

Neues Vollzugskonzept Boden Kanton Bern

Im Kanton Bern obliegt der BSF als Fachstelle nach USG die strategische Steuerung beim Vollzug Boden relevanter Fragestellungen. Der Bereich «Land- und Forstwirtschaft» wird im LANAT, der Bereich «Bauen» im Amt für Wasser und Abfall (AWA) umgesetzt. Um den vielfältigen Nutzungs- und Schutzansprüchen an

die Ressource Boden gerecht zu werden, koordiniert die «Fachgruppe Boden Kanton Bern» seit dem 1. Januar 2009 die Zusammenarbeit zwischen den Ämtern. Damit wird der Vollzug effektiver, effizienter und kundenfreundlicher organisiert und der landwirtschaftliche Bodenschutz gestärkt.

Résumé

Dans l'agriculture intensive telle qu'elle est pratiquée de nos jours, il faut produire toujours plus, ce qui nécessite des besoins croissants en énergie. A l'échelle mondiale, ceci engendre des effets dommageables sur la terre nourricière dont nous dépendons tous.

Des sols battus et érodés, des eaux stagnantes et des ornières profondes tant dans les champs que dans les forêts, des sols qui se tassent à cause de la minéralisation de la matière organique ainsi que des semelles de labour imperméables sont les symptômes révélateurs d'une utilisation inadéquate de la charrue ainsi que de multiples passages avec des engins lourds qui, surtout si les conditions du sol sont défavorables, provoquent des compactages pernicious. Dans le dessein d'améliorer la portance des sols, le Canton de Berne a mis en place une stratégie de promotion de systèmes culturaux sans labour qui préservent les sols. Grâce aux effets du semis direct pratiqué à long terme, les sols des terres ouvertes présentent une stabilité de structure et une activité biologique comparables aux sols des prairies. Le «Programme de promotion du sol du Canton de Berne» est opérationnel depuis le 1^{er} août 2009; il comprend des mesures concernant la préservation de l'humus et l'épandage des engrais de ferme auxquelles s'ajoute la protection de l'air et de l'eau. Ainsi, les objectifs environnementaux fixés par la Confédération sont pris en compte de manière active et complète.

L'agriculture de l'avenir doit produire des aliments et des fourrages en ménageant les ressources naturelles et en faisant un usage économe des énergies non renouvelables. Cet objectif ne peut être atteint que par une réorientation de l'utilisation du sol avec des techniques qui le ménagent durablement.

A l'échelon fédéral, les bases légales concernant la protection qualitative du sol se trouvent dans la loi sur la protection de l'environnement (*LPE 1983*) et dans l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (*OSol 1998*). Le Service de la protection des sols (SPS) de l'Office de l'agriculture et de la nature (OAN) est chargé de la surveillance et de l'évaluation des sols; il met en œuvre les mesures de précaution conformément à l'Ordonnance sur la préservation des bases naturelles de la vie et des paysages (*OPBNP 1997*).

Les modalités d'action sont adaptées à la grande diversité des intensités d'utilisation du sol dans le canton de Berne; elles sont fonction des problèmes à résoudre et elles prennent en compte l'ensemble de l'exploitation. La stratégie se concrétise en quatre étapes: identification des atteintes, mesure et évaluation de ces atteintes, mise au point d'un plan d'action et concrétisation des mesures prévues.

Par ce Rapport sur les sols 2009, c'est la troisième occasion d'informer le Conseil-exécutif et le public sur la situation actuelle des sols du canton. Les mesures en cours et celles qui sont à l'état de projet sont exposées.

Répertoire des propriétés naturelles des sols du Canton de Berne

Les pertes de sol cultivable par l'extension des surfaces construites sont, dans l'ensemble de la Suisse, très élevées et ne montrent aucun signe de fléchissement. Dans la zone à forte densité de population du Plateau, c'est en chiffre rond 1 m² resp. 1 m³ de terre agricole qui disparaît irrémédiablement à chaque seconde. Ce phénomène n'est pas sans effets négatifs sur la sécurité de nos ressources alimentaires et hydriques. De plus, les risques d'inondations et autres dégâts d'eau sont accrus.

Pour pouvoir, à l'avenir, pondérer de manière adéquate les contraintes d'exploitation par rapport aux besoins de protection, un répertoire des propriétés naturelles des sols sera d'une grande utilité. La cartographie des sols traduit graphiquement leurs qualités et leurs caractéristiques. Les données de base sont numérisées et permettent la mise en évidence des surfaces d'assolement, des surfaces constructibles ou aptes à être remises en cultures, les surfaces des sols dégradés et superficiels justifiant une régénération. Ces cartes contiennent aussi des informations sur les risques d'érosion et de compactage, sur les remaniements parcellaires; elles peuvent aussi servir à la gestion des surfaces forestières, à la protection de la nature ainsi qu'à la prévention des risques naturels, etc.

En Suisse, la cartographie détaillée des sols ne couvre de loin pas tout le territoire. Dans le canton de Berne, seuls 12 % des surfaces agricoles et forestières sont cartographiées, dont 4 % seulement au niveau de résolution supérieur. Le SPS a élaboré un projet de cartographie des sols du canton de Berne; il pourrait être réalisé en quatre étapes:

1. compilation, mise en forme et numérisation des données de base existantes;
2. développement d'un plan conceptuel du sol;
3. circonscription des surfaces à cartographier en priorité;
4. récolte de nouvelles données sur les sols aux fins de cartographie.

Un projet de cartographie des sols est une tâche de longue haleine qui nécessite des moyens importants. Il exige une planification solide avec une évaluation détaillée des coûts en fonction de chacune des quatre étapes mentionnées et doit prévoir l'échelonnement de la mise en œuvre dans le terrain. Certes, une carte des sols coûte cher, mais elle fournit une foule d'informations extrêmement utiles à de nombreux utilisateurs au profit du développement durable, par conséquent au profit des générations futures.

Tassement de la tourbe dans le «Grand Marais»

Le «Grand Marais» est devenu cultivable grâce aux deux corrections des eaux du Jura (1863–1885 et 1962–1973). C'est aujourd'hui le «jardin potager» du canton de Berne.

L'abaissement du niveau des eaux, les drainages ainsi que la minéralisation de la matière organique ont eu pour effet un tassement de la tourbe. L'utilisation intensive du sol a encore accéléré la minéralisation de la matière organique.

Depuis la première correction des eaux du Jura, on a mesuré un tassement atteignant jusqu'à deux mètres dans la zone des établissements pénitentiaires de Witzwil, dans le Seeland bernois. Ceci correspond à un tassement moyen de 0.75 à 1.43 cm par année. Actuellement, on l'estime à 0.5 cm par an. A ce phénomène s'ajoutent 7 à 18 t d'émissions de CO₂ par ha de culture. Un problème particulier apparaît dans les terres reposant sur un sous-sol de craie lacustre: après la disparition de la tourbe liée au processus d'oxydation, elles deviennent quasiment impropres tant aux grandes cultures qu'aux cultures maraîchères. Des données sur les sols faisant défaut, on ne peut pas encore conclure définitivement s'il y a lieu de prévoir des restrictions d'utilisation des terres du «Grand Marais».

Le fort tassement des sols affecte le système de régulation des eaux et limite fortement la culture de légumes, en particulier en périodes de hautes eaux. De surcroît, la minéralisation de la matière organique libère des nitrates facilement lessivables et augmente la mobilité des substances toxiques. Ce phénomène concerne particulièrement les sols des Etablissements de Witzwil sur lesquels furent déposées, autrefois, des ordures ménagères.

Parmi les mesures aptes à préserver le «jardin potager» bernois et à limiter la pollution de l'air et des eaux, on peut mentionner l'extensification de la production végétale agricole, la mise en œuvre du travail de conservation du sol par la culture sans labour notamment, l'accroissement des surfaces en prairies voire en espaces de protection écologique, une régulation ciblée de la nappe phréatique ainsi que la couverture du sol avec des terres d'excavation saines. A ceci s'ajoute la cartographie détaillée de toute la région afin de constituer un solide instrument de travail à la disposition des acteurs concernés, ainsi que la formation et le perfectionnement des exploitants.

Dommmages physiques au sol

Les sols ayant subi des dommages physiques (tassements) sont moins productifs et ne se régènèrent que très lentement, si tant est que ce soit encore possible. Les travaux de génie civil donnent souvent lieu à un intense trafic d'engins et à des déplacements de terre maladroits qui engendrent des dégâts irréversibles à la structure du sol. Pour ce qui est de l'utilisation des machines et la remise en cultures d'aires de chantier, des directives ont été élaborées et elles sont bien mises en pratique.

Dans le secteur agricole, il peut se produire des tassements jusqu'au niveau du sous-sol dus au poids élevé des convois de transport des engrais de ferme et des machines de récolte modernes. C'est particulièrement lors de la récolte des betteraves sucrières que les contraintes physiques sur le sol sont élevées. Des mesures effectuées sur des terres labourées ont montré que des récolteuses à deux rangs ou à six rangs, engagées dans des conditions trop humides, avaient affecté la structure du sol jusqu'à une profondeur de 60 cm, les 30 premiers cm étant bien sûr fortement compactés. Après plusieurs années de pratique systématique du se-

mis direct, la couche supérieure du sol devient plus stable et il est rare que le sous-sol subisse des dommages. Il est donc prioritaire d'améliorer la portance des sols cultivés en évitant les actions qui peuvent le déstabiliser. La solution réside dans la mise en œuvre de systèmes culturaux sans labour, la diminution du poids des convois dans les champs, un équipement en pneumatiques conséquent et le montage d'un appareillage embarqué pour la régulation de leur pression. Les utilisateurs sont aussi invités à tenir compte des valeurs tensiométriques qui sont publiées et des directives d'utilisation des machines.

Les événements de loisirs sont aussi concernés: les manifestations ont souvent lieu sur des surfaces agricoles et, malgré leur courte durée, d'importants dommages à la structure du sol peuvent survenir. Ce sont en particulier les véhicules de transport qui sont en cause car leurs pneumatiques de type routier ne sont pas du tout adaptés à la circulation dans le terrain; ils peuvent provoquer des tassements jusqu'au niveau du sous-sol.

Acidification et contamination par les métaux lourds des sols forestiers du Canton de Berne

Quelque 31 % de la surface totale du canton de Berne sont couverts par de la forêt. Depuis des années, la forêt subit des immissions excessives d'azote; il s'ensuit une acidification du sol qui accroît la solubilité des métaux lourds. Un échange a lieu entre les éléments nutritifs et l'aluminium toxique qui est lessivé avec les nitrates excédentaires dans les eaux potables. Les arbres mal alimentés fournissent moins de bois, deviennent malades et sont de plus en plus sensibles aux coups de vent.

Une étude menée par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), sur mandat du SPS, a évalué les données des sols de 238 sites forestiers; il en ressort que pour la plupart d'entre eux une augmentation de l'acidification serait dommageable. Un bon nombre est déjà naturellement très acide. Une faible saturation en bases et capacité d'échange des cations est révélatrice d'une nutrition des plantes perturbée. Le risque de migration de métaux lourds est d'autant plus élevé que les sols sont très acides. La contamination par les métaux lourds n'est pas généralisée. On détecte toutefois des taux plus élevés ou des dépassements de la valeur indicative dans un cas analysé sur quatre.

Ces données et évaluations ponctuelles ne peuvent cependant pas être extrapolées à l'ensemble de la surface forestière car il manque un répertoire systématique des propriétés de tous les sols forestiers du canton. Les évaluations sur les séries chronologiques se rapportant à la pérennité des forêts reposent sur les travaux de l'Institut de biologie végétale appliquée (IBA) auxquels nous pouvons recourir pour les éléments qui touchent le canton de Berne. Elles mettent en évidence une acidification des sols mesurable dans un laps de temps relativement court et elles confirment l'hypothèse d'une relation directe entre des dépôts accrus d'azote et une altération des paramètres de fertilité des sols. Dans les écosystèmes sensibles comme celui de la forêt, le dépassement quasiment systématique des limites d'immissions (Critical Loads) pour l'azote entraîne l'accélération de l'acidification qui est observée. Par les mesures qui sont actuellement déjà en vigueur et par celles qui sont à l'état de projet dans les domaines de la pureté de l'air et de l'écologie agricole, les retombées d'azote sur le sol devraient pouvoir être réduites à l'avenir.

Pertes d'azote provenant du secteur agricole

Dans le secteur agricole, les pertes d'azote par lixiviation de nitrates ou d'émissions d'ammoniac restent un problème malgré toutes les actions entreprises jusqu'à maintenant. Les mesures globales prévues dans le cadre des prestations écologiques requises (PER) ont malgré tout permis, par une fumure contrôlée et des cultures dérobées ou des engrais verts, une réduction des lixiviations de nitrates. Cependant, presque la moitié des captages d'eau dans les zones agricoles intensives du Mittelland bernois atteignent des niveaux de pollution dépassant la valeur limite exigée (= seuil d'intervention) de 25 mg de nitrates par litre d'eau. Selon les objectifs environnementaux de la Confédération, la pollution des eaux par les nitrates

devrait être réduite de 50 % par rapport à la situation de 1985 et les émissions d'ammoniac devraient être diminuées de 43 % par rapport à la situation de l'année 2000. Des mesures stratégiques concrètes ont leur fondement dans la législation suivante: au niveau fédéral, c'est l'art. 77a/b qui a été introduit dans la Loi sur l'Agriculture, et au niveau cantonal, c'est l'ordonnance d'application révisée (OPBNP art. 2) qui découle de la Loi sur l'Agriculture. Dans le cadre du «Programme de promotion du sol du Canton de Berne», une stratégie d'incitation est en mesure de faire passer des dispositions efficaces pour réduire les pertes de nitrates et d'ammoniac.

Surveillance cantonale des sols (KABO) – Comparaisons entre deux cycles d'observations

Dans le cadre du KABO, 16 sites du canton sont l'objet d'analyses physiques, biologiques, chimiques et agronomiques depuis 1994. Le second cycle d'analyses étant achevé, la comparaison avec les relevés du premier cycle est du plus haut intérêt, en particulier en ce qui a trait à l'évolution de la fertilité des sols. Il faut tenir compte des nombreux changements qui sont intervenus dans les pratiques d'exploitation au cours de ces 15 ans: conversion accrue de prairies permanentes en surfaces de compensation écologique, recours au semis direct sur quatre des sites, réduction du nombre des animaux de rente sur certains sites. En plus du facteur temps, la comparaison prend en compte l'occupation du sol par des prairies permanentes ou des terres ouvertes, la production selon les prestations écologiques requises (PER) ou sous forme d'agriculture biologique (BIO) ainsi que les systèmes culturaux avec labour ou semis direct.

D'une manière générale, les sols sous prairie permanente présentent une structure plus stable que les sols exploités en grandes cultures. Ils se distinguent par une porosité totale plus élevée, une densité apparente plus basse et une meilleure conductivité hydraulique à saturation. Leurs teneurs en matière organique plus élevées influencent favorablement les paramètres du sol et la disponibilité des éléments nutritifs.

Les sols qui sont régulièrement labourés présentent souvent une densité apparente élevée au niveau du sous-sol, ce qui limite fortement la circulation de l'air et de l'eau. Il a été constaté de nombreux dépassements de la valeur indicative proposée par la Société suisse de pédologie (SSP) pour des paramètres du sol choisis. Les cas les plus marqués se rapportent au

labour avec un tracteur roulant dans la raie de labour, avec un taux de patinage élevé, ce qui exerce des contraintes physiques importantes sur le sol.

En renonçant au travail du sol pour le remplacer par le semis direct, la stabilité structurale se rapproche, au fil des années, de celle d'une prairie permanente, les populations de vers de terre augmentent, la macroporosité s'améliore, de même que la perméabilité à l'eau et à l'air. Grâce au semis direct, on peut atteindre l'objectif d'une portance améliorée des terres ouvertes. Ceci est d'autant plus important que 50 % des travaux des champs sont effectués dans des conditions de sol défavorables; par ailleurs, une parcelle de grande culture subit sur l'ensemble de sa surface deux fois plus de passages de machines qu'une prairie, soit en moyenne 6.8 passages par année.

Les surfaces exploitées selon les directives BIO sont moins bien pourvues en éléments nutritifs que les surfaces exploitées selon les PER. Les teneurs en humus plus faibles agissent défavorablement sur certains des paramètres physiques et biologiques mesurés. En revanche, le renoncement aux matières auxiliaires de nature chimique fait que l'on ne constate pas d'enrichissement du sol par des substances nocives. Manifestement, ceci favorise indirectement l'activité biologique dans la couche supérieure du sol, la capacité de rétention en eau et la stabilité des agrégats, plus que dans les sols exploités selon les PER.

Les résultats du KABO qui sont actuellement disponibles permettent de situer l'état initial en vue du monitoring de l'efficacité des mesures prises dans le cadre du «Programme de promotion du sol du Canton de Berne».

Développement de stratégies pour le maintien de la fertilité des sols

Depuis 1994, sur la parcelle de suivi à long terme «Oberacker» de l'Inforama Rütli à Zollikofen (BE), on compare deux systèmes culturels évolutifs, «semis direct» et «labour», dans une rotation de cultures sans prairie temporaire et sans période de jachère, avec une fumure exclusivement minérale.

Les expériences acquises jusqu'à maintenant confirment que la pratique du semis direct en continu permet de remplacer valablement le système du labour classique et qu'il est suffisamment au point pour être appliqué dans la pratique. Le renoncement au travail du sol exige une stratégie globale qui inclut une rotation des cultures adaptée au système, une gestion conséquente des résidus de récolte et des engrais verts ainsi qu'un emploi ciblé des matières auxiliaires. En supprimant la charrue, l'activité biologique du sol est améliorée, de même que la stabilité des agrégats. L'eau s'écoule mieux, ce qui diminue le risque d'érosion et garantit un meilleur approvisionnement des plantes tant en eau qu'en éléments fertilisants. La teneur en humus dans la couche supérieure du sol est améliorée,

ce qui agit favorablement sur la fourniture d'azote aux plantes, la rendant plus régulière et plus prolongée. La proportion de phosphore et de potassium disponible pour les plantes est augmentée. Six ans après la conversion, les rendements tendent à être plus élevés dans le système en semis direct, bien que la fumure soit identique dans les deux systèmes, mais les besoins en énergie sont 10 % inférieurs et la production d'ozone est diminuée de 20 %.

Les problèmes comme l'augmentation du prix de l'énergie, les pratiques culturales qui engendrent des contraintes physiques sur le sol, les pertes d'azote et le réchauffement climatique, requièrent des solutions durables. Le semis direct peut apporter une contribution non négligeable. Des adaptations de la rotation des cultures, de la gestion des engrais verts, de la technique de semis et de la fumure azotée ainsi que, dans les systèmes où il faut recourir au labour, le passage à un travail superficiel effectué le tracteur roulant hors raie de labour, sont autant de contributions à l'optimisation de la conduite des cultures.

Mettre en œuvre toutes les ressources disponibles en matière de techniques de protection

Malgré toutes les conditions posées par les PER, il faut des mesures complémentaires pour améliorer et stabiliser la structure des sols afin de diminuer les risques d'érosion et de maintenir durablement la fertilité des terres. Depuis 1996, les agriculteurs ont été sensibilisés au concept du travail de conservation du sol et, pour les inciter à passer à la culture sans labour, un soutien financier leur a été accordé pendant la phase de conversion. Actuellement, en gros 5 % des surfaces en grandes cultures du canton de Berne sont cultivées en semis direct. Le transfert des connaissances se fait de préférence sur le terrain, devant des parcelles exploitées selon ces techniques et au contact direct avec les intéressés.

Avec le lancement du «Programme de promotion du sol du Canton de Berne», par des agriculteurs et des spécialistes des sols, c'est un concept global et durable qui vise à ménager le sol et ses ressources, avec la prise en compte, à l'interface, de l'eau et de l'air. La participation à ce programme est libre. Il bénéficie de mesures financières incitatives pour soutenir la

mise en œuvre de diverses actions concernant les systèmes culturels ménageant le sol (semis sous litière, semis en bandes fraisées, semis direct; labour superficiel hors raie de labour), la régénération du sol et des mesures relatives à la culture (rotation des cultures, couverture végétale en hiver, sous-semis, renoncement aux herbicides, compostage du fumier) ainsi que les systèmes d'épandage de lisier réduisant les pertes d'ammoniac (purinage par tuyaux, matériel de transport ménageant le sol).

Ce catalogue de mesures fait partie du concept du programme qui comprend aussi une partie formation complétée par le conseil technique pour lequel on privilégie le principe «de paysans à paysans». Le dernier volet du programme est le monitoring de l'efficacité des mesures; il repose sur les analyses du KABO complétées par les aspects protection des plantes et les mesures des immissions assurées par beco Économie bernoise. À l'échéance du projet, en 2015, les mesures introduites devraient être économiquement supportables et poursuivies sans contribution financière.

Un nouveau concept d'exécution pour les sols du Canton de Berne

Dans le Canton de Berne, il incombe au SPS, en tant que service technique (selon la loi sur la protection de l'environnement) d'assurer le pilotage stratégique dans l'exécution de travaux se rapportant à des problèmes particuliers. Le secteur «économie agricole et forestière» est assumé par l'OAN tandis que le secteur «constructions» est du ressort de l'Office des eaux et des déchets (OED). Pour tenir compte

de la diversité des mesures d'exploitation et de protection des sols de manière pragmatique, le «Groupe technique Sol du Canton de Berne» coordonne la collaboration entre les différents offices depuis le 1^{er} janvier 2009. Ainsi, l'exécution des tâches se rapportant au sol est plus efficace, elle est orientée vers les utilisateurs, et c'est finalement le sol qui est renforcé.

Summary

Intensive agriculture as currently practiced is driven by the need to increase production, which in turn means increasing energy consumption. The result is harmful impacts on natural resources worldwide.

Sealed surfaces and eroded soils, waterlogging, deep wheel ruts in fields and forests, soil settlement resulting from loss of organic matter, and distinct plough pans are unmistakable signs that soil is being compacted by inappropriate ploughing and frequent use of heavy machines, often under unfavourable soil conditions. In order to increase soil carrying capacity, the Canton of Bern has adopted a strategy that calls for cropping systems without ploughing to protect the soil. Thanks to long-term no-till agriculture, cropland can become as structurally stable, and revitalised with soil fauna, as the soils in pastures. Since 1 August 2009, air and water have also been included in the Canton of Bern's «Soil Support Programme» together with measures to restore organic matter and apply liquid manure. Environmental goals established at the federal level are thus being actively and comprehensively addressed.

Agriculture in future will need to be based on food and fodder production that conserves resources to the greatest extent possible with minimal use of non-renewable energy sources. This will be achievable only through a reorientation of land management and economical use of the soil resource.

At the federal level, the legal basis for qualitative soil conservation is found in the federal law relating to the protection of the environment (*USG 1983*) and in the according ordinance relating to impacts on the soil (*VBBö 1998*). The Soil Conservation Service (BSF) in the Office for Agriculture and Nature (LANAT) monitors and assesses soil and takes necessary precautionary measures in accordance with the Ordinance on preservation of natural resources and the cultural landscape (*LKV 1997*).

The strategy for dealing with soils takes a problem-solving, holistic approach in light of the highly differentiated intensity of soil use in the Canton of Bern. Four conceptual steps are based on this approach: recognising harmful impacts on the soil, measuring and assessing them, developing strategies for dealing with them, and implementing measures.

The present Soils Report 2009 is the third report intended to inform the cantonal government and the public about the current status of soils and discuss current and planned measures.

Inventory of natural soil properties in the Canton of Bern

Loss of fertile soil caused by expansion of settled areas remains high throughout Switzerland. Approximately 1 m² – or 1 m³ of agricultural land – is irretrievably lost every second in the densely settled central part of the country. This impairs food security and drinking water security and leads to increased flooding. An inventory of natural soil properties will be of great use in or-

der to balance protection with the need for production in future. Soil quality and soil properties will be shown on soil maps. Digitally processed data will be used as a basis for identifying crop rotation areas, for construction and recultivation work, for evaluation of degraded, shallow soils, for making erosion and compaction risk maps, for carrying out land reapportionment,

and for forestry, nature conservation, risk prevention etc.

Detailed soil maps are available only in very fragmentary form in Switzerland. Just 12 % of the agricultural and forested area in the Canton of Bern has been mapped, and only 4 % at high resolution. The BSF has made a soil mapping proposal for the Canton of Bern consisting of four steps:

1. Compilation, processing, and digitalisation of available basic data;
2. Formulation of a conceptual plan for soils;
3. Determination of priority areas for mapping;
4. Collection of new soil data for soil mapping.

Compiling a soil map is a long-term, resource-intensive project that requires sound planning, a detailed cost estimate based on these four steps, and fieldwork carried out at different stages. However, the high costs of a soil map must be seen alongside the enormous gains for its many users – including the benefits for future generations and for sustainable development.

Peat settlement in the «Grosse Moos»

The «Grosse Moos», an extensive plain in western Switzerland at the foot of the Jura Mountain Range, was reclaimed as agricultural land thanks to Jura river corrections that took place at two different periods, from 1863–1885 and 1962–1973. Today this area is the «vegetable garden» of the Canton of Bern. The resulting drainage of this bogland greatly reduced the volume of soil as a consequence of loss of water and organic matter. Loss of organic matter was also accelerated by intensive land use.

Since the first river correction, maximum settlement of up to two metres was observed around the Witzwil Prison in the Bernese Lake District, corresponding to an average settlement rate of 0.75–1.43 cm annually. The current rate is still 0.5 cm annually. This means that annual CO₂ emissions amount to 7–18 t/ha of cropped land. In particular, soils underlain by calcareous mud become virtually unsuitable for cropping or growing vegetables after complete loss of peat by oxidation. No final assessment of the

extent of potential limitations on use in the entire «Grosse Moos» can be made at present owing to a lack of soil data.

Heavy settlement of soils has an impact on the water regulation system and severely limits vegetable cropping – particularly during flooding. In addition, mineralisation of organic matter results in easily leachable nitrates and increases the mobility of pollutants in soils around the Witzwil Prison that had already been polluted by earlier waste disposal.

Appropriate measures for preserving the «vegetable garden» of Bern and minimising air and water pollution include extensive cropping, use of no-till cropping systems that protect soil, increased conversion to use of grassland and use of nature preserves, education and training of farmers, targeted regulation of groundwater levels, covering soils with clean excavated soil material, and detailed mapping of the entire area as a basis.

Harmful soil physical impacts

Harmful physical impacts impair soil fertility, and soils recover only very slowly, if at all. Both inappropriate relocation of earth and traffic can lead to irreversible structural damage in the course of construction work. Guidelines for use of machinery and recultivation of construction sites have been successfully formulated and implemented.

Spreading of liquid manure and modern mechanised harvesting in agriculture can cause harm to the level of the subsoil as a result of heavy weight. Harvesting of sugar beets in particular causes great physical stress. One study showed that passing over ploughed soils with two- and six-row harvesters when soil conditions were too moist had harmful impacts to a depth of at least 60 cm, with the upper 30 cm

especially compacted. Topsoil show considerably more structural stability after many years of no-till cropping, with very little structural damage to the subsoil. Priority should therefore be given to improving the carrying capacity of farmland by minimising intervention. Measures for doing this include conversion to systems of cropping without ploughing, reducing weight on agricultural fields, installing pressure control systems with optimal tires, and paying attention to publicised tensiometer values and technical bulletins when using machinery.

Leisure activities carried out for short periods on agricultural land can also cause considerable structural damage. Transport vehicles with tires unsuited for use in fields can cause damage by compaction, particularly in the subsoil.

Acidification and heavy metal pollution in forest soils in the Canton of Bern

Approximately 31 % of the total area of the Canton of Bern is covered by forests. Forests have been subjected for years to environmental stress resulting from excessive nitrogen deposition: the forest floor is acidified; heavy metals become more soluble, and nutrients are exchanged for toxic aluminum and leached into drinking water, together with surplus nitrates. Undernourished trees produce less timber, contract diseases, and are susceptible to windthrow.

An evaluation of soil data from 238 forest sites commissioned by the BSF and carried out by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) showed that most forest floors react sensitively to further acidification. Many have already become naturally highly acidified. Minimal base saturation and cation exchange capacity are evidence of disturbed nutrient supply. The risk of displacement of heavy metals is greater in highly acid soils. Pollution with heavy metals is not widespread, although isolated high values or exceedance of

reference values were found at every fourth site investigated.

Such data and evidence from specific sites cannot be extrapolated to all forested areas, owing to the lack of a comprehensive inventory of forest soil properties. The time series measurements done by the Institute for Applied Plant Biology (IAP) in the context of long-term forest monitoring – including sites in Bern – can be of use in assessing temporal aspects. These show measurable acidification within a short period, and confirm the suspicion that there is a direct connection between elevated nitrogen deposition and decline in soil fertility parameters. Especially in sensitive ecosystems like the forest, exceedance of critical loads of nitrogen virtually throughout the canton has led to the accelerated acidification observed. Less nitrogen should be transferred to soil from the atmosphere in future as a result of air pollution and agroecological measures planned and already partially implemented.

Nitrogen loss from agriculture

Loss of nitrogen in the form of nitrate leaching and ammonia emissions in agriculture remains a problem despite considerable effort. Comprehensive measures in the context of the proof of ecological performance (ÖLN) have led to a reduction in nitrate leaching through controlled fertilisation and use of green manure. Nevertheless, pollution in almost half of all drinking water catchments in the intensively cropped central part of the canton exceeded the standard value (= intervention value) by 25 mg of nitrate/litre of water. Federal environmental goals for ag-

riculture call for deposition of nitrogen in water to be reduced to 50 % of 1985 levels, and ammonia emissions to be reduced to 43 % of levels in 2000. Effective measures have a foundation in law: at the federal level this is provided by the recent article 77a/b of the agricultural law, and at the cantonal level by the revised LKV ordinance (article 2) in the cantonal agricultural law. A strategy of incentives can be used to implement measures for reducing nitrate and ammonia losses in the context of the Canton of Bern's «Soil Support Programme».

Cantonal soil monitoring (KABO) – two sampling cycles in comparison

Physical, biological, chemical and agronomic data have been collected in the context of KABO at 16 sites since 1994. After conclusion of the second sampling, comparison with the first sampling, and hence with the development of soil fertility, was of particular interest. Moreover, many changes in cropping have been made in the past 15 years, such as increasing use of pastures as ecological compensation areas, conversion to no-tillage at four sites, and partial reduction of the livestock population. In addition to consideration of the temporal factor, comparisons were made between pastures and cropland, production according to the proof of ecological performance (ÖLN) and according to

guidelines for organic farming (BIO), and cropping systems using no-tillage and ploughing.

Soils in pastures are generally more structurally stable than soils on cropland. This is evident in terms of greater total pore volumes, higher saturated hydraulic conductivities, and lower bulk densities. In particular, greater organic matter contents have a positive impact on soil parameters and nutrients.

Cropland that is regularly ploughed tends to develop greater bulk density, particularly in the subsoil, and hence water and air balance are severely limited. Reference values – accord-

ing to the proposal established by the Swiss Soil Society – were often exceeded for selected physical soil parameters. In particular, the (rear) tractor wheel – in conjunction with the usual slip – has an especially heavy physical impact on the soil during ploughing.

When tillage is abandoned, long-term no-till agriculture can develop stable soil structure on cropland comparable to that on pastures, with high earthworm populations, a large number of macropores, high hydraulic conductivity, and air permeability. No-till agriculture makes it possible to achieve the goal of greater carrying capacity on cropland. This is all the more important given that 50 % of the field operations take place under unfavourable soil conditions and that cropland is travelled area-wide by vehicles more than twice as frequently as pastures, i. e. 6.8 times annually.

Areas cultivated in accordance with BIO guidelines have fewer nutrients than ÖLN areas. Lower organic matter content has an especially minimising impact on some of the physical and biological parameters measured. On the other hand, no accumulation of pollutants was found in organically cropped soils thanks to the lack of chemical inputs. This apparently has an indirect biological impact whereby soil water uptake and aggregate stability in the topsoil are greater than in soils cropped in accordance with ÖLN guidelines.

The present KABO results will be used to assess the initial conditions for impact monitoring in the context of the Canton of Bern's «Soil Support Programme».

Developing strategies to conserve soil fertility

The «no-tillage» and «plough» cropping systems have been compared and developed further, with crop rotation and exclusive use of mineral fertilisers and no fallow periods, on the «Oberacker» long-term field trial at the Inforama Rütli in Zollikofen (BE) since 1994.

Studies so far have confirmed that a long-term no-till system is an alternative to the conventional plough system, and is ready for application in agricultural practice. No-till agriculture requires an overall strategy, with appropriate crop rotation and use of crop residue and green manure, as well as targeted application of chemical inputs. Abandoning the plough makes the soil biologically more active and gives it a more stable structure. Water can infiltrate more easily, reducing the risk of erosion and guaranteeing that water and nutrient supplies are more

even. Organic matter content in the topsoil increases, leading to continual replenishment of nitrogen, with greater duration during the vegetation period. Phosphorous and potassium exist in a form that is more available to plants. Six years after switching to this system, yields tended to be larger with identical amounts of fertiliser in the no-till system – with 10 % less energy input and 20 % less ozone formation.

Problems such as rising energy costs, cropping practices that harm the soil, loss of nitrogen, and climate warming call for long-term solutions. No-till agriculture can make a substantial contribution in this respect. Adaptations in crop rotation, including green manure, seeding techniques, and nitrogen fertilisers – as well as shallow use of the on-land (offset) plough in a soil inversion system – can help to optimise cropping.

Implementing measures to conserve resources

Despite the requirements of ÖLN, additional measures are necessary to improve and stabilise soil structure, reduce erosion, and maintain soil fertility in the long term. Farmers have been made aware of cropping systems that conserve the soil since 1996, and have received financial support during the transition phase. Today about 5 % of the cropland in the Canton of Bern is under no-till agriculture. Knowledge transfer should preferably take place in successful show-and-tell among those interested in application of these systems.

The Canton of Bern's «Soil Support Programme» launched by farmers and soil experts pursues a comprehensive and sustaina-

ble problem-solving approach to soil protection at the interface of water and air. It is based on voluntary participation and allows for financial incentives for implementation of different measures related to cropping systems that protect the soil (mulch-till, strip-till or no-till; on-land plough), soil development and cropping measures (crop rotation, soil cover over winter, undersown crops, abandonment of herbicides, manure composting) and ammonia-reducing techniques for the application of liquid manure (umbilical application system, soil-conserving undercarriages). This catalogue of measures is part of the programme concept which, together with educational and extension components, constitutes an overall «By Farmer to

Farmer's» approach, along with impact monitoring based on KABO that includes plant protection and immission measurements by Economie bernoise. Following completion of the project

in 2015, these measures should be economically feasible without additional incentives and be pursued further.

A new enforcement concept in the Canton of Bern

According to the USG, the BSF is the responsible authority in the Canton of Bern for strategic control in the enforcement of problems relating to soil. Agricultural and forestry problems will be enforced by the LANAT, and construction problems by the Office for Water and Waste Management (AWA). In order to take account of the many demands relating to use and protec-

tion of the soil resource, the Canton of Bern's «Soil Working Group» has been coordinating collaboration between offices since 1 January 2009. Enforcement of soil protection measures will thereby be organised in a more effective, more efficient and more customer friendly manner and soil protection in agriculture will be strengthened.

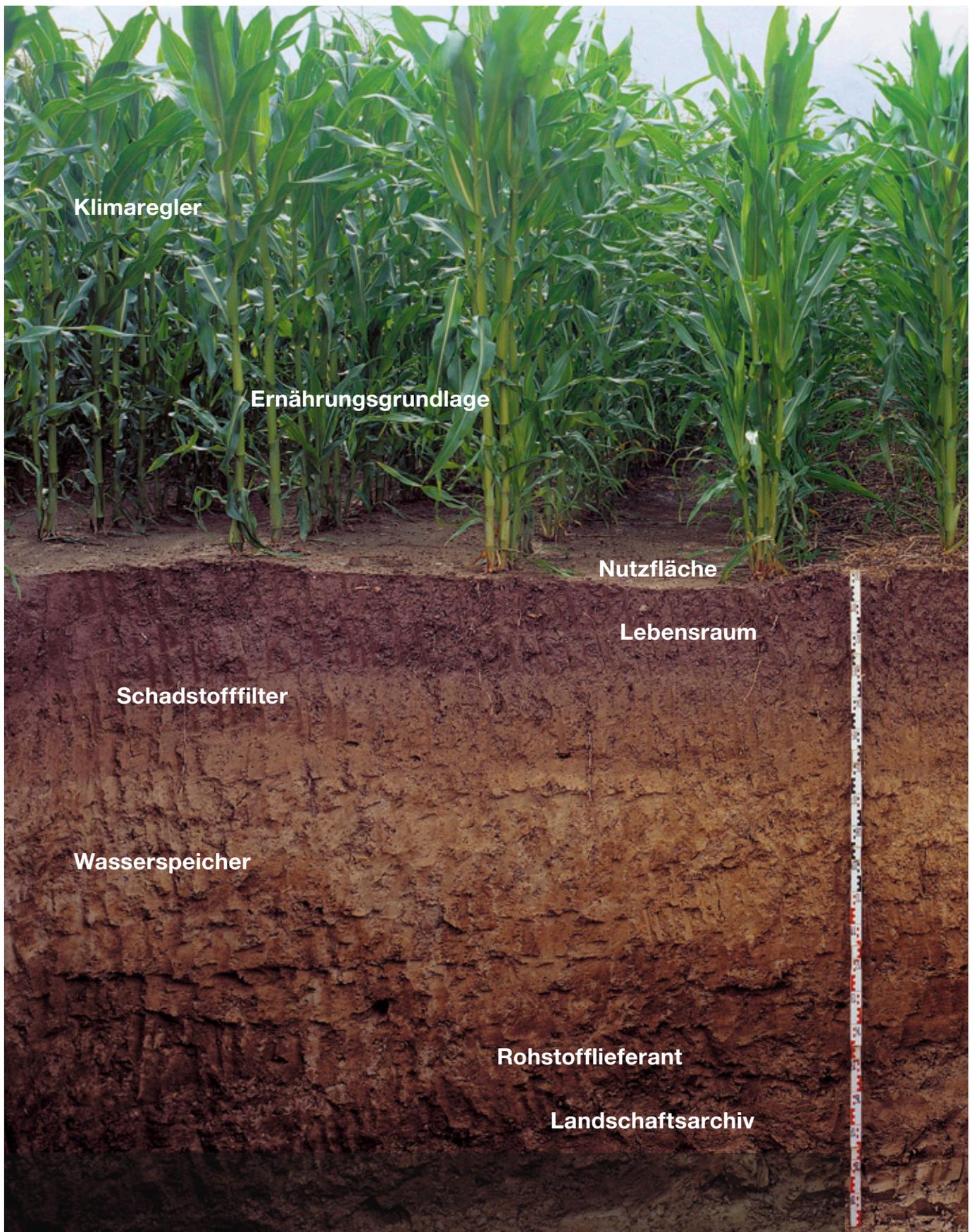
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Impressum	v
Zusammenfassung	vii
Résumé	xiii
Summary	xix
Inhaltsverzeichnis	xxv
1 Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit – eine zentrale Zielsetzung	1
1.1 Bodenschutz im Kanton Bern	2
1.2 Handlungsstrategie	3
1.2.1 Belastungen erkennen	3
1.2.2 Belastungen messen und beurteilen	3
1.2.3 Lösungsstrategien entwickeln	3
1.2.4 Massnahmen umsetzen	3
2 Verzeichnis der natürlichen Bodeneigenschaften im Kanton Bern	5
2.1 Flächenintensive Beanspruchung des Bodens im Kanton Bern	6
2.2 Bodenkarten – Grundlage für bodengerechtes Handeln	8
2.3 Bestehende Bodenkarten – eine Übersicht	9
2.4 Technik der Bodenkartierung und Verwaltung von Bodendaten	10
2.5 Schrittweise Aufarbeitung der Bodendaten im Kanton Bern	11
2.6 Schlussfolgerungen	13
2.7 Ausblick	14
3 Torfsackung im «Grossen Moos»	15
3.1 Korrektur der Juragewässer	16
3.1.1 Verbreitung der Moorböden	16
3.2 Torfsackung und Kohlenstoffverlust	18
3.2.1 Ausmass der Sackung	18
3.2.2 Bestimmung des Kohlenstoffverlusts infolge der Torfsackung	19
3.2.3 Auswirkungen des Torfabbaus	19
3.2.4 CO ₂ -Emissionen	20
3.3 Zukunft der Entwässerungsinfrastruktur	20
3.4 Schadstoffe	21
3.5 Schlussfolgerungen und Ausblick	21
4 Physikalische Bodenbelastungen	23
4.1 Bodenschutz beim Bauen	24
4.1.1 Rekultivierungen	24
4.1.2 Beachtung des Unterbodens	25
4.1.3 Verwertung von Bodenaushub	25
4.1.4 Einsatzgrenzen für Baumaschinen	26
4.1.5 Bodenkundliche Baubegleiter	27
4.1.6 Folgebewirtschaftung rekultivierter Flächen	27
4.1.7 Schlussfolgerungen	28
4.1.8 Ausblick	28
4.2 Moderne Erntemechanisierung	28
4.2.1 Zuckerrübenernte	29
4.2.2 Bodenbelastung der Ernteverfahren	29
4.2.3 Auswirkungen von langjährigem Direktsaat- und Pflugsystem	30
4.2.4 Auswirkungen auf das Gefüge	30
4.2.5 Schlussfolgerungen	30
4.2.6 Ausblick	31
4.3 Bodenbelastung bei Freizeitveranstaltungen	32
4.3.1 Tractor Pulling	32

4.3.2	Bodenphysikalische Untersuchungen	33
4.3.3	Schlussfolgerungen	33
4.3.4	Ausblick.....	34
5	Versauerung und Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden im Kanton Bern.....	35
5.1	Bodenversauerung	37
5.1.1	Versauerungsprozess	37
5.1.2	Versauerung forstwirtschaftlich genutzter Böden.....	37
5.1.3	Auswirkungen der Versauerung	42
5.2	Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden	43
5.2.1	Stand der Schwermetallbelastung	44
5.2.2	Richtwertüberschreitungen nach VBBo	44
5.2.3	Verlagerungsrisiko.....	45
5.2.4	Biologische Beeinträchtigungen durch Schwermetalle.....	46
5.2.5	Gesamtbeurteilung des durch Schwermetalle verursachten Risikos.....	46
5.3	Gesamtbeurteilung der Berner Waldböden	46
5.4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	49
6	Stickstoff-Verluste aus der Landwirtschaft	51
6.1	Erste Massnahmen in der Nitrat-Bekämpfung	52
6.1.1	Agrarpolitischer Wandel	52
6.1.2	Massnahmenbeurteilung.....	53
6.1.3	Boden schonender Ackerbau zur Nitrat-Reduktion	54
6.1.4	Sanierungsprojekt «Walliswil»	54
6.2	Ammoniak-Verluste	55
6.3	Schlussfolgerungen.....	57
6.4	Ausblick.....	57
7	Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) – zwei Beprobungszyklen im Vergleich.....	59
7.1	Zweitbeprobung.....	60
7.2	Resultate und Diskussion	61
7.2.1	Physikalische Parameter	61
7.2.2	Biologische Parameter	65
7.2.3	Organische und anorganische Schadstoffe.....	67
7.2.4	Nährstoffe und Bodenkennwerte	70
7.3	Beurteilung der physikalischen Bodenbelastung.....	75
7.4	Richtwertvorschläge im physikalischen Bodenschutz	79
7.5	Gesamtbeurteilung der KABO-Resultate.....	80
7.6	Schlussfolgerungen.....	81
7.7	Ausblick.....	81
8	Lösungsstrategien entwickeln zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit....	83
8.1	Direktsaat und Pflug im Systemvergleich.....	84
8.1.1	Pflanzenschutz	85
8.1.2	Bodenleben und Bodenstruktur.....	86
8.1.3	Humus- und Nährstoffdynamik	87
8.1.4	Pflanzenerträge.....	88
8.1.5	Ökobilanz positiv für DS-System.....	89
8.1.6	Wirtschaftlichkeit im Vergleich.....	89
8.2	Schlussfolgerungen zum Systemvergleich.....	89
8.3	Ausblick.....	90
9	Umsetzung Ressourcen schonender Massnahmen	93
9.1	Beginn der Umsetzung.....	94
9.1.1	Mehrjährige Massnahmen konsequent umsetzen	95
9.1.2	Erfolg der Förderung Boden schonender Anbausysteme.....	96
9.1.3	Wissenstransfer	98
9.2	Erosionsbekämpfung	100
9.3	Förderprogramm Boden Kanton Bern	101
9.3.1	Bildung und Beratung.....	102
9.3.2	Massnahmenkatalog.....	102
9.3.3	Monitoring und Kontrolle	104
9.3.4	Kosten und Finanzierung	105
9.4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	105

10	Vollzugskonzept Boden Kanton Bern	107
10.1	Neues Vollzugskonzept im Bodenschutz	108
10.2	Ämter übergreifende Zusammenarbeit	109
	Verzeichnisse	111
	Abkürzungen	111
	Verzeichnis der Gesetze und Verordnungen	113
	Verzeichnis der Normen, Richtlinien und Merkblätter	114
	Literatur	115
	Anhang I:	
	Bodensäure und Versauerung – unter spezieller Betrachtung des Stickstoff-Kreislaufs	121
	Anhang II:	
	Erst- und Zweitbeprobungsergebnisse der physikalischen und biologischen Parameter	127

1 Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit – eine zentrale Zielsetzung



1 Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit – eine zentrale Zielsetzung

Boden erfüllt vielfältige Funktionen. Der Kanton Bern verfügt neben den intensiv genutzten Ackerböden im Mittelland über extensiv genutzte Böden an Wiesen- und Waldstandorten sowie auf Alpweiden. Die entsprechend der Bewirtschaftung sehr differenzierte Nutzungsintensität stellt unterschiedlichste Ansprüche an den Bodenschutz. Im Zentrum stehen Lösungen, welche die Fruchtbarkeit der Ressource Boden erhalten und gleichzeitig ökonomisch und sozial tragbar sind.

Der Bodenschutz ist rechtlich verankert und wird im Kanton Bern mit einer umfassenden Strategie umgesetzt. Die Bodenschutzfachstelle (BSF) des Amtes für Landwirtschaft und Natur (LANAT) überwacht und beurteilt die Böden in der Land- und Forstwirtschaft

auf der Grundlage der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO) und weiterer punktueller Untersuchungen. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern werden Handlungsstrategien entwickelt und geeignete Lösungen umgesetzt.

1.1 Bodenschutz im Kanton Bern

Die Rechtsgrundlagen (**Kasten 1–1**) für den qualitativen Bodenschutz finden sich auf eidgenössischer Ebene im Umweltschutzgesetz (USG 1983) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998). Aufgrund dieser gesetzlichen Grundlagen sind die Kantone verpflichtet, eine entsprechende Fachstelle zu unterhalten. Im Kanton Bern ist die BSF Teil des LANAT und damit der Volkswirtschaftsdirektion (VOL) angegliedert. Die BSF überwacht und beurteilt den Boden im Sinne der

VBBo und trifft die erforderlichen Vorsorgemassnahmen (Art. 2 LKV). Die Kantone teilen die Ergebnisse der Überwachung dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) mit und veröffentlichen sie (Art. 4 VBBo). Mit dem vorliegenden «Bodenbericht 2009» nimmt die BSF diese Informationspflicht wahr. Gleichzeitig richtet sich der Bericht an ein breites Publikum und bringt diesem die aktuellen Problemfelder und Lösungsansätze des Bodenschutzes näher.

Die Handlungsstrategie der BSF richtet sich aufgrund der im Kanton Bern stark differenzierten Nutzungsintensität der Böden auf ein lösungsorientiertes, gesamtheitliches Vorgehen und gliedert sich in vier Teilschritte. Sie ist auf die Ziele des LANAT abgestimmt. Aufgrund der geltenden nationalen und internationalen Gesetze bzw. Abkommen formulierten das BAFU und das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) die Umweltziele Landwirtschaft (BAFU und BLW 2008). Diese Zielsetzungen werden in der Handlungsstrategie der BSF zum qualitativen Schutz der land- und forstwirtschaftlichen Böden ebenfalls berücksichtigt.

Der Schutz des Bodens in seiner flächenhaften Ausdehnung ist insbesondere Aufgabe der Abteilung Kantonsplanung des Amtes für Gemeinden und Raumordnung (AGR). Im Rahmen der räumlichen Bodeninformation wird in Kapitel 2 kurz darauf eingegangen. Der bauliche Bodenschutz (Kapitel 4.1) liegt gemäss den revidierten Organisationsverordnungen der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion (BVE) sowie der VOL seit 1. Januar 2009 im

Kasten 1–1: Rechtsgrundlagen des qualitativen Bodenschutzes für den Kanton Bern

Der qualitative Bodenschutz stützt sich im Wesentlichen auf folgende Gesetze und Verordnungen:

USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (1983): Schutz der Bodenfruchtbarkeit, Vorsorgeprinzip, Grundlage für Anordnung von Massnahmen.
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens (1998): Die Kantone sind verpflichtet, die chemischen, biologischen und physikalischen Belastungen der Böden zu überwachen und zu beurteilen. Weiter regelt die VBBo mit geeigneten Massnahmen die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit.
GeoIV	Geoinformationsverordnung (2008): Die im Rahmen der VBBo erhobenen Daten der Kantonalen Bodenbeobachtung gehören zum Katalog der Geobasisdaten des Bundesrechts.
LKV	Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (1997): Förderung Ressourcen – Boden, Wasser, Luft – und Energie schonender Produktionssysteme mit finanziellen Beiträgen.

Zuständigkeitsbereich der Abteilung Betriebe und Abfall (Fachbereich Boden) des Amtes für Wasser und Abfall (AWA) und wird nicht mehr durch die BSF vollzogen (Kapitel 10).

1.2 Handlungsstrategie

Bei sämtlichen Schritten der Handlungsstrategie (**Abbildung 1-1**) spielt die Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern wie der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Täniken (ART), der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) eine wichtige Rolle. Weiter ist das Wissen über die Qualität der vorhandenen Böden zentral. Eine flächendeckende, grossmasstäbliche Bodenkarte fehlt bisher, wäre aber als Grundlage für nutzungs- und schutzrelevante Lösungen von grossem Nutzen (Kapitel 2).

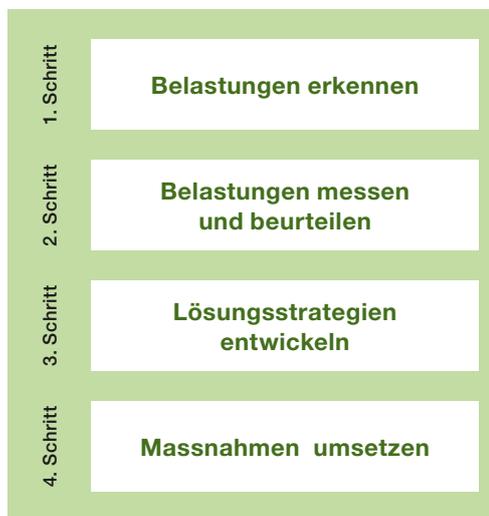


Abbildung 1-1: Handlungsstrategie des qualitativen Bodenschutzes im Kanton Bern, umgesetzt auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen

1.2.1 Belastungen erkennen

Auf dem Areal der Anstalten Witzwil wurde – stellvertretend für das ganze «Grosse Moos» – die Torfsackung seit der ersten Juragewässerkorrektur erfasst (Kapitel 3). Der oxidative Abbau des Torfs führt zu einer Degradation der vorwiegend ackerbaulich genutzten Böden. Die Folge ist ein erheblicher Höhenverlust in sehr kurzen Zeiträumen und weiter ein beträchtlicher Verlust an Kohlenstoff, der in Form von CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird.

Punktuell können auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Bodenbelastungen bei Bauarbeiten, aber auch bei Freizeitveranstaltungen auftreten. Eine flächendeckende Ausdehnung der physikalischen Belastung zeichnet sich bei zunehmend schwerer Mechanisierung sowohl im Acker- wie auch im Futterbau ab (Kapitel 4).

1.2.2 Belastungen messen und beurteilen

Die Beurteilung von forstwirtschaftlich genutzten Böden zeigt, dass der flächendeckend hohe Stickstoff-Eintrag am Anfang einer Wirkungskette steht und zu einem grossen Risiko für eine beschleunigte Versauerung wird, was die Auswaschung von Schwermetallen und anderen Stoffen begünstigt (Kapitel 5). Erhöhte Einträge von Stickstoff werden nicht nur im Wald, sondern auch im Grund- und damit im Trinkwasser festgestellt (Kapitel 6).

Im Kanton Bern werden knapp ein Drittel der Böden landwirtschaftlich genutzt. Insbesondere auf Ackerflächen stellen grossflächige Belastungen ein Problem dar. Die Resultate des

zweiten Beprobungszyklus der KABO (Kapitel 7) lassen eine Beurteilung der Belastungssituation im Kanton Bern zu.

1.2.3 Lösungsstrategien entwickeln

Die Dauerbeobachtungsfläche «Oberacker» (Kapitel 8) dient bereits seit 1994 dazu, Lösungsansätze für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung zu suchen. Die aus dem langjährigen Systemvergleich «Direktsaat versus Pflug» gemachten Erfahrungen führen zu praktikablen Massnahmen, um die Ressource Boden, Wasser und Luft zu schonen. Die Dauerbeobachtungsfläche dient weiterhin der Entwicklung von Anbausystemen, insbesondere im Bereich der Energie- und Stickstoff-Effizienz.

1.2.4 Massnahmen umsetzen

Um die Bodenbelastung der ackerbaulich genutzten Flächen zu reduzieren, müssen die erfolgreich entwickelten Massnahmen gezielt umgesetzt werden (Kapitel 9). Seit 1997 können in nitrat-, erosions- und verdichtungsgefährdeten Gebieten im Rahmen der LKV finanzielle Anreize für Boden schonende Anbausysteme ausbezahlt werden. Die Verbreitung von umfassenderen Massnahmen wird seit August 2009 mit dem durch den Bund massgeblich mitfinanzierten «Förderprogramm Boden Kanton Bern» unterstützt.

2 Verzeichnis der natürlichen Bodeneigenschaften im Kanton Bern



Profilansprache

2 Verzeichnis der natürlichen Bodeneigenschaften im Kanton Bern

Die Ressource Boden wird durch die menschliche Nutzung vielfältig beansprucht. Mit der Ausdehnung der Siedlungsfläche geht stetig fruchtbarer Boden verloren. Nicht jeder Boden ist aber für jede Nutzung gleich gut geeignet. Kenntnisse über Qualität und Eigenschaften von Böden erleichtern bodenrelevante Entscheide und die Abwägung verschiedener Nutzungs- und Schutzansprüche. Detaillierte Bodendaten sind im Kanton Bern jedoch nur lückenhaft vorhanden.

Eine systematische, flächendeckende Aufarbeitung der Bodendaten des Kantons Bern kann in vier Schritten erreicht werden. Als erstes sind die bereits vorhandenen Bodenprofile und Bodenkarten zusammenzustellen und digital aufzubereiten. Die systematische Auswertung dieser Grundlagendaten erlaubt die Abgrenzung grossflächiger Bodeneinheiten in einem Bodenkonzeptplan. Dieser Plan dient als Grundlage für die Priorisierung der neu zu kartierenden Gebiete und könnte in den kantonalen Richtplan eingehen. Anschliessend erfolgen, gestaffelt nach Prioritäten, die Bodenaufnahmen im Gelände sowie ihre elektronische Erfassung und Aufbereitung. Bestehende und neue Bodendaten werden im GIS und in der nationalen Bodendatenbank (NABODAT) verwaltet und vernetzt. Eine Veröffentlichung über das Geoportal des Kantons Bern gewährleistet, dass die Kenntnisse der Bodeneigenschaften allen potenziellen Nutzern zur Verfügung stehen.

Der Boden ist eine durch die menschliche Nutzung vielfältig beanspruchte und zunehmend knapper werdende natürliche Ressource. Die Ausdehnung der Siedlungs- und Waldfläche geht oft auf Kosten fruchtbarer Böden. Schutz vor Naturgefahren, Bau-, Land-, Forstwirtschaft, Natur- und Bodenschutz verfolgen teilweise sehr unterschiedliche Interessen in Bezug auf die Bodennutzung. Fundierte Kenntnisse über die Qualität und Eigenschaften der Böden erleichtern die Bearbeitung nutzungs- und schutzrelevanter Fragen. Entsprechende Entscheide könnten sachgerecht, nachvollziehbar und schneller gefällt werden. Detaillierte Bodendaten würden durch Bodenkartierung

gewonnen. Im Kanton Bern sind solche Daten jedoch bisher nur lückenhaft vorhanden (VOL 2003). Die wenigen bestehenden Karten sind kaum digital aufgearbeitet und daher nur bedingt nutzbar.

Bodendaten sind für verschiedenste bodenrelevante Fragestellungen nutzbar. Überlagert mit anderen Grundlagendaten könnten spezifische Anwendungskarten wie z. B. Erosionsrisikokarten generiert werden. Nachfolgend wird eine Möglichkeit zur handlungsorientierten und schrittweisen Erarbeitung der Bodendaten im Kanton Bern aufgezeigt.

2.1 Flächenintensive Beanspruchung des Bodens im Kanton Bern

Unter den vielfältigen Bodenbeanspruchungen durch menschliche Tätigkeit ist der Bodenverlust durch Überbauung der stärkste Eingriff in das Ökosystem Boden. Wird Boden versiegelt bzw. ausgehoben, geht der «Naturkörper» Boden mit seinen vielfältigen Funktionen verloren.

In der Schweiz ist der Flächenverlust durch bauliche Tätigkeit unvermindert hoch. Gemäss den Zahlen der aktuellsten Arealstatistik wurden zwischen 1979/85 und 1992/97 pro Sekunde rund 1.0 m² landwirtschaftliche Nutzfläche bzw. 1.0 m³ Boden in Siedlungsfläche umgewandelt

(BFS 1997). Betroffen ist vorwiegend fruchtbares Ackerland im sehr dicht besiedelten Mittelland, insbesondere entlang der Hauptverkehrsachsen. Waldareale sind durch das Forstpolizeigesetz von 1876 (*heute Waldgesetz, WaG 1991*) weitgehend vor Flächenverlust geschützt.

Im Kanton Bern nahm in der obgenannten 12-jährigen Periode die Siedlungsfläche (inkl. Verkehrsflächen, Industrieareale etc.) um rund 3800 ha zu, das Waldareal um 1800 ha (**Tabelle 2-1**). Dies entspricht einer Zunahme von 39 m² pro Kopf. Dieser Wert liegt knapp unter dem Schweizer Durchschnitt (43 m²), ist aber bedeutend höher als in verstäderten Kantonen wie z.B. Zürich (20 m²).

Die zunehmende Zerstörung von Boden durch Versiegelung stellt die Nahrungsmittelsicherheit und Trinkwasserversorgung in Frage und verursacht Probleme in Bezug auf den Hochwasserschutz. In zwölf Jahren verlor der Kanton Bern 38 000 000 m² mehrheitlich guten, landwirtschaftlich genutzten Boden. 40% davon oder 15 000 000 m² wurden durch Gebäude, Strassen etc. versiegelt und unwiederbringlich zerstört. Diese Fläche entspricht der Produktionsgrundlage von 190 Bauernhöfen à zwanzig Hektaren, auf denen beispielsweise 22 800 t Brotweizen (6 t/ha) produziert werden könnten.

Unter der Annahme, dass 40% des durchschnittlichen Jahresniederschlags (1000 mm) durch den Boden ins Grundwasser infiltriert, werden als Folge der fehlenden Sickerflächen jährlich 6 Milliarden Liter weniger Grundwasser neu gebildet. Dafür fliesst über die neu ver-

siegelten Flächen jährlich 15 Milliarden Liter mehr Niederschlagswasser oberflächlich ab. Das Wasser gelangt direkt oder über Kläranlagen in die Gewässer und erhöht das Risiko von Hochwasser.

Beim Abbau von Rohstoffen, für Installationsplätze und Transportpisten auf Baustellen und bei der Erstellung von Tagbautunnels werden vorübergehend fruchtbare Böden beansprucht. Es ist zu erwarten, dass diese vorübergehende Beanspruchung von Böden – auch bei abnehmender Bautätigkeit – eher noch zunehmen wird. Temporär beanspruchter Boden kann jedoch durch sachgerechte Rekultivierung und mehrjährige Folgebewirtschaftung wiederhergestellt und als Fruchtfolgefläche genutzt werden (Kapitel 4.1).

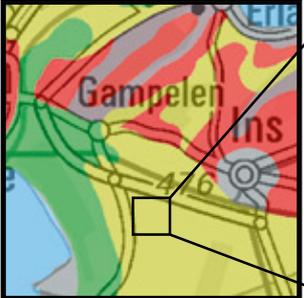
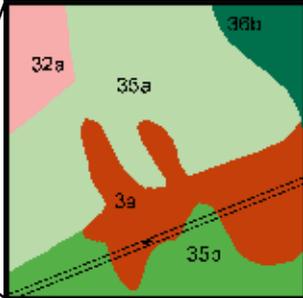
Nebst den durch bauliche Tätigkeit bedrohten Böden im halbstädtischen, achsen-nahen ländlichen Mittelland sind weiter verdichtungsanfällige Böden (Funktionsverlust der Drainagen), organische Böden (Kapitel 3) sowie Ackerböden mit hohem Erosionsrisiko (Kapitel 9.2) gefährdet.

Der Verlust an fruchtbarem Boden durch die Ausdehnung der Wald- und Siedlungsfläche ist schweizweit unvermindert hoch. Die zunehmende Versiegelung bedroht unsere Nahrungsgrundlage und vermindert die Einsickerung von Niederschlagswasser, was vermehrt zu Grundwassertiefständen oder Hochwasser führen kann.

Tabelle 2-1: Flächenänderungen der Bodennutzung in verschiedenen Kantonen und in der Schweiz im 12-jährigen Zeitraum von 1979/85 bis 1992/97 (Zahlen gerundet, BFS 1997) und pro Einwohner (BFS 2009)

Kanton/Land	Bodennutzung	Fläche	Veränderung	Veränderung	Einwohner	Veränderung
		1992/97	in 12 Jahren	in 12 Jahren		
		[ha]	[ha]	[%]	[in Tausend]	(davon Siedlungsfläche versiegelt) [m ²]
Bern	Wies- und Ackerland	150 000	-5600	-3.6	969.1	-57.8
	Siedlungsfläche	38 100	+3800	+11.1		+39.2 (+15.7)
Freiburg	Wies- und Ackerland	72 000	-2200	-3	268.1	-82.1
	Siedlungsfläche	12 000	+2000	+20		+74.6 (+29.8)
Zürich	Wies- und Ackerland	64 000	-3800	-5.6	1332.9	-28.5
	Siedlungsfläche	35 000	+2700	+8.4		+20.3 (+8.1)
Schweiz	Wies- und Ackerland	840 000	-36 000	-4.1	7700.2	-46.8
	Siedlungsfläche	280 000	+33 000	+13.5		+42.9 (+17.1)

Tabelle 2-2: In der Schweiz gebräuchliche Bodenkartenmasstäbe, dargestellt anhand eines Kartenausschnitts vom Areal des Gutbetriebs Witzwil sowie deren Anwendungsbereiche (zusammengestellt nach FAL 1997, Lüscher 2004 und Fenner 2007)

Masstabsbereich	1:200 000–1:500 000 Kleinmasstäblich	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 ha–2500 ha	6.25 ha–25 ha (Betriebsgrösse)	0.6 ha–1 ha (Parzellengrösse)
Detaillierungsgrad und Auflösung	nicht detailliert nicht parzellenscharf	halbdetailliert (generalisiert) nicht parzellenscharf	detailliert parzellenscharf
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)
Masstab	1:200 000	1:25 000	1:5000
			

2.2 Bodenkarten – Grundlage für bodengerechtes Handeln

Bodenkarten geben Auskunft über Bodentyp und -eigenschaften eines Standorts. Die inhaltliche und standörtliche Genauigkeit der Bodenkarte hängt vom Aufnahme- und Kartenmasstab ab (**Tabelle 2-2**). Fundierte parzellenscharfe Sachentscheide sind nur auf Basis von grossmassstäblichen Bodenkarten (1:2500–1:5000) möglich. Digital aufbereitet, können sie vielfältig und effizient genutzt werden.

Bis heute spielt die Art und Qualität der Böden bei der Nutzungsplanung im Kanton Bern kaum eine Rolle. Bodenkarten liefern zusätzliche Informationen, um bei Zielkonflikten verschiedener Nutzungs- und Schutzansprüche an den Boden (Siedlung, Naturschutz, Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, Schutz vor Naturgefahren etc.) sinnvoll zu entscheiden. Vergleichbare Kriterien erhöhen zudem die Transparenz, auch der kommunalen Planung. Idealerweise würden in erster Linie Böden zur Überbauung freigegeben, deren Fruchtbarkeit durch natürliche Faktoren oder

menschliche Einflüsse bereits eingeschränkt ist.

Mit Bodenkarten erhalten Vollzug und Planungsbüros einfachen Zugang zu bodenkundlichen Entscheidungsgrundlagen, was die Planungs- und Bewilligungsverfahren beschleunigt und verbilligt.

Gemäss Sachplan Fruchtfolgeflächen hat der Kanton Bern 84 000 ha Fruchtfolgeflächen auszuweisen. Noch fehlen 5308 ha (**Tabelle 2-3**). Um diese auszuscheiden, sind Bodendaten wie die pflanzennutzbare Gründigkeit notwendig (**Kasten 2-1**).

Die Wiederherstellung vorübergehend genutzter Böden bedingt als Grundlage für die bodenkundliche Begleitung der Bau- und Rekulтивierungsarbeiten eine detaillierte Bodenaufnahme des Ist-Zustandes.

Da Deponiemöglichkeiten immer knapper werden, wird in Erwägung gezogen, sauberen

Aushub auf Landwirtschaftsareal auszubringen und so zum Beispiel degradierte oder flachgründige Böden aufzuwerten (Fry und Liechti 2009).

Abgeleitet aus den Bodendaten, können spezifische Anwendungskarten (z. B. Erosionsrisikokarten) generiert werden.

Von umfassenden Bodendaten profitieren beispielsweise

- die Landwirtschaft (Schutz bzw. Aufwertung gefährdeter Landwirtschaftsböden; Vermeidung von Bodenverdichtung und Erosion, Kapitel 9; Planungen von Landumlegungen, Bewässerungsanlagen sowie Aufbesserung degradierter Böden, Kapitel 3; Erarbeitung von Bewirtschaftungsmassnahmen und deren Umsetzung aufgrund der Erkenntnisse aus der Kantonalen Bodenbeobachtung, Kapitel 5 und 7);
- die Waldwirtschaft (standortgerechte Baumartenwahl und Bodenversauerungsrisiko, Kapitel 5);
- der Naturschutz (Gewässerrenaturierung, ökologische Vernetzung);
- die Beurteilung von Naturgefahren (Hochwasserrisiko aufgrund des Infiltrationsvermögens);
- die Bauwirtschaft (Umweltverträglichkeitsprüfungen, Baubewilligungsverfahren allgemein).

Um die verschiedenen Nutzungs- und Schutzansprüche an den Boden abzuwägen zu berücksichtigen, sind detaillierte Kenntnisse über die Qualität und Eigenschaften der betroffenen Böden von grossem Nutzen. Fundierte Sachentscheide sind nur auf der Basis von grossmassstäblichen Bodenkarten (1:2500–1:5000) möglich. Digital aufbereitet, können Bodenkarten auch von der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Bauwirtschaft und im Naturschutz vielfältig genutzt werden.

Tabelle 2–3: Flächenbilanz des Kantons Bern, gerundet (BFS 1997)

Kanton Bern, Gesamtfläche	595 900 ha
Die Gesamtfläche verteilt sich auf:	
– Siedlungsflächen	38 100 ha
– unproduktive Flächen (Gletscher, Seen etc.)	115 000 ha
– Wald, Gebüschwald und Gehölze	184 600 ha
– Landwirtschaftsflächen	258 200 ha
} <i>davon sind rund 18 000 ha detailliert kartiert</i>	
Die Landwirtschaftsflächen verteilen sich auf:	
– Alpwirtschaftliche Nutzflächen	85 600 ha
– Heimweiden	17 000 ha
– Wies- und Ackerland (inkl. Obst-, Reb- und Gartenbau)	155 600 ha
Das Wies- und Ackerland verteilt sich auf:	
– Inventar Fruchtfolgeflächen (Vorgabe Bund 84 000 ha ¹)	78 692 ha²
– restliches Wies- und Ackerland	76 900 ha

¹ gemäss Sachplan Fruchtfolgeflächen hat der Kanton Bern 84 000 ha auszuweisen (ARE 2006)

² inkl. vorübergehend anders genutzte Flächen wie Abbau- und Deponiezonen sowie Golfplätze (AGR 2006)

Kasten 2–1: Vollzugshilfe Fruchtfolgeflächen (ARE 2006)

Fruchtfolgeflächen sind der agronomisch besonders wertvolle Teil des für die landwirtschaftliche Nutzung geeigneten Kulturlandes der Schweiz. Sie umfassen ackerfähiges Kulturland, vorab Ackerland und die Kunstwiesen in Rotation sowie ackerfähige Naturwiesen. Sie sind mit Blick auf die klimatischen Verhältnisse, die Beschaffenheit des Bodens und die Geländeform zu bestimmen. Die Bedürfnisse des ökologischen Ausgleichs sind zu berücksichtigen.

Die Qualitätskriterien, denen die Fruchtfolgeflächen zu genügen haben, basieren auf den Grundlagen des Sachplans Fruchtfolgeflächen von 1992.

1. Kriterium	Klimazone	A / B / C / D1–4
2. Kriterium	Hangneigung	≤ 18 %
3. Kriterium	pflanzennutzbare Gründigkeit	≥ 50 cm
4. Zusatzkriterium	effektive Lagerungsdichte ¹	≤ Richtwert gemäss Vorschlag BGS
5. Zusatzkriterium	Schadstoffe ¹	≤ Richtwert gemäss VBBo
6. Zusatzkriterium	zusammenhängende Fläche	≥ 1 ha Grösse und geeignete Parzellenform

¹ gilt nur für Ersatzflächen

2.3 Bestehende Bodenkarten – eine Übersicht

Die erste bodenkundliche Übersichtskarte der Schweiz entstand 1928 im Massstab 1:600 000. Erst 1980 wurde mit der Bodeneignungskarte der Schweiz (1:200 000) eine erste flächendeckende, kleinmassstäbliche Bodenkarte publiziert. Trotz intensiver Bodenkartiertätigkeit seit den 1960er Jahren sind weite Gebiete der Schweiz bis heute erst sehr lückenhaft mittel- und grossmassstäblich kartiert (Weisskopf und Nievergelt 2003). In verschiedenen Regionen existieren Bodenkarten im Massstab 1:25 000. Sie entsprechen den Kartenblättern der Schweizer Landeskarte und wurden von der Eidgenössischen Forschungs-

anstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL, heute ART) erstellt. Der Kanton Thurgau verfügt über eine flächendeckende Bodenübersichtskarte im Massstab 1:50 000. Grossmassstäbliche Bodenkarten im Massstab 1:5000 gibt es bisher nur für die Landwirtschaftsareale der Kantone Baselland, Zug und Zürich. Der Kanton Solothurn arbeitet seit einigen Jahren in Etappen an einer Detailbodenkarte im Massstab 1:2500 für das Landwirtschafts- und Waldareal. Im Kanton Wallis schliesslich wird eine projektbezogene Bodenkarte im Massstab 1:10 000 für die im Haupttal geplante dritte Rhonekorrektur erstellt.

Im Kanton Bern wurden bis zum Jahr 2000 im Rahmen verschiedener Projekte 55 000 ha kartiert. Das entspricht 12 % des Landwirtschafts- und Waldareals (VOL 2003). Davon entfallen allerdings nur rund 18 000 ha auf detaillierte Bodenkarten im Massstab 1:1000 bis 1:10 000 (grösstenteils Landwirtschaftsareal). Sie wurden im Rahmen von Meliorationen, Umweltverträglichkeitsprüfungen bei Bauprojekten, Waldstandortkartierungen etc. erstellt. Die restlichen rund 37 000 ha umfasst das Landwirtschafts- und Waldareal der drei vollständig kartierten und (wenigstens teilweise) im Kanton Bern liegenden Landes-

kartenblätter 1146 «Lyss», 1164 «Grindelwald» und 1229 «Murten» im Massstab 1:25 000. Seit 2000 wurden nur noch rund 100 ha für die Reb-
güterzusammenlegung Ligerz-Twann-Tüscherz-Alfermée detailliert kartiert (Massstab 1:1000).

Grossmassstäbliche detaillierte Bodenkarten sind in der Schweiz nur sehr lückenhaft vorhanden. Im Kanton Bern bestehen erst für 12 % des Landwirtschafts- und Waldareals Bodenkarten. Nur rund 18 000 ha (4 %) sind in einem Detaillierungsgrad kartiert, der parzellenscharf verbindliche Entscheide zulässt.

2.4 Technik der Bodenkartierung und Verwaltung von Bodendaten

In der Schweiz wurde die Technik der Bodenkartierung an der FAL erarbeitet (FAL 1997). In Zusammenarbeit mit der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) wurde die Klassifikation der Böden fachlich bereinigt (BGS 1998, BGS und FAL 2002). Als Ergänzung entstand gemeinsam mit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) das Handbuch «Waldbodenkartierung» (BUWAL 1996). Diese Kartieranleitungen dokumentieren detailliert das Vorgehen bei den Feldaufnahmen für eine Bodenkarte. Seit einigen Jahren ergänzen elektronische Hilfsmittel wie das Geoinformationssystem (GIS) die eigentlichen Kartieranleitungen.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) fördert zusammen mit der BGS die Bodenkartierung als zentrales Element der Bodeninformation. Im Vordergrund stehen folgende Tatsachen, die auch für die Bodenkartierung im Kanton Bern relevant sind:

a. Revision und Weiterentwicklung der Klassifikation der Böden der Schweiz

Die laufende Revision befasst sich mit Unklarheiten bei der Bodenansprache, welche sich in der Kartierpraxis ergeben haben. Zudem ist ein Konzept zu einer Gesamtrevision und

ein Katalog von Referenzböden der Schweiz in Arbeit. Die überarbeiteten Kartierschlüssel werden in deutscher und französischer Sprache erscheinen (BGS 2009).

b. Aufarbeitung bestehender Bodendaten durch das Projekt BI-CH der BGS

Ziel des Projekts Bodeninformation Schweiz (BI-CH) ist die landesweite Aufarbeitung bereits vorhandener Bodendaten. Dazu wurden die Anforderungen der verschiedenen Nutzerprofile an die Bodendaten geklärt und ein Datenmodell entworfen, das die einheitliche Aufarbeitung früherer Bodenprofilenaufnahmen gewährleistet. Mit der Bearbeitungssoftware («MigraProfil») können nun ältere Profile auf den aktuellen Stand der Bodenklassifikation gebracht und digitalisiert werden (BGS 2009).

c. Erarbeitung einer zentralen Datenbank durch das BAFU

Wichtigster Baustein des Netzwerk Umweltbeobachtung Schweiz (NUS) im Fachbereich Boden ist die nationale Bodendatenbank (NABODAT), eine Erweiterung der Bodendatenbank BODAT der Kantone Aargau, Solothurn, Baselland und Graubünden. Die NABODAT wird ab 2010 alle verfügbaren Punktdaten des Bundes und der Kantone in ein einheitliches Datenmodell zusammenführen und mit einem GIS verknüpfen. Später soll evtl. in der NABODAT 2 auch die Abspeicherung von Sachdaten mit Flächenbezug ermöglicht werden (Kasten 2–2).

Verschiedene Kantone sind dabei, bereits bestehende Bodendaten aufzuarbeiten und neue Gebiete zu kartieren. Das Bundesamt für Umwelt und die Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz unterstützen die Arbeiten. Bestehende Kartieranleitungen werden den neusten Anforderungen an-

Kasten 2–2: Netzwerk Umweltbeobachtung Schweiz NUS (BAFU 2008)

Das Netzwerk ist in zwölf Fachbereiche aufgeteilt. Für den Fachbereich «Boden» ist die NABODAT der zentrale Baustein. Der Kanton Bern hat Einsitz in die NUS-Fachgruppe Boden und bestimmt die Strategie massgebend mit.

Im Jahr 2007 unterzeichneten das BAFU sowie die Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz (KVU), die Konferenz der Kantonsförster (KOK) und die Konferenz der Beauftragten für Natur- und Landschaftsschutz (KBNL) sowie 24 Kantone eine Rahmenvereinbarung zur Zusammenarbeit bei Aufbau, Betrieb und periodischer Erneuerung einer gesamtschweizerisch harmonisierten Umweltdatenbank.

gepasst. Die Anwendung des Datenmodells für Punktdaten des BI-CH und die Arbeit nach vorhandenen Grundlagen der Kartiertechnik garantieren die schweizweite Einheitlichkeit der Bodendaten. Ab 2010 werden die Daten in der zentralen NABODAT zusammengeführt und mit einem GIS verknüpft.

2.5 Schrittweise Aufarbeitung der Bodendaten im Kanton Bern

Die Bodenschutzfachstelle setzt sich seit längerem mit der konzeptionellen Erfassung der natürlichen Bodeneigenschaften auseinander und schlägt die folgende Strategie vor (Ab-

bildung 2-1). Da insbesondere die zeitintensive Aufnahme neuer Bodendaten im grossflächigen, topographisch inhomogenen Kanton Bern verschiedensten Anforderungen genügen muss,

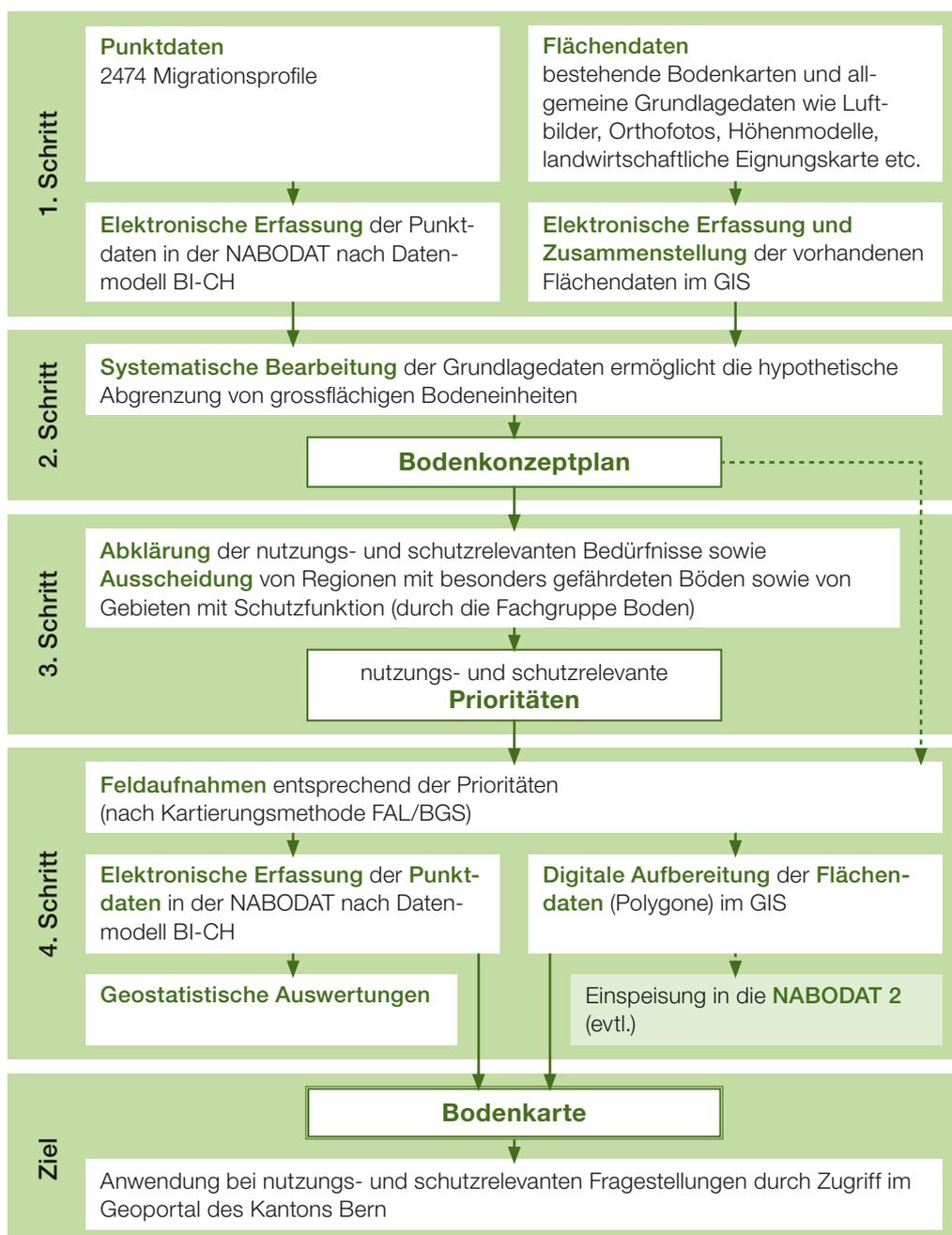


Abbildung 2-1: Vorschlag eines Konzepts zur schrittweisen Erarbeitung der Bodendaten im Kanton Bern

könnte die Realisierung des Projekts in vier Einzelschritten erfolgen (*GEOTEST 2009*). Ein Projekthandbuch garantiert einen optimierten Ablauf und definiert, allenfalls im Rahmen eines Pilotprojektes, die Projektorganisation sowie die Arbeitsvorschriften zur Qualitätssicherung. Als Grundlage für die Erstellung der Bodenkarte (Schritt 4) kann das Projekthandbuch für die Bodenkartierung im Kanton Solothurn (*AFU 2001–2009*) herangezogen werden.

1. Schritt: Zusammenstellen der Grundlagendaten

Alle vorhandenen und einer weiteren bodenkundlichen Auswertung dienlichen Grundlagendaten werden gesammelt und, falls nicht in digitaler Form vorhanden, elektronisch erfasst. Zu den Grundlagendaten gehören Punktdaten und Flächendaten.

Die **Punkt**daten bereits vorhandener Profilaufnahmen werden gemäss Datenmodell BI-CH aufbereitet und digitalisiert (**Abbildung 2–1**). Das erübrigt die Definition eines kantonalen Datenmodells und gewährleistet den Transfer in die NABODAT. Auf den Kanton Bern entfallen 2474 Bodenprofilblätter, die in diversen Projekten aufgenommen wurden.

Die **Fläch**endaten umfassen die bestehenden Bodenkarten, inklusive der angrenzenden Gebiete der Nachbarkantone. Dazu kommen der Übersichtsplan (1:10 000), Luftbilder, Orthophotos, digitale Höhenmodelle, baulich veränderte Böden (Rekultivierungen, Golfplätze etc.), die landwirtschaftliche Eignungskarte des Kantons Bern, die für die Bodeneignungskarte 1:200 000 erstellten Kartenskizzen, Drainagepläne, Leitungspläne (Wasser- und Gasleitungen), geologische Karten, geologische Punktdaten (Baggerschlitz, Bohrungen), Vegetationskarten (v.a. Waldareal und Sömmerungsweiden), Kataster der belasteten Standorte und historische Karten. Viele dieser Flächendaten sind digital vorhanden und werden als Geobasisdaten (GeolG 2008 bzw. GeolV 2008) vom kantonalen Amt für Geoinformation (AGI) digital zur Verfügung gestellt.

Kasten 2–3: Bodenmodell

Das Bodenmodell basiert auf den empirischen Zusammenhängen zwischen den natürlichen Bodenbildungsfaktoren (geologisches Ausgangsmaterial, Oberflächenform, Klima, Zeit und Lebewesen) und anthropogenen Eingriffen sowie der zu erwartenden Ausbildung der Bodeneigenschaften bzw. der Bodeneinheiten. Eine Bodeneinheit repräsentiert massstabbezogen eine Fläche (Polygon) mit gleicher Bodeninformation.

2. Schritt: Erstellen eines Bodenkonzeptplans

Die unter Schritt 1 zusammengestellten Grundlagendaten werden unter Anwendung eines Bodenmodells (**Kasten 2–3**) systematisch ausgewertet. Durch die grossflächige Abgrenzung von Bodeneinheiten entsteht ein Konzeptplan, dessen kartografische Genauigkeit einem Massstab von 1:75 000 entspricht. Die Abgrenzung der Bodeneinheiten erfolgt durch bodenkundlich begründbare Einzelentscheide nach einem Schlüssel, der noch von Fachleuten ausgearbeitet wird. Dies steht im Gegensatz zu synthetischen Bodenkarten, wo Bodeneinheiten durch Algorithmen errechnet werden. Feldarbeiten wie Profilaufnahmen und Handbohrungen sind für den Bodenkonzeptplan nicht notwendig. Neue Bodendaten und Pläne können aber laufend als Grundlagendaten erfasst und in den Konzeptplan integriert werden.

Vergrössert auf den (Arbeits-)Massstab 1:10 000 zeigt der Bodenkonzeptplan eine Übersicht der grossflächigen Bodeneinheiten im Kanton Bern. Die Genauigkeit der Bodeninformationen variiert je nach den zugrunde liegenden Daten. Wo bereits Bodenkarten vorhanden sind, entspricht die Genauigkeit jener der Grundlagendaten. Sind grossmassstäbliche Bodenkarten in den Konzeptplan eingeflossen, können dort parzellenscharfe Entscheide gefällt werden. In der Regel ist die Genauigkeit aber deutlich geringer als der (Arbeits-)Massstab. Der Bodenkonzeptplan könnte im kantonalen Richtplanwerk als Grundlage aufgeführt werden.

3. Schritt: Ausscheiden der prioritär zu kartierenden Flächen

Der Bodenkonzeptplan ist eine unverzichtbare Vorstufe zur grossmassstäblichen Bodenkarte. Er dient als Arbeitsgrundlage für die Priorisierung der zu kartierenden Flächen gemäss **Tabelle 2–3**. Sämtliche Nutzungs- und Schutzansprüche an die Böden sind dabei ausgewogen zu berücksichtigen. Alle Amtsstellen, die sich im Rahmen ihrer Vollzugsarbeiten mit der Beanspruchung von Böden auseinandersetzen, werden im Rahmen der neu konzipierten direktionsübergreifenden «Fachgruppe Boden Kanton Bern» (Kapitel 10) in den Abstimmungsprozess miteinbezogen. Jene Flächen, bei welchen sich das grösste Bedürfnis nach Bodeninformation ergibt, sollen zuerst kartiert werden. Die Priorisierung berücksichtigt die folgenden drei Aspekte:

- räumlicher Aspekt:
Ausrichtung der Kartierungsarbeiten nach Schwerpunktregionen, z. B. des Massnahmeblatts C_07 des kantonalen Richtplans (*AGR 2006*). Denkbar ist eine Differenzierung nach ackerfähigem Kulturland, Wald mit Schutzfunktion, Naturwiesen, Waldflächen und Alpweiden.

- zeitlicher Aspekt:
Dringlichkeit einer verfügbaren Bodeninformation und damit die zeitliche Abfolge der Kartierungsarbeiten.
- Aspekt der Auflösung:
Bestimmung der erforderlichen Massstabsgenauigkeit. Im ländlichen Raum der Schwerpunktregion C ist beispielsweise zu prüfen, ob auf Flächen, die keinen unmittelbaren Bedrohungen ausgesetzt sind, keine besonderen Schutzfunktionen erfüllen und extensiv genutzt werden (Düngeverbot), eine vereinfachte boden-/vegetationskundliche Standortskartierung (evtl. auch mit geringerem Detaillierungsgrad) angebracht ist. Damit könnte der Arbeits- und Finanzaufwand vermutlich reduziert werden. Eine entsprechende vereinfachte Methode wäre allerdings noch zu entwickeln.

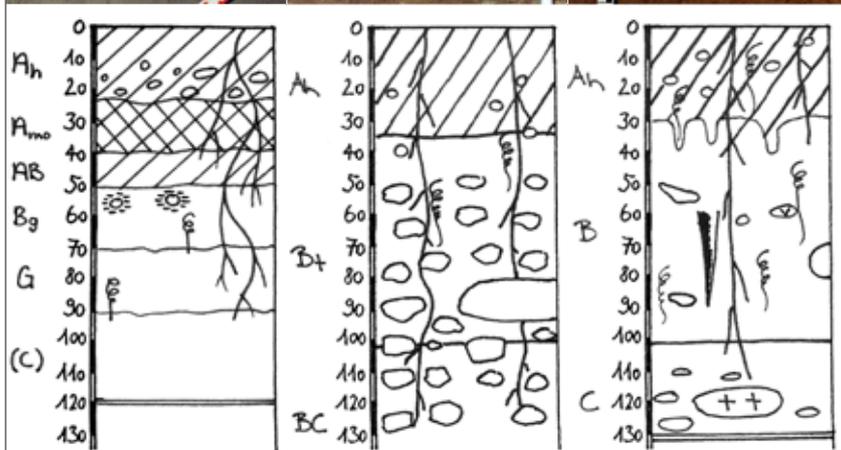
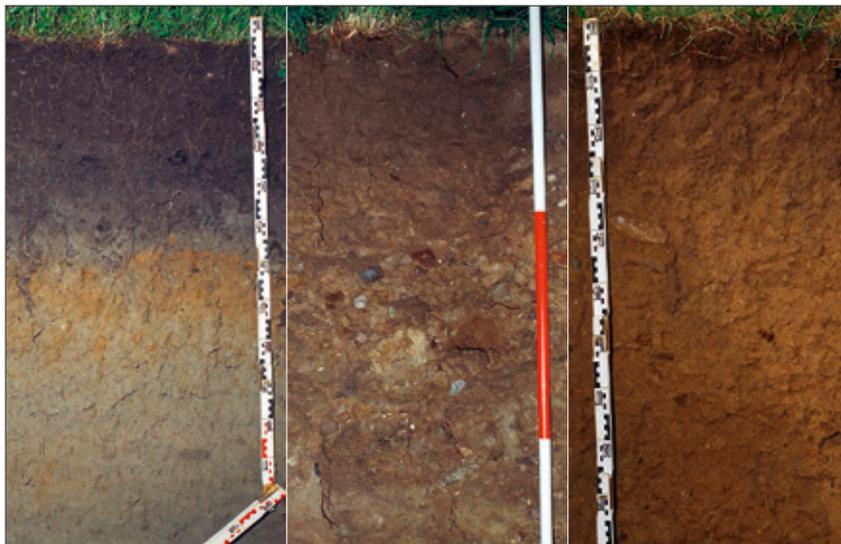


Abbildung 2–2: Beispiele verschiedener Bodentypen im Kanton Bern mit entsprechenden Profilskizzen (von links: Gley anmoorig, Parabraunerde, Braunerde)

4. Schritt: Erstellen der Bodenkarte

Schritt 4 umfasst die zeitintensiven bodenkundlichen Felderhebungen (Profilaufnahmen und Handbohrungen gemäss bestehender Kartieranleitungen der FAL/BGS). Die neu aufgenommenen Bodenprofile (**Abbildung 2–2**) dienen, zusammen mit den in Schritt 1 digitalisierten Migrationsprofilen, als Referenzstandorte. Die anschliessende Abgrenzung der Bodeneinheiten (Flächen mit denselben Bodeneigenschaften) erfolgt mittels Handbohrungen.

Die Bodenkartierung wird entsprechend der im dritten Schritt ausgearbeiteten Prioritäten etappenweise in Losen durchgeführt. Die **Punktdaten** (Profilaufnahmen) werden laufend in die NABODAT eingegeben und auch für weitergehende statistische Auswertungen verwendet. Die gemäss Kartieranleitung ausgeschiedenen Polygone werden als **Flächendaten** digital aufgearbeitet. Sie werden potenziellen Nutzerkreisen über das Geoportal des Kantons Bern zugänglich gemacht und später allenfalls in die Datenbank für Flächendaten NABODAT 2 eingespielen.

Die flächendeckende, grossmassstäbliche Bodenkartierung des Kantons Bern verlangt ein handlungsorientiertes Vorgehen und eine systematische Planung. Ein Handbuch definiert die Projektorganisation sowie die Arbeitsvorschriften

zur Qualitätssicherung. Die Realisierung des Projekts könnte in vier Einzelschritten erfolgen:

1. Sammlung, Aufarbeitung und Digitalisierung bereits vorhandener Grundlagendaten
2. Erstellen eines Bodenkonzeptplans
3. Ausscheiden der prioritär zu kartierenden Flächen
4. Aufnahme noch nicht vorhandener Bodendaten

Die Veröffentlichung der digital aufgearbeiteten und neu erarbeiteten Bodeninformation über das Geoportal des Kantons Bern erleichtert allen interessierten Nutzern den Zugang zu den Bodendaten.

2.6 Schlussfolgerungen

Fundierte Kenntnisse über die Qualität und Eigenschaften der Böden erleichtern die Bearbeitung nutzungs- und schutzrelevanter Fragen. Entsprechende Entscheide können sachgerecht, nachvollziehbar und schneller gefällt werden.

Detaillierte Bodendaten werden durch Bodenkartierung gewonnen. Deren inhaltliche und standörtliche Genauigkeit hängt vom Aufnahme- und Kartenmassstab ab. Parzellenscharfe Entscheide sind nur auf Basis von grossmassstäblichen Bodenkarten (1:2500–1:5000) möglich.

Digital aufbereitet, können Bodenkarten vielfältig genutzt werden. Von umfassenden Bodendaten profitieren die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft, die Raumplanung, die Bauwirtschaft, aber auch der Naturschutz, der Gewässerschutz, der Bodenschutz und der Schutz vor Naturgefahren. Die Bodenkartierung ist des-

halb eine wichtige Querschnittsaufgabe, die im Kanton Bern mehrere Ämter in den Direktionen Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion (BVE), Justiz-, Gemeinde- und Kirchendirektion (JGK) und Volkswirtschaftsdirektion (VOL) betrifft.

2.7 Ausblick

Das Erarbeiten einer grossmasstäblichen Bodenkarte ist ein vieljähriges, kostenintensives Projekt. Gestützt auf einen politischen Entscheid, bedingt es eine fundierte Planung. Diese enthält eine detaillierte Kostenschätzung, aufgeschlüsselt auf die vier Ausführungsschritte und das gestaffelte Vorgehen bei den Felderhebungen in Losen.

Den hohen Kosten einer Bodenkarte steht ein ausserordentlich hoher Nutzen gegenüber. Flächendeckend nutzbare Bodeninformationen fördern den haushälterischen Umgang mit der Ressource Boden und deren Erhalt für zukünftige Generationen. Die vielfältigen ökologischen und ökonomischen Interessen im Zusammenhang mit der Bodennutzung können besser und effizienter aufeinander abgestimmt werden.

3 Torfsackung im «Grossen Moos»



Bodenoberfläche ~1938



Situation 1980

3 Torfsackung im «Grossen Moos»

Als Folge zweier Juragewässerkorrekturen wurde die Ebene des «Grossen Moos» entwässert und die torfhaltigen Böden für den Acker- und Gemüsebau nutzbar gemacht. Entwässerung und Bodenbewirtschaftung führen zu einem beschleunigten oxidativen Abbau der Torfschicht und damit zu einem Verlust an Boden. Auf tief- und flachtorfigen Flächen konnte bis heute eine maximale Sackung von bis zu 2 m beobachtet werden. Der Abbau der organischen Substanz wird sich auch in Zukunft fortsetzen und längerfristig die landwirtschaftliche Produktion erschweren oder teilweise verunmöglichen. Zudem setzen die Oxidationsprozesse klimawirksames Kohlendioxid in die Atmosphäre frei. Das «Grosse Moos» ist als vielfältige Natur- und Kulturlandschaft zu erhalten.

Das Gebiet des Berner Seelands wurde vom Rhonegletscher geprägt. Bei seinem Rückzug nach der letzten Eiszeit vor 15 000 Jahren hinterliess er im Raum Wangen a. Aare bzw. Solothurn mehrere Endmoränen. Hinter diesen Wällen bildete sich ein ausgedehnter See, der durch die Ablagerung grosser Geschiebemassen im Laufe der Zeit teilweise aufgefüllt wurde. In der dadurch entstandenen Ebene änderten die Aare und andere Flüsse infolge der

Geschiebeablagerungen mehrmals ihren Lauf. Die Ebene wurde periodisch überflutet. Der permanente Wasserüberschuss führte an der Bodenoberfläche zu sauerstoffarmen Verhältnissen und verhinderte die Oxidation der anfallenden Pflanzenreste. Organisches Material wurde zu locker gelagerten Schichten, dem Torf, angesammelt. Es bildete sich das «Grosse Moos».

3.1 Korrektur der Juragewässer

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wurde das «Grosse Moos» extensiv als Weide- und Streuland genutzt. Das Gebiet war häufig überschwemmt, und das Geschiebe der Aare behinderte den Abfluss der Seen. Um Armut und Malaria zu bekämpfen, wurde zwischen 1863 und 1885 die erste Juragewässerkorrektur durchgeführt. Die Aare wurde durch den Hagneckkanal in den Bielersee umgeleitet, der Wasserspiegel der drei Juraseen um 2.5 m abgesenkt und im ganzen Gebiet des «Grossen Moos» wurden Entwässerungskanäle gebaut. Damit war eine wichtige Voraussetzung für eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung geschaffen. Unerwarteterweise war die Amplitude der Seespiegelschwankungen bei Hochwasserereignissen höher als ursprünglich vermutet, und die Hochwassergefährdung im «Grossen Moos» blieb erhalten. Die unmittelbar nach der Korrektur einsetzende Torfsackung erhöhte das Überschwemmungsrisiko zusätzlich. Eine zweite Juragewässerkorrektur, welche zwischen 1962 und 1973 ausgeführt wurde, war unumgänglich. Durch eine Verbreiterung der Verbindungskanäle wurden die drei Seen

hydrologisch zu einem See verbunden und das Entwässerungssystem verbessert.

3.1.1 Verbreitung der Moorböden

Enthält eine Schicht mehr als 40 cm Torf, gilt ein Standort als Moor (*Frei et al. 1980*). Im «Grossen Moos», im Brüttelen- und Lüscherzermoo wurden im Zusammenhang mit Meliorationen und Güterzusammenlegungen Bodenkarten erstellt (*Frei et al. 1972*). Die Gesamtfläche von 3743 ha beinhaltet 1076 ha tieftorfige Halbmoore (Torfschicht > 90 cm) und 812 ha flachtorfige Halbmoore (Torfschicht 40–90 cm). Damit sind rund 50 % der Flächen tieftorfige bzw. flachtorfige Halbmoore. Weitere 631 ha sind Anmoorgleye mit einer Torfschicht von weniger als 40 cm.

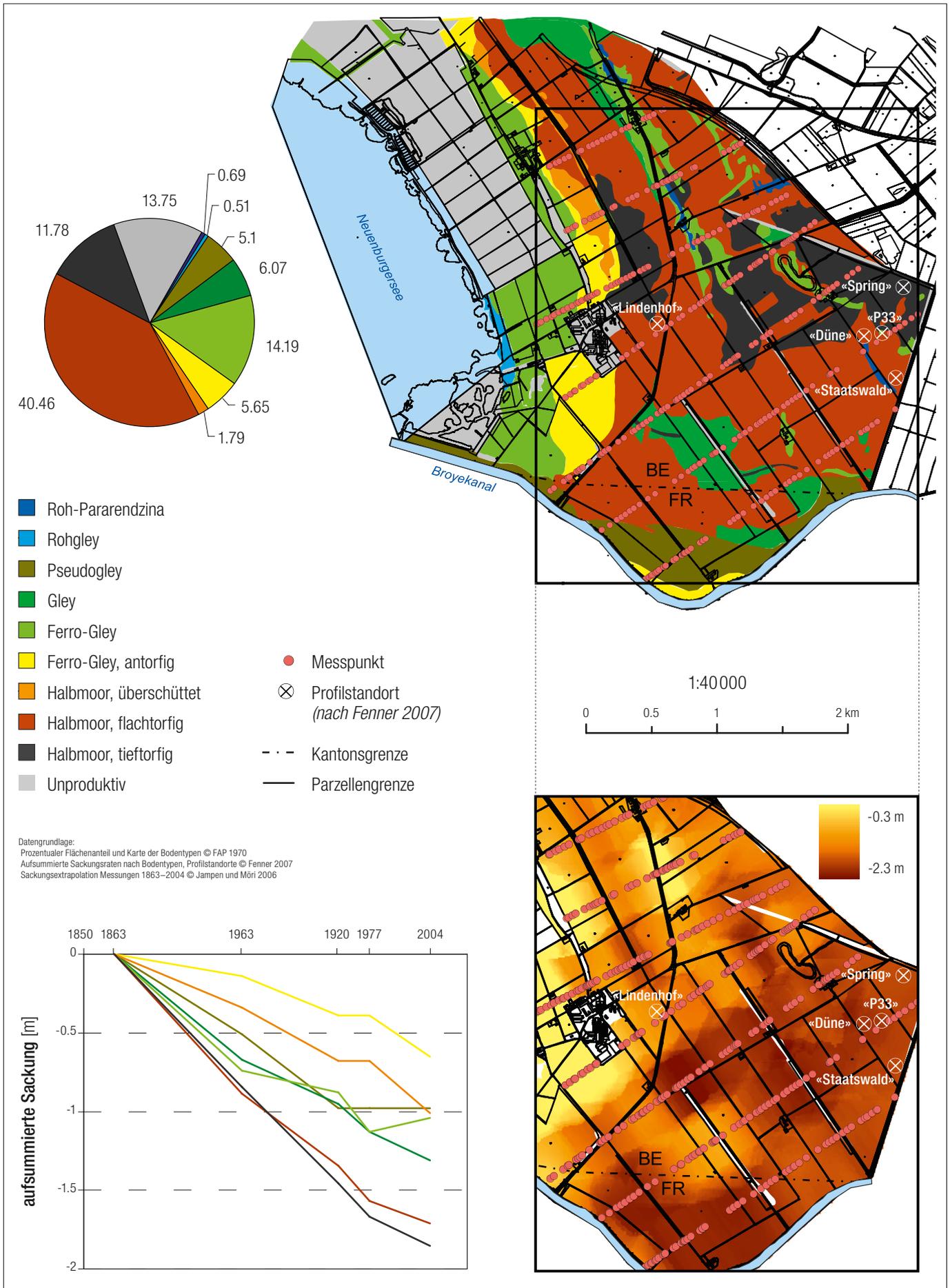


Abbildung 3–1: Ausschnitt aus der Bodenkarte Ins-Gampelen-Gals (1970) mit den Profilstandorten gemäss Tabelle 3–1 (oben rechts) und prozentualer Flächenanteil der Bodentypen (oben links) auf dem Areal der Anstalten Witzwil, Sackungsveränderungen unterschieden nach Bodentypen (unten links, aufsummierte Mittelwerte der Perioden 1863–1920, 1920–1963, 1963–1977 und 1977–2004 nach Fenner 2007) und Sackungsextrapolation der Messungen zwischen 1863–2004 im Bereich der Messtransecte (unten rechts, nach Jampen und Möri 2006)

3.2 Torfsackung und Kohlenstoffverlust

Die Entwässerung durch die Juragewässerkorrekturen führte dazu, dass die trocken gelegten, ursprünglich sehr locker gelagerten, im Wasser liegenden Torfschichten ihre Stütze verloren und in sich zusammensackten. Weil nun Sauerstoff in die entwässerten Schichten eintreten konnte, setzten gleichzeitig Oxidationsprozesse ein, welche die Sackung zusätzlich förderten. Die heute im Gebiet übliche intensive Bodenbearbeitung begünstigt die Durchlüftung und damit den Abbau der organischen Substanz zusätzlich.

Zusammen mit der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) und der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) startete die Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern (BSF) im Jahr 2003 ein

Projekt mit den Zielen, die Sackungsraten sowie den Kohlenstoffverlust in Form von Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre zu quantifizieren (Fenner 2007).

3.2.1 Ausmass der Sackung

Um die Sackungsraten genau zu erfassen, erwies sich das Areal der Anstalten Witzwil als geeignet. Dieses Gebiet liegt einerseits im 1972 kartierten Perimeter, und andererseits wurden hier 1863 entlang von sieben Transekten quer über den Betrieb die exakte Höhe über Meer erfasst. Diese Höhenmessungen wurden 1920, 1963, 1977 und 2004 wiederholt. So konnten die Sackungsraten in Form eines Höhenverlusts entlang der Transekte von der ersten Juragewässerkorrektur bis heute bzw. für jede Periode zwischen zwei Messzeitpunkten erfasst werden.

Auf dem Areal der Anstalten Witzwil (inkl. Flächen im angrenzenden Kanton Freiburg) sind 54 % der Flächen tieftorfige oder flachtorfige Halbmoore, die restlichen Flächen sind mineralische Böden (Abbildung 3-1 oben). Anhand der Höhendaten wurde von der SHL eine flächenhafte Karte im Bereich der Messtransekte (Abbildung 3-1 unten rechts) mit den Sackungsraten erstellt (Jampen und Möri 2006). Wie erwartet, sackten tieftorfige Böden stärker als mineralische. Zwischen tief- und flachtorfigen Böden konnten kaum Unterschiede in der Sackungsdynamik erkannt werden (Fenner 2007). Seit Beginn der ersten Juragewässerkorrektur wurde auf beiden Kartierungseinheiten eine maximale Sackung von bis zu 2 m beobachtet. Die jährlichen Sackungsraten waren nach der ersten Juragewässerkorrektur am grössten. Ein zweites (relatives) Sackungs-

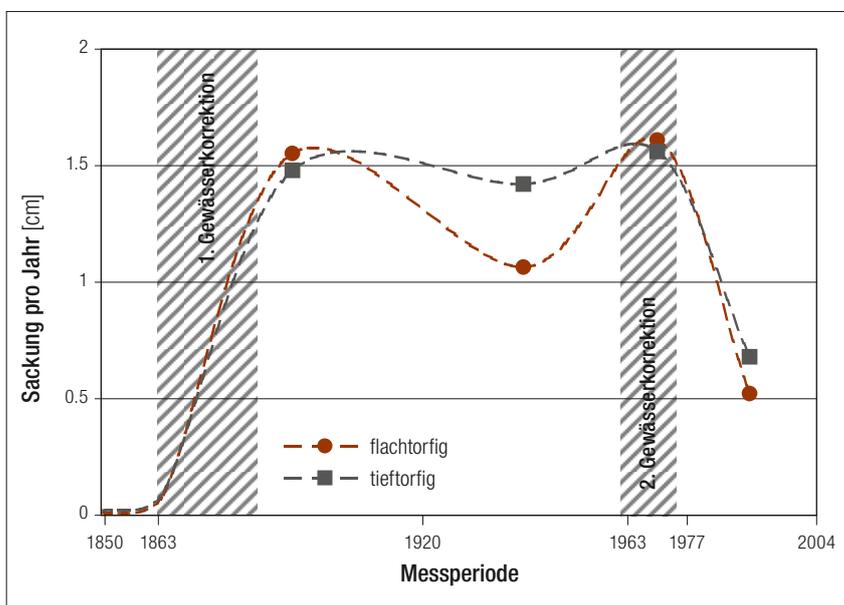


Abbildung 3-2: Jährliche Sackungsraten der torfhaltigen Böden auf dem Areal der Anstalten Witzwil; Trendlinie aufgrund von Mittelwerten gemäss Tabelle 3-1

Tabelle 3-1: Torfmächtigkeiten der Jahre 1863 und 2004, Torfsackung und jährliche Torfsackung in der Zeitperiode 1863 bis 2004, vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff der Jahre 1863 und 2004 sowie jährlicher Verlust an organischem Kohlenstoff in der Zeitperiode 1863 bis 2004 anhand von fünf Bodenprofilen auf dem Areal des Gutbetriebs der Anstalten Witzwil (Fenner 2007)

Profilidentifikation nach Fenner (2007)	Nutzungsart	Torfmächtigkeit 1863	Torfmächtigkeit 2004
		[cm]	[cm]
«Spring»	Fruchtfolgefläche	314	130
«P33»	langjährige Wiese	341	140
«Staatswald» ¹	langjährige Wiese	258	60
«Düne»	langjährige Wiese	135	30
«Lindenhof»	Fruchtfolgefläche	170	30
Spannweite (Range)		135–341	30–140

¹ Die Profilidentifikation «Staatswald» gemäss Fenner ist eine langjährige Wiese.

maximum lässt sich für die Periode während der zweiten Juragewässerkorrektion feststellen (**Abbildung 3-2**).

3.2.2 Bestimmung des Kohlenstoffverlusts infolge der Torfsackung

Um die Kohlenstoffverluste in die Atmosphäre zu erfassen, wurden auf dem Areal der Anstalten Witzwil anhand der Bodenkarte und der Karte mit den Sackungsraten fünf repräsentative Standorte ausgewählt (**Abbildung 3-1 oben rechts**). An jedem dieser fünf Standorte wurde ein Bodenprofil (**Abbildung 3-3**) geöffnet und schichtbezogene Proben zur Bestimmung der Lagerungsdichte und des Kohlenstoffgehalts entnommen. Anhand der jeweiligen torfigen Horizontmächtigkeiten, der horizontbezogenen Lagerungsdichten und des organischen Kohlenstoffgehalts wurde in neunfacher Wiederholung die Menge an organischem Kohlenstoff ermittelt (*Fenner 2007*).

Mit den von Fenner (2007) erfassten Daten konnte abgeschätzt werden, wieviel Kohlenstoff ursprünglich in den Profilen vorhanden und wie hoch der jährliche oxidative Torfverlust zwischen dem Beginn der ersten Entwässerung 1863 und der letzten Höhenmessung 2004 war (**Tabelle 3-1**). Die Torfmächtigkeit der fünf Profile beträgt heute zwischen 30 und 140 cm (im Jahr 1863 zwischen 135 und 341 cm) und der in Abhängigkeit der Dichte berechnete Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 250 und 1444 t/ha (im Jahr 1863 zwischen 743 und 1835 t/ha). Das Niveau der Bodenoberfläche sank jährlich zwischen 0.75 und 1.43 cm. Erwartungsgemäss sind die Unterschiede an den fünf Profilstandorten beträchtlich und repräsentieren die pedogenetisch bedingten, unterschiedlichen Torfmächtigkeiten auf dem Areal der Anstalten



Abbildung 3-3: Drei der fünf zur Quantifizierung des Kohlenstoffverlust 2006 ausgehobene Bodenprofile auf dem Areal der Anstalten Witzwil (von links: tief-torfartig auf Seekreide; flachtorfartig auf Seekreide und antorfartig auf Sanddüne)

Witzwil. Den Böden an den fünf Profilstandorten gingen jährlich zwischen 1940 und 4970 kg C/ha in Form von CO₂ verloren (**Tabelle 3-1**). Dies entspricht einer Menge von 7.12 bis 18.24 t CO₂ pro Hektare Anbaufläche und Jahr (Umrechnungsfaktor 3.67). Bei der heutigen Sackungsrate von ca. 0.5 cm pro Jahr (**Abbildung 3-2**) reicht der Vorrat an organischem Kohlenstoff – bei einem Höhenverlust von weiteren 30 bis 140 cm Boden – theoretisch noch 60 (flachtorfartige Flächen) bis 280 Jahre (tief-torfartige Flächen) bis zum vollständigen Torfabbau.

3.2.3 Auswirkungen des Torfabbaus

Liegt unter der Torfschicht ein sandhaltiger Unterboden, sind aus ackerbaulicher Sicht keine gravierenden Einschränkungen für die landwirtschaftliche Produktion zu erwarten. Sinkt das Niveau der Bodenoberfläche sogar unter die Hochwassermarken der Seen, kann

Tabelle 3-1: Fortsetzung

Torfsackung 1863–2004	Jährliche Torfsackung 1863–2004	Vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863	Vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff pro Hektare 2004	Verlust an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863–2004	Jährlicher Verlust an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863–2004
[cm]	[cm]	[t]	[t]	[t]	[t]
184	1.30	1835	1297	538	3.81
201	1.43	1718	1444	274	1.94
198	1.40	1419	718	701	4.97
105	0.75	743	250	493	3.5
140	1.00	953	513	440	3.12
105–201	0.75–1.43	743–1835	250–1444	274–538	1.94–4.97

in den meisten Gebieten der Grundwasserspiegel mittels Pumpen kontrolliert werden. Böden auf einem Unterboden mit Seekreide hingegen eignen sich dereinst kaum für eine intensive acker- oder gemüsebauliche Nutzung. Aufgrund der heute noch fehlenden Daten – die Bodenkarte erfasste die unter dem Torf liegenden Schichten nicht – ist das Ausmass der Nutzungseinschränkung jedoch schwer abzuschätzen.

3.2.4 CO₂-Emissionen

Mit der Bodenkarte von 1972 kann versucht werden, die Berechnungen des Fallbeispiels der Anstalten Witzwil auf das ganze Berner Seeland zu extrapolieren. Im Gebiet des «Grossen Moos» entwickelten sich 1888 ha organische Böden. Im Verlauf der nächsten 60 Jahre werden im Berner Seeland jährlich 13 000–34 000 t CO₂ in die Atmosphäre abgegeben. Der erwartete CO₂-Eintrag in die Atmosphäre entspricht 0.4–1 % des Reduktionsziels, für das sich die Schweiz 2003 mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls verpflichtet hat (Reduktion der Treibhausgasemissionen um 8 % von 2008–2012 gegenüber

dem Stand von 1990, *UNFCCC 1997*). Danach werden die Emissionen während den folgenden 220 Jahren langsam bis zum vollständigen Abbau des Torfs auch auf den tieftorfigen Flächen abnehmen.

Organische Böden konnten sich in der Schweiz auf ca. 37 000 ha entwickeln (*Leifeld et al. 2003*). Ungefähr die Hälfte dieser Flächen wird extensiv bewirtschaftet und weist ein relativ ungestörtes Profil auf. Die flach- und tieftorfigen Flächen im «Grossen Moos» entsprechen einem Zehntel der gesamtschweizerischen Flächen mit gestörtem Profil. Dies bedeutet, dass das Reduktionsziel des Kyoto-Protokolls um 4–10 % leichter zu erreichen ist, wenn die Moorböden schweizweit naturnah genutzt werden. Die extensive Bewirtschaftung oder sogar Renaturierung kultivierter Moorböden entspricht zudem dem landwirtschaftlichen Umweltziel «Treibhausgase» (**Kasten 3–1**).

Zwei Juragewässerkorrekturen haben die Torfböden im «Grossen Moos» ackerbaulich nutzbar gemacht. Einsetzende Oxidationsprozesse führten wegen der Entwässerung und der Bodenbewirtschaftung zu einem Verlust der Torfmächtigkeit von jährlich rund 1 cm. Heute hat sich die Torfsackung auf ungefähr 0.5 cm pro Jahr reduziert. Trotzdem werden die CO₂-Emissionen in Zukunft beträchtlich sein.

Kasten 3–1: Landwirtschaftliches Umweltziel «Treibhausgase» (BAFU und BLW 2008)

Reduktion der landwirtschaftlichen Kohlendioxid-, Methan- und Lachgas-Emissionen.

3.3 Zukunft der Entwässerungsinfrastruktur

Die Sackung der Böden im «Grossen Moos» bewirkte einen Niveau-Verlust. Dies führte dazu, dass das Reguliersystem der beiden Juragewässerkorrekturen – besonders im Hochwassersommer 2007 – überdurchschnittlich stark belastet wurde und zeitweise sogar weite Flächen unter Wasser standen. Die auf den Gemüsebau ausgerichtete Produktion der meist intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen kann dadurch stark eingeschränkt werden. Zusätzlich ist zu befürchten, dass wegen der prognostizierten Klimaerwärmung mit einer Zunahme der Hochwasserereignisse zu rechnen ist. Der Ruf nach einer verbesserten Regulierung des Gewässersystems wird daher früher oder

später von politischer Seite beantwortet werden müssen, was die gegenwärtige Diskussion rund um die Abflussbegrenzung der Aare bei Murgenthal («Murgenthaler Bedingung») zeigt. Insbesondere die Binnenkanäle und das Drainagesystem erfordern regelmässige Unterhaltsarbeiten. Diese Arbeiten wurden von den dafür verantwortlichen Flurgenossenschaften teilweise vernachlässigt. Im Rahmen der VOL-internen Impulsgruppe Umweltschutz (IG UWS) wird die periodische Wiederinstandstellung der Binnenkanäle und Hauptleitungen diskutiert (*IG UWS 2008*). Dabei spielen auch ökologische Aspekte eine entscheidende Rolle (**Kasten 3–2**).

Das infolge der Torfsackung veränderte Höhenniveau erfordert eine periodische Wiederinstandstellung des engmaschigen Entwässerungssystems. Die ackerbauliche Nutzung im «Grossen Moos» wird in Bezug auf den Unterhalt der Entwässerungsinfrastruktur mit erheblichen Kosten sowohl für die Landnutzer als auch für die Öffentlichkeit verbunden sein.

Kasten 3–2: Landwirtschaftliches Umweltziel «Gewässerraum» (BAFU und BLW 2008)

Ausreichender Gewässerraum im Sinne des Leitbildes Fließgewässer mit gewässergerechtem Uferbereich gemäss Modulstufenkonzept im Landwirtschaftsgebiet.

3.4 Schadstoffe

Die durch die Entwässerung und Bodenbearbeitung ausgelöste Mineralisierung der organischen Substanz führt zur Bildung von mobilem Nitrat. Der Abbauprozess kann im Weiteren die Mobilität von anorganischen Schadstoffen erhöhen. Schwermetalle und Nitrat können mit perkolierendem Niederschlagswasser vermehrt ins Grundwasser gelangen.

Eine solchermassen erhöhte Schadstofffreisetzung ist insbesondere auf den Flächen der Anstalten Witzwil problematisch, da hier zur Bodenverbesserung in der Zeitspanne von 1913 bis 1954 der Kehrriech der Stadt Bern entsorgt und in die Böden eingearbeitet wurde (Rytz 2001). Im Hinblick auf den Gewässerschutz und eine hohe Nahrungsmittelsicherheit muss mittelfristig die Schadstoffbelastung auf den zur Kehrriechentsorgung verwendeten Flächen überprüft werden.

3.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die heutige intensive landwirtschaftliche Nutzung verstärkt den Prozess der Torfsackung im «Grossen Moos». Bereits vor knapp 40 Jahren wurde von der Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau (FAP, heute ART) empfohlen, die entwässerten Böden extensiver zu nutzen. Setzt sich die Torfsackung weiter fort, führt dies zu einer geringeren Nährstoffverfügbarkeit und bei gleich bleibend hoher Nährstoffzufuhr zu einer geringeren Biomasseproduktion. Gleichzeitig können Nitrat und weitere Schadstoffe mobilisiert werden und ins Grund- oder Seewasser gelangen. In erster Linie wird jedoch durch die Freisetzung von CO₂ die Atmosphäre belastet.

Da die Landwirtschaftsbetriebe im «Grossen Moos» meistens nur über kleine Betriebsflächen verfügen, sind sie auf eine hohe Bewirtschaftungsintensität angewiesen. Dies wird in Zukunft vermutlich dazu führen, dass sie vermehrt auf eine bodenunabhängige Produktion unter Glas umstellen. Die Zunahme der Gewächshäuser wird daher in den nächsten Jahren das Landschaftsbild im «Grossen Moos» prägen. Degradieren auf den nicht durch Gewächshäuser versiegelten Flächen die torfhaltigen Böden ungehindert weiter, wird die Gemüseproduktion vermehrt auf den mineralischen Böden der angrenzenden Hügel betrieben. Aufgrund der dazu üblichen intensiven Bodenbearbeitung, der Hangneigung und der Bodenbeschaffenheit, ist hier vermehrt mit Erosion zu rechnen.

Durch den Abbau der torfhaltigen Böden auf einer Fläche von fast 2000 ha wird die Umwelt belastet. Um den komplexen Folgen der Torfsackung entgegenzuwirken, besteht dringender Handlungsbedarf. Geeignete Massnahmen zum Erhalt der Torfböden und zur Minimierung der Schädwirkungen sind unter Berücksichtigung der Luftreinhaltung und des Gewässerschutzes zu diskutieren:

- Extensivierung des Ackerbaus (Boden schonende Anbausysteme, Kapitel 8 und 9) und Umstellung der Landwirtschaft auf

Grünlandnutzung. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung des im ländlichen Raum des «Grossen Moos» verbreiteten Gemüsebaus wird diese Massnahme jedoch äusserst schwierig umzusetzen sein.

- Durch Bildung und Beratung der Bewirtschafter sind deren Kenntnisse um Zusammenhänge zwischen Bewirtschaftung und Torfsackung zu erweitern.
- Gezielte Regulierung des Grundwasserspiegels mit dem Ziel, diesen durchgehend auf einem möglichst hohen Niveau zu halten.
- Überschütten der Böden mit organischem und allenfalls sauberem, mineralischem Aushubmaterial zur Verlangsamung der Torfsackung. Aus logistischen und finanziellen Gründen ist das Überschütten der gefährdeten, degradierten Flächen kaum grossflächig realisierbar. Auch wird es äusserst schwierig sein, genügend geeignetes und sauberes Bodenmaterial zu finden.
- Bildung einer Arbeitsgemeinschaft «Grosses Moos», um politische, sozioökonomische und hydrologische Aspekte für die Erhaltung und standortgerechte Nutzung der Böden miteinzubeziehen.
- Da im «Grossen Moos» die unter der Torfschicht liegenden Unterböden – infolge der

Kasten 3-3: Landwirtschaftliches Umweltziel «Landschaft» (BAFU und BLW 2008)

Erhalt, Förderung und Weiterentwicklung vielfältiger Kulturlandschaften mit ihren spezifischen regionalen Eigenarten und ihrer Bedeutung für Biodiversität, Erholung, Identität, Tourismus und Standortattraktivität, über

- 1. Offenhaltung durch angepasste Bewirtschaftung;**
- 2. Vielfalt der nachhaltig genutzten und erlebbaren Kulturlandschaften;**
- 3. Erhaltung, Förderung und Weiterentwicklung ihrer regionsspezifischen, charakteristischen, natürlichen, naturnahen und baulichen Elemente.**

früher durch das Gebiet mäandrierenden Flussläufe – kleinräumig sehr inhomogen sind, ist eine Bodenkartierung (Kapitel 2) bis unterhalb der Torfschicht nötig, um adäquate, standortsbezogene Massnahmen vorschlagen und diese gegebenenfalls auch umsetzen zu können.

Das «Grosse Moos» ist eine vielfältige Natur- und Kulturlandschaft mit eigener Identität, die es zu erhalten gilt. Die vorgeschlagenen Massnahmen helfen mit, das landwirtschaftliche Umweltziel «Landschaft» umzusetzen (**Kasten 3-3**).

3 Torfsackung im «Grossen Moos»



Bodenoberfläche ~1938



Situation 1980

3 Torfsackung im «Grossen Moos»

Als Folge zweier Juragewässerkorrekturen wurde die Ebene des «Grossen Moos» entwässert und die torfhaltigen Böden für den Acker- und Gemüsebau nutzbar gemacht. Entwässerung und Bodenbewirtschaftung führen zu einem beschleunigten oxidativen Abbau der Torfschicht und damit zu einem Verlust an Boden. Auf tief- und flachtorfigen Flächen konnte bis heute eine maximale Sackung von bis zu 2 m beobachtet werden. Der Abbau der organischen Substanz wird sich auch in Zukunft fortsetzen und längerfristig die landwirtschaftliche Produktion erschweren oder teilweise verunmöglichen. Zudem setzen die Oxidationsprozesse klimawirksames Kohlendioxid in die Atmosphäre frei. Das «Grosse Moos» ist als vielfältige Natur- und Kulturlandschaft zu erhalten.

Das Gebiet des Berner Seelands wurde vom Rhonegletscher geprägt. Bei seinem Rückzug nach der letzten Eiszeit vor 15 000 Jahren hinterliess er im Raum Wangen a. Aare bzw. Solothurn mehrere Endmoränen. Hinter diesen Wällen bildete sich ein ausgedehnter See, der durch die Ablagerung grosser Geschiebemassen im Laufe der Zeit teilweise aufgefüllt wurde. In der dadurch entstandenen Ebene änderten die Aare und andere Flüsse infolge der

Geschiebeablagerungen mehrmals ihren Lauf. Die Ebene wurde periodisch überflutet. Der permanente Wasserüberschuss führte an der Bodenoberfläche zu sauerstoffarmen Verhältnissen und verhinderte die Oxidation der anfallenden Pflanzenreste. Organisches Material wurde zu locker gelagerten Schichten, dem Torf, angesammelt. Es bildete sich das «Grosse Moos».

3.1 Korrektur der Juragewässer

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wurde das «Grosse Moos» extensiv als Weide- und Streuland genutzt. Das Gebiet war häufig überschwemmt, und das Geschiebe der Aare behinderte den Abfluss der Seen. Um Armut und Malaria zu bekämpfen, wurde zwischen 1863 und 1885 die erste Juragewässerkorrektur durchgeführt. Die Aare wurde durch den Hagneckkanal in den Bielersee umgeleitet, der Wasserspiegel der drei Juraseen um 2.5 m abgesenkt und im ganzen Gebiet des «Grossen Moos» wurden Entwässerungskanäle gebaut. Damit war eine wichtige Voraussetzung für eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung geschaffen. Unerwarteterweise war die Amplitude der Seespiegelschwankungen bei Hochwasserereignissen höher als ursprünglich vermutet, und die Hochwassergefährdung im «Grossen Moos» blieb erhalten. Die unmittelbar nach der Korrektur einsetzende Torfsackung erhöhte das Überschwemmungsrisiko zusätzlich. Eine zweite Juragewässerkorrektur, welche zwischen 1962 und 1973 ausgeführt wurde, war unumgänglich. Durch eine Verbreiterung der Verbindungskanäle wurden die drei Seen

hydrologisch zu einem See verbunden und das Entwässerungssystem verbessert.

3.1.1 Verbreitung der Moorböden

Enthält eine Schicht mehr als 40 cm Torf, gilt ein Standort als Moor (*Frei et al. 1980*). Im «Grossen Moos», im Brüttelen- und Lüscherzermoo wurden im Zusammenhang mit Meliorationen und Güterzusammenlegungen Bodenkarten erstellt (*Frei et al. 1972*). Die Gesamtfläche von 3743 ha beinhaltet 1076 ha tieftorfige Halbmoore (Torfschicht > 90 cm) und 812 ha flachtorfige Halbmoore (Torfschicht 40–90 cm). Damit sind rund 50 % der Flächen tieftorfige bzw. flachtorfige Halbmoore. Weitere 631 ha sind Anmoorgleye mit einer Torfschicht von weniger als 40 cm.

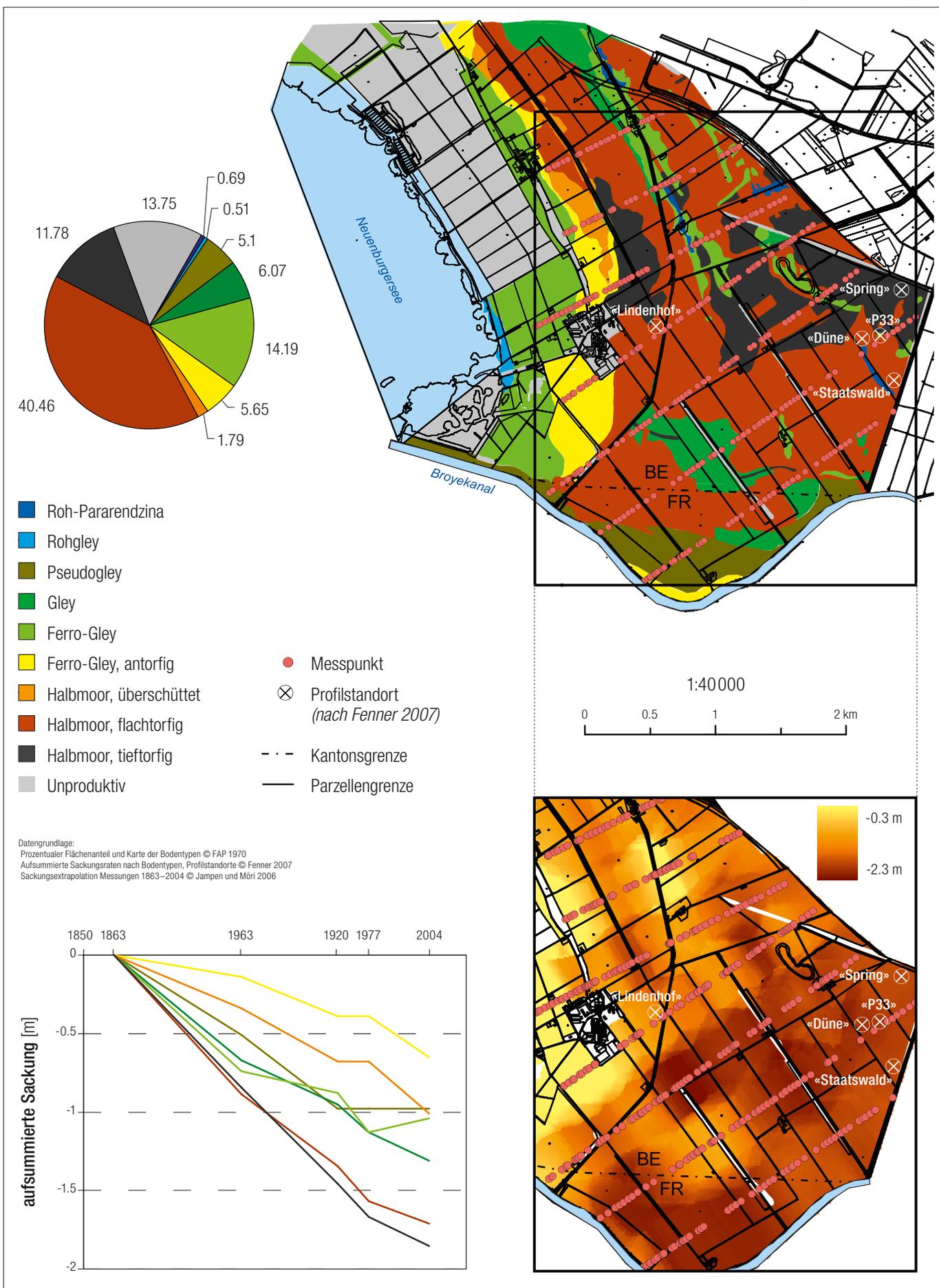


Abbildung 3–1: Ausschnitt aus der Bodenkarte Ins-Gampelen-Gals (1970) mit den Profilstandorten gemäss Tabelle 3–1 (oben rechts) und prozentualer Flächenanteil der Bodentypen (oben links) auf dem Areal der Anstalten Witzwil, Sackungsveränderungen unterschieden nach Bodentypen (unten links, aufsummierte Mittelwerte der Perioden 1863–1920, 1920–1963, 1963–1977 und 1977–2004 nach Fenner 2007) und Sackungsextrapolation der Messungen zwischen 1863–2004 im Bereich der Messtransecte (unten rechts, nach Jampen und Möri 2006)

3.2 Torfsackung und Kohlenstoffverlust

Die Entwässerung durch die Juragewässerkorrekturen führte dazu, dass die trocken gelegten, ursprünglich sehr locker gelagerten, im Wasser liegenden Torfschichten ihre Stütze verloren und in sich zusammensackten. Weil nun Sauerstoff in die entwässerten Schichten eintreten konnte, setzten gleichzeitig Oxidationsprozesse ein, welche die Sackung zusätzlich förderten. Die heute im Gebiet übliche intensive Bodenbearbeitung begünstigt die Durchlüftung und damit den Abbau der organischen Substanz zusätzlich.

Zusammen mit der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) und der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) startete die Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern (BSF) im Jahr 2003 ein

Projekt mit den Zielen, die Sackungsraten sowie den Kohlenstoffverlust in Form von Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre zu quantifizieren (Fenner 2007).

3.2.1 Ausmass der Sackung

Um die Sackungsraten genau zu erfassen, erwies sich das Areal der Anstalten Witzwil als geeignet. Dieses Gebiet liegt einerseits im 1972 kartierten Perimeter, und andererseits wurden hier 1863 entlang von sieben Transekten quer über den Betrieb die exakte Höhe über Meer erfasst. Diese Höhenmessungen wurden 1920, 1963, 1977 und 2004 wiederholt. So konnten die Sackungsraten in Form eines Höhenverlusts entlang der Transekte von der ersten Juragewässerkorrektur bis heute bzw. für jede Periode zwischen zwei Messzeitpunkten erfasst werden.

Auf dem Areal der Anstalten Witzwil (inkl. Flächen im angrenzenden Kanton Freiburg) sind 54 % der Flächen tieftorfige oder flachtorfige Halbmoore, die restlichen Flächen sind mineralische Böden (Abbildung 3-1 oben). Anhand der Höhendaten wurde von der SHL eine flächenhafte Karte im Bereich der Messtransekte (Abbildung 3-1 unten rechts) mit den Sackungsraten erstellt (Jampen und Möri 2006). Wie erwartet, sackten tieftorfige Böden stärker als mineralische. Zwischen tief- und flachtorfigen Böden konnten kaum Unterschiede in der Sackungsdynamik erkannt werden (Fenner 2007). Seit Beginn der ersten Juragewässerkorrektur wurde auf beiden Kartierungseinheiten eine maximale Sackung von bis zu 2 m beobachtet. Die jährlichen Sackungsraten waren nach der ersten Juragewässerkorrektur am grössten. Ein zweites (relatives) Sackungs-

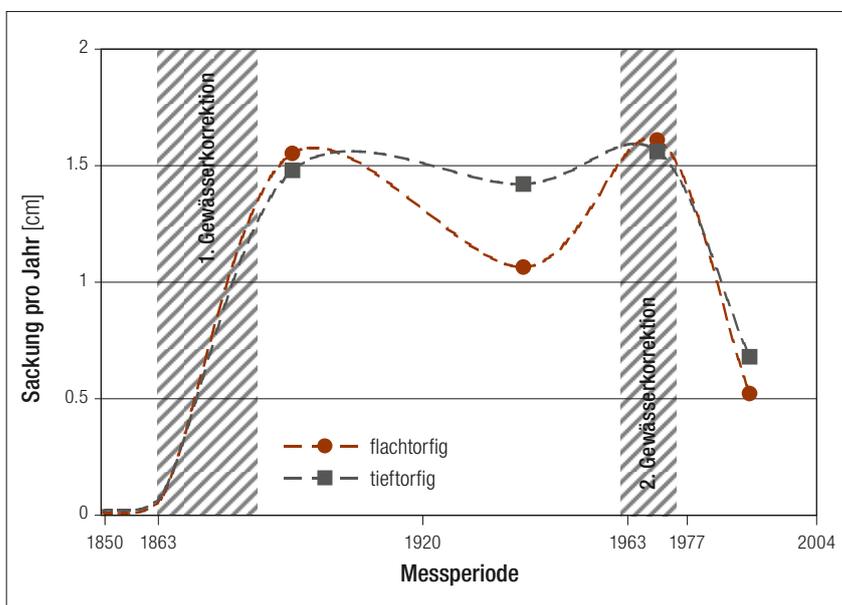


Abbildung 3-2: Jährliche Sackungsraten der torfhaltigen Böden auf dem Areal der Anstalten Witzwil; Trendlinie aufgrund von Mittelwerten gemäss Tabelle 3-1

Tabelle 3-1: Torfmächtigkeiten der Jahre 1863 und 2004, Torfsackung und jährliche Torfsackung in der Zeitperiode 1863 bis 2004, vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff der Jahre 1863 und 2004 sowie jährlicher Verlust an organischem Kohlenstoff in der Zeitperiode 1863 bis 2004 anhand von fünf Bodenprofilen auf dem Areal des Gutbetriebs der Anstalten Witzwil (Fenner 2007)

Profilidentifikation nach Fenner (2007)	Nutzungsart	Torfmächtigkeit 1863	Torfmächtigkeit 2004
		[cm]	[cm]
«Spring»	Fruchtfolgefläche	314	130
«P33»	langjährige Wiese	341	140
«Staatswald» ¹	langjährige Wiese	258	60
«Düne»	langjährige Wiese	135	30
«Lindenhof»	Fruchtfolgefläche	170	30
Spannweite (Range)		135–341	30–140

¹ Die Profilidentifikation «Staatswald» gemäss Fenner ist eine langjährige Wiese.

maximum lässt sich für die Periode während der zweiten Juragewässerkorrektur feststellen (**Abbildung 3-2**).

3.2.2 Bestimmung des Kohlenstoffverlusts infolge der Torfsackung

Um die Kohlenstoffverluste in die Atmosphäre zu erfassen, wurden auf dem Areal der Anstalten Witzwil anhand der Bodenkarte und der Karte mit den Sackungsraten fünf repräsentative Standorte ausgewählt (**Abbildung 3-1 oben rechts**). An jedem dieser fünf Standorte wurde ein Bodenprofil (**Abbildung 3-3**) geöffnet und schichtbezogene Proben zur Bestimmung der Lagerungsdichte und des Kohlenstoffgehalts entnommen. Anhand der jeweiligen torfigen Horizontmächtigkeiten, der horizontbezogenen Lagerungsdichten und des organischen Kohlenstoffgehalts wurde in neunfacher Wiederholung die Menge an organischem Kohlenstoff ermittelt (*Fenner 2007*).

Mit den von Fenner (2007) erfassten Daten konnte abgeschätzt werden, wieviel Kohlenstoff ursprünglich in den Profilen vorhanden und wie hoch der jährliche oxidative Torfverlust zwischen dem Beginn der ersten Entwässerung 1863 und der letzten Höhenmessung 2004 war (**Tabelle 3-1**). Die Torfmächtigkeit der fünf Profile beträgt heute zwischen 30 und 140 cm (im Jahr 1863 zwischen 135 und 341 cm) und der in Abhängigkeit der Dichte berechnete Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 250 und 1444 t/ha (im Jahr 1863 zwischen 743 und 1835 t/ha). Das Niveau der Bodenoberfläche sank jährlich zwischen 0.75 und 1.43 cm. Erwartungsgemäss sind die Unterschiede an den fünf Profilstandorten beträchtlich und repräsentieren die pedogenetisch bedingten, unterschiedlichen Torfmächtigkeiten auf dem Areal der Anstalten

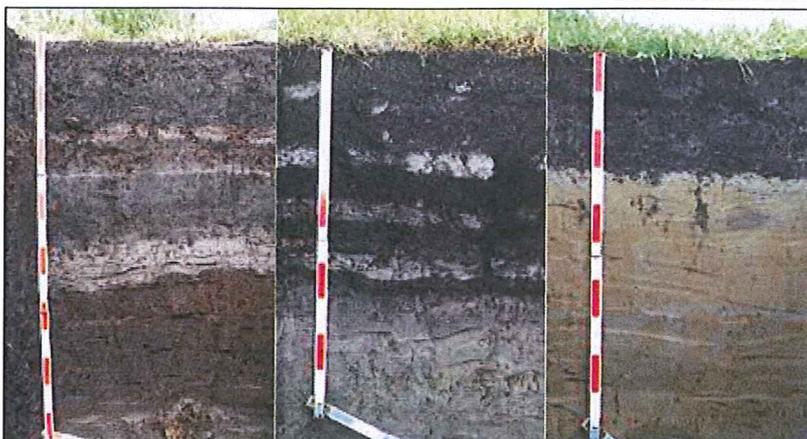


Abbildung 3-3: Drei der fünf zur Quantifizierung des Kohlenstoffverlust 2006 ausgehobene Bodenprofile auf dem Areal der Anstalten Witzwil (von links: tieftorfig auf Seekreide; flachtorfig auf Seekreide und antorfig auf Sanddüne)

Witzwil. Den Böden an den fünf Profilstandorten gingen jährlich zwischen 1940 und 4970 kg C/ha in Form von CO₂ verloren (**Tabelle 3-1**). Dies entspricht einer Menge von 7.12 bis 18.24 t CO₂ pro Hektare Anbaufläche und Jahr (Umrechnungsfaktor 3.67). Bei der heutigen Sackungsrate von ca. 0.5 cm pro Jahr (**Abbildung 3-2**) reicht der Vorrat an organischem Kohlenstoff – bei einem Höhenverlust von weiteren 30 bis 140 cm Boden – theoretisch noch 60 (flachtorfige Flächen) bis 280 Jahre (tieftorfige Flächen) bis zum vollständigen Torfabbau.

3.2.3 Auswirkungen des Torfabbaus

Liegt unter der Torfschicht ein sandhaltiger Unterboden, sind aus ackerbaulicher Sicht keine gravierenden Einschränkungen für die landwirtschaftliche Produktion zu erwarten. Sinkt das Niveau der Bodenoberfläche sogar unter die Hochwassermarken der Seen, kann

Tabelle 3-1: Fortsetzung

Torfsackung 1863–2004	Jährliche Torfsackung 1863–2004	Vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863	Vorhandene Menge an organischem Kohlenstoff pro Hektare 2004	Verlust an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863–2004	Jährlicher Verlust an organischem Kohlenstoff pro Hektare 1863–2004
[cm]	[cm]	[t]	[t]	[t]	[t]
184	1.30	1835	1297	538	3.81
201	1.43	1718	1444	274	1.94
198	1.40	1419	718	701	4.97
105	0.75	743	250	493	3.5
140	1.00	953	513	440	3.12
105–201	0.75–1.43	743–1835	250–1444	274–701	1.94–4.97

in den meisten Gebieten der Grundwasserspiegel mittels Pumpen kontrolliert werden. Böden auf einem Unterboden mit Seekreide hingegen eignen sich dereinst kaum für eine intensive acker- oder gemüsebauliche Nutzung. Aufgrund der heute noch fehlenden Daten – die Bodenkarte erfasste die unter dem Torf liegenden Schichten nicht – ist das Ausmass der Nutzungseinschränkung jedoch schwer abzuschätzen.

3.2.4 CO₂-Emissionen

Mit der Bodenkarte von 1972 kann versucht werden, die Berechnungen des Fallbeispiels der Anstalten Witzwil auf das ganze Berner Seeland zu extrapolieren. Im Gebiet des «Grossen Moos» entwickelten sich 1888 ha organische Böden. Im Verlauf der nächsten 60 Jahre werden im Berner Seeland jährlich 13 000–34 000 t CO₂ in die Atmosphäre abgegeben. Der erwartete CO₂-Eintrag in die Atmosphäre entspricht 0.4–1 % des Reduktionsziels, für das sich die Schweiz 2003 mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls verpflichtet hat (Reduktion der Treibhausgasemissionen um 8 % von 2008–2012 gegenüber

dem Stand von 1990, *UNFCCC 1997*). Danach werden die Emissionen während den folgenden 220 Jahren langsam bis zum vollständigen Abbau des Torfs auch auf den tieftorfigen Flächen abnehmen.

Organische Böden konnten sich in der Schweiz auf ca. 37 000 ha entwickeln (*Leifeld et al. 2003*). Ungefähr die Hälfte dieser Flächen wird extensiv bewirtschaftet und weist ein relativ ungestörtes Profil auf. Die flach- und tieftorfigen Flächen im «Grossen Moos» entsprechen einem Zehntel der gesamtschweizerischen Flächen mit gestörtem Profil. Dies bedeutet, dass das Reduktionsziel des Kyoto-Protokolls um 4–10 % leichter zu erreichen ist, wenn die Moorböden schweizweit naturnah genutzt werden. Die extensive Bewirtschaftung oder sogar Renaturierung kultivierter Moorböden entspricht zudem dem landwirtschaftlichen Umweltziel «Treibhausgase» (**Kasten 3–1**).

Zwei Juragewässerkorrekturen haben die Torfböden im «Grossen Moos» ackerbaulich nutzbar gemacht. Einsetzende Oxidationsprozesse führten wegen der Entwässerung und der Bodenbewirtschaftung zu einem Verlust der Torfmächtigkeit von jährlich rund 1 cm. Heute hat sich die Torfsackung auf ungefähr 0.5 cm pro Jahr reduziert. Trotzdem werden die CO₂-Emissionen in Zukunft beträchtlich sein.

Kasten 3–1: Landwirtschaftliches Umweltziel «Treibhausgase» (BAFU und BLW 2008)

Reduktion der landwirtschaftlichen Kohlendioxid-, Methan- und Lachgas-Emissionen.

3.3 Zukunft der Entwässerungsinfrastruktur

Die Sackung der Böden im «Grossen Moos» bewirkte einen Niveau-Verlust. Dies führte dazu, dass das Reguliersystem der beiden Juragewässerkorrekturen – besonders im Hochwassersommer 2007 – überdurchschnittlich stark belastet wurde und zeitweise sogar weite Flächen unter Wasser standen. Die auf den Gemüsebau ausgerichtete Produktion der meist intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen kann dadurch stark eingeschränkt werden. Zusätzlich ist zu befürchten, dass wegen der prognostizierten Klimaerwärmung mit einer Zunahme der Hochwasserereignisse zu rechnen ist. Der Ruf nach einer verbesserten Regulierung des Gewässersystems wird daher früher oder

später von politischer Seite beantwortet werden müssen, was die gegenwärtige Diskussion rund um die Abflussbegrenzung der Aare bei Murgenthal («Murgenthaler Bedingung») zeigt. Insbesondere die Binnenkanäle und das Drainagesystem erfordern regelmässige Unterhaltsarbeiten. Diese Arbeiten wurden von den dafür verantwortlichen Flurgenossenschaften teilweise vernachlässigt. Im Rahmen der VOL-internen Impulsgruppe Umweltschutz (IG UWS) wird die periodische Wiederinstandstellung der Binnenkanäle und Hauptleitungen diskutiert (*IG UWS 2008*). Dabei spielen auch ökologische Aspekte eine entscheidende Rolle (**Kasten 3–2**).

Das infolge der Torfsackung veränderte Höhenniveau erfordert eine periodische Wiederinstandstellung des engmaschigen Entwässerungssystems. Die ackerbauliche Nutzung im «Grossen Moos» wird in Bezug auf den Unterhalt der Entwässerungsinfrastruktur mit erheblichen Kosten sowohl für die Landnutzer als auch für die Öffentlichkeit verbunden sein.

Kasten 3–2: Landwirtschaftliches Umweltziel «Gewässerraum» (BAFU und BLW 2008)

Ausreichender Gewässerraum im Sinne des Leitbildes Fließgewässer mit gewässergerechtem Uferbereich gemäss Modulstufenkonzept im Landwirtschaftsgebiet.

3.4 Schadstoffe

Die durch die Entwässerung und Bodenbearbeitung ausgelöste Mineralisierung der organischen Substanz führt zur Bildung von mobilem Nitrat. Der Abbauprozess kann im Weiteren die Mobilität von anorganischen Schadstoffen erhöhen. Schwermetalle und Nitrat können mit perkolierendem Niederschlagswasser vermehrt ins Grundwasser gelangen.

Eine solchermassen erhöhte Schadstofffreisetzung ist insbesondere auf den Flächen der Anstalten Witzwil problematisch, da hier zur Bodenverbesserung in der Zeitspanne von 1913 bis 1954 der Kehrriech der Stadt Bern entsorgt und in die Böden eingearbeitet wurde (Rytz 2001). Im Hinblick auf den Gewässerschutz und eine hohe Nahrungsmittelsicherheit muss mittelfristig die Schadstoffbelastung auf den zur Kehrriechentsorgung verwendeten Flächen überprüft werden.

3.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die heutige intensive landwirtschaftliche Nutzung verstärkt den Prozess der Torfsackung im «Grossen Moos». Bereits vor knapp 40 Jahren wurde von der Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau (FAP, heute ART) empfohlen, die entwässerten Böden extensiver zu nutzen. Setzt sich die Torfsackung weiter fort, führt dies zu einer geringeren Nährstoffverfügbarkeit und bei gleich bleibend hoher Nährstoffzufuhr zu einer geringeren Biomasseproduktion. Gleichzeitig können Nitrat und weitere Schadstoffe mobilisiert werden und ins Grund- oder Seewasser gelangen. In erster Linie wird jedoch durch die Freisetzung von CO₂ die Atmosphäre belastet.

Da die Landwirtschaftsbetriebe im «Grossen Moos» meistens nur über kleine Betriebsflächen verfügen, sind sie auf eine hohe Bewirtschaftungsintensität angewiesen. Dies wird in Zukunft vermutlich dazu führen, dass sie vermehrt auf eine bodenunabhängige Produktion unter Glas umstellen. Die Zunahme der Gewächshäuser wird daher in den nächsten Jahren das Landschaftsbild im «Grossen Moos» prägen. Degradieren auf den nicht durch Gewächshäuser versiegelten Flächen die torfhaltigen Böden ungehindert weiter, wird die Gemüseproduktion vermehrt auf den mineralischen Böden der angrenzenden Hügel betrieben. Aufgrund der dazu üblichen intensiven Bodenbearbeitung, der Hangneigung und der Bodenbeschaffenheit, ist hier vermehrt mit Erosion zu rechnen.

Durch den Abbau der torfhaltigen Böden auf einer Fläche von fast 2000 ha wird die Umwelt belastet. Um den komplexen Folgen der Torfsackung entgegenzuwirken, besteht dringender Handlungsbedarf. Geeignete Massnahmen zum Erhalt der Torfböden und zur Minimierung der Schädwirkungen sind unter Berücksichtigung der Luftreinhaltung und des Gewässerschutzes zu diskutieren:

- Extensivierung des Ackerbaus (Boden schonende Anbausysteme, Kapitel 8 und 9) und Umstellung der Landwirtschaft auf

Grünlandnutzung. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung des im ländlichen Raum des «Grossen Moos» verbreiteten Gemüsebaus wird diese Massnahme jedoch äusserst schwierig umzusetzen sein.

- Durch Bildung und Beratung der Bewirtschafter sind deren Kenntnisse um Zusammenhänge zwischen Bewirtschaftung und Torfsackung zu erweitern.
- Gezielte Regulierung des Grundwasserspiegels mit dem Ziel, diesen durchgehend auf einem möglichst hohen Niveau zu halten.
- Überschütten der Böden mit organischem und allenfalls sauberem, mineralischem Aushubmaterial zur Verlangsamung der Torfsackung. Aus logistischen und finanziellen Gründen ist das Überschütten der gefährdeten, degradierten Flächen kaum grossflächig realisierbar. Auch wird es äusserst schwierig sein, genügend geeignetes und sauberes Bodenmaterial zu finden.
- Bildung einer Arbeitsgemeinschaft «Grosses Moos», um politische, sozioökonomische und hydrologische Aspekte für die Erhaltung und standortgerechte Nutzung der Böden miteinzubeziehen.
- Da im «Grossen Moos» die unter der Torfschicht liegenden Unterböden – infolge der

Kasten 3-3: Landwirtschaftliches Umweltziel «Landschaft» (BAFU und BLW 2008)

Erhalt, Förderung und Weiterentwicklung vielfältiger Kulturlandschaften mit ihren spezifischen regionalen Eigenarten und ihrer Bedeutung für Biodiversität, Erholung, Identität, Tourismus und Standortattraktivität, über

- 1. Offenhaltung durch angepasste Bewirtschaftung;**
- 2. Vielfalt der nachhaltig genutzten und erlebbaren Kulturlandschaften;**
- 3. Erhaltung, Förderung und Weiterentwicklung ihrer regionsspezifischen, charakteristischen, natürlichen, naturnahen und baulichen Elemente.**

früher durch das Gebiet mäandrierenden Flussläufe – kleinräumig sehr inhomogen sind, ist eine Bodenkartierung (Kapitel 2) bis unterhalb der Torfschicht nötig, um adäquate, standortsbezogene Massnahmen vorschlagen und diese gegebenenfalls auch umsetzen zu können.

Das «Grosse Moos» ist eine vielfältige Natur- und Kulturlandschaft mit eigener Identität, die es zu erhalten gilt. Die vorgeschlagenen Massnahmen helfen mit, das landwirtschaftliche Umweltziel «Landschaft» umzusetzen (**Kasten 3-3**).

4 Physikalische Bodenbelastungen



Baupiste auf nicht abhumusiertem Boden

4 Physikalische Bodenbelastungen

Bodenschadverdichtungen können in verschiedenen Bereichen auftreten. Durch physikalische Belastung geschädigte Böden sind in ihrer Fruchtbarkeit beeinträchtigt und erholen sich – wenn überhaupt – nur langsam. Auf der Grundlage der revidierten Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) kann die Bodenschutzfachstelle mit geeigneten Auflagen die physikalischen Bodenbelastungen minimieren.

Unsachgemässe Erdumlagerungen oder Befahrungen bei Bauarbeiten führen zu irreversiblen Gefügeschäden. Für den Maschineneinsatz und die Rekultivierung von Baustellen konnten erfolgreich Richtlinien ausgearbeitet und umgesetzt werden. In der Landwirtschaft belasten der Hofdüngeraustrag und die moderne Erntemechanisierung die Böden bis in den Unterboden. Insbesondere bei der Zuckerrübenenernte mit Einsatzgewichtern, die weit über den für Strassen zulässigen Maximalgewichten liegen, ist die physikalische Belastung sehr hoch und verursacht in gepflügten Böden teils massive Verdichtungen. Hier steht die Verbesserung der Tragfähigkeit der Ackerböden durch möglichst geringe Bodenbearbeitung im Vordergrund. Auch beim Tractor Pulling oder anderen Freizeitveranstaltungen, die kurzzeitig auf landwirtschaftlich genutzten Böden durchgeführt werden, kann es zu erheblichen Gefügeschäden kommen. Auch Transportfahrzeuge mit für den Feldeinsatz unangepasster Strassenbereifung können Schadverdichtungen verursachen.

4.1 Bodenschutz beim Bauen

Bauvorhaben im Hoch- und Tiefbau sowie bei Kiesgruben, Steinbrüchen und Deponien führen zu Bodenaushub und -umlagerungen. Im Kanton Bern sind jährlich grosse Flächen betroffen. Insbesondere bei Grossprojekten wie dem Bahn-, Autobahn- oder Gasleitungsbau kommt es über weite Strecken zu beträchtlichen Bodenverschiebungen. Unsachgemässer Umgang kann zu irreversiblen Gefügeschäden führen und die Fruchtbarkeit der betroffenen Flächen beträchtlich einschränken. In Zusammenarbeit mit allen beteiligten Akteuren wurden geeignete Schutzmassnahmen und Regelungen für den Maschineneinsatz entwickelt. Auf der Grundlage der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) können diese insbesondere bei Bauvorhaben mit der Pflicht zu einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) mittels geeigneten Rahmenbedingungen bzw. Auflagen umgesetzt werden.

4.1.1 Rekultivierungen

Unterirdischer Leitungsbau oder Tagbautunnels hinterlassen nach der Fertigstellung des Bauwerks Bodenoberflächen, die wieder der land- oder forstwirtschaftlichen Nutzung zugeführt, d. h. rekultiviert werden müssen. Zudem benötigen Baustellen in der Regel mehr Fläche als das eigentliche Bauwerk einnimmt. Auch solche Umgebungsflächen müssen rekultiviert werden. Im Rahmen eines Bauprojekts wird oft mehr Boden ausgehoben als für die Umgebungsgestaltung wieder verwendet werden kann. Mit dem überschüssigen Bodenaushub werden ausgebeutete Kiesgruben aufgefüllt oder Terrainveränderungen vorgenommen, welche anschliessend ebenfalls zu rekultivieren sind.

Rekultivierungsarbeiten waren früher zwar arbeitsmässig sehr aufwändig, dafür aber häufig erfolgreich. Bis ins 20. Jahrhundert wurden mit dem Einsatz von Pferdefuhrwerken kaum grosse Bodenverdichtungen verursacht. Bei korrektem Vorgehen und mit qualitativ

gutem Boden wurden Auffüllungen erfolgreich rekultiviert und fruchtbare Böden wieder «hergestellt». Bei nasser Witterung mussten die Arbeiten aus physikalischen Gründen eingestellt werden. Schon damals war das vorliegende Bodenmaterial entscheidend, so führte beispielsweise ein Bodenaufbau mit tonigem Unterbodenmaterial zu unbefriedigenden Resultaten.

Mit dem Einsatz von leistungsfähigeren Baumaschinen und Lastwagen wurde es in jüngerer Zeit möglich, bedeutende Aushubvolumina umzulagern und grosse Flächen baulich zu verändern. Nach Niederschlägen war es nun möglich, auch wassergesättigte Böden maschinell auszuheben. Damit wurde der Rekultivierungserfolg zunehmend abhängig vom jeweiligen Wetterglück und von den pedologischen Kenntnissen der beteiligten Personen. Bauunternehmer mit einem grossen Wissen erkannten nach wie vor die Bedeutung einer korrekten Rekultivierung, während andere in erster Linie auf eine den Bauplänen entsprechende korrekte Terraingestaltung und im besten Fall auf einen genügend mächtigen Oberbodenauftrag achteten. Zunehmend führten unsachgemäss durchgeführte Rekultivierungen zu kaum reversiblen Störungen der Bodenfruchtbarkeit, insbesondere beim Unterboden. Nach der Einführung des Umweltschutzgesetzes (*USG 1983*) wurde von den Bodenschutzfachstellen zusammen mit Akteuren aus der Kiesbranche sukzessive nach Lösungen gesucht. Unter Beteiligung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL, heute ART) und des Schweizerischen Fachverbandes für Sand und Kies (FSK, heute FSKB) konnten schliesslich verbindliche Rekultivierungsrichtlinien ausgearbeitet werden (*FSK 1987*).

4.1.2 Beachtung des Unterbodens

Ende der 1980er Jahre wurden für den Bau des Grauholz-Tunnels der Neubaustrecke Bahn 2000 riesige Baugruben geöffnet. Geplant war, mit dem Untergrund des Tunnelaushubs eine neue Landschaft zu gestalten, um diese – nach der Fertigerstellung des Bauwerks und einigen Jahren Rekultivierungszeit – wieder uneingeschränkt landwirtschaftlich nutzen zu können.

Im UVP-Verfahren verlangte die Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern (BSF) erstmalig, dass zusätzlich zum Oberboden beim Abtrag, während der Zwischenlagerung und bei den Rekultivierungsarbeiten auch der Unterboden (**Abbildung 4-1**) miteinbezogen werden muss. Dies führte zu viel grösseren umzulagernden Erdmengen und zu grossen Zwischenlagern. Die Bauunternehmer bezweifelten zu Beginn den Sinn dieser neuen Auflage. Erst nach erfolgter Rekultivierung mit zufriedenen Grund-

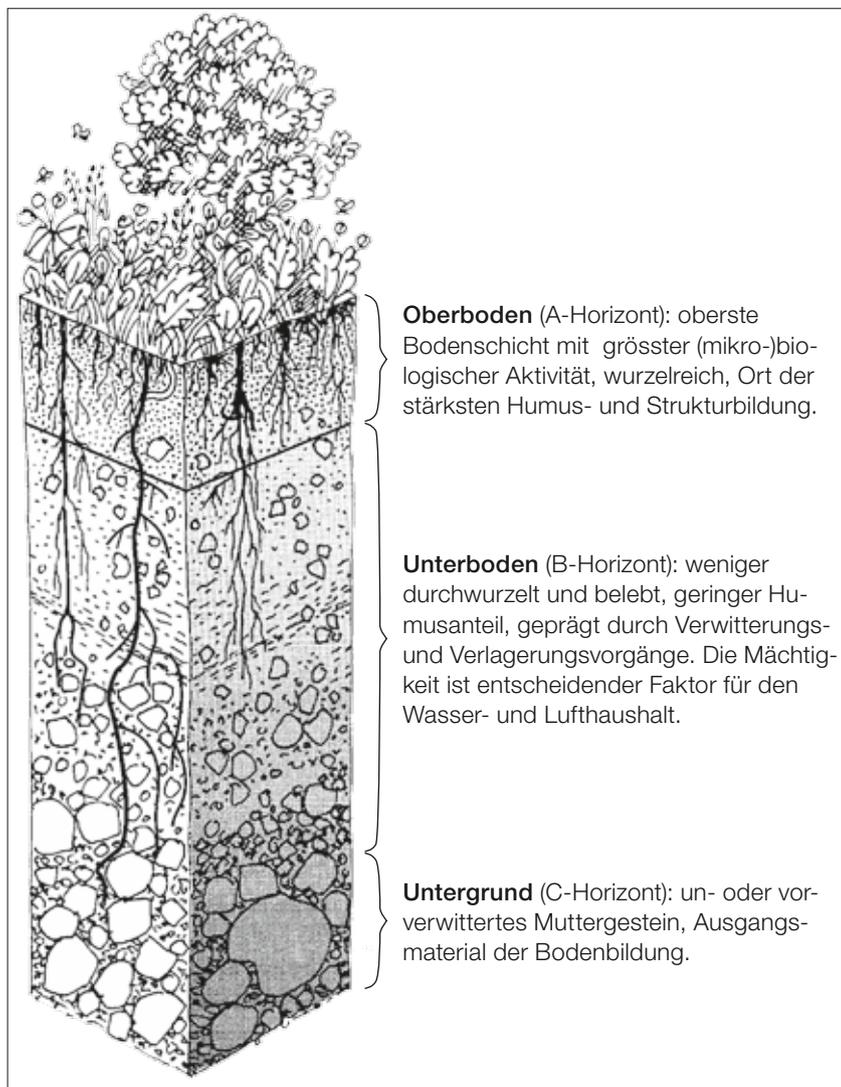


Abbildung 4-1: Darstellung eines Bodenkörpers mit Oberboden, Unterboden und Untergrund. Bodenhorizonte beschreiben den schichtweisen Aufbau des Bodens. Je nach Bodenbildung entwickelten sich unterschiedlich mächtige Horizonte.

eigentümern und einer hohen Ertragsleistung der Böden setzte bei den Bauunternehmern ein Umdenken ein. Seither ist die Trennung von Ober- und Unterboden bei grossräumigem Aushub Standard. In UVP-pflichtigen Baubewilligungsverfahren wird der Umgang mit den verschiedenen Bodenhorizonten – in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften gemäss Bodenkartierung – detailliert geregelt. Auch in den Rekultivierungsrichtlinien der Kiesbranche sowie in allen folgenden baulichen Bodenschutzrichtlinien wurde diese Massnahme aufgenommen.

4.1.3 Verwertung von Bodenaushub

Bei Überbauungen sowie Strassen- und Bahnbauten fallen jährlich beträchtliche Mengen fruchtbaren Bodens als Aushub an. Die Ressource Boden ist jedoch nicht oder nur beschränkt erneuerbar, was die Frage nach einer sinnvollen Verwendung dieses Materials aufwirft. Mit der Lancierung einer Bodenbörse versuchte 2003 das Amt für Umweltschutz

des Kantons Luzern in Zusammenarbeit mit den Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, BE, BL, BS und SO dem Boden einen Wert zu geben. Damit sollte verhindert werden, dass wiederverwertbares Bodenmaterial in Baugruben «entsorgt» wird. Zudem wird die Wiederverwertung von überschüssigem Bodenmaterial bei Bauprojekten von Behörden oft verlangt. Über die Bodenbörse konnten Unternehmen oder Privatpersonen im Internet kostenlos einen Bedarf an Boden anmelden oder Boden anbieten. Das Abstimmen von Angebot und Nachfrage in zeitlicher Hinsicht hat sich aufgrund der engen Zeitpläne auf Baustellen als besondere Herausforderung erwiesen. Die Umsetzung der sinnvollen Wiederverwertung von überschüssigem Bodenmaterial funktionierte bisher nur mangelhaft, und die Bodenbörse war nicht das geeignete Mittel dazu.

4.1.4 Einsatzgrenzen für Baumaschinen

Ein Beispiel für die Zweckmässigkeit von Bodenschutzrichtlinien zur Verhinderung von Verdichtungsschäden im Boden lieferte der Erweiterungsbauprojekt der Hockdruck-Erdgasleitung von Ruswil (LU) nach Altavilla (FR), quer durch den Kanton Bern (**Abbildung 4–2**). Die neue Gasleitung sollte über weite Strecken direkt neben die erste, 20 Jahre früher gebaute Hochdruckleitung gelegt werden. Während der Planungsphase zeigten sich die Grundeigentümer besorgt, da sie ein zweites Mal direkt betroffen und die vom ersten Bau verursachten Verdichtungsschäden streckenweise immer noch festzustellen waren. Um solche Baufehler beim zweiten Leitungsbau zu verhindern, gründeten sie den Verein für Bodenschonenden Gasleitungsbau (BOGA) und



Abbildung 4–2: Korrekter Bodenaushub im Rahmen des Erdgasanleitungsbaus mit Trennung von Ober- und Unterboden

unterstützten im UVP-Verfahren entscheidend die Forderungen der Bodenschutzfachstellen der Kantone BE, FR, LU und SO. Das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) reagierte auf die Einwände der Grundeigentümer und erweiterte die Auflagen der bereits vorliegenden Baubewilligung. Zusammen mit den Kantonen BE, LU, und SO, dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute BAFU), der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), dem Eidgenössischen Rohrleitungsinspektorat, der Erdgaswirtschaft und einem selbstständigen Bodenschutzexperten wurden Bodenschutzrichtlinien erarbeitet (*BEW 1993, heute BEW 1997*). Die wesentlichen Eckpunkte der Bodenschutzrichtlinien beim Bau von Rohrleitungen sind

- die exakte Aufnahme der Bodenverhältnisse vor Baubeginn (Bodenkartierung, Kapitel 2);
- die entsprechend auf die jeweiligen Boden- und Grundwasserverhältnisse abgestimmten Schutzmassnahmen sowie
- die Kriterien für die Boden- und Witterungsverhältnisse, unter welchen gebaut werden darf.

Physikalische Schädigungen des Bodens beim Befahren und beim Umlagern sind primär von der Bodenfeuchte abhängig. Obwohl diese direkt gemessen werden kann, ist sie je nach Bodentyp unterschiedlich zu interpretieren. Mit der Saugspannung wurde ein für alle Böden geeigneter, einheitlich zu interpretierender Parameter mit einfacher Messtechnik (Tensiometer) gefunden. Die Saugspannung ermöglicht Aussagen zur Tragfähigkeit des Bodens. Gewicht und Flächenpressung der beladenen Fahrzeuge können somit in Relation zum gemessenen Saugspannungswert gebracht werden (**Abbildung 4–3**). Werden die Einsatzgrenzen für einen bodenverträglichen Maschineneingriff überschritten, müssen die Arbeiten gestoppt oder Druck und Scherung reduzierende Schutzmassnahmen (z. B. Schüttung von Kispisten, Baggermatratzen) ergriffen werden.

Eine Diplomarbeit am Geografischen Institut der Universität Bern (GIUB) untersuchte die durch den Gasleitungsbau auf den Boden ausgeübten Druckbelastungen (*von Rohr 1996*). Wie erwartet wurde festgestellt, dass das Ausmass der physikalischen Bodenbeanspruchung mit abnehmender Saugspannung zunimmt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Bodenschäden in einem vertretbaren Rahmen blieben, wenn die in den Bodenschutzrichtlinien formulierten Einsatzgrenzen für Baumaschinen respektiert wurden. Obwohl nicht sämtliche Bodenschäden zu vermeiden waren, durften die Grundeigentümer die rekultivierten Flächen des neuen Leitungstrassees in einem wesentlich besseren Zustand übernehmen als diejenigen nach dem ersten Leitungsbau. Trotz den Bodenschutzauflagen wurde der Bau der zweiten Leitung

innerhalb der erforderlichen Zeit ausgeführt. Der Zusatzaufwand verteuerte die Baukosten um weniger als 10%. Beim Bau einer weiteren grossen Hochdruckgasleitung von Deutschland nach Italien sowie von unterirdischen Gasröhrenspeichern und kleineren Verteilungsleitungen wurden die genannten Richtlinien diskussionslos wieder angewendet und sind heute Teil der Dienstbarkeitsverträge zwischen Grundeigentümern und Bauherrschaft.

Die Erkenntnisse aus den erfolgreich evaluierten Massnahmen wurden in neue Richtlinien zum Bodenschutz (*BUWAL 2001*), in die Schweizer Norm Erdbau, Teil Boden (*VSS 2000*) und in verschiedene kantonale Bodenschutzrichtlinien aufgenommen. Auch die Rekultivierungsrichtlinie der Kiesbranche wurde überarbeitet und vervollständigt (*FSK 2001*). Zur direkten Anwendung für den Maschinisten kam im «ABC für Erdarbeiten» zudem eine kleine Zusammenfassung heraus, welche vor allem bei der Rekultivierung von Kiesabbaustellen rege benützt wird.

4.1.5 Bodenkundliche Baubegleiter

In den 1990er Jahren wurde die Autobahn A5 Solothurn-Biel gebaut. Die Strecke enthielt etliche Tagbautunnels und somit grosse Rekultivierungsflächen. Im Rahmen des UVP-Verfahrens wurden die Bodenschutzfachstellen BE und insbesondere SO miteinbezogen, die detaillierte Auflagen formulierten. Gleich zu Baubeginn führte die nasse Witterung auf der Baustelle zu einer Missachtung der Auflagen. Nur durch das unverzügliche und entschiedene Eingreifen der Vollzugsbehörden konnten grossflächige Schäden verhindert werden. Es zeigte sich, dass der Bodenschutz nicht primär durch das Erlassen von Richtlinien durchgesetzt werden kann, sondern nur durch eine rollende Planung und permanente Kontrolle der Bauarbeiten vor Ort.

Angesichts der Vielzahl von Baustellen war die direkte Betreuung durch die kantonalen Fachstellen nicht möglich, zumal die anstehenden Probleme oft eine hohe Dringlichkeit aufwiesen. Deshalb wurde mit einem Regierungsratsbeschluss bewirkt, dass die bodenkundliche Baubegleitung einem Ingenieurbüro übertragen werden konnte. Durch diesen Begleiter wurden sämtliche Erdarbeiten – vom Abtrag über die Zwischenlagerung bis zur Rekultivierung und Folgebewirtschaftung – geplant und überwacht.

Die Zusammenarbeit der bodenkundlichen Baubegleiter (BBB) mit den Bodenschutzfachstellen hat sich bewährt. BBB werden heute bei allen grösseren, meist UVP-pflichtigen Baustellen eingesetzt. In Zusammenarbeit mit der schweizerischen Ausbildungsstätte für Natur- und Umweltfachleute (SANU) werden seit

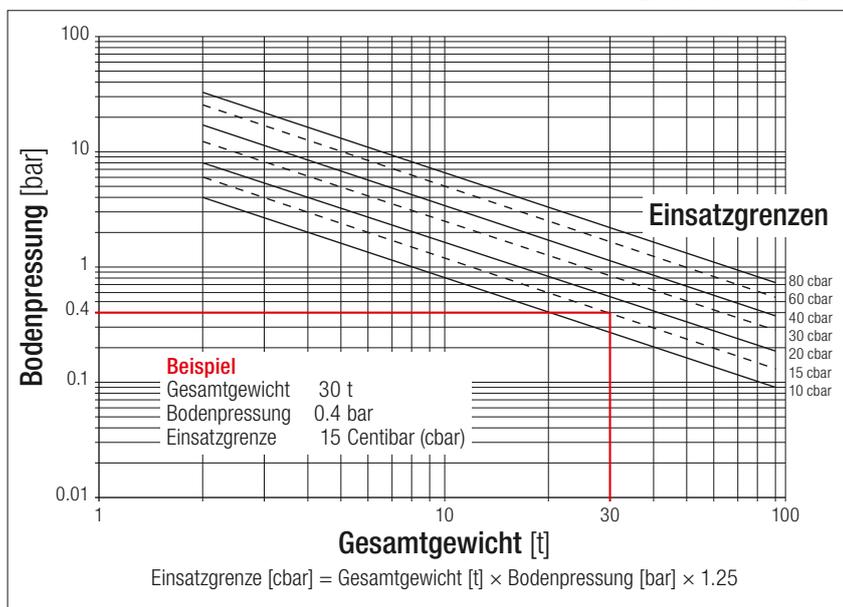


Abbildung 4–3: Einsatzgrenzen von Baumaschinen und Fahrzeugen mit Berücksichtigung der Flächenpressung unter den Reifen bzw. Raupen und des Gesamtgewichts beladener Maschinen (SN 640 583, VSS 2000: 9)

2003 Ausbildungskurse für BBB angeboten. Die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) beaufsichtigt den Ausbildungsgang und führt eine Liste mit den Namen erfolgreicher AbsolventInnen.

4.1.6 Folgebewirtschaftung rekultivierter Flächen

Selbst wenn während der Bauzeit sämtliche Auflagen korrekt eingehalten werden, sind frisch rekultivierte Flächen kaum tragfähig und reagieren sehr empfindlich auf physikalische Belastungen. Bevor ein rekultivierter Boden wieder in die intensive landwirtschaftliche Produktion überführt werden kann, muss dieser über einige Jahre seine Struktur und biologische Aktivität aufbauen und die natürliche Tragfähigkeit wiedererlangen. Die Fachkommission «Rekultivierung» des Kantons Bern, bestehend aus Vertretern der Behörden und der Kiesbranche, erarbeitete deshalb mit den «Richtlinien Folgebewirtschaftung rekultivierter Flächen» (GSA 1997) ein Merkblatt, welches die notwendigen Nutzungsetappen zur Stabilisierung des Bodens nach einem baulichen Eingriff aufzeigt. Landwirte, welche bereits früher rekultivierte Flächen übernommen haben, halten sich meist an diese vorübergehenden Nutzungseinschränkungen. Bei Baustellen mit Landbesitzern ohne entsprechende Erfahrung werden die Auflagen oft nur mangelhaft eingehalten.

Durch Bauarbeiten umgelagerter Boden ist sorgfältig zu rekultivieren, um wieder ohne Einschränkungen genutzt werden zu können. Dabei müssen unter Berücksichtigung des Bodenaufbaus der Ober- und der Unterboden separat ab-

getragen, zwischengelagert und wieder aufgetragen sowie eine angepasste Folgebewirtschaftung eingehalten werden. Bodenschäden treten auf, wenn schwere Maschinen auf nassem Boden im Einsatz sind. Dies hat zur Formulierung von Einsatzgrenzen für Baumaschinen und Fahrzeugen geführt. Die Mitarbeit von bodenkundlichen Baubegleitern bei der Planung der Erdarbeiten sowie für die Kontrolle der Auflagen vor Ort hat sich bewährt.

4.1.7 Schlussfolgerungen

Die Bodenschutzrichtlinien beim Bauen wurden an konkreten Bauvorhaben zusammen mit den beteiligten Akteuren entwickelt und sind somit breit abgestützt. Auf grösseren Baustellen werden heute die Auflagen des Bodenschutzes weitgehend umgesetzt. Diese können in der Regel ohne grössere Bauverzögerungen und ohne wesentliche Mehrkosten ausgeführt werden, sofern sie rechtzeitig in den Planungsprozess miteinbezogen wurden. Die Schwerpunkte des baulichen Bodenschutzes sind

- die Erhebung des Ausgangszustandes mittels Bodenkartierung;
- der Einbezug eines BBB auf Baustellen;
- das Ausführen von Bodenbewegungen nur bei abgetrocknetem Bodenzustand;
- die Trennung von Ober- und Unterboden bei Abtrag, Zwischenlagerung und Wiederauftrag sowie
- das Anpassen der Folgebewirtschaftung nach erfolgter Rekultivierung.

4.1.8 Ausblick

Bei allen Baustellen wird durch die zuständige Fachstelle darauf hingearbeitet, dass die Grundsätze des Bodenschutzes, insbesondere die Trennung von Ober- und Unterboden sowie das Beachten der Bodenfeuchte vor Maschineneinsätzen, zur Selbstverständlichkeit werden. Obwohl auf kleineren Baustellen oft die gleichen Unternehmen arbeiten wie auf UVP-pflichtigen Grossbaustellen, besteht bei kleineren Leitungsbauten (z. B. Wasser- und Abwasserleitungen) und insbesondere beim Bau von Wohnhäusern und Industriegebäuden noch Handlungsbedarf. Der Begriff «Unterboden» ist

bei Architekten und Planern weitgehend unbekannt, und dieses wertvolle Erdmaterial wird dem übrigen Aushub oder Schutt gleichgesetzt. Bei der Wiederherstellung der Umgebung fehlt deshalb oft geeignetes Bodenmaterial, und die Infiltrations-, Speicher- und Filtereigenschaften des neu geschütteten, meist (zu) flachgründigen Bodens sind ungenügend. Mit der Broschüre «Bodenschutz lohnt sich. Für einen wirksamen Bodenschutz im Hochbau. Tipps und Richtlinien für die Planung» (BAFU 2008) wird versucht, die Akteure des Hochbaus im Umgang mit Boden zu sensibilisieren. Ziel ist es, dass auf allen Baustellen die Bodenschutzauflagen ohne besondere Kontrollen eingehalten werden.

Boden ist ein nicht erneuerbares Gut – zumindest nicht in für Menschen relevanten Zeiträumen von einigen Jahrzehnten. Und doch fallen bei fortlaufender baulicher Tätigkeit grosse Überschüsse an wiederverwertbarem Unter- und Oberboden an. Ein grosser Teil davon wird wegen mangelnder Nachfrage bzw. dem Fehlen einer konkreten Verwertungsmöglichkeit als Boden in Kiesgruben und Deponien vergraben, d. h. entsorgt. Damit geht diese wertvolle Ressource für immer verloren. Im Kanton Bern gibt es viele flachgründige Böden mit eingeschränkter landwirtschaftlicher Nutzungseignung oder degradierte Böden. Solche Böden mit geringer oder abnehmender Fruchtbarkeit, die sich jedoch für den Ackerbau eignen, könnten mit zugeführtem Bodenmaterial aufgewertet werden. Die Fachstellen scheiden zusammen mit interessierten Grundeigentümern und Unternehmern solche Flächen aus und erarbeiten die nötigen Vorschriften und Bewilligungen. Das langfristige Ziel besteht darin, für Rekultivierungen und Bodenverbesserungen geeigneten Bodenaushub (Ober- und Unterboden) nicht mehr zur Auffüllung von Gruben zu verwenden, dies umso mehr, weil die Deponien nur für die Ablagerung von nicht mehr verwertbarem Material genutzt werden sollten.

Ein besonderes Augenmerk gilt den Torfböden. Durch die Sackung nimmt hier die Torfmächtigkeit stetig ab, und gleichzeitig ist eine legale Wiederverwertung von organischem Aushub (Torf) abgesehen von einer Verwendung zur Bodenverbesserung stark eingeschränkt. Um diese Situation zu verbessern, wurde das Merkblatt «Verwertung von organischem Aushub» (BSF et al. 2005) erarbeitet.

4.2 Moderne Erntemechanisierung

Physikalische Bodenbelastungen treten heute im Zusammenhang mit der ackerbaulichen Bodennutzung insbesondere beim Hofdüngeraustrag (Gülle, Mist) und bei der Ernte von Mais, Getreide, Zuckerrüben sowie Kartoffeln auf. Güllefässer, Mistzetter, Mäh-

drescher sowie mehrreihige, ladebunkerbestückte Maishäcksler bzw. Zuckerrüben- und Kartoffelvollernter können über beträchtliche Einsatzgewichte verfügen (Kapitel 7.3). Die allerhöchsten Belastungen werden heute bei der Zuckerrübenernte verursacht. Bei ge-

fülltem Ladebunker können die auf den Boden einwirkenden Gewichte bis zu 70 t betragen. Verglichen mit dem maximal zulässigen Fahrzeuggewicht auf Strassen (40 t) führt eine solchermaßen schwere Erntemechanisierung zu erheblichen Bodenbelastungen und birgt die Gefahr einer Beeinträchtigung der Bodenfertbarkeit in sich. Da im Kanton Bern jährlich rund 4000 ha Zuckerrüben angebaut werden, wird nachfolgend der Einfluss verschiedener Mechanisierungs- und Anbausysteme auf die Bodenstruktur aufgezeigt.

4.2.1 Zuckerrübenernte

Verschiedene, rasch aufeinander folgende Mechanisierungsschritte führten in den letzten 20 Jahren dazu, dass in der Schweiz vor allem zweireihige, von einem Schlepper gezogene (**Abbildung 4-4**) sowie sechsreihige selbstfahrende Erntemaschinen (**Abbildung 4-5**) zum Einsatz kommen. Um lang anhaltende Schäden des Bodengefüges zu vermeiden und dem wirtschaftlichen Umfeld gerecht zu werden, setzt man heute sechsreihige Erntemaschinen mit spurveretzten Fahrwerken und grösstmöglichen Reifen für möglichst wenige Überfahrten ein.

Die während der Zuckerrübenernte im Herbst oft ungünstigen weil sehr feuchten und von den Landwirten nicht beeinflussbaren Bodenbedingungen, die Mehrfachbefahrungen beim zweireihigen gezogenen Ernteverfahren («Multi Pass-Effekt») sowie Radlasten von über 10 t beim sechsreihigen selbstfahrenden Verfahren geben immer wieder Anlass zu Bedenken hinsichtlich möglicher Gefügeschäden durch Bodenbelastungen. Grundsätzlich stellt sich die Frage, welches Ernteverfahren die geringeren Bodenbelastungen verursacht und damit in der Praxis zu bevorzugen ist.

Unter fachlicher Mitwirkung der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Täniken (ART) und der BSF befasste sich eine Diplomarbeit der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) mit der Wechselwirkung zwischen der Bodenbelastung dieser zwei Ernteverfahren. Zudem wurde die unterschiedliche Gefügestabilität der beiden Anbausysteme Direktsaat (DS) und Pflug (PF) untersucht, die auf zwei unmittelbar nebeneinander liegenden Parzellen langjährig angewendet worden sind (**Kasten 4-1**).

4.2.2 Bodenbelastung der Ernteverfahren

Summierte man die von allen Rädern eines Ernteverfahrens überrollte Fläche auf, so wurde mit dem sechsreihigen selbstfahrenden Verfahren mit 135 % bedeutend weniger Fläche überfahren als mit dem zweireihigen gezogenen Verfahren mit 298 %; auf die beiden



Abbildung 4-4: Zweireihiger gezogener Zuckerrübenvollernter



Abbildung 4-5: Sechsreihiger selbstfahrender Zuckerrübenvollernter

Räder des Vollernters vom zweireihigen gezogenen Verfahren entfielen dabei 128 % Fahrspurflächenanteil. Die Differenz zuungunsten des zweireihigen gezogenen Ernteverfahrens ergibt sich durch die geringere Arbeitsbreite, die grössere Anzahl Räder und die häufigeren Wendemanöver (Van der Veer 2005).

Das Gewicht des zweireihigen gezogenen Ernteverfahrens bei leerem Ladebunker betrug inkl. Schlepper 8150 kg, das Maximalgewicht bei gefülltem Bunker 12 100 kg. Die höchsten Radlasten traten mit 6000 kg oder 48 % des maximalen Einsatzgewichts unter dem rechten Vollernterrad auf. Der höchste Kontaktflächen- druck wurde ebenfalls unter diesem Rad gemessen, nämlich im System DS mit 86 kPa und im System PF mit 98 kPa.

Das sechsreihige selbstfahrende Verfahren belastete den Boden bereits mit einem deut-

Die Böden der beiden Anbausysteme DS und PF sind typische Braunerden auf Grundmoräne und bodenkundlich identisch. Die Erhebungen wurden unter in der Praxis möglichen worst-case-Bedingungen «maximale Radlast auf sehr feuchtem bis nassem Boden» durchgeführt. Die Bodendruckmessungen und die Entnahme der Zylinderproben erfolgten in drei unterschiedlichen Tiefen (20, 30 und 60 cm) jeweils unter dem Rad mit dem höchsten Kontaktflächendruck. Beim zweireihigen gezogenen Ernteverfahren wurde der Effekt der Mehrfachbefahrung miteinbezogen. Die Kontrollmessungen entstammen einer unbefahrenen Teilfläche (Handernte).

lich höheren Leergewicht von 20 750 kg und bei vollem Ladebunker mit einem maximalen Einsatzgewicht von 32 450 kg. Dabei lag mit 10 000 kg am meisten Gewicht auf dem linken Hinterrad. Beim Wenden oder Leeren des Bunkers erhöhte sich das Gewicht bei angehobenem Rodeorgan auf 35 100 kg. Das sechsreihige selbstfahrende Verfahren wies durchwegs grosse Kontaktflächen auf, wobei der grösste Kontaktflächendruck mit 125 kPa nicht unter dem mit dem grössten Gewicht belasteten Rad gemessen wurde, sondern unter dem linken Vorderrad. Gesamthaft war der Kontaktflächendruck beim zweireihigen gezogenen Ernteverfahren um rund 20 % tiefer als derjenige des Vergleichsverfahrens (Van der Veer 2005).

4.2.3 Auswirkungen von lang-jährigem Direktsaat- und Pflugsystem

Durch den bei worst-case-Bedingungen (Kasten 4-1) durchgeführten Vergleich konnten relevante Unterschiede zwischen den beiden Anbausystemen DS und PF festgestellt werden. Die gemessenen Kontaktflächen sind bei maximaler Bunkerfüllung bei praktisch allen Rädern beider Ernteverfahren beim Anbausystem DS jeweils um bis zu 18 % höher als beim Anbausystem PF. Das in der obersten Bodenschicht oft beobachtete stabilere Plättchengefüge (Kapitel 8) führt zu einer stärkeren Deformation der Reifen. Die Radlasten lassen sich folglich beim System DS auf eine grössere Kontaktfläche abstützen.

Wegen dieser stabileren Gefügeform breiten sich die auf den Boden ausgeübten Druckbeanspruchungen bei DS stärker in horizontaler Richtung, in der gelockerten Bodenstruktur des PF-Systems vermehrt in vertikaler Richtung in tiefere Bodenschichten aus. Aufgrund der regelmässigen Lockerung wird der gepflügte Boden während Überfahrten stärker verdichtet, was zu den für dieses Anbausystem typischen Fahrspuren führt.

4.2.4 Auswirkungen auf das Gefüge

Durch die Überfahrten wurden im System PF bei beiden Ernteverfahren sowohl der Gefügebau (Groporenvolumen und Luftdurchlässigkeit) als auch die Gefügestabilität (Vorbelastung) zum Teil stark ungünstig verändert. Auch Kooistra und Boersma (1994) weisen in ihren Untersuchungen auf die abnehmende Stabilität des Bodens nach einem Pflugeinsatz bzw. auf eine Stabilitätszunahme durch den Verzicht auf den Pflug hin.

In allen drei Bodentiefen des Systems DS wurden bezüglich Gefügebau und -stabilität wenige Unterschiede zwischen den Kontrollmessungen des unbefahrenen Bodens und den Messungen nach den Überfahrten mit den zwei Ernteverfahren festgestellt. Im System PF dagegen sind die Veränderungen der Gefügebau-Parameter im Vergleich zu den Kontrollmessungen des unbefahrenen Bodens auch im Unterboden ausgeprägt. Teilweise liegen die Werte der Grobporenvolumina (Abbildung 4-6) nach den Befahrungen unter den von der BGS vorgeschlagenen Richt- und teilweise sogar Prüfwerten (von 7 bzw. 5 Vol.-%), was als Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit zu interpretieren ist (Häusler und Buchter, 2004).

Unter worst-case-Bedingungen beeinträchtigen beide Zuckerrübenernteverfahren den Boden im Anbausystem PF bis in mindestens 60 cm Bodentiefe. Man findet erst auf 30 cm Tiefe eine Schicht mit erhöhter Gefügestabilität. Im DS-System hingegen lässt sich eine erhöhte Gefügestabilität auch in der obersten Bodenschicht nachweisen, so dass in diesem System wesentlich geringere Gefügebbeeinträchtigungen im Unterboden auftreten. Das System Direktsaat leistet daher einen grossen Beitrag zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Böden und zur Vermeidung von Unterbodenverdichtungen.

Zwischen den Zuckerrübenernteverfahren «sechsreihig selbstfahrend» und «zweireihig gezogen» ist jedoch kein wesentlicher Unterschied in Bezug auf die Bodenbelastung ersichtlich. Nur im Oberboden sind leichte Tendenzen zugunsten des zweireihigen gezogenen Verfahrens festzustellen.

4.2.5 Schlussfolgerungen

Die Zuckerrübenerte entspricht in der landwirtschaftlichen Praxis, aufgrund der oft (zu) nassen Witterung im Herbst, häufig einem worst-case-Szenario. Der bodenschonende Einsatz von Zuckerrübenerntemaschinen (gezogen oder selbstfahrend) verlangt organisatorische Verbesserungen. Hierzu gehören das Vermeiden

von Nassernten, ein häufigeres Abbunkern, das Anlegen von Mieten an beiden Feldenden sowie eine maximale Nutzung der befestigten Wege. Die bodenmechanischen Eigenschaften der Fahrzeuge lassen sich durch maximal mögliche Bereifung mit korrekt eingestelltem Luftdruck verbessern. Darüber hinaus ist insbesondere auch eine Reduktion bei der Bodenbearbeitung anzustreben.

Die Grundanforderungen eines vorsorglichen mechanischen Bodenschutzes an die landwirtschaftliche Mechanisierung ist das Anpassen der Fahrzeugeigenschaften an die begrenzte Gefügestabilität der Böden; dies soll bei gegebenen Bodenverhältnissen und wechselnder Auslastung sowohl im Allgemeinen (Fahrzeugauswahl für eine bestimmte Standort- und Bewirtschaftungssituation) als auch im Speziellen (Fahrzeugausrüstung und -einsatz) gelten (Weisskopf und Keller 2008).

4.2.6 Ausblick

Selbstfahrende Vollerntemaschinen, Güllefässer sowie Mistzetter können – insbesondere bei (zu) feuchten Bodenbedingungen – das Bodengefüge langfristig schädigen. Gleichzeitig kann im heutigen agrarpolitischen Umfeld die rationelle Bewirtschaftung mit einer zunehmend schweren Mechanisierung wohl kaum aufgehalten werden. Daher ist grundsätzlich die Tragfähigkeit der ackerbaulich genutzten Böden zu verbessern. Mit diesem Lösungsansatz unterstützt der Kanton Bern seit 1997 die Boden schonenden Anbausysteme, insbesondere die Direktsaat. Dank der Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (LKV 1997) wurde die Umstellung mit finanziellen Anreizen gefördert. Um das landwirtschaftliche Umweltziel «Bodenverdichtung» (Kasten 4–2) zu erreichen, sind vorsorgliche Massnahmen zum Schutz des Bodengefüges (insbesondere im Unterboden) absolut unerlässlich. Rechtliche Lösungsansätze für dieses Problem neigen oft zu unzulässigen Verallgemeinerungen und Vereinfachungen der Belastungssituation, so dass die Bodenschutzziele nicht erreicht werden können oder die landwirtschaftliche Bodennutzung unnötig stark eingeschränkt wird. Im Kanton Bern wird daher auf die Eigenverantwortung der Bodennutzer gesetzt. Im Vordergrund stehen folgende Überlegungen:

- Bei geringem Reifendruck verformt sich nicht der Boden, sondern der Reifen, was nur zu schwach ausgeprägten Fahrspuren führt. Damit lässt sich das Zugvermögen der Reifen im Feld erhöhen sowie die Kontaktfläche um rund einen Drittel vergrössern. Da umgekehrt auf Strassenfahrten hohe Reifendrücke sinnvoll sind, empfiehlt sich – zur Vermeidung von physikalischen Bodenbelastungen – die Montage eines Regeldrucksystems bei über-

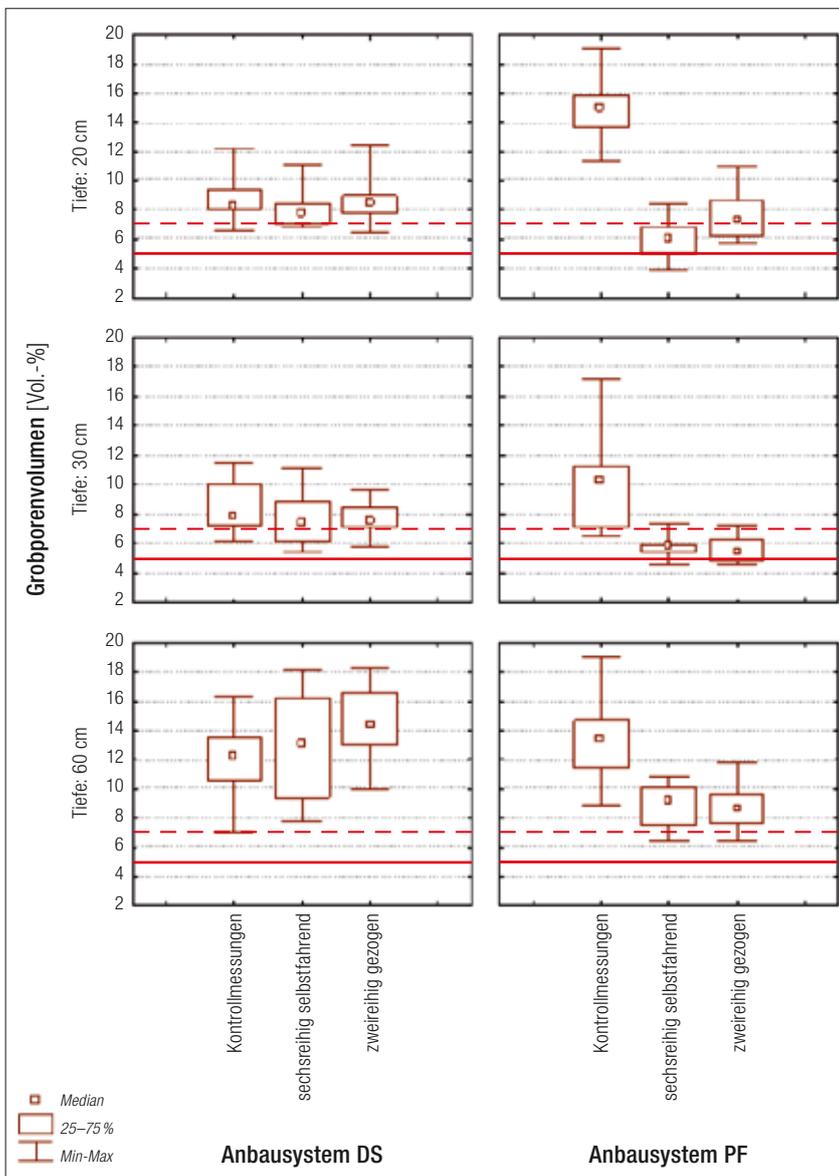


Abbildung 4–6: Grobporovolumen nach den Überfahrten mit den Zuckerrübenernteverfahren «sechsstreihig selbstfahrend» und «zweistreihig gezogen» sowie den unbefahrenen Kontrollmessungen in 20, 30 und 60 cm Bodentiefe für die beiden Anbausysteme Direktsaat (DS) und Pflug (PF); Box-Plot mit Median, Interquartilsdistanz 25–75% sowie Minimum und Maximum; BGS-Richt (---) und Prüfwert (—)

Kasten 4–2: Landwirtschaftliches Umweltziel «Bodenverdichtung» (BAFU und BLW 2008)

Vermeidung dauerhafter Verdichtungen landwirtschaftlicher Böden.

schweren und überbetrieblich eingesetzten Maschinen.

- Da die Bodenfeuchte ein entscheidender Faktor zur Vermeidung von physikalischen Bodenbelastungen ist, wurden 1996 an sechs Standorten im Rahmen der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO) Messstellen zur Erfassung der Saugspannung eingerichtet. Diese Tensiometerwerte sind seither in benutzerfreundlicher Form dreimal wöchentlich aktualisiert unter www.vol.be.ch/lanat/landwirtschaft/



Abbildung 4-7: Durch Holzernte verursachte Fahrspuren

bodenschutz für interessierte Landwirte abrufbar.

- Um auf die Problematik von Bodenverdichtungen aufmerksam zu machen, wurde von der Arbeitsgruppe «Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und Luzern» das Merkblatt «Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht» (2005) erarbeitet.

- Auf eine wendende Bodenbearbeitung kann in den meisten Fällen verzichtet werden. Wird trotzdem eine solche durchgeführt (z. B. im Biolandbau oder im Gemüsebau), ist diese mit Boden schonender Technik (Onland-Pflug) durchzuführen. Die Umstellung auf Boden schonende Anbausysteme ist auch zur Verhinderung von Bodenverdichtungen ins «Förderprogramm Boden Kanton Bern» integriert worden (Kapitel 9). Das durch die exemplarische Untersuchung der zwei Zuckerrübenanbauebenen gewonnene Wissen ist in dessen Konzeption eingeflossen.

- Das Risiko von Bodenschadverdichtungen durch land- und forstwirtschaftliche Maschinen kann mittels des von der SHL erarbeiteten Bodendruck-Berechnungsprogramms TiM (Tryck i Marken) unter www.vol.be.ch/lanat/landwirtschaft/bodenschutz selber abgeschätzt werden.

- Auch Waldböden sind zunehmend in ihren Strukturen durch physikalische Belastungen gefährdet. Insbesondere bei der Holzernte entstehen durch schwere Forstmaschinen bis in den Unterboden reichende Fahrspuren mit deutlich ausgeprägten seitlichen Aufwölbungen (**Abbildung 4-7**, *Lüscher et al. 2009*). Dies wirkt sich nachteilig auf die Funktionen und Leistungen des Waldes aus.

4.3 Bodenbelastung bei Freizeitveranstaltungen

Im Zusammenhang mit Freizeitveranstaltungen jeglicher Art werden im Kanton Bern jährlich einige hundert Hektaren landwirtschaftliche Nutzfläche vorübergehend als Trainings-, Wettkampf-, Parkplatz- oder Festhüttenstandorte genutzt. Diese Aktivitäten können insbesondere

bei nasser Witterung vor, während und nach der Veranstaltung zum Teil massive Bodenbelastungen verursachen. Exemplarisch sollen am Beispiel der Tractor Pulling-Veranstaltung in Niederbipp die Probleme dargestellt werden.



Abbildung 4-8: Bodenverdichtung im Pistenbereich eines Tractor Pulling-Wettkampfes durch Druckbeanspruchung und hohen Schlupf der Antriebsräder

4.3.1 Tractor Pulling

Tractor Pulling ist ein Geschicklichkeitswettbewerb mit dem Ziel, bei vorgegebenem Traktorgewicht möglichst viel Zugkraft auf den Boden zu übertragen. Im Wettkampf wird während eines Wertungsdurchgangs der Zugwiderstand des am Traktor angehängten, speziell konstruierten Bremswagens kontinuierlich erhöht (**Abbildung 4-8**). Mit angepasster Gewichtsverteilung, guter Bereifung, optimalem Reifendruck und geschickter Fahrtechnik wird vom Wettkampfteilnehmer versucht, den stetig steigenden Zugkraftbedarf so lange wie möglich aufzubringen, um nach 100 m mit einem «Full Pull» die volle Distanz abzufahren.

Das «ideale» Übertragen der Zugkraft auf den Boden ist gleichzeitig ein zentrales Anliegen des bewirtschaftungsbedingten Befahrens von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Diesen Aspekt der «guten fachlichen

Praxis» einem einschlägigen Publikum wettbewerbsmässig zu vermitteln, entspricht der Strategie der BSF. Gemäss Strassenverkehrsverordnung (*StrVV 2004, Art. 45*) legt im Kanton Bern das Strassenverkehrs- und Schifffahrtsamt nach Anhörung weiterer Behörden die erforderlichen Bedingungen und Auflagen fest. Seit dem Jahr 2000 werden für Tractor Pulling-Veranstaltungen im Kanton Bern Bewilligungen erteilt, unter der Bedingung, dass das Höchstgewicht für Traktoren von 8 t (ab 2003 11 t) eingehalten wird und der maximale Reifendruck 80 hPa beträgt. Zusätzlich muss der Pistenbereich vor dem Anlass als Wiese genutzt sowie bei Niederschlag abgedeckt werden.

4.3.2 Bodenphysikalische Untersuchungen

Im Jahr 2004 führten die Veranstalter in Niederbipp die so genannte «freie Klasse» mit PS-Zahlen bis 10 000 ein, um die Publikumsattraktivität zu steigern. Verbunden mit dieser Einführung waren unerlaubte Anpassungen im Pistenbereich (Bewässerung, Veränderung des Bodenaufbaus), welche im Jahr 2006 bodenphysikalische Untersuchungen der ART auslösten. Bodenproben wurden parallel aus den Bereichen Fahrerlager, Festhütte und einer vermeintlich unbelasteten, ausschliesslich landwirtschaftlich genutzten Fläche als Referenz entnommen. Anhand von ungestörten Zylinderproben aus dem Ober- und Unterboden wurden an dem schwach humosen sandigen Lehm (20 % Ton und 2.6 % Humus) der Gefügebau und die Gefügestabilität des Bodens untersucht (*Ramseier et al. 2009*).

Die Untersuchung zeigte, dass der Gefügebau im Oberboden des Pistenbereichs nicht primär durch senkrecht einwirkende Druckbelastungen beeinträchtigt wird, sondern hauptsächlich durch den hohen Schlupf der Antriebsräder beim Ziehen des Bremswagens sowie die regelmässig durchgeführten Massnahmen zur Pistenpräparation (Aufeggen und Nivellieren). Die Grobporenvolumina (**Abbildung 4–9**) lagen im Bereich des von der BGS vorgeschlagenen Richtwerts von 7 % oder darunter (*Häusler und Buchter 2004*).

Damit ihre Motorleistung möglichst weitgehend in Zugkraft umgesetzt werden kann, sind die bis zu 11 t schweren Traktoren beim Tractor Pulling überdurchschnittlich gut bereift. Dies führte dazu, dass im Unterboden der Piste trotz der zum Teil sehr hohen Einsatzgewichte, der vielen Überfahrten und der relativ tiefen Saugspannung nur geringe Druckbelastungen gemessen wurden. Wird derselbe Unterboden bei hoher Bodenfeuchte jedoch durch Fahrzeuge mit unangepasster Bereifung befahren, wie dies bei der Untersuchungsfläche Festhütte zwecks Montage und Demontage des Festzelts sowie der Anlieferung von Getränken und Verpflegung

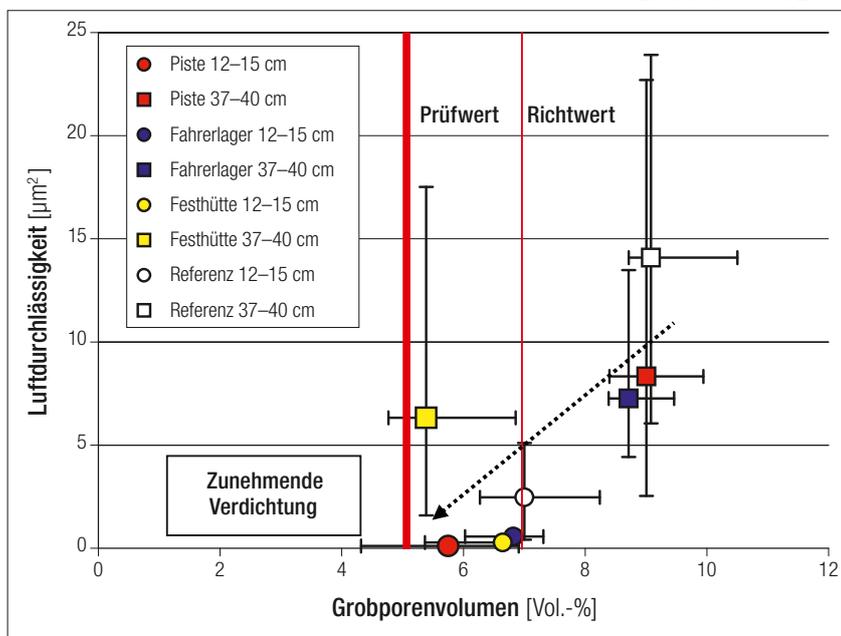


Abbildung 4–9: Darstellung des Grobporenvolumens und der Luftdurchlässigkeit (mit Median und Quartilen) in je zwei Bodentiefen von vier bei den Tractor Pulling-Veranstaltungen in Niederbipp unterschiedlich belasteten Böden. Die Messungen erfolgten bei einer Entwässerung auf 60 hPa (entspricht einem feuchten Bodenzustand).

durch Lastwagen mit Strassenbereifung der Fall war, entstehen Gefügebeeinträchtigungen. Im Gegensatz zum Oberboden ist im Unterboden keine kurzfristige Regeneration zu erwarten. Auf der Fläche des Fahrerlagers sind sowohl der Ober- als auch der Unterboden durch die Freizeitaktivitäten nur unwesentlich beeinträchtigt worden.

Die Tractor Pulling-Veranstaltung in Niederbipp wurde zur Steigerung der Besucherzahlen stetig PS-intensiver gestaltet. Immer grossflächigere Bodenbelastungen waren die Folge. Im Pistenbereich wurde der Gefügebau im Oberboden erheblich beeinträchtigt. Die überdurchschnittlich gute Bereifung der Wettkampffahrzeuge verhinderte jedoch starke Verdichtungen im Unterboden. Zum Teil massive Veränderungen der Bodenstruktur wurden dagegen ausserhalb der Piste festgestellt. Hier führten die nicht angepasste Strassenbereifung der Zulieferfahrzeuge sowie fehlende Bodenschutz-Empfehlungen zu Gefügeschäden im Unterboden.

4.3.3 Schlussfolgerungen

Insgesamt erwiesen sich folgende drei Bodenschutzauflagen als sinnvoll:

- Pisten- und wenn möglich Fahrerlagerbereiche sind aus der Fruchtfolge zu nehmen und dauerhaft zu begrünen.

- Die Piste ist bei Niederschlagsereignissen vor der Veranstaltung mit einer Plastikfolie konsequent abzudecken.
- Für das gesamte Festgelände sind bestenfalls anhand der Bodenkarte vorgängig Abklärungen bezüglich Bodeneigenschaften und allfälliger Schutzmassnahmen zu treffen.

4.3.4 Ausblick

Publikumsintensive Anlässe wie beispielsweise Turnfeste, Open-Air Festivals, Tractor Pulling oder Motocross-Veranstaltungen haben einen grossen Logistik- und Infrastrukturbedarf. Das Merkblatt «Freizeitveranstaltungen auf der grünen Wiese» (2004) soll Veranstalter dabei unterstützen, schwerwiegende Bodenbelastungen zu vermeiden. Basierend auf dem USG und der VBBo sind aus Sicht des Bodenschutzes bei Freizeitveranstaltungen folgende Auflagen einzuhalten:

- Standorte für Festhütten und andere temporäre Anlagen sind durch einen BBB zu überprüfen.
- Das Befahren der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Lastwagen und anderen

nichtlandwirtschaftlichen Fahrzeugen ist konsequent zu vermeiden.

- Das Zeitfenster für die Einhaltung der Auflagen muss um die Dauer des Auf- und Abbaus der Infrastruktur erweitert werden.
- Möglichst alle befestigten Plätze sind in die Abwicklung der Veranstaltung einzubeziehen.
- Beim Individualverkehr ist ein Verkehrskonzept zu erstellen, wobei die Nähe von Veranstaltungen zum überbauten Gemeindegebiet die Möglichkeit erhöht, Personenwagen auf befestigten Flächen abzustellen.
- Bei zweifelhaften Witterungsbedingungen sind Personenwagen nur auf Naturwiesen abzustellen.

Grundsätzlich ist es trotz den geforderten Massnahmen fraglich, ob ÖLN-Beiträge für kurzfristig von Freizeitveranstaltungen beanspruchte, landwirtschaftlich genutzte Flächen gerechtfertigt sind. Zumindest ist die Aufnahme von solchermaßen belasteten Böden in die Direktzahlungs-Kürzungsrichtlinien der Direktzahlungsverordnung (DZV 1998) zu prüfen.

5 Versauerung und Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden im Kanton Bern



Peitschenmoos-Fichten-Tannenwald

5 Versauerung und Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden im Kanton Bern

Der Wald leidet seit Jahren unter übermässigen Stickstoff-Einträgen. Im Kanton Bern werden die kritischen Eintragswerte (Critical Loads) für Stickstoff fast flächendeckend überschritten. Dies führt im Waldboden zu einer massiv beschleunigten Versauerung: Schwermetalle sind leichter löslich, Nährstoffe werden gegen toxisches Aluminium (Al) ausgetauscht und zusammen mit dem überschüssigen Nitrat ins Trinkwasser ausgewaschen. Mangelernährte Bäume liefern weniger Holz, werden krank und anfällig für Windwurf.

Eine Mehrheit der 238 untersuchten Waldböden ist stark bis sehr stark versauert. Viele Böden liegen auf karbonatarmem Muttergestein und sind deshalb natürlicherweise bereits stark entkarbonatet. Diese weisen bereits heute eine eingeschränkte Nährstoffverfügbarkeit und ein grosses Risiko für eine Aluminium-Toxizität auf. Insgesamt konnten nur 27 % der untersuchten Standorte als problemlos erkannt werden, 44 % zeigten gewisse Risiken bezüglich einer weiteren Versauerung und 29 % wurden als kritisch eingestuft.

Eine übermässige Anreicherung von Schwermetallen kann bei Pflanzen und Mikroorganismen zu toxischen Effekten führen und ebenfalls die Bodenfruchtbarkeit gefährden. Gut ein Viertel der 108 untersuchten Waldböden zeigt erhöhte Werte oder Richtwertüberschreitungen von mindestens einem Element, wobei zwei Drittel auf geogene und pedogene Prozesse zurückzuführen sind und ein Drittel auf atmogene Emissionen vor allem von Blei. Die Mehrheit der Standorte weist ein hohes Risiko für eine Schwermetallauswaschung auf, was bei zunehmender Versauerung und atmogenem Eintrag zu einer Belastung des Trinkwassers führt.

Mit verschiedenen Massnahmen in den Bereichen Luftreinhaltung und Landwirtschaft müssen die Stickstoff-Emissionen in Zukunft gesenkt werden.

Im Kanton Bern sind rund 31 % der Gesamtfläche oder 184 000 ha Wald und Gehölze (BFS 1997). Mit dem Forstpolizeigesetz von 1876 (*heute Waldgesetz, WaG 1991*) besteht seit weit über 100 Jahren eine wirkungsvolle Grundlage, diese Fläche in ihrer quantitativen Ausdehnung zu erhalten. Zu Beginn der 1980er Jahre rückte mit dem Begriff «Waldsterben» europaweit die Waldgesundheit in den Vordergrund: Auch in der Schweiz wurden vielerorts neuartige Waldschäden beobachtet und intensive Diskussionen darüber geführt, ob Luftimmissionen wie Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x) zu saurem Regen und zu den damals festgestellten Kronenverlichtungen

bzw. Verfärbungen bei Fichtennadeln und Buchenblättern führten. Auf politischer Ebene wurden Massnahmen zur Reduktion des Schadstoffeintrags beschlossen (*Luftreinhalteverordnung 1985, Reduktion von Schwefel im Heizöl und Blei im Benzin*).

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) erfasst und beurteilt ab 1984 mit der jährlich durchgeführten Sanasilva-Inventur den Gesundheitszustand sowie die langfristige Entwicklung der Waldbäume anhand des Blatt- bzw. Nadelverlustes. Im gleichen Jahr richtete das Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) im Auf-

trag verschiedener Deutschschweizer Kantone – darunter auch der Kanton Bern – Dauerbeobachtungsflächen zur Untersuchung der Waldschäden ein.

Alleine mit dem Parameter der Kronenverlichtung vermochte die WSL weder den Gesundheitszustand des Waldes als solchen noch die Ursachen dafür genau zu beurteilen. Deshalb richtete die Forschungsanstalt 1994 im Rahmen einer europaweiten Zusammenarbeit 18 über die ganze Schweiz verteilte Forschungsflächen ein. Mit diesen LWF-Flächen (Langfristige Waldökosystem Forschung) können detaillierte Daten zum Gesundheitszustand des Waldes erhoben sowie die Wirkungszusammenhänge der diversen schädlichen Einflussfaktoren herausgearbeitet werden. Sowohl die WSL als auch das IAP richten damit ihren Forscherblick zunehmend weg vom Baum-

bestand hin zum Waldboden und untersuchen vermehrt Bodenparameter. Dies soll zu Erkenntnissen über den Stoffumsatz der Böden unter dem Einfluss der Luftimmissionen führen. Insbesondere der seit Jahren übermässige Eintrag von Stickstoff-Verbindungen (Kapitel 6) wird dabei von beiden Institutionen als für den Boden relevant erkannt.

Steht fest oder ist zu erwarten, dass in bestimmten Gebieten die Belastungen des Bodens die Bodenfruchtbarkeit gefährden, so sorgen die Kantone gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) für eine Überwachung. Diese Bestimmung führte zu zwei Untersuchungen, welche gemeinsam von der WSL und der Bodenschutzfachstelle (BSF) durchgeführt wurden und im Folgenden vorgestellt werden.

5.1 Bodenversauerung

5.1.1 Versauerungsprozess

Die meisten Böden im Kanton Bern bildeten sich seit der letzten Eiszeit vor rund 10000 Jahren aus zuerst weitgehend unverwittertem Muttergestein. Je nach Gesteinsart hat der Versauerungsprozess bei einem unterschiedlichen pH-Wert begonnen und verlief seither – beeinflusst auch durch die anderen Bodenbildungsfaktoren – zeitlich variabel.

Der pH-Wert ist einer von verschiedenen Parametern zur Charakterisierung der Versauerung (Anhang I). Er ist indirekt das Mass der Protonenkonzentration im Boden und ein bedeutender Standortfaktor für Pflanzen und Bodenlebewesen. Er beeinflusst viele chemische Prozesse im Boden, insbesondere die Nährstoffverfügbarkeit. In einem sauren Boden mit tiefem pH-Wert vermag der Austausch (Kasten 5–1) kaum mehr basische Kationen wie Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalium (K^+) oder Natrium (Na^+) zu binden. Diese für Pflanzen wichtigen Nährstoffe werden in erster Linie durch das saure Kation Aluminium (Al^{3+}) ersetzt, welches bei zu hoher Konzentration für sensitive Pflanzen toxisch wirken kann.

Die fortlaufende Abnahme des pH-Werts ist in offenen Ökosystemen wie dem Wald ein langsam verlaufender Prozess. Dieser kann jedoch durch anthropogen verursachte Deposition massiv beschleunigt werden. Insbesondere ein zu hoher Eintrag von Stickstoff-Verbindungen führt in Waldböden zu einer Anreicherung von Protonen, sofern der eingetragene Stickstoff nicht durch Pflanzen oder Mikroorganismen aufgenommen, sondern in Form von Nitrat-Stickstoff wieder ausgewaschen wird. Gleichzeitig kommt es – zur Wahrung der Elektroneutralität – zu einer Auswaschung von

Kasten 5–1: Austauscher

Die an der Teilchenoberfläche (am sog. Austauscher) gebundenen Ionen, können durch andere, gleichsinnig geladene Ionen aus der Bodenlösung ersetzt werden. Dieser Vorgang ist reversibel und wird Ionenaustausch genannt. Besitzt der Austauscher eine negativ geladene Oberfläche (z. B. Tonmineralien), werden Kationen (positiv geladene Ionen wie Ca^{2+} oder Mg^{2+}) ausgetauscht, und man spricht von einem Kationenaustauscher.

(basischen) Kationen, womit Nährstoffe verloren gehen (Anhang I).

Die Versauerung eines Bodens ist grundsätzlich ein natürlicher Prozess. Stickstoff-Einträge, verursacht durch menschliche Aktivitäten, beschleunigen diesen erheblich. Je saurer ein Boden, desto weniger sind die für Pflanzen lebensnotwendigen Nährstoffe verfügbar. Zudem wird toxisches Aluminium freigesetzt und so die Vegetation und das Bodenleben geschädigt.

5.1.2 Versauerung forstwirtschaftlich genutzter Böden

Die WSL hat eine Übersicht zum Säurestatus der Berner Waldböden sowie dessen Dynamik bezüglich einer weiteren pH-Abnahme erarbeitet (Zimmermann 2009). Als Grundlage dazu diente die hauseigene Pedothek. Innerhalb des Kantons Bern wurden im Rahmen verschiedener Projekte an 238 Waldstandorten Bodenprofile geöffnet, beschrieben und horizontspezifisch Bodenmaterial für chemische Analysen (pH-Wert und austauschbare Kat-

ionen) entnommen. Der grösste Teil des umfassenden Datenmaterials (206 Profile) stammte aus den von 1991 bis 1994 im Kanton Bern durchgeführten Arbeiten zum standortkundlichen Kartierungsschlüssel an vegetationskundlich ausgewählten Waldstandorten (*Amt für Wald und Natur des Kantons Bern und Kantonsforstamt des Kantons Freiburg 1995*).

a. Status und Dynamik der Versauerung

An insgesamt 1399 morphologisch unterscheidbaren Mineralbodenhorizonten wurden der pH-Wert sowie die austauschbaren sauren und basischen Kationen bestimmt.

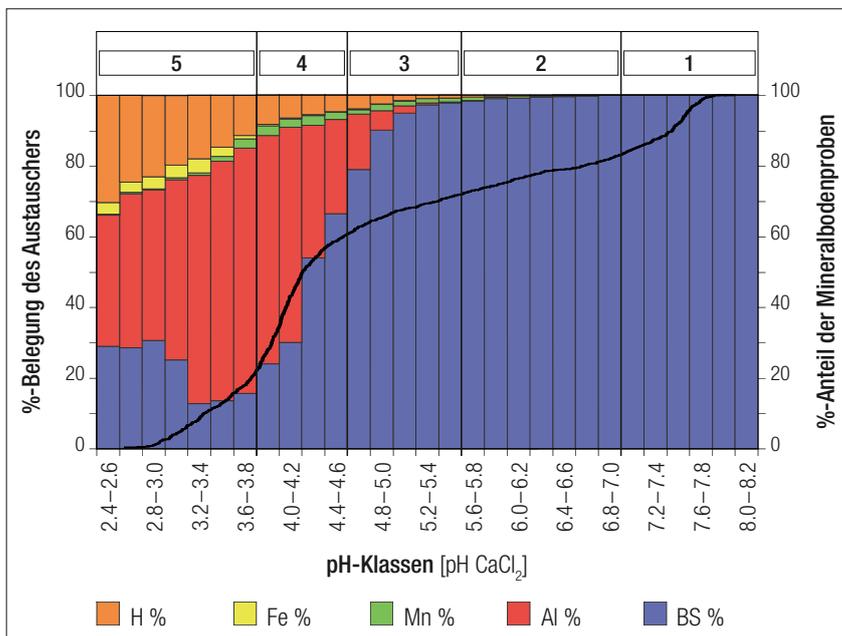


Abbildung 5-1: Mittlere prozentuale Belegung des Austauschers mit Al³⁺, Fe³⁺, Mn²⁺ und Protonen (H⁺) und mittlere Basensättigung (BS) von 1399 Mineralbodenproben (linke y-Achse) gruppiert nach Klassen von 0.2 pH-Einheiten (x-Achse). Dem Säulendiagramm ist die kumulative Häufigkeitsverteilung der pH-Werte überlagert (rechte y-Achse).

Aufgrund der Verteilung der gemessenen pH-Werte und der jeder Gruppe entsprechenden mittleren Besetzung des Austauschers mit Kationen (**Abbildung 5-1**) können die Horizonte in fünf Säureklassen (Pufferbereiche) eingeteilt werden (**Tabelle 5-1**). Dabei liefert die kumulative Häufigkeitsverteilung der pH-Werte Informationen über die Puffereffizienz, und die vorhandenen austauschbaren Kationen widerspiegeln die vorherrschenden Pufferreaktionen.

In jeder der fünf Säureklassen dominiert bei einem Protoneneintrag eine bestimmte Pufferreaktion, welche die Protonen neutralisieren kann. Dabei wird eine zusätzliche Abnahme des pH-Werts so lange verhindert (gepuffert), bis die an der Reaktion beteiligte Puffersubstanz (in der Säureklasse 1 ist es Kalk) aufgebraucht ist oder der laufende Protoneneintrag die Pufferrate (Puffergeschwindigkeit) übersteigt. Die Pufferung der Protonen wird damit durch das Vorhandensein einer Puffersubstanz und durch die Pufferrate bestimmt und insbesondere in den Säureklassen 2 und 3 auch limitiert. Die pH-Werte der morphologisch unterscheidbaren 1399 Mineralbodenhorizonte konzentrieren sich deutlich auf die Säureklassen mit grosser Puffereffizienz (**Tabelle 5-1**). Die beiden Säureklassen 2 und 3 bilden Übergangszustände, welche die einzelnen Mineralbodenhorizonte während der Bodenbildung schnell durchlaufen, was an der flach verlaufenden Kurve der kumulativen Häufigkeitsverteilung von **Abbildung 5-1** sichtbar ist.

Innerhalb eines Bodenprofils können sich die Bodeneigenschaften über die einzelnen Mineralbodenhorizonte sehr stark verändern. Bevor die Böden der 238 Profilstandorte als ganze Einheit klassiert werden konnten, musste der pH-Wert eines jeden Mineralbodenhorizonts mit dem jeweiligen Anteil an Feinerde (Horizontvolumen abzüglich Volumen des Skelettgehalts) gewichtet werden. Diese Gewichtung führte zum mittleren pH-Wert, mit welchem jeder Standort einem der fünf Säureklassen

Tabelle 5-1: Definition der Säureklassen mit den entsprechenden dominanten Pufferreaktionen und -effizienzen sowie die kumulative Häufigkeitsverteilung der Mineralbodenhorizonte (n = 1399)

Säureklasse	pH-Bereich [CaCl ₂]	dominante Pufferreaktion	Puffer-effizienz	kumulative Häufigkeitsverteilung der Mineralbodenhorizonte [%]
1	> 7.00	Karbonatverwitterung	gross	17
2	5.61 – 7.00	Protonierung variabler Ladungen sowie Silikatverwitterung	gering	11
3	4.61 – 5.60	Protonierung variabler Ladungen, Silikatverwitterung und beginnende Auflösung von Aluminium-Verbindungen	gering	11
4	3.81 – 4.60	Auflösung von Aluminium-Verbindungen	gross	35
5	< 3.80	Protonierung organischer Substanz und Auflösung von Aluminium- bzw. Eisenverbindungen	mittel	26

von **Tabelle 5–2** zugeordnet werden konnte. Insgesamt wurde bei 148 der untersuchten 238 Waldstandorte der Säurestatus stark bis sehr stark sauer festgestellt. Im Vergleich zu einer gesamtschweizerischen Untersuchung (*Blaser et al. 2008a*) sind im Kanton Bern die stark bis sehr stark sauren Böden übervertreten, vermutlich weil hier überdurchschnittlich viele Böden auf karbonatarmen Muttergesteinen wie Molassesanden und Moränen liegen, welche natürlicherweise bereits stark entkarbonatet sind.

Bevor die Säuredynamik im Verlauf der bisherigen und der zukünftigen Bodenbildung abgeschätzt werden konnte, mussten zusätzlich zum oben diskutierten Säurestatus die beiden folgenden Überlegungen zum Verhalten bodenchemischer Abläufe angestellt werden. Die Bodenversauerung beginnt mit der Auflösung von Karbonaten zur Pufferung der Protonen und schreitet gemäss den beschriebenen Pufferreaktionen von der Profilloberfläche nach unten bzw. von Säureklasse 1 bis 5 fort. Für Böden auf karbonathaltigem Muttergestein wird demzufolge der pH-Wert zu Beginn der Bodenbildung im alkalischen Bereich (Säureklasse 1) gelegen haben; auf karbonatfreiem Muttergestein hingegen lag der ursprüngliche pH-Wert vermutlich im schwach sauren Bereich der Säureklasse 2. Diese erste Überlegung ermöglicht die Berechnung von sogenannten pH-Gradienten, welche sich aus der Differenz zwischen dem tiefsten im Bodenprofil festgestellten pH-Wert sowie dem geschätzten pH-Wert zu Beginn der Bodenbildung ergeben und damit Aussagen über die bereits abgelaufene Säuredynamik zulassen. Ebenfalls charakteristisch für die Säuredynamik ist die prozentuale Belegung des Austauschers mit sauren Kationen (Al^{3+} , Fe^{3+} und Mn^{2+}) sowie mit Protonen (**Abbildung 5–1**). Die Bodenversauerung gilt als umso weiter fortgeschritten, je stärker die Basensättigung (BS, **Kasten 5–2**) abgenommen hat.

Die Beurteilung der während der Bodenbildung durchlaufenen Säuredynamik unter Einbezug des pH-Gradienten und der BS nach dem hier nicht erläuterten Klassierungsschema von Zimmermann (2009) zeigt, dass Standorte auf karbonatfreiem Muttergestein stärker versauern als jene auf karbonathaltigem: Sind von den acht Profilen auf karbonatfreiem Muttergestein sieben stark bis sehr stark versauert, ist die Versauerung auf karbonathaltigem Muttergestein nur bei 103 der 230 Standorte stark oder sehr stark fortgeschritten.

Die Säuredynamik eines Bodenprofils, mit welcher bei einem andauernden Protoneneintrag in Zukunft gerechnet werden kann, steht ebenfalls in Abhängigkeit zum Säurestatus des Bodens. Dabei bestimmt der Anteil an Feinerde (Horizontmächtigkeit) in den beiden Säureklassen mit geringer Puffereffizienz (d. h. in den Säureklassen 2 und 3) die Empfindlich-

Tabelle 5–2: Klassierung und Definition des Säurestatus ganzer Bodenprofile (n = 238) sowie Anzahl Standorte in diesen Klassen

Säurestatusklasse ganzer Bodenprofile	Definition der Säurestatusklasse ¹ (gemäss den Säureklassen von Tab. 5-1)	Anzahl Standorte
alkalisch	100 % der Feinerde in Säureklasse 1	13
schwach sauer	tiefster pH-Wert in Säureklasse 2 oder 3	55
mässig sauer	tiefster pH-Wert (jedoch < 50 % der Feinerde) in Säureklasse 4	22
stark sauer	tiefster pH-Wert (jedoch > 50 % der Feinerde) in Säureklasse 4; oder tiefster pH-Wert (jedoch < 50 % der Feinerde) in Säureklasse 5	133
sehr stark sauer	> 50 % Feinerde in Säureklasse 5	15

¹ Die Definition berücksichtigt bei jedem Standort das ganze Profil und wurde nach den Volumenanteilen der Feinerde der einzelnen Horizonte (Horizontvolumen abzüglich Volumen des Skeletts) gewichtet.

Kasten 5–2: Basensättigung (BS)

In alkalischen bis schwach sauren Böden überwiegen die basischen Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und Na^+), während in stark sauren Böden Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} und H^+ dominieren. Die Basensättigung ist der prozentuale Anteil der im Boden vorhandenen basischen Kationen an der KAK (Kasten 5–3) und damit die relative Belegung des Austauschers (Kasten 5–1) mit basischen Kationen.

keit für eine weitere Abnahme des pH-Werts. Bei 135 Standorten wurde kein Mineralbodenhorizont im empfindlichen pH-Bereich festgestellt. Folglich unterliegen diese Standorte keiner grossen Säuredynamik, und die Empfindlichkeit einer weiteren pH-Abnahme ist gering, da an diesen Standorten entweder die Mineralbodenhorizonte mit geringer Puffereffizienz (Säureklassen 2 und 3) bereits passiert worden sind (112 Standorte) oder sich immer noch im Karbonatpufferbereich der Säureklasse 1 befinden (17 Standorte). Hingegen konnte bei 103 Standorten mindestens ein Mineralbodenhorizont im sensitiven Bereich festgestellt werden. Aufgrund des jeweiligen Anteils an Feinerde (Horizontmächtigkeit) im kritischen Bereich wird bei 44 dieser Standorte die Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme als gross bis sehr gross beurteilt.

Bei Böden auf karbonatfreiem Muttergestein ist die Versauerung weiter fortgeschritten als bei jenen auf karbonathaltigem. Nur wenige der 238 untersuchten Profile können künftig eingetragene Säuren erfolgreich neutralisieren. Etwas weniger als die Hälfte der Standorte ist bereits sehr sauer und reagiert darum nicht mehr empfindlich. An 44 Standorten wird der pH-Wert bei andauerndem Säureeintrag jedoch rasch weiter abnehmen.

Kasten 5–3: Kationenaustauschkapazität (KAK)

Von der gesamten im Boden vorhandenen Nährstoffmenge (Ionen) befindet sich jeweils nur ein sehr geringer Teil in der Bodenlösung. Der Grossteil belegt den Austauscher, welcher somit als Nährstoffreservoir dient. Die maximal am Austauscher reversibel austauschbare Ionenmenge ist die Austauschkapazität ($\text{mmol}_c\text{m}^{-2}$). Die Summe der am Austauscher gebundenen Kationen bezeichnet man als Kationenaustauschkapazität.

b. Status und Dynamik von BS und KAK

Neben dem pH-Wert können auch die BS und die Kationenaustauschkapazität (KAK, **Kasten 5–3**) zur Charakterisierung des Säurestatus beigezogen werden. Mit den in **Abbildung 5–1** dargestellten Analysewerten der 1399 morphologisch unterscheidbaren Mineralbodenhorizonte kann bei der Säureklasse 4 eine sehr deutliche Abnahme der mittleren BS von 90 % auf 15 % und gleichzeitig eine massive Zunahme der Al^{3+} -Belegung am Austauscher von 6 % auf 70 % festgestellt werden.

Entsprechend dem Vorgehen bei der Erfassung des Säurestatus wurden bei der Klassierung der BS und der KAK alle Mineralbodenhorizonte eines Profils berücksichtigt. Dazu wurde ebenfalls für beide Parameter der jeweilige Wert mit dem entsprechenden Anteil an Feinerde (Horizontmächtigkeit) gewichtet. Die Gewichtung führte zur mittleren totalen Basensättigung (TBS) und zur mittleren totalen Kationenaustauschkapazität (TKAK). Beide Parameter konnten anschliessend zu fünf Statusklassen gruppiert werden (**Tabelle 5–3**). Je saurer ein Boden, desto tiefer sind die TBS und TKAK, und desto stärker wird im Ökosystem Wald die Verfügbarkeit der für die pflanzliche Ertragsbildung äusserst wichtigen basischen Kationen eingeschränkt sein. Ein tiefer bis sehr tiefer Status der BS wurde bei 25, bei der KAK gar bei 96 Standorten festgestellt. Demgegenüber konnten zwei Drittel (BS) bzw. ein Drittel (KAK) der Standorte in einer

hohen bis sehr hohen Klasse eingeteilt werden (**Tabelle 5–3**).

Um die Dynamik der BS zu erfassen, gelten als chemische Indikatoren pH-Werte zwischen 3.8 und 5.6 (Säureklassen 3 und 4) sowie eine BS zwischen 5 % und 95 % als Bereiche mit schnell ablaufenden Veränderungen (**Abbildung 5–1**). Da die BS jedoch eine relative Grösse ist, kann ihre Dynamik nur indirekt über die KAK erfasst werden: Die Empfindlichkeit für eine Abnahme der BS ist umso kleiner, je höher die KAK (Bei einer hohen KAK ist ein grösserer Protoneneintrag notwendig, um eine Abnahme der BS zu bewirken.) und je geringer der Anteil an Feinerde mit einer tiefen KAK ist. Die Zuordnung erfolgte nach dem hier nicht dargestellten Klassifikationsschema von Blaser et al. (2008b). Bei 148 Standorten ist die Empfindlichkeit für eine weitere Abnahme der BS gering bis nicht vorhanden. Hingegen wird bei 53 der 238 Standorte die Empfindlichkeit für eine weitere Abnahme der BS als hoch bis sehr hoch eingestuft.

Der Säurestatus eines Bodens kann ebenfalls mit der Anzahl Austauscherplätze (KAK) und deren Belegung mit für Pflanzen notwendigen basischen Nährstoffen (BS) charakterisiert werden. Zwei Drittel der untersuchten 238 Profile weisen eine hohe bis sehr hohe BS auf, ein Drittel eine hohe bis sehr hohe KAK. Demgegenüber werden 53 Standorte sehr empfindlich reagieren, wenn sich die Nährstoffspeicherung bei weiterem Säureeintrag verschlechtert.

c. Risiko für Aluminium-Toxizität

Potenziell toxische Effekte von Aluminium auf sensitive Pflanzen werden vielfach mit einem ungünstigen BC/Aluminium-Verhältnis in der Bodenlösung in Verbindung gebracht, wobei BC die Summe der basischen Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ ist. Ein BC/Aluminium-Verhältnis von < 0.2 am Kationenaustauscher bewirkt erfahrungsgemäss ein entsprechendes Verhält-

Tabelle 5–3: Klassierung des Status von Basensättigung (BS) und Kationenaustauschkapazität (KAK) ganzer Bodenprofile sowie Definition der Klassen von mittlerer totaler Basensättigung (TBS) und mittlerer totaler Kationenaustauschkapazität (TKAK), jeweils ergänzt mit dem Standardfehler des berechneten Mittelwerts und der Anzahl Standorte in diesen Klassen (n = 238)

Statusklassen von BS und KAK ganzer Bodenprofile	Definition der TBS-Klassen	berechnete mittlere TBS ¹	Anzahl Standorte pro BS-Statusklasse	Definition der TKAK-Klassen	berechnete mittlere TKAK ¹	Anzahl Standorte pro KAK-Statusklasse
	[%]	[%]		$[\text{mmol}_c\text{m}^{-2}]$	[%]	
sehr hoch	> 85	96.9 ±0.4	104	> 250	304 ±21.0	17
hoch	50.1–85	67.7 ±1.2	59	150–250	186 ±3.0	60
mittel	15.1–50	30.2 ±1.4	50	100–150	126 ±1.8	65
tief	5.1–15	9.3 ±0.6	20	50–100	75 ±1.6	76
sehr tief	≤ 5	3.9 ±0.3	5	≤ 50	34 ±2.1	20

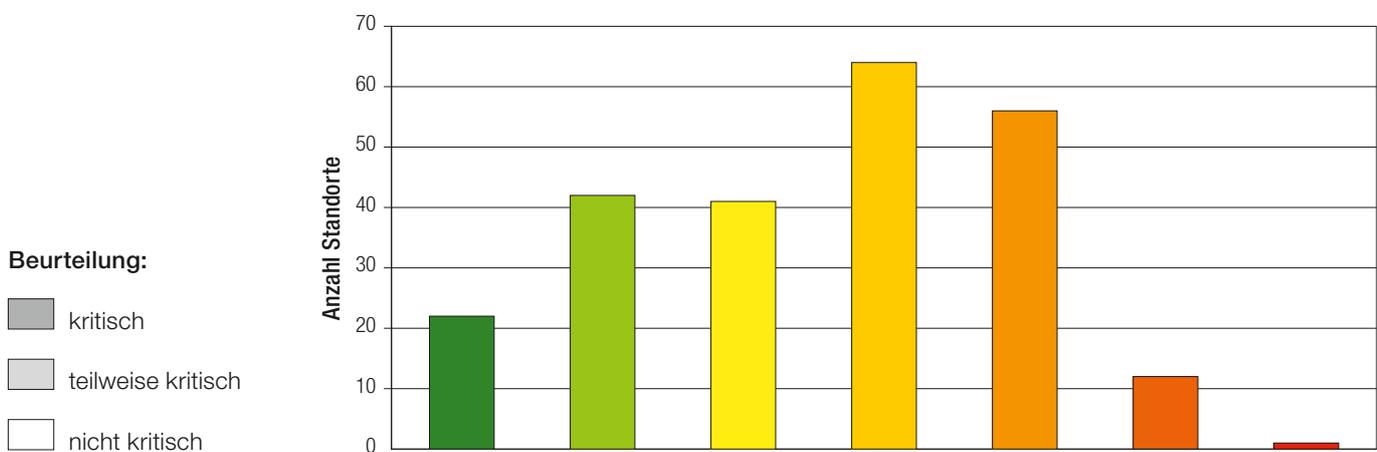
¹ Die TBS- bzw. TKAK-Berechnung berücksichtigt bei jedem Standort das ganze Profil und wurde nach den Volumenanteilen der Feinerde (Horizontmächtigkeiten) gewichtet.

nis in der Bodenlösung von < 1 und wird deshalb als kritisch für das Feinwurzelwachstum von sensitiven Pflanzen angesehen (Zimmermann 2009).

Bei 126 der 238 beprobten Standorte liegt das BC/Aluminium-Verhältnis in keinem der morphologisch unterscheidbaren Mineralbodenhorizonte tiefer als der kritische Wert. Diese Böden weisen dementsprechend kein Risiko für eine Aluminium-Toxizität auf. Demgegenüber konnte an 112 Standorten ein Risiko einer Aluminium-Toxizität bei mindestens einem Mineralbodenhorizont festgestellt werden. Davon weisen 52 Standorte bei prozentual mehr als zwei Drittel der im Profil vorhandenen Feinerde ein BC/Aluminium-Verhältnis unterhalb der kritischen Grenze von 0.2 auf. Damit ist das

Risiko für eine Aluminium-Toxizität bei diesen 52 der 238 Standorte bereits heute vorhanden und wird bei einem weiteren Protoneneintrag mit grosser Wahrscheinlichkeit noch weiter zunehmen. Insbesondere Standorte auf karbonatfreiem Muttergestein neigen zu einem grossen Risiko für eine Aluminium-Toxizität.

Herrscht im Boden ein ungünstiges Verhältnis zwischen basischen Nährstoffen und Aluminium, wird Aluminium durch die Vegetation aufgenommen. Bei empfindlichen Pflanzen kann dies zu Vergiftungserscheinungen führen. Heute ist die Gefahr von Aluminium-Schäden bereits an 52 der 238 untersuchten Standorte gegeben. Bei fortschreitender Versauerung wird dieses Risiko zunehmen.



Anzahl Standorte (n = 238) (Anteil in Prozent)	22 (9.3 %)	42 (17.7 %)	41 (17.2 %)	64 (26.9 %)	56 (23.5 %)	12 (5.0 %)	1 (0.4 %)
Statuskriterien							
pH-Wert	alkalisch		alkalisch bis mässig sauer	mässig bis sehr stark sauer	meist sehr stark sauer	sehr stark sauer	
Basensättigung	sehr hoch		hoch bis sehr hoch	hoch	mittel	tief bis sehr tief	
Kationenaustauschkapazität	hoch bis sehr hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch	tief bis hoch	tief	tief bis sehr tief	sehr tief
Dynamische Kriterien							
Empfindlichkeit für eine Abnahme des pH-Werts	sehr geringe bis keine	geringe, an wenigen Standorten hohe	rund 50 % der Standorte geringe, 50 % hohe	oft keine	keine (pH bereits zu tief)		sehr hohe
Empfindlichkeit für eine Abnahme der Basensättigung	keine	sehr geringe	geringe bis keine	meist hohe	mässige	hohe	sehr hohe
Aluminium-Toxizität							
Risiko Aluminium-Toxizität	kein Risiko		meist kein Risiko	kein bis mässiges Risiko	mässiges bis grosses Risiko	grosses Risiko	

Abbildung 5-2: Zusammenstellung der von Zimmermann (2009) vorgenommenen Gesamtbeurteilung aller sechs diskutierten Beurteilungskriterien sowie Gruppierung der 238 Waldstandorte in sieben Klassen (grün = Standorte ohne Kriterien im kritischen Bereich, rot = Standorte mit allen Kriterien im kritischen Bereich)

d. Gesamtbeurteilung der Bodenversauerung forstwirtschaftlich genutzter Böden

Die in mehreren Einzelschritten ausgearbeiteten sechs Kriterien (drei Statuskriterien, zwei dynamische Kriterien und das Risiko der Aluminium-Toxizität) zur Beurteilung von Waldböden werden abschliessend zu einer Gesamtübersicht zusammengefasst. Dies ermöglicht eine überblicksartige Darstellung und Diskussion sämtlicher im Rahmen der Untersuchung geprüften Risiken (**Abbildung 5–2**).

Die Gruppierung der Waldstandorte nach den sechs Kriterien gleicht einer Normalverteilung. Lediglich 27 % der Standorte weisen bei keinem der Untersuchungskriterien ein Risiko auf. Bei allen übrigen Standorten wurde mindestens ein Untersuchungskriterium als nicht optimal beurteilt. Diese Standorte können folgendermassen unterteilt werden: 44 % der Standorte weisen (noch) keine oder nur kaum Statuskriterien im kritischen Bereich auf. Dennoch liegen bei diesen Standorten die dynamischen Kriterien im kritischen Bereich. Damit besteht das Risiko einer Abnahme von BS bzw. des pH-Werts, womit die Gefahr einer ungenügenden Nährstoffversorgung der Pflanzen steigt, sofern der Protoneneintrag nicht reduziert werden kann. 29 % der Standorte weisen Statuskriterien sowie dynamische Kriterien im kritischen Bereich auf. An diesen Standorten muss mehrheitlich mit einem Risiko für pflanzentoxisches Aluminium gerechnet werden, und es besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Bodenfruchtbarkeit bei anhaltend grosser Säurebelastung beeinträchtigt wird. Die Bodenfruchtbarkeit kann im Wald mit der Fähigkeit, sich nachhaltig natürlich zu verjüngen, definiert werden. Sobald die Versauerung so weit fortgeschritten ist, dass pflanzentoxisches Aluminium zu Schädigungen an den Wurzeln von Sämlingen führt, ist eine erfolgreiche Keimung und Etablierung junger Waldbäume nicht mehr gewährleistet und damit die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt. Dies wird vor allem an jenen Standorten der Fall sein, die wenige gelöste organische Substanzen oder andere Komplexbildner im Boden besitzen, welche potenziell toxisches Aluminium binden und damit detoxifizieren können. Wie viele der 52 Standorte mit grossem Risiko für Aluminium-Toxizität diese Voraussetzungen besitzen, sollte genauer untersucht werden.

Die Untersuchung an 238 vorwiegend nach vegetationskundlichen Kriterien ausgewählten Waldstandorten zeigt, dass die Mehrheit der Flächen auf einen weiteren Säureeintrag und die damit verbundenen Folgen empfindlich reagiert. Im Kanton Bern befinden sich relativ viele Waldstandorte auf stark entkarbonatetem Muttergestein wie Molassesanden und kalkarmen Mischgesteinsmoränen. Diese neigen bei fortgeschrittener Bodenbildung natürlicherweise zu tiefen pH-Werten. In

der Gesamtbeurteilung werden lediglich 27 % der Standorte als risikofrei eingestuft. 44 % dagegen weisen ein Risiko für eine Abnahme des pH-Werts oder der BS auf, und 29 % der Standorte sind so stark versauert oder weisen so geringe BS auf, dass sie der Vegetation keine idealen Wachstumsbedingungen mehr bieten.

5.1.3 Auswirkungen der Versauerung

Die an 238 Waldstandorten durchgeführten Untersuchungen stützen sich auf einmalige, allerdings sehr umfangreiche Probenahmen. Die daraus erzielten Resultate können daher nur als einmalige Zustandserfassung interpretiert werden und erlauben weder eine räumliche noch eine zeitlich genaue Extrapolation.

Demgegenüber untersucht das IAP seit 1984 im Rahmen einer Dauerbeobachtung 133 Waldstandorte. 18 Standorte liegen im Kanton Bern, die restlichen in den Kantonen AG, BL, BS, FR, SO, TG, ZG und ZH. Das IAP konnte dank zeitlich verschoben und wiederholt durchgeführten Beprobungen eine effektiv zunehmende Versauerung auf Waldstandorten nachweisen (*IAP 2009*): Der pH-Wert nahm innerhalb einer Untersuchungsperiode von neun Jahren in kalkfreien Bodenschichten (0 bis 40 cm) um durchschnittlich 0.11 Einheiten ab, die BS um 5.3 %. 23 von 38 auf Aluminium-Toxizität hin untersuchte Flächen zeigen zudem eine Abnahme des BC/Aluminium-Verhältnisses. Bei 32 % der Böden wird die Fähigkeit, Säuren zu puffern, als eingeschränkt beschrieben, und es konnte nachgewiesen werden, dass die stark sauren Bodenverhältnisse zu geringen Regenwurmdichten führen.

Als Ursache wurde insbesondere der zu hohe Stickstoff-Eintrag in Waldflächen erkannt (*IAP 2009*), weshalb das Institut parallel zur Wald-dauerbeobachtung auch Stickstoff-Düngungsversuche durchführte (*IAP 2008*). **Tabelle 5–4** zeigt die im Zusammenhang mit einem erhöhten Stickstoff-Eintrag beobachteten Veränderungen und deren Auswirkungen.

Auch im Kanton Bern ist der Eintrag von Stickstoff in Wälder zu hoch. Die kritischen Eintragswerte (Critical Loads) – festgelegt im Göteborg-Protokoll (*UNECE 1999*), das im Jahr 2005 auch von der Schweiz ratifiziert wurde – sind heute auf fast allen Waldflächen selbst an quellenfernen Standorten überschritten (Kapitel 6). Rund zwei Drittel dieser Stickstoff-Depositionen gelangen in Form von Ammoniak aus der Landwirtschaft in die Atmosphäre, und davon gelangt ein Teil in die Wälder (*beco 2005*). Im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Flächen hat dies auf Waldstandorten eine umso gravierendere Wirkung, als hier die durch Stickstoff-Einträge beschleunigte Versauerung aufgrund

Tabelle 5–4: Die im Boden und in den Pflanzen bei Stickstoff-Düngung beobachteten Veränderungen sowie Auswirkungen auf den Zustand des Ökosystems Wald (IAP 2008)

	Beobachtung	Bedeutung	Auswirkungen
Boden	Versauerung: Abnahme pH-Wert, Basensättigung und BC/Al-Verhältnis	erhöhter Austausch von Ca und Mg durch toxisches Al und Mn, Auswaschung der Nährstoff-Ionen und Nitrat; erhöhte Gefahr für Verlagerung und Aufnahme von Schwermetallen	Nährstoffverlust; erhöhte Aufnahme von toxischem Al und Mn, aber nicht bei allen Baumarten (Baumartenselektion); natürliche Verjüngung eingeschränkt durch reduzierte Keimfähigkeit; belastetes Grundwasser; Streuakkumulation;
Bodenleben	wenige Regenwürmer, geringe mikrobiologische Aktivität, gehemmte Mykorrhiza-Bildung	geringes Nährstoffrecycling, geringe Bioturbation, gestörte P- und Wasseraufnahme	schlechtere Bodenstruktur; gehemmtes Wurzelwachstum;
Spross	Mangel an P, Mg und teilweise K in den Blättern	Nährstoffungleichgewicht	geringerer Stammzuwachs bei P-Mangel; Mangelernährung;
Wurzeln	weniger Feinwurzeln, mehr Wurzeln im Oberboden – weniger im Unterboden, geringeres Wurzelwachstum gegenüber Spross	eingeschränkte Nährstoffversorgung und Wasseraufnahme	geringere Trockenresistenz; Instabilität (windwurfgefährdet);
Schadorganismen	verminderte Resistenz gegenüber Krankheiten und/oder Schädlingen	gehemmte Bildung von Phenolverbindungen zur Abwehr	erhöhter Parasitenbefall durch Pilze und saugende Insekten;
Vegetation	Anstieg der Stickstoffzahl und des Deckungsgrades einzelner Arten	Veränderung der Vegetation, Überhandnehmen einzelner Arten	eingeschränkte Naturverjüngung durch Brombeer-Wucherungen.

des für Waldflächen geltenden Düngeverbots (ChemRRV 2005) nicht durch Kalkdüngergaben kompensiert werden kann.

Die Walddauerbeobachtung des IAP zeigt, dass eine Versauerung innerhalb der kurzen Beobachtungsperiode von neun

Jahren effektiv messbar ist. Im Rahmen von Düngeversuchen wurde ein direkter Zusammenhang zwischen erhöhten Stickstoff-Depositionen und einer Abnahme von Bodenfruchtbarkeitsparametern gefunden.

5.2 Schwermetallbelastung forstwirtschaftlich genutzter Böden

Der Grundgehalt an Schwermetallen im Boden ist geogenen Ursprungs und stammt aus dem Muttergestein. Durch die Bodenbildung (Pedogenese) können die Schwermetalle, je nach Löslichkeit und vorhandenem pH-Wert, in die Tiefe verlagert werden. Dies führt zu Horizonten mit verarmten bzw. angereicherten Schwermetallkonzentrationen. Für die einzelnen Bodentypen ergeben sich damit charakteristische Tiefenverläufe (Luster et al. 2006). Neben diesen natürlicherweise seit Jahrtausenden ablaufenden Vorgängen gelangen seit relativ kurzer Zeit über atmosphärischen Eintrag aus menschlichen Aktivitäten zusätzliche Schwermetallmengen auf und in den Boden. Diese binden sich an die organische Substanz sowie an Bodenminerale und können in der Streuschicht sowie im humusreicheren Oberboden zu erhöhten Konzentrationen führen. Auch via Nährstoffkreislauf kann dieser Effekt beispielsweise bei Zink ausgeprägt sein (Walther et al. 2004). Geogene Grundgehalte, pedogene Prozesse und atmogene Einträge bestimmen das Bild der

Schwermetallverläufe. Damit zeigen Waldböden ein «natürliches» Abbild der Schwermetallsituation, im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Böden, die zusätzlich durch Schwermetalle via Düngung belastet werden können (Kapitel 7).

Eine übermässige Anreicherung von Schwermetallen kann bei Pflanzen und Mikroorganismen zu toxischen Effekten führen und die Bodenfruchtbarkeit gefährden. Die Toxizitätsgrenze ist dabei abhängig vom betrachteten Element und dessen Verfügbarkeit. Je nach den weiteren Eigenschaften des Bodens können Schwermetalle lateral in Oberflächengewässer oder vertikal ins Grundwasser verlagert werden und damit in andere Ökosysteme exfiltrieren bzw. das Trinkwasser belasten.

Schwermetalle im Boden stammen aus dem Muttergestein und können sich durch verschiedene Prozesse lokal im Boden anreichern. Zudem gelangen Schwer-

Tabelle 5–5: Klassierung der 108 Waldstandorte anhand des Tiefenverlaufs vom Leitelement Pb, der Schwermetalle Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni und Zn, des Bodentyps und des pH-Werts, ergänzt mit der Anzahl Standorte pro Klasse

Gruppe	Charakterisierung	Anzahl Standorte
1	Die Blei-Konzentration verläuft im Tiefenverlauf gerade oder nimmt ab. Die Gehalte der anderen Schwermetalle nehmen infolge Verlagerungsprozessen und Stauwasserzonen in der Tiefe zu.	22
2	Die Blei-Konzentration verläuft im Tiefenverlauf gerade oder nimmt ab. Die Gehalte der anderen Schwermetalle zeigen im Profil einen bauchigen Verlauf, d. h. sie nehmen zuerst zu und dann wieder ab. Bei dieser Gruppe handelt es sich meist um Parabraunerden mit charakteristischen Ton-Auswaschungs- bzw. Ton-Anreicherungs-horizonten.	29
3	Die Blei-Konzentration nimmt im Tiefenverlauf ab. Die Gehalte der anderen Schwermetalle nehmen in der Tiefe ebenfalls ab. Die Böden sind meist bis zur Oberfläche karbonathaltig.	16
4	Diese Profile weisen dieselben Schwermetall-Tiefenverläufe auf wie in Gruppe 3, die Böden sind jedoch weitgehend karbonatfrei.	4
5	Die Blei-Konzentration nimmt im Tiefenverlauf ab. Die Gehalte der anderen Schwermetalle zeigen einen vorwiegend konstanten geraden Verlauf mit geringen Schwermetallkonzentrationen und kaum Verlagerungsanzeichen.	10
6	Diese Profile weisen dieselben Schwermetall-Tiefenverläufe auf wie in Gruppe 5, einzig die Cr- und Ni-Konzentrationen nehmen in der Tiefe zu.	7
7	Profile mit Podsolierung, d. h. durch Verlagerung von Eisenverbindungen und organischer Substanz ausgebleichter oberer Bodenbereich und darunter ein mit Huminstoffen und Sesquioxiden angereicherter Einwaschungshorizont.	13
8	Restliche Standorte mit gestörten Profilen oder nicht erklärbaaren Schwermetallverläufen eines oder mehrerer Elemente.	7

metalle aus menschlichen Quellen über die Atmosphäre in den Boden. Hohe Konzentrationen schädigen Vegetation sowie Bodenleben und können die Bodenfruchtbarkeit gefährden. Ausserdem können Schwermetalle aus dem Boden ausgewaschen werden und das Trinkwasser belasten.

liche Standorte möglich. Als Leitelement für die Gruppierung wurde Blei ausgewählt, da Blei von allen Schwermetallen die geringste Mobilität aufweist und häufig atmogen angereichert wird. Die acht resultierenden Profil-Gruppen weisen jedoch keine scharfe Trennung auf, da die Tiefenverläufe nicht bei allen Elementen gleichgerichtet bzw. gleich stark ausgeprägt sind.

5.2.1 Stand der Schwermetallbelastung

Die WSL stellte der BSF Bodenmaterial von 108 Standorten der im Rahmen der standortkundlichen Kartierungsschlüssel für die Wälder beschriebenen Profile (Kapitel 5.1.2) zur Verfügung. Von diesem horizontspezifisch entnommenen Probenmaterial bestimmte das Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern (GBL) 1997/98 den pH-Wert sowie die Totalgehalte nach VBBo der Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kobalt (Co), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni) und Zink (Zn). In Zusammenarbeit mit der WSL wurden diese Daten bezüglich Schwermetallbelastung und Risiko für Wasser und Boden ausgewertet (Maurer et al. 2009).

Die Standorte wurden nach den Tiefenverläufen der Schwermetalle, des Bodentyps sowie des pH-Werts gruppiert (Tabelle 5–5) und mit je einem Leitprofil gemäss Walthert et al. (2004) beschrieben. Damit waren Aussagen über Bodentypen bzw. Böden mit ähnlichen Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit auf ähn-

5.2.2 Richtwertüberschreitungen nach VBBo

Die VBBo legt unter anderem Richtwerte für die Konzentration von anorganischen Schadstoffen fest. Bei deren Überschreitung gilt ein Boden als belastet. Die Schwermetallkonzentrationen der untersuchten Waldböden wurden dementsprechend mit dem für jedes Schwermetall festgelegten Richtwert verglichen. Unter dem Richtwert liegende, erhöhte Werte (80 % bis < 100 % des Richtwerts) wurden ebenfalls festgehalten (Tabelle 5–6).

Insgesamt weisen von den 108 untersuchten Waldbodenprofilen 15 Standorte in einem oder mehreren Horizonten eine Überschreitung des Richtwerts auf. Davon wurden an vier Standorten Richtwertüberschreitungen bei zwei und an einem Standort Überschreitungen bei vier Metallen festgestellt. Weitere 15 Standorte weisen erhöhte Werte bei mindestens einem Element auf. Die Standorte der Gruppe 1 weisen alle einen hohen Gehalt an Schwermetallen im Muttergestein auf. Ein hoher Ausgangsgehalt

im Muttergestein muss jedoch nicht zwingend zu einer Bodenbelastung führen. Vermutlich wurden die Schwermetalle bereits aus dem erschlossenen Profil ausgewaschen.

Richtwertüberschreitungen durch Blei wurden an fünf, erhöhte Werte dieses Schwermetalls an 10 Standorten festgestellt. Blei stammt vermutlich aus dem bis in die 1980er-Jahre verwendeten verbleiten Benzin, da Standorte entlang von grösseren Verkehrsrouten oft deutliche Bleibelastungen aufweisen. Blei bindet sich stark an die organische Substanz und wird aufgrund seiner geringen Mobilität häufig im Oberboden akkumuliert, was zum typischen Verlauf mit in der Tiefe abnehmenden Bleikonzentrationen führt. Auch die drei mit Quecksilber belasteten Standorte weisen auf einen atmogenen Eintrag hin. Quecksilber entweicht bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, beim Bergbau, bei industriellen Verfahren oder bei der Müllverbrennung gasförmig und wird weiträumig verfrachtet. Die einzige Richtwertüberschreitung für Quecksilber ist vermutlich auf den ehemaligen Abbau von Braunkohle in der Nähe dieses Standorts zurückzuführen.

Der Richtwert für Nickel ist an acht Standorten überschritten, und an sechs weiteren finden sich erhöhte Werte. Weiter wurden an einigen Standorten Richtwertüberschreitungen und erhöhte Werte bei Cadmium, Chrom und Kupfer festgestellt. Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink stammen in der Regel vom Muttergestein. Durch Bodenbildungsprozesse können diese Elemente verlagert werden, was bei Chrom, Kupfer und Nickel zu Richtwertüberschreitungen vorwiegend im Unterboden führen

kann. Dies ist vor allem auf Anreicherungen im Verlauf der Verwitterung zurückzuführen, welche insbesondere bei Böden aus Karbonatgestein zu beobachten ist. Kalk wird leicht gelöst und ausgewaschen, während die schwerer löslichen Bestandteile zurückbleiben und sich anreichern. Zink kann sich aufgrund der Anlagerung an die organische Substanz via Nährstoffkreislauf im Oberboden anreichern. Kupfer könnte neben dem Muttergestein auch aus Kontaminationsquellen wie Metallschmelzen, Verbrennungsanlagen und Hochspannungskabel stammen.

Von den 30 Standorten mit erhöhten Schwermetallwerten bzw. Richtwertüberschreitungen sind schätzungsweise rund ein Drittel durch menschliche Aktivitäten und zwei Drittel primär infolge geo- und/oder pedogener Prozesse belastet.

Die VBBo legt pro Schwermetall Richtwerte fest. Diese sind an 15 der 108 untersuchten Standorte bei mindestens einem Schwermetall überschritten. Weitere 15 Standorte weisen zudem erhöhte Werte (> 80 % des Richtwerts) auf. Am häufigsten betroffen sind die Metalle Blei – vermutlich aus menschlichen Quellen – sowie Nickel, das in der Regel aus dem Muttergestein stammt.

5.2.3 Verlagerungsrisiko

Das Gefährdungsrisiko für die Umwelt hängt nicht nur vom Totalgehalt, sondern massgeb-

Tabelle 5–6: Gesamtbeurteilung des durch Schwermetalle verursachten Risikos anhand der Richtwertüberschreitungen der Elemente Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn, des lateralen oder vertikalen Verlagerungsrisikos sowie der Grenzwerte nach VanMechelen et al. (1997) der in acht Gruppen eingeteilten Standorte

Gruppe	Anzahl Standorte pro Gruppe	Anzahl Standorte ohne Risiken	Anzahl Standorte mit VBBo-Richtwertüberschreitungen	Anzahl Standorte mit erhöhten Schwermetallgehalten ²	Anzahl Standorte mit Verlagerungsrisiko		Anzahl Standorte mit Überschreitung bzw. Annäherung der VanMechelen-Grenzwerte ³
					vertikal	lateral	
1	22	8	3	5	2	11	1 (1)
2	29	9	5	7	4	13	1 (1)
3	16	12	3	3			(1)
4	4	2		1	1		
5	10		1	3	1	9	
6	7	2		1	3	2	
7	13	1	1	2	1	11	
8 ¹	7		2	2		1	
Total	108	34	15	24	12	47	5

¹ In der Gruppe 8 wurde das Verlagerungsrisiko nur bei einem Standort beurteilt.

² Erhöhter Schwermetallgehalt = 80 % bis < 100 % des VBBo-Richtwerts.

³ Die Ziffer in der Klammer bezeichnet die Anzahl Standorte mit erhöhten Werten (80 % bis < 100 % der Grenzwerte nach VanMechelen).

lich von der Mobilität der Schwermetalle ab. Das Risiko für eine Verlagerung wird sowohl durch chemische als auch durch physikalische Faktoren bestimmt. Verlagerungen sind primär abhängig vom pH-Wert der Bodenlösung bzw. vom Kalkgehalt des Bodens. Je saurer die Bodenlösung, desto mobiler sind die Schwermetalle (Kapitel 5.1). Physikalisch wird das Verlagerungsrisiko durch morphologische Barrieren in Form von schlecht wasserdurchlässigen Schichten bestimmt.

Je nach Gruppe besteht ein laterales oder eher vertikales Verlagerungsrisiko (**Tabelle 5–6**). Deutlich treten die karbonathaltigen Böden der Gruppe 3 hervor, bei denen aufgrund des generell hohen pH-Werts kein Risiko besteht. Ebenso deutlich zeigen die Gruppen 5 und 7 ein klares, meist laterales Verlagerungsrisiko bei fast allen Standorten. Bei der Gruppe 5 handelt es sich um Standorte, die über das gesamte Profil stark versauert sind. Die Gruppe 7 beinhaltet die sauren Podsole mit deutlichen Aus- bzw. Einwaschungshorizonten.

Insgesamt weisen von 102 untersuchten Standorten deren 43 kein Verlagerungsrisiko für Schwermetalle auf, bei 59 Standorten ist ein mögliches Risiko für die Verlagerung von Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink vorhanden. Das laterale Verlagerungsrisiko und damit der Schwermetalltransport in Oberflächengewässer wurde häufiger festgestellt als das vertikale.

Die von Schwermetallen ausgehende Gefährdung ist nicht nur von der Konzentration abhängig, sondern auch von deren Löslichkeit. Schwermetalle sind um so mobiler, je saurer ein Boden ist. In mehr als der Hälfte der 102 untersuchten Profile können vorhandene Schwermetalle verlagert werden.

5.2.4 Biologische Beeinträchtigungen durch Schwermetalle

Pflanzen und Mikroorganismen nehmen Stoffe in erster Linie aus der Bodenlösung auf. Übermässige Konzentrationen von Schwermetallen beeinflussen die Bodenfruchtbarkeit negativ, indem der Stoffhaushalt von Pflanzen und Mikroorganismen beeinträchtigt wird. Die Auf-

nahme von Schwermetallen ist abhängig von ihrer Mobilität und der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung.

Inwieweit Schwermetalle ein potenzielles Risiko darstellen, kann mit den von VanMechelen et al. (1997) formulierten Grenzwerten für Mikroorganismen abgeschätzt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde die organische Auflage nicht beprobt. Im Mineralboden wurde der Grenzwert für Chrom zweimal überschritten. Drei weitere Standorte wiesen erhöhte Chrom-, Kupfer- bzw. Nickel-Werte auf.

5.2.5 Gesamtbeurteilung des durch Schwermetalle verursachten Risikos

Im Sinne einer Gesamtbeurteilung werden die Kriterien hoher Schwermetallgehalt (VBBo), Verlagerungsrisiko und biologische Beeinträchtigungen zusammengefasst (**Tabelle 5–6**). Bei einem Drittel der Standorte wurden keine Risiken festgestellt. An 14 % aller 108 analysierten Standorte wird der VBBo-Richtwert für Schwermetalle von mindestens einem Element überschritten, an insgesamt 22 % zeigen sich erhöhte Werte bei mindestens einem Schwermetall. Das Risiko für die physikalisch-chemische Verlagerung von potenziell vorhandenen Schwermetallen ist mit 58 % weit verbreitet, wobei die laterale Auswaschung eher vorkommen kann als die vertikale. An drei Standorten zeigte sich eine mögliche Beeinträchtigung der Mikroorganismen. Nicht dargestellt in **Tabelle 5–6** sind die Kriterienkombinationen: 16 % der Böden zeigen eine Kombination der Kriterien hoher Schwermetallgehalt und hohes Verlagerungsrisiko, 2 % aller untersuchten Standorte sind sowohl chemisch als auch physikalisch und biologisch belastet. Insgesamt 28 Standorte zeigen eine Mehrfachbelastung bzw. ein Mehrfachrisiko.

Die Schwermetallbelastung der beprobten Standorte ist kein flächendeckendes Problem. Jedoch zeigen immerhin 17 der 102 Standorte gleichzeitig eine erhöhte oder hohe chemische Belastung meist einzelner Schwermetalle, kombiniert mit einem erhöhten Verlagerungsrisiko. An drei Standorten sind zusätzlich die Mikroorganismen in ihrer Aktivität beeinträchtigt.

5.3 Gesamtbeurteilung der Berner Waldböden

Die Versauerung ist ein natürlicher Prozess. Seit Jahrzehnten gelangen jedoch zusätzlich Stickstoff sowie Schadstoffe aus Landwirtschaft, Verkehr, Industrie und Haushalt in grösseren Mengen in unsere Böden (**Abbildung**

5–3). Insbesondere beim Stickstoff werden die kritischen Eintragswerte (Critical Loads) für Wald auch im Kanton Bern fast flächendeckend überschritten, was hier zu einer Beschleunigung des Versauerungsprozesses führt. Eingetragener

Ammoniak-Stickstoff wird über die Nitrifikation zu Nitrat-Stickstoff oxidiert, was Protonen freisetzt. Wird das Nitrat während der Vegetationsruhe nicht von den Pflanzen aufgenommen, kann es ausgewaschen werden, was zu einer zusätzlichen Versauerung führt. Die durch die Oxidation freigewordenen Protonen können in karbonatfreien, sauren Böden nur ungenügend gepuffert werden und der pH-Wert nimmt ab. Bereits heute weisen rund 60 % der untersuchten Waldböden einen tiefen pH-Wert auf.

Lediglich 27 % der von Zimmermann (2009) ausgewerteten Standorte weisen bei keinem bezüglich Versauerung untersuchten Kriterium ein Risiko auf. Bei allen übrigen Standorten ist ein gewisses Risiko für eine Beeinträchtigung der Funktionen des Waldbodens gegeben. Bei 44 % dieser Standorte sind zwar die Risiken gering und bei zukünftig reduziertem Protoneneintrag werden die Bodenfunktionen kaum beeinträchtigt. 29 % der Standorte hingegen weisen bei mindestens drei oder noch mehr Untersuchungskriterien hohe Risiken auf. Insbesondere besteht bei 22 % der Böden ein grosses Risiko für Aluminium-Toxizität. An diesen Standorten muss genau abgeklärt werden, ob wirklich pflanzentoxisches Aluminium auftritt oder ob genügend gelöste organische Substanzen bzw. andere Komplexbildner vorhanden sind, welche toxisches Aluminium binden und damit detoxifizieren können. Andernfalls wäre die Bodenfruchtbarkeit gefährdet, weil sich der Wald nicht mehr natürlich verjüngen kann.

In sauren Böden kann die Nährstoffversorgung gestört sein, weil die basischen Kationen gelöst und ausgewaschen werden. Durch Säurepufferungsprozesse in Böden mit pH-Werten < 4.6 gelangen vermehrt Aluminium-Ionen in Lösung, welche die Nährstoffkationen am Austauscher verdrängen. Die Nährstoffkationen werden in der Folge, vor allem in Zeiten, in denen die Aufnahme durch Pflanzen nicht sehr gross ist, ausgewaschen und gehen dem Boden-Pflanzen-System verloren. Meistens ist die Nachlieferung durch die Verwitterung zu gering, sodass dies im Extremfall zu Nährstoffmangel bei den Bäumen führen kann. Sie können nicht mehr optimal wachsen und werden anfälliger für Parasitenbefall und Windwurf.

Je saurer die Böden, desto mobiler sind nicht nur das Aluminium, sondern auch die Schwermetalle. Auf kalkhaltigen, basischen Standorten sind die Schwermetalle fest an die Bodenpartikel gebunden. Der Richtwert für Schwermetalle nach VBBo wird auf 15 der 108 von Maurer et al. (2009) untersuchten Waldstandorten bei mindestens einem Element überschritten. An weiteren 15 Standorten wurden erhöhte Werte ebenfalls bei mindestens einem Element festgestellt. Rund ein Drittel dieser Werte sind auf atmogene Einträge – insbesondere bei Blei und Quecksilber – zurückzuführen, zwei Drittel sind weitgehend geogenen

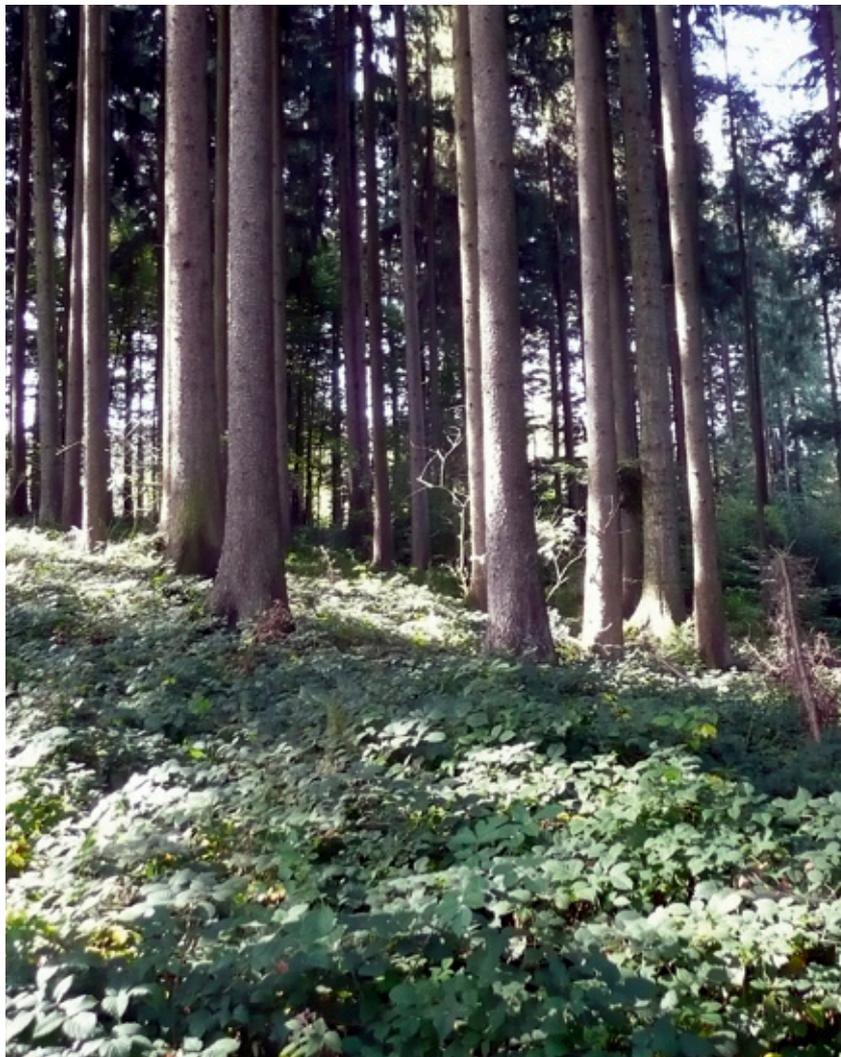


Abbildung 5–3: Der seit Jahrzehnten übermässige Stickstoff-Eintrag führt zu einem starken Bewuchs mit Brombeeren, wodurch die natürliche Verjüngung gehemmt wird.

Ursprungs. Die zunehmende Versauerung führt zu einem erhöhten Risiko für eine Mobilisierung der Schwermetalle, unabhängig davon, ob die Schwermetalle atmosphärischen oder geogenen Ursprungs sind. Das humide Klima der Schweiz mit seiner grundsätzlich positiven Wasserbilanz trägt weiter zu diesem Risiko bei.

Die anhand der beprobten Berner Waldstandorte gemachten Feststellungen entsprechen in ihrer Grössenordnung anderen in der Schweiz durchgeführten umfangreichen Punktuntersuchungen. Insbesondere auf karbonatfreien Standorten und in Gebieten mit hohen Ammoniak-Emissionen ist die Fruchtbarkeit der Berner Waldböden gefährdet. Aufgrund der fehlenden flächendeckenden Bodenkarten (Kapitel 2) können die Resultate nicht auf die gesamte Waldfläche des Kantons Bern übertragen werden. Inwiefern die Stickstoff-Emissionen bzw. die Tierdichte einen Zusammenhang mit der Waldbodenversauerung haben könnte, wird in **Abbildung 5–4** dargestellt. Tendenziell sind in Gebieten mit hohem Tierbestand oft Standorte mit hohem Versauerungsrisiko festzustellen (z. B. Oberaargau, Grenzgebiet zum tierreichen Kanton Luzern).

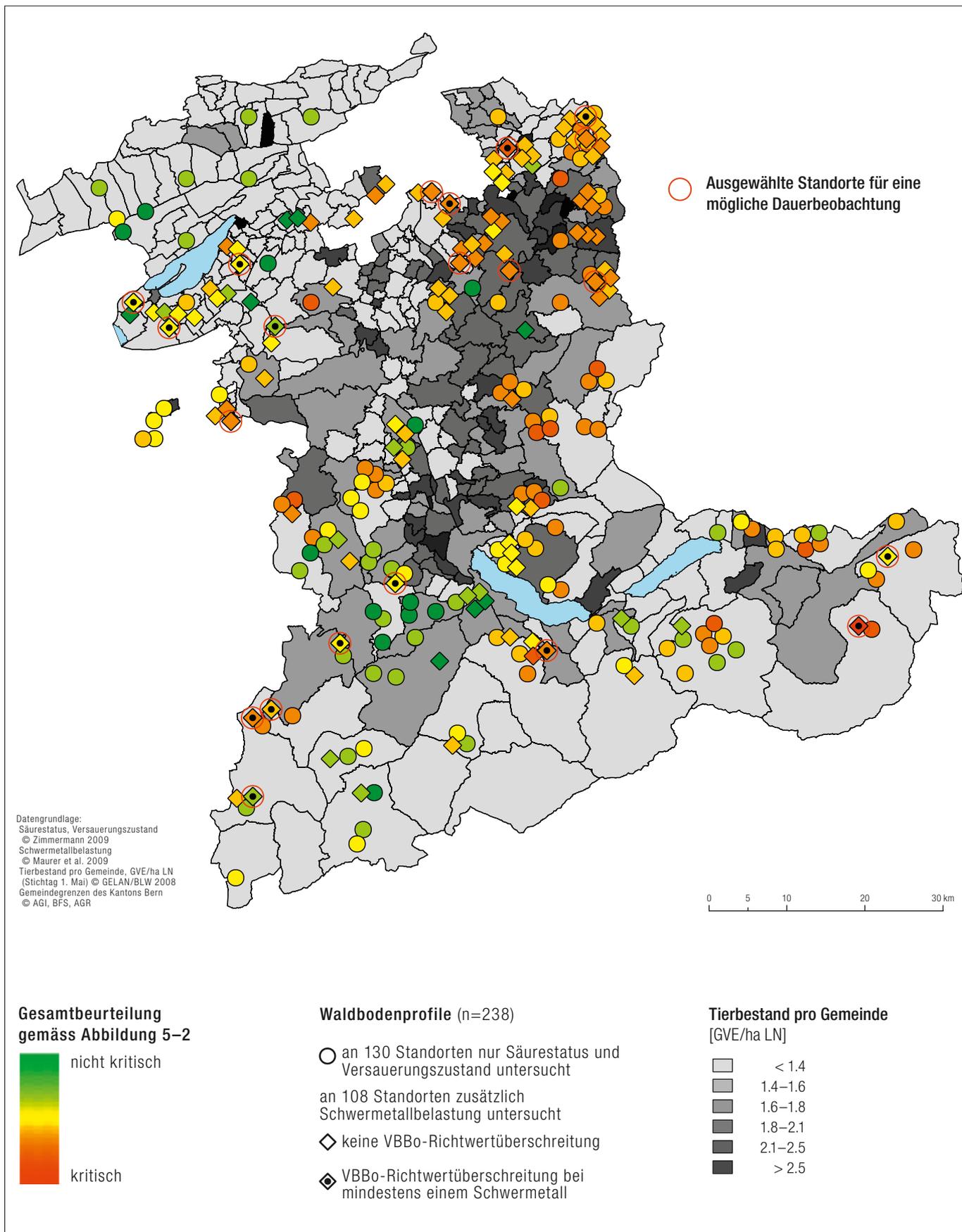


Abbildung 5-4: Gesamtbeurteilung der 238 Waldstandorte des Säurestatus und Versauerungszustands (grün = nicht kritisch, rot = kritisch), Lage der Standorte nicht punktgenau, nach Zimmermann 2009) mit zusätzlicher Beurteilung der Schwermetallbelastung bei 108 Standorten (Maurer et al. 2009), unterlagert vom Tierbestand pro Gemeinde (DGVE/ha LN)

Demgegenüber scheint der Jura mit karbonathaltigen Böden und geringen Tierdichten nicht gefährdet zu sein.

Aus der Landwirtschaft gelangen über die Luft grosse Mengen Stickstoff in die Waldböden und beschleunigen deren Versauerung. In sauren Böden werden Nähr-

stoffe leichter ausgewaschen, und für Pflanzen schädliches Aluminium kann freigesetzt werden. Auch andere Schwermetalle – aus dem Muttergestein oder menschlicher Herkunft – werden in sauren Böden einfacher verlagert und gelangen allenfalls in Oberflächengewässer oder ins Grundwasser.

5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Wald als vergleichsweise naturbelassenes Element der urban genutzten Landschaft übernimmt wichtige regulierende Aufgaben wie die Ableitung von Wasser bei Starkniederschlägen (Hochwasserschutz), die Grundwasserneubildung (Trinkwasser), den Schutz vor Naturgefahren (Schutzwälder) sowie bei der Klimaregulation. Die Wälder sind daher in ihrer flächenhaften Ausdehnung zu schützen, was in der Schweiz erfüllt ist, und hinsichtlich ihrer Gesundheit nicht zu gefährden. Es gibt jedoch Anzeichen, dass die Fruchtbarkeit der Waldböden infolge menschlicher Aktivitäten abnimmt, was wiederum die Entwicklung der Waldbäume und das Erfüllen der Waldfunktionen einschränken kann.

Für die Fruchtbarkeitsbeurteilung von Waldböden sind die bisherigen 25 Jahre der Walddauerbeobachtung eine sehr kurze Zeit, da mögliche Veränderungsprozesse zeitlich langsam verlaufen und nur sehr schwer zu erfassen sind. Erfreulicherweise sind innerhalb der bestehenden Waldschadensforschung der WSL und des IAP die Berner Standorte gewichtig vertreten. Bei einigen Standorten belegen die Untersuchungen schon heute ernst zu nehmende Veränderungen, die aufgrund der kurzen Beobachtungsdauer als «bemerkenswert und besorgniserregend» (IAP 2009) beurteilt werden. Eine möglichst lange Beurteilungsdauer ist aufgrund der daraus resultierenden fundierten Aussagen zentral. Aus diesem Gesichtspunkt ist die vom Kanton Bern 2009 beschlossene weitere Unterstützung des IAP-Programms für die folgenden vier Jahre 2009–2013 zu begrüssen und über das Jahr 2013 hinaus weiterzuverfolgen.

Steht fest oder ist zu erwarten, dass in bestimmten Gebieten die Belastungen des Bodens die Bodenfruchtbarkeit gefährden, so sorgen die Kantone für eine Überwachung der Bodenbelastung (VBBo 1998). Für eine mögliche weitere Beobachtung wurden aus der Untersuchung Zimmermann (2009) diejenigen Standorte aus den drei höchsten Belastungskategorien mit denjenigen mit Mehrfachbelastung aus der Auswertung Maurer et al. (2009) überlagert und entsprechend elf Standorte ausgewählt. Mit den zusätzlichen zehn Böden mit VBBo-Richtwertüberschreitung ergeben sich insgesamt 21 Standorte (**Abbildung 5–4**) für eine mögliche Weiterbeobachtung. In

welchem Rahmen diese durchgeführt wird, ist Gegenstand zukünftiger Abklärungen in Zusammenarbeit mit dem kantonalen Amt für Wald (KAWA), der WSL und dem IAP.

Neben der Erfassung des Waldbodenzustandes sind Massnahmen für die Einhaltung der Critical Loads für Stickstoff, welche in naturnahen Ökosystemen heute fast flächendeckend überschritten werden, erforderlich (Kapitel 6). Aufgrund der geltenden nationalen und internationalen Gesetzesgrundlagen haben das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) mit dem landwirtschaftlichen Umweltziel «Ammoniak» einen Zielwert für Ammoniak-Emissionen festgelegt (**Kasten 6–4**). Um diesen zu erreichen, müssen die Emissionen gegenüber dem Stand 2000 um 43 % reduziert werden.

Der seit den 80er Jahren konsequent eingeschlagene Weg zur Reduktion von anthropogen verursachten Schadstoffeinträgen auf Waldflächen ist konsequent weiterzuführen. Zusätzlich wird entsprechend internationaler Übereinkommen (UNECE 1999) und nationaler Zielsetzungen (BAFU und BLW 2008) im Kanton Bern die Immissionsreduktion von Stickstoff auf mehreren Ebenen gezielt angegangen:

- Industrie, Verkehr und Haushalt: Massnahmenplan Luftreinhaltung (*beco 2005*);
- Landwirtschaft: Im Massnahmenbereich III des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» werden ab 1. August 2009 Ammoniak reduzierende Ausbringsysteme mit finanziellem Anreiz gefördert. Mit dem Austrag der Gülle auf oder in den Boden erhofft man sich eine erhöhte Stickstoff-Effizienz (Kapitel 9).

Damit die räumliche Variation der Stickstoff-Emissionen besser abgeschätzt und die getroffenen Massnahmen beurteilt werden können, beteiligt sich der Kanton Bern, gemeinsam mit den Kantonen GE, FR, LU, ZG, und TG, mit sieben Standorten an einem längerfristigen Ammoniak-Messprojekt. Daneben sind auch die WSL, das IAP, die ART und das BAFU am Projekt beteiligt. Um den Wald als Ökosystem mit all seinen Funktionen erhalten zu können, fördert das KAWA seit 20 Jahren die Pflege von Jungwald mit standortgerechten Baumartenmischungen.

6 Stickstoff-Verluste aus der Landwirtschaft



Gülleaustrag mit einem Schleppschlauch-Verteilsystem

6 Stickstoff-Verluste aus der Landwirtschaft

Intensive ackerbauliche Bodennutzung kann zu einer Belastung des Grundwassers mit Nitrat führen und damit unser Trinkwasser gefährden. Allein durch Düngeberatung konnte die Nitrat-Konzentration im Grundwasser nicht reduziert werden. Umfassendere Massnahmen im Rahmen des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) trugen aufgrund von kontrollierter Düngung und Zwischenkulturen zu einer Reduktion der Nitrat-Auswaschung bei. Dennoch liegt im intensiv genutzten Berner Mittelland die Belastung von fast der Hälfte aller Trinkwasserfassungen über dem Anforderungswert (=Interventionswert) von 25 mg NO₃-/l Wasser. Eine angepasste ackerbauliche Bewirtschaftung zur Minimierung des Nitrat-Verlusts wird innerhalb des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» mit finanziellen Anreizen unterstützt.

Im Weiteren belastet Stickstoff in Form von Ammoniak naturnahe Ökosysteme. Fast die gesamte Waldfläche im Kanton Bern ist von erhöhtem Stickstoff-Eintrag betroffen. Der Grossteil der Ammoniak-Emissionen stammt aus der Landwirtschaft. Die Förderung von verbesserten Ausbringtechniken für Hofdünger kann die Ammoniak-Emissionen effizient verringern.

Kasten 6–1: Nitrat

Im Gegensatz zu den meisten anderen Nährstoffen wird die Stickstoff-Verbindung des negativ geladenen Nitrat-Ions (NO₃⁻) nicht durch die Bodenpartikel (Ton oder Humus) festgehalten. Da Nitrat gleichzeitig auch sehr gut wasserlöslich ist, kann es mit dem Bodenwasser in tiefere Schichten bis ins Grundwasser verlagert werden, wo es die Trinkwasserreserven belastet (Huber 2002). Einen grossen Einfluss auf die Nitrat-Auswaschung haben Art, Bedeckungsdauer und Bedeckungsgrad des Pflanzenbestandes. Mit zunehmender Stickstoff-Düngung steigt in der Regel auch die Stickstoff-Auswaschung, wobei die anfallenden Niederschlagsereignisse eine übergeordnete Rolle spielen.

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts kam es infolge der Intensivierung im Pflanzenbau (Abbildung 6–1) zu einer vermehrten Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser (Kasten 6–1). Dies führte dazu, dass der Nitrat-Gehalt im Trinkwasser in den achtziger Jahren in vielen Wasserfassungen über dem in der Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) festgesetzten Anforderungswert von 25 mg NO₃⁻/l Wasser lag. Bei etlichen Fassungen wurde sogar der in der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV 1995) definierte Toleranzwert für Trinkwasser von 40 mg NO₃⁻/l Wasser überschritten (Kantonales Laboratorium 1986).

6.1 Erste Massnahmen in der Nitrat-Bekämpfung

Der Kanton Bern reagierte auf diese Situation, indem der Grosse Rat im September 1988 ein auf sieben Jahre befristetes «Programm zur Ursachenbekämpfung der Nitrat-Auswaschung 1989–1995» bewilligte und dieses 1990 erweiterte. Das Programm zielte darauf ab, die Nitrat-Auswaschung in ausgewählten Belastungsgebieten zu vermindern und Erfahrungen darüber zu sammeln, wie weit sich diese Auswaschung in grossen Grundwasser-Einzugsgebieten mit fundierter landwirtschaftlicher Beratung verringern lässt. Allein mit diesem Beratungsansatz konnte nach

einer siebenjährigen Projektzeit in den 16 Belastungsgebieten keine nachhaltige Senkung des Nitrat-Gehalts in den Trinkwasserfassungen nachgewiesen werden (Fachkommission Nitrat-Bekämpfung/Projektgruppe Nitrat 1996). Das Projekt wurde 1995 abgeschlossen.

6.1.1 Agrarpolitischer Wandel

Zwischen 1993 und 1995 fand in der schweizerischen Agrarpolitik ein grosser

Wandel statt, und der vom Kanton Bern zur Verminderung der Nitrat-Belastung propagierte, stark auf die Düngeberatung ausgerichtete Ansatz war nicht mehr gefragt. 1993 führte der Bund ein mehrheitlich flächenbezogenes Direktzahlungssystem ein. Dieser Systemwechsel basierte vorwiegend auf ökologischen Anforderungen und brachte die Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) mit sich. Dabei wurden nach den Bestimmungen der Direktzahlungsverordnung (DZV 1998) diejenigen Landwirte zum Bezug von allgemeinen Direktzahlungen berechtigt, welche auf ihrem Betrieb unter anderem eine ausgeglichene Stickstoff-Bilanz (Suisse-Bilanz), eine geregelte Fruchtfolge, einen angemessenen Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen und einen geeigneten Bodenschutz (Bodenschutzindex) einführen.



Abbildung 6–1: Der Austrag von stickstoffhaltigen Mineraldüngern kann bei intensiv genutzten Flächen und nasser Witterung zu einer erhöhten Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser führen.

6.1.2 Massnahmenbeurteilung

Im Rahmen der Evaluation der Ökomassnahmen in der Landwirtschaft, welche in der Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft (1998) geregelt sind, verfolgte die Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) die zeitliche Entwicklung der Nitrat-Gehalte von Trinkwasserfassungen im Kanton Bern (Spiess und Prasuhn 2007). Die Nitrat-Gehalte haben im Kanton Bern zwischen den Referenzjahren 1990/92 und 2002/04 um durchschnittlich 3.2 mg NO_3^-/l Wasser abgenommen. Die Abnahme war mit je 4.4 mg NO_3^-/l Wasser im Mittelland und in den Voralpen am höchsten. Gemäss Spiess und Prasuhn (2007) hat der Rückgang der Getreide- und Kartoffelfläche, der geringere Stickstoff-Düngereinsatz im Ackerbau sowie der vermehrte Anbau von Zwischenkulturen und Gründüngungen am meisten zur Verringerung der Nitrat-Auswaschung beigetragen. Über die Hälfte der Reduktion dürfte demnach eine Folge der 1993 eingeführten Ökomassnahmen sein.

Seit Beginn des Nitrat-Projekts im Jahr 1989 verbesserte sich die Qualität des Grundwassers betreffend Nitrat-Gehalt in vielen Trinkwasserfassungen des Kantons Bern. Auch bezüglich der maximalen Nitrat-Gehalte im Verteilernetz der grössten Versorgungen der Gemeinden im Kanton Bern ergab sich für den Zeitraum von 1996 bis 2002 eine Verbesserung der allgemeinen Situation. Das vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) in der Agrarpolitik 2007 vorgeschlagene agrarökologische Etappenziel einer Reduktion um 5 mg NO_3^-/l Wasser zwischen 1990/92 und 2005 (Forni et al. 1999) wurde jedoch im Mittelland und in den Voralpen knapp nicht erreicht.

Gleichzeitig wird im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelland der Anforderungswert (= Interventionswert) von 25 mg NO_3^-/l Wasser bei fast der Hälfte der Trinkwasserfassungen

nach wie vor überschritten (Abbildung 6–2, Spiess und Prasuhn 2007). Das erste landwirtschaftliche Umweltziel «Nitrat» (Kasten 6–2) wird dementsprechend nicht erfüllt.

Im Jahr 2004 wurde der Bodenschutzindex aus dem ÖLN gestrichen. Damit fehlt ein wirkungsvolles Instrument, um Schwarzbrachen während des Winterhalbjahres zu vermeiden. Die Stickstoff-Auswaschung aus brachliegenden Flächen erhöhte sich erneut (BAFU 2009). In der Folge stieg in den Jahren 2005 bis 2006 die Anzahl der Toleranzwertüberschreitungen bei öffentlich abgegebenem Trinkwasser wieder an, von der Witterung zusätzlich begünstigt. Nach dem nassen Sommer 2007 hat sich die Nitrat-Situation wieder leicht entschärft (Kantonales Laboratorium 2008).

Kasten 6–2: Landwirtschaftliches Umweltziel «Nitrat» (BAFU und BLW 2008)

1. Maximal 25 mg NO_3^-/l Wasser in Gewässern, die der Trinkwassernutzung dienen oder dafür vorgesehen sind und deren Zuflösbereich hauptsächlich von der Landwirtschaft genutzt wird.
2. Reduktion der landwirtschaftsbedingten Stickstoff-Einträge in die Gewässer um 50 % gegenüber 1985.

Nitrat kann auch oberflächlich in Fliessgewässer und Seen verfrachtet werden. Um die internationale Verpflichtung der Schweiz im Rahmen des Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Nordatlantiks (OSPAR) und des Übereinkommens zum Schutz des Rheins einhalten zu können, sollte der Stickstoff-Eintrag in Gewässer entsprechend dem zweiten landwirtschaftlichen Umweltziel «Nitrat» (Kasten 6–2) vermindert werden. Die Oberflächengewässer werden durch die Landwirtschaft nicht nur mit Nitrat, sondern auch mit Phosphor belastet. Die

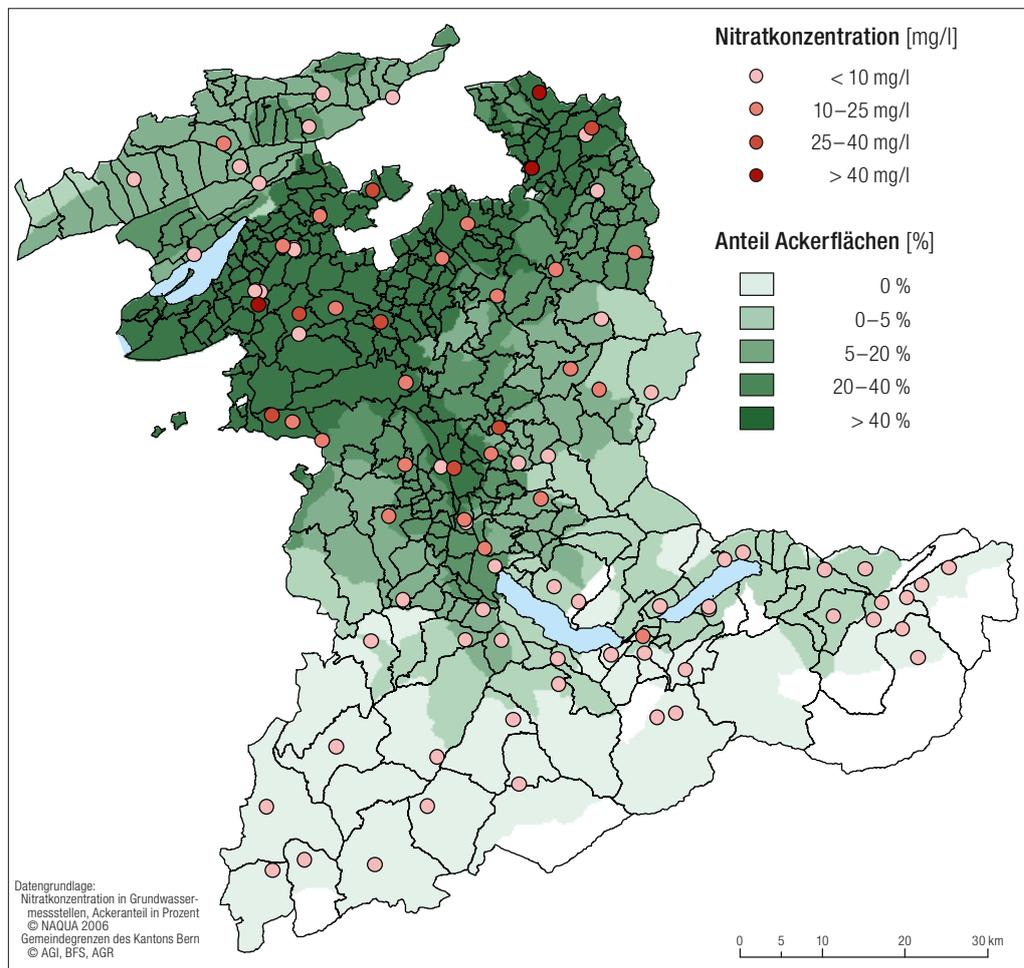


Abbildung 6–2: Nitrat-Konzentration in Grundwasser-Messstellen im Jahr 2006, unterlegt mit dem prozentualen Anteil Ackerflächen (NAQUA 2006)

Reduktion der Auswaschung dieses Stoffes wird mit dem landwirtschaftlichen Umweltziel «Phosphor» (Kasten 8–2) angestrebt.

6.1.3 Boden schonender Ackerbau zur Nitrat-Reduktion

Obwohl das Nitrat-Projekt 1995 nicht weitergeführt wurde, blieb der Kanton Bern in den darauf folgenden Jahren weiterhin aktiv. Die langjährige Untersuchung von Spiess und Prasuhn (2007) zeigt deutlich auf, dass sich das Nitrat-Problem auf die ackerbaulich genutzten Flächen des Mittellands beschränkt. Mit der Inkraftsetzung des kantonalen Landwirtschaftsgesetzes (KLWG 1997) und dessen Ausführungsverordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (LKV 1997) schuf der Kanton die rechtlichen Grundlagen, um in besonders nitratbelasteten, verdichtungs- oder erosionsgefährdeten Gebieten vorbeugende Massnahmen zur Regenerierung der Bodenstruktur zu ergreifen. Wie Ergebnisse der Dauerbeobachtungsfläche «Oberacker» (Kapitel 3) aufzeigen, kann die Direktsaat bei sachgerechter Düngung einen Beitrag zur Verminderung von Stickstoff-Belastungen der Oberflächengewässer und des

Grundwassers leisten (Gutachterbüro Terr-Aquat 2006; Zihlmann et al. 2006). Auf ackerbaulich genutzten Flächen wird die Umstellung vom Pflugsystem auf Boden schonende Anbausysteme mit finanziellen Anreizen punktuell gefördert (Kapitel 9). Eine Verursacher bezogene Vermeidung erhöhter Nitrat-Gehalte im Trinkwasser ist wirkungsvoller und 16mal billiger als die sehr aufwändige Denitrifizierung des Trinkwassers (VOL 2003).

6.1.4 Sanierungsprojekt «Walliswil»

Im Jahr 2000 erfolgte im Gebiet der Gemeinde Walliswil der Start zu einem neuen, auf zehn Jahre befristeten Grundwasser-Sanierungsprojekt nach Art. 62a Gewässerschutzgesetz (GSchG 1998), welches durch das BLW finanziell unterstützt wurde. Ziel war es, im Projektperimeter unter Mitwirkung der Landwirte bis ins Jahr 2009 den Nitrat-Gehalt dauerhaft unter 25 mg NO₃⁻/l Wasser zu senken. Das kantonale Wasserwirtschaftsamt (WWA, heute AWA) eröffnete im Jahr 2005 der Gemeinde Walliswil, dass die Schutzzone um die Fassung «Sebiloch» zu nahe am Siedlungsgebiet liege und damit ein zu hohes Gefährdungspotenzial

in Bezug auf Coli-Bakterien aufweise. Die Trinkwasserfassung sei deshalb nicht gesetzeskonform und müsse mittelfristig aufgehoben werden. Dieser Umstand führte dazu, dass sich das BLW vor Projektende aus seinen Finanzierungsverpflichtungen zurückzog.

Im Interesse der Förderung umweltfreundlicher Ackerbausysteme geht der Ansatz in einem vierjährigen Folgeprojekt über die reine Nitrat-Bekämpfung nach Art. 62a GSchG hinaus und richtet sich auf das gesamte Stickstoff-Management bei Boden schonendem Ackerbau. Die Landwirte werden nicht mehr nur für die Umstellung auf Boden schonende Anbausysteme, sondern auch für Fruchtfolgeanpassungen und Einschränkungen beim Düngemiteleinsetz (auf der Basis der Suisse-Bilanz) finanziell abgegolten.

Nach einer vorübergehenden Senkung des Nitrat-Gehalts auf knapp unter 30 mg NO_3^-/l Wasser bis ins Jahr 2003 (VOL 2003) und einer zwischenzeitlichen Erhöhung auf über 40 mg NO_3^-/l im Jahr 2007 ist der Nitrat-Gehalt seit 2008 wieder am Sinken (Abbildung 6–3). Offensichtlich haben die niederschlagsarmen Jahre zwischen 2003 und 2006 sowie die Tatsache, dass nicht alle Ackerflächen eine Winterbegrünung aufwiesen, zu einer zeitweiligen Erhöhung geführt. Das Projekt in Walliswil wird per Ende 2009 abgeschlossen. Bereits jetzt kann festgestellt werden, dass die intensive Beratung der Landwirte und die getroffenen Massnahmen zu einer erneuten Senkung der Nitrat-Werte in der Wasserversorgung beigetragen haben. Das erste landwirtschaftliche Umweltziel «Nitrat» (Kasten 6–2) von 25 mg NO_3^-/l Wasser ist für die Grundwasserfassung trotz Projekt (noch) nicht erreicht. Die motivierten Landwirte haben nun die Möglichkeit, im Rahmen

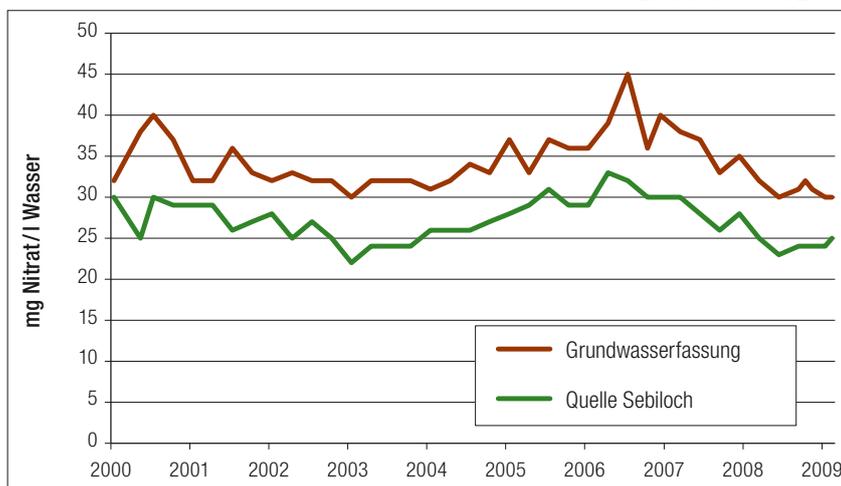


Abbildung 6–3: Entwicklung des Nitrat-Gehalts der Wasserversorgung Walliswil zwischen 2000 und 2009

des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» (Kapitel 9) weiterhin Nitrat senkende Massnahmen umzusetzen.

Nitrat bleibt im Trinkwasser ein unerwünschter Fremdstoff, dessen Konzentration im Interesse eines möglichst reinen Trinkwassers den Toleranzwert von 40 mg NO_3^-/l Wasser nicht übersteigen darf. Insbesondere im intensiv genutzten Berner Mittelland stellt die Nitrat-Belastung des Trinkwassers noch immer ein Problem dar. Hier wird bei rund der Hälfte der Trinkwasserfassungen der Anforderungswert (= Interventionswert) von 25 mg NO_3^-/l Wasser überschritten. Bisher erwiesen sich die meisten der getroffenen Massnahmen als zu wenig wirksam, vor allem aber waren sie zu kurzfristig angesetzt, um das Nitrat-Problem langfristig entschärfen zu können.

6.2 Ammoniak-Verluste

Pflanzenbaulich nicht genutzter Stickstoff belastet einerseits als Nitrat die Gewässer, andererseits gelangt er in Form von gasförmigem Ammoniak über die Luft in naturnahe Ökosysteme wie Wälder und Seen. Ammoniak-Deposition kann zu Nährstoffungleichgewichten führen (Kasten 6–3). Rund 90 % der Ammoniak-Emissionen in der Schweiz stammen aus der Landwirtschaft (Reidy und Menzi 2005). Im landwirtschaftlichen Umweltziel «Ammoniak» (Kasten 6–4) wurde unter Berücksichtigung der geltenden nationalen und internationalen Gesetzesgrundlagen ein Zielwert für Ammoniak-Emissionen festgelegt. Dieser Wert stützt sich auf den wirkungsorientierten Ansatz der kritischen Eintragswerte (Critical Loads), welche im Rahmen des im Jahr 2005 durch die Schweiz ratifizierten Göteborg-Protokolls ausgearbeitet wurden (UNECE 1999). Diese bezeichnen die spezifischen maximalen (Stickstoff-)Depositionen,

die insbesondere empfindliche Ökosysteme nach dem heutigen Stand des Wissens längerfristig ertragen können, ohne dass sie in ihrer Funktion oder Struktur beeinträchtigt werden. Damit diese Werte nicht überschritten werden, sollten die Ammoniak-Emissionen der Schweiz

Kasten 6–3: Ammoniak

In Regionen mit hoher Tierdichte gelangt die Stickstoff-Verbindung Ammoniak (NH_3) infolge ihrer Flüchtigkeit vorwiegend aus Hofdünger in die Atmosphäre. Die Hälfte der Moleküle wird in einem Umkreis von 10 km um den Emissionsort wieder deponiert, die andere Hälfte wird mehrheitlich zu Ammoniumionen (NH_4^+) umgewandelt und kann über beträchtliche Distanzen verfrachtet werden. Ammoniak ist nicht direkt schädlich, kann aber in naturnahe Ökosysteme gelangen, deren Stoffhaushalt nachhaltig verändern und die Artenvielfalt gefährden. Die resultierende beschleunigte Bodenversauerung führt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit von Waldböden (Kapitel 5).

Kasten 6–4: Landwirtschaftliches Umweltziel «Ammoniak» (BAFU und BLW 2008)

Die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft betragen maximal 25 000 t Stickstoff pro Jahr.

gegenüber dem Stand 2000 von 44 000 t um 43 % reduziert werden können (BAFU und BLW 2008).

Ammoniak-Verluste entstehen in erster Linie in Zusammenhang mit der Nutztierhaltung im Stall bzw. während der Lagerung und dem Ausbringen von Hofdüngern (BAFU und BLW 2008). Dabei liegt das grösste Reduktionspotenzial bei einer angepassten Ausbringtechnik der Gülle. Die heute in der Schweiz weitverbreiteten Techniken Prallteller bzw. Weitwurfverteiler schleudern die Gülle durch die Luft und verursachen dadurch hohe Ammoniak-Emissionen (Reidy und Menzi 2005). Durch das direkte Ausbringen der Gülle auf (Schleppschauch und Schleppschuh) oder sogar in den Boden (Gülle-drill) können die Ammoniak-Verluste markant reduziert werden (FAT 1997).

Seit 2000 misst die Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (FUB) im Rahmen einer Auftragsarbeit des Bundesamts für Umwelt

(BAFU), der OSTLUFT und verschiedener Kantone (u. a. auch das beco des Kantons Bern mit sieben Messstationen) mittels Passivsammlern die Ammoniak-Immissionen. Die höchsten Ammoniak-Konzentrationen und stärksten jahreszeitlichen Schwankungen mit hohen Werten im Sommer werden in der Schweiz in Gebieten mit intensiver Viehwirtschaft gemessen. In Regionen mit viel Ackerbau, extensiver Viehwirtschaft sowie in städtischen Gebieten liegen die Konzentrationen wesentlich tiefer, und die Schwankungen im Jahresverlauf sind gering (Thöni und Seitter 2009). An einzelnen Messstationen ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Ammoniak-Konzentration in der Luft und dem anfallenden Hofdünger sowie der Gülleausbringtechnik festgestellt worden.

Im Kanton Bern sind fast alle Waldflächen (Abbildung 6–4) und 50 % der naturnahen Ökosysteme (z. B. Hochmoore) von erhöhten Stickstoff-Depositionen betroffen (beco 2005). Der im Rahmen der Agrarpolitik 2011 neu geschaffene Art. 77a/b im Landwirtschaftsgesetz (LwG 1998) erlaubt es, von der Landwirtschaft erbrachte Leistungen, welche über die Anforderungen des ÖLN hinausgehen, finanziell abzugelten. Der Kanton Bern nutzte dies und lancierte das vom BLW mitfinanzierte «Förderprogramm Boden Kanton Bern» (Kapitel 9).

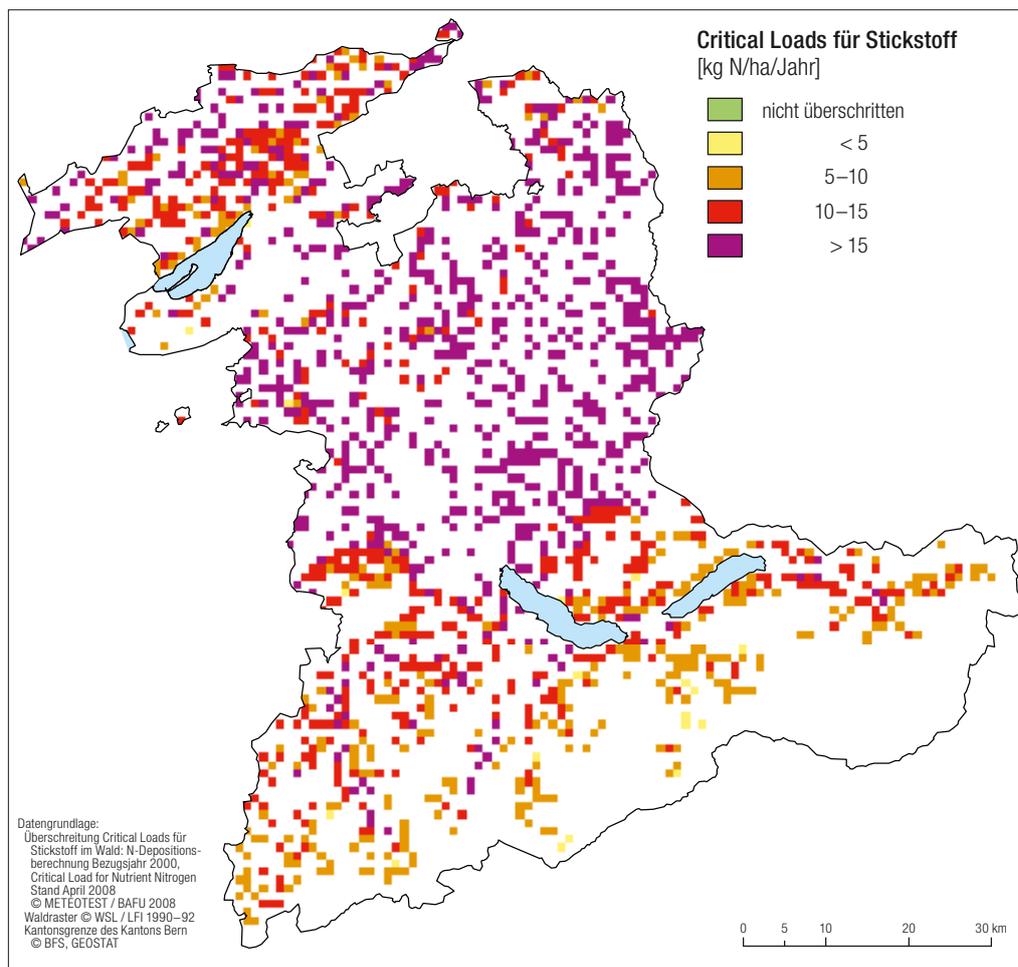


Abbildung 6–4: Überschreitung der kritischen Eintragswerte (Critical Loads) für Stickstoff auf Waldflächen des Kantons Bern gemäss der Konvention über weiträumig grenzüberschreitende Luftverunreinigung (UNECE 1979)

Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft belasten naturnahe Ökosysteme. Die Critical Loads für Stickstoff werden auf fast allen Waldflächen des Kantons Bern überschritten. Internationale Bestimmungen zur Reduktion der Ammoniak-Emissionen sind im Göteborg-Protokoll formuliert und seit 2005 von der Schweiz ratifiziert. Damit dies erreicht werden kann, ist in der Schweiz eine Reduktion von knapp der Hälfte aller Ammoniak-

Verluste anzustreben. Ein sehr grosses Reduktionspotenzial liegt bei einem Gülleausstrag, der dem heutigen Stand der Technik angepasst ist. Im Rahmen des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» wird seit dem 1. August 2009 ein emissionsmindernder und gleichzeitig Boden schonender Ausstrag der Gülle mit Massnahmen, die über die Anforderungen des ÖLN hinausgehen, finanziell unterstützt.

6.3 Schlussfolgerungen

Aufgrund der produktionsorientierten Landwirtschaft sind Stickstoff-Verluste, insbesondere im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelland, trotz aller Anstrengungen zugunsten einer nachhaltigen Verbesserung nach wie vor ein Problem. Um die erhöhten Nitrat-Einträge in die Gewässer und die Ammoniak-Depositionen in empfindliche Ökosysteme zu verhindern, ist eine effizientere Nutzung des Stickstoffs in der land-

wirtschaftlichen Produktion anzustreben; dies umso mehr, als die Revision der Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (*GRUDAF 2009*) eher eine zusätzliche Intensivierung mit sich bringt, da höhere Stickstoff-Gaben im Ackerbau zulässig sind. Dennoch bleibt die Verringerung der Nitrat- und Ammoniak-Verluste ein Ziel im Interesse sowohl der Öffentlichkeit wie auch der Landwirtschaft.

6.4 Ausblick

Durch verbesserte Düngetechnik (Zeitpunkt und Art der Ausbringung) sowie durch gezielte Fruchtfolgeplanung (z. B. vermehrter Anbau von Leguminosen als Haupt- oder Zwischenkultur) kann der Düngemittelaufwand reduziert, die Stickstoff-Effizienz vieler Betriebe erhöht und können naturnahe Ökosysteme geschont werden. Dies bringt dem Bewirtschafter ökonomische Vorteile, und er spart gleichzeitig die Herstellungskosten für Mineraldünger ein. Verschiedene Massnahmen sollen zu einer verbesserten Stickstoff-Effizienz beitragen:

- Die Massnahmen zur Stickstoff-Verlustminimierung mittels angepasster ackerbaulicher Bewirtschaftung sowie zeitgemässer Technik beim Austragen von Gülle werden seit 2009 mit dem auf sechs Jahre befristeten «Förderprogramm Boden Kanton Bern» (Kapitel 9) durch finanzielle Anreize unterstützt. Das im Programm vorgesehene Wirkungsmonitoring dient der Beurteilung dieser Massnahmen.
- Im Rahmen einer Projektergänzung zum «Förderprogramm Boden Kanton Bern» sollen weiterführende Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft erarbeitet werden.
- Zur Reduktion des Aus- und Abwaschungsrisikos von Nitrat wird, in Zusammenarbeit mit der ART und der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL), die Stickstoff-Effizienz einer ammoniumbasierten Stickstoff-Düngungsstrategie untersucht. Im CULTAN-Verfahren (= Controlled Up-

take Long Term Ammonia Nutrition) werden mit Radinjektoren flüssiges (**Abbildung 6–5**) oder mit Säscharen gekörntes Ammoniumsulfat als Düngerdepot in den Boden injiziert bzw. abgelegt (*Sturny et al. 2007*). Gemäss Sommer (2005) werden diese Depots verlustarm, d.h. nur mit geringen Denitrifikations- und Nitrat-Verlusten von den Pflanzenbeständen aufgenommen.

- In der Region der Grundwasserfassung Gimmiz laufen Vorbereitungsarbeiten für ein neues Projekt nach Art. 62a GSchG, um die



Abbildung 6–5: Stickstoff-Versorgung eines Getreidebestandes mit flüssigem Ammoniumsulfat mittels speziell konstruierter Radinjektoren

seit einigen Jahren deutlich ansteigenden Nitrat-Werte im Grundwasser nachhaltig zu reduzieren.

7 Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) – zwei Beprobungszyklen im Vergleich



Probenahme ungestörter Zylinderproben

7 Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) – zwei Beprobungszyklen im Vergleich

Im Kanton Bern ist – genauso wie andernorts – der konventionelle Pflugeinsatz das Standardverfahren bei der Feldbestellung. Regelmässig gepflügte Böden weisen einen schlechten Strukturaufbau sowie eine verminderte Tragfähigkeit und einen eingeschränkten Wasser- und Lufthaushalt auf. Schwere Maschinen bei der Ernte und dem Hofdüngeraustrag, aber insbesondere das auf dem Furchengrund laufende Traktorrad verursachen bei nassen Bedingungen starke physikalische Bodenbelastungen. Dies führt bei gepflügten Böden zu einer dichteren Lagerung im Unterboden.

Im Wissen darum, dass ein Ackerboden pro Jahr 6.8-mal flächendeckend überfahren wird und die Hälfte der Feldeinsätze bei ungünstigen Bedingungen erfolgt, muss die Tragfähigkeit der Ackerböden markant erhöht werden. Dazu leistet die Direktsaat einen wesentlichen Beitrag: Langjährig pfluglos bestellte Ackerflächen erreichen eine ähnlich stabile Bodenstruktur wie Naturwiesen mit einem hohen Humusgehalt, einer grossen Regenwurmpopulation, vielen Grobporen und einem ausgeglichenen Wasser- und Lufthaushalt.

Im Gegensatz zu Böden von Betrieben, die nach ökologischem Leistungsnachweis (ÖLN) wirtschaften und eine gute Nährstoffversorgung zeigen, sind Böden von biologisch wirtschaftenden Betrieben (BIO) allgemein humusärmer. Dieser geringere Humusgehalt verschlechtert einige der gemessenen physikalischen und biologischen Eigenschaften der Böden. Dagegen entstehen in BIO Böden wegen des Verzichts auf chemische Hilfsstoffe keine Schadstoffanreicherungen, was zu einer guten Wasseraufnahme sowie Krümelstruktur und damit zu einer geringeren Verschlammung der Oberböden führt.

Gemäss der kantonalen Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (*LKV 2008*) überwacht und beurteilt die Bodenschutzfachstelle den Boden auf der Grundlage des Umweltschutzgesetzes (*USG 1983*) und der entsprechenden Verordnung über Belastungen des Bodens (*VBBö 1998*). Sie nimmt diese Aufgabe im Rahmen der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO)

wahr, wo seit 1994 physikalische, biologische, chemische und agronomische Parameter erhoben und ausgewertet werden. Im Zentrum dieser Dauerbeobachtung steht unter Einbezug der Bewirtschaftung das Erfassen der physikalischen Belastungen von landwirtschaftlich besonders intensiv genutzten Böden im Berner Mittelland.

7.1 Zweitbeprobung

Der Schwerpunkt bei der Darstellung der Erstbeprobungs-Resultate von 19 Standorten lag bei der Erhebung des Ausgangszustands sowie bei ersten Aussagen zu möglichen Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung (insbesondere der Bodenbearbeitung) auf die Bodenfruchtbarkeit. Dazu wurden bis im

Jahr 2000 an jedem Standort eine Naturwiese (NW) mit einer nahe gelegenen und pedologisch ähnlich aufgebauten Ackerfläche (AF) beprobt und verglichen. Die Beprobungen beider Flächen erfolgten einmal pro Fruchtfolgeperiode jeweils im zweiten Hauptnutzungsjahr der Kunstweise. Die daraus gewonnenen Resultate wurden in zwei

Bodenberichten eingehend diskutiert (BSF 1997, VOL 2003).

Die vorliegende 2008 abgeschlossene Zweitbeoprobung erfolgte analog der Erstbeoprobung mit den in der Methodensammlung der KABO festgehaltenen Parametern und Methoden (BSF 1996) jedoch nur an 16 Standorten. Leider mussten drei Standorte aus Gründen einer Bewirtschaftungsänderung aufgegeben werden. Dies zeigt auf, dass die Dauerbeobachtung grosse Anforderungen an die Quali-

tätssicherung stellt. Ein Generationenwechsel auf dem Landwirtschaftsbetrieb, eine Neuausrichtung der Betriebsleitung, aber auch Veränderungen in der Analytik oder beim Personal im Labor können die Genauigkeit der Resultate beeinflussen. Die Ausarbeitung von Richtlinien (VBB, Referenzmethoden-Handbuch), Ringversuche der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) und intern klar definierte Abläufe (Methodensammlung) helfen mit, ein hohes Mass an Vertrauenswürdigkeit in die Daten zu erhalten.

7.2 Resultate und Diskussion

Im Bodenbericht 2003 wurde bei der Diskussion der Resultate ausschliesslich die explorative Statistik verwendet (Polasek 1994). Begründet wurde dieses Vorgehen mit dem pro Standort geringen Datensatz und mit der bei Bodenparametern oft festgestellten, breiten Streuung der erarbeiteten Daten. Dabei wurde an jedem Standort jeweils die NW mit der AF verglichen.

Bei der Darstellung der Resultate der Zweitbeoprobung steht vermehrt der Vergleich der beiden zeitlich verschobenen Beprobungszyklen im Vordergrund, was – unter Einbezug der jeweiligen Bewirtschaftung – allgemeinere Rückschlüsse und Tendenzen von Fruchtbarkeitsveränderungen sichtbar werden lässt. Dazu wurde einerseits der explorative Vergleich der NW und der AF, unterschieden nach den zwei Tiefenstufen (OB = Oberboden, d. h. -10 bis -15 cm, UB = Unterboden, d. h. -35 bis -40 cm), an jedem Standort weitergeführt (Anhang II) und andererseits die folgenden Vergleiche vorgenommen:

- **Beprobungszyklus:** Erstbeoprobung im Vergleich zur Zweitbeoprobung
- **Nutzung:** NW im Vergleich zu AF
- **Produktionsrichtlinie:** 12 Standorte mit einer Bewirtschaftung gemäss ökologischem Leistungsnachweis (ÖLN) im Vergleich zu 4 Standorten gemäss biologischem Landbau (BIO)
- **Anbausystem:** 12 AF im Pflugsystem (PF) im Vergleich zu 4 AF im Direktsaatsystem (DS)

Der Datensatz wurde mit dem Programm STATISTICA auf signifikante Unterschiede geprüft und die Mittelwerte der 16 Mediane grafisch dargestellt. Die Resultate des Systemvergleichs DS-PF der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker (im Folgenden Systemvergleich Oberacker genannt) werden in Kapitel 8 detailliert diskutiert. In dieses Kapitel 7 werden sie lediglich miteinbezogen, um hier formulierte Erkenntnisse zu bestätigen.

7.2.1 Physikalische Parameter

a. Gesamtporenvolumen

Der Boden besteht zu rund 50 % aus Hohlräumen, die mit Wasser oder Luft gefüllt sind. Der Parameter Gesamtporenvolumen erfasst die Hohlräume anhand von ungestörten Zylinderproben.

Der über alle 16 Standorte gezogene Vergleich der NW und AF zeigt bei beiden Beprobungszyklen nur im Oberboden einen signifikanten Unterschied bei den Gesamtporenvolumina, wobei die AF rund 3 Vol.-% tiefere Werte aufweisen als die NW (Abbildung 7-1). Der Mittelwert beträgt gut 51 Vol.-% bei den NW und gut 48 Vol.-% bei den AF. Die bereits im Bodenbericht 2003 belegte Tatsache, dass die Oberböden der AF im Vergleich zu den NW weniger Hohlräume enthalten, hat sich mit der

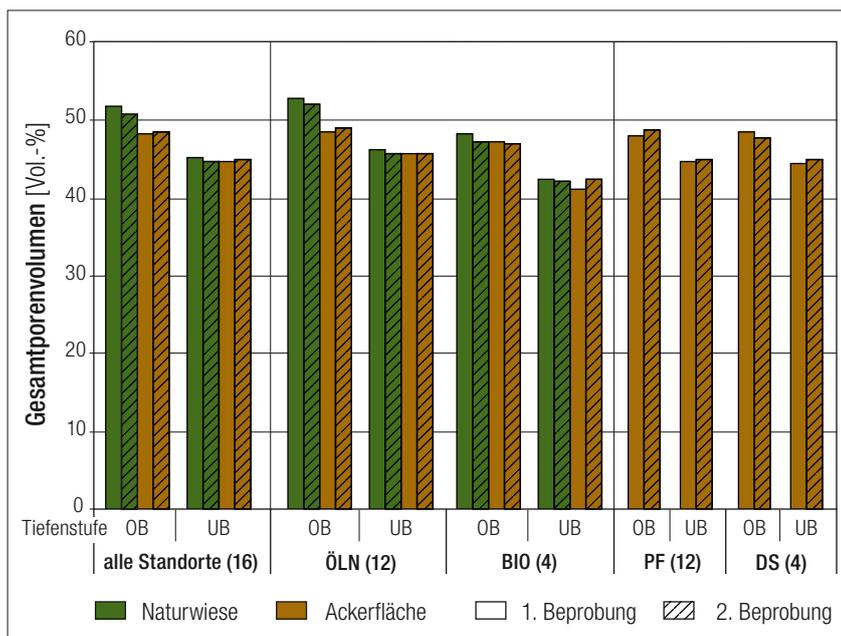


Abbildung 7-1: Gesamtporenvolumen von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Ober- und Unterboden sowie Erst- und Zweitbeoprobung). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

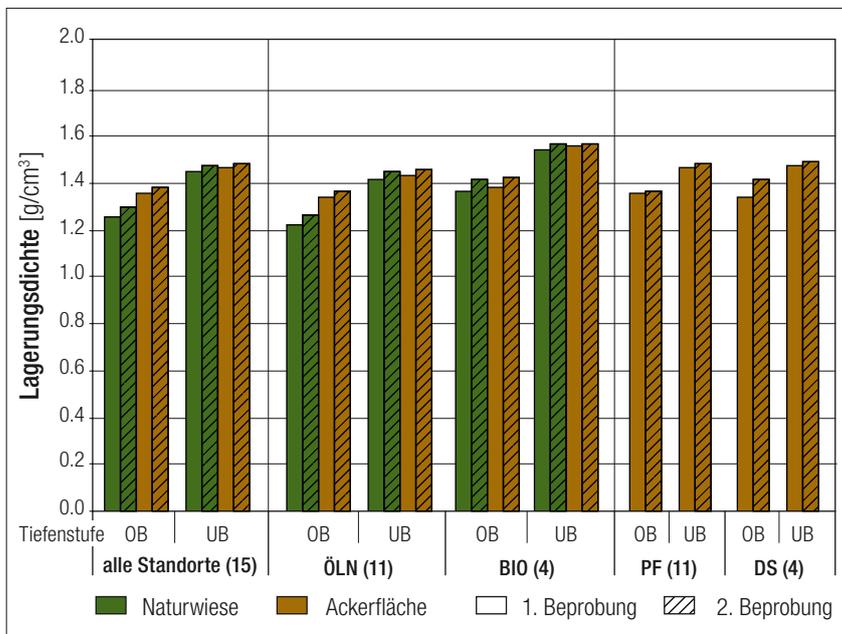


Abbildung 7–2: Lagerungsdichte von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Ober- und Unterboden sowie Erst- und Zweitbeprobung). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 15 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (11 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (11 Standorte) und DS (4 Standorte).

Zweitbeprobung bestätigt. Die Gesamtporenvolumina der Unterböden sind in den NW und AF tiefer als diejenigen der Oberböden, auf den NW um 6 Vol.-% und auf den AF um 4 Vol.-%. Der Mittelwert beträgt rund 45 Vol.-%.

Hohe Gesamtporenvolumina auf den NW sind insbesondere bei den ÖLN Standorten Roggwil und Treiten im Oberboden (in Treiten auch im Unterboden) festzustellen (Anhang II). In Roggwil, wo die NW noch heute als Wässer-matte genutzt wird, führte die ackerbauliche Bewirtschaftung im Oberboden zu einer massiven Reduktion des Gesamtporenvolumens um mehr als 15 Vol.-%.

Die Standorte der Produktionsrichtlinie BIO weisen bei beiden Beprobungszyklen in den Oberböden der NW und AF ein signifikant tieferes Gesamtporenvolumen auf als die ÖLN Standorte. Vermutlich haben die tieferen Humusgehalte der BIO Standorte (Kapitel 7.2.4) zu einem schlechteren Gefügebautbau geführt.

Signifikante Unterschiede zwischen den Anbausystemen DS und PF wurden nicht festgestellt. Diese Beobachtung kann im Systemvergleich Oberacker teilweise bestätigt werden: Wurden hier bei der Erstbeprobung auf den DS Parzellen noch signifikant tiefere Gesamtporenvolumina gemessen, waren nach der Umstellungszeit bei der Zweitbeprobung keine statistischen Unterschiede zwischen den DS und den PF Parzellen mehr festzustellen.

Die Resultate der KABO zeigen, dass Oberböden höhere Gesamtporenvolumina aufweisen als Unterböden, ÖLN Standorte

höhere als BIO und die Oberböden in den NW höhere als in den AF.

b. Lagerungsdichte

Je höher das Gesamtporenvolumen, desto tiefer ist die Lagerungsdichte. Nicht in die Berechnungen einbezogen wurde der ÖLN Standort Treiten, da es sich hier nicht um einen mineralischen, sondern um einen Torfboden mit sehr geringer Lagerungsdichte (1 g/cm^3) handelt (Anhang II). Dies würde die Statistik stark beeinflussen. Entsprechend den Gesamtporenvolumina sind die Oberböden aller 15 AF bei beiden Beprobungszyklen signifikant um 0.1 g/cm^3 dichter gelagert als diejenigen der NW (**Abbildung 7–2**). Im Mittel weisen die Unterböden bei den AF eine um 0.1 g/cm^3 , bei den NW eine um 0.2 g/cm^3 signifikant höhere Lagerungsdichte auf als die Oberböden. Dies kann nur teilweise mit dem Eigengewicht des Bodens erklärt werden (Kapitel 7.3 und 7.4). Generell führt die Wiesennutzung zu lockerer Lagerung. Wie beim Gesamtporenvolumen wird die Lagerungsdichte am Standort Roggwil am stärksten durch die ackerbauliche Nutzung verändert.

Werden die Produktionsrichtlinien miteinander verglichen, weisen die ÖLN Standorte gegenüber den BIO Standorten bei beiden Beprobungszyklen signifikant tiefere Lagerungsdichten in den Unterböden der NW und AF sowie in den Oberböden der NW auf. In den Oberböden der BIO Standorte sind auch die Werte der NW hoch und entsprechen nahezu denjenigen der AF. Dies steht im Gegensatz zu den ÖLN Standorten, wo die Oberböden der AF deutlich dichter gelagert sind als die Böden der NW.

Der Vergleich der Anbausysteme DS und PF ergab keine signifikanten Unterschiede. In den Oberböden der gepflügten Flächen wurden zwischen den beiden Beprobungszyklen konstante Lagerungsdichten (1.40 g/cm^3) festgestellt. Demgegenüber zeigen die Oberböden der direkt gesäten Flächen eine tendenzielle Dichtezunahme von 1.34 g/cm^3 auf 1.42 g/cm^3 . Dies steht im Gegensatz zum Systemvergleich Oberacker, wo die Oberboden-Dichten der PF Parzellen zwischen der Erst- und Zweitbeprobung leicht zunehmen.

Die Resultate der KABO zeigen, dass in den Oberböden sowohl die NW-Nutzung als auch das PF-Anbausystem eine tiefere, die Produktionsrichtlinie BIO dagegen in den Oberböden der NW und den Unterböden generell eine höhere Lagerungsdichte bewirken.

c. Porengrößenverteilung

In Anhang II sind für jeden Standort die Einzelwerte der auf die verschiedenen Porenklassen

aufgeteilten Gesamtporenvolumina zusammengestellt. Hier wird nur auf die Grobporen (Entwässerung bei pF 1.8) näher eingegangen. Vor allem diese unterliegen innerhalb weniger Jahre bewirtschaftungsbedingten Veränderungen und sind für das rasche Ableiten von Niederschlagswasser und die Durchlüftung des Bodens ausschlaggebend. Sie gelten als Verdichtungsparameter.

Der Nutzungsvergleich zwischen AF und NW über alle 16 Standorte zeigt bei den Grobporenvolumina sowohl in den Oberböden als auch in den Unterböden keine signifikanten Unterschiede (**Abbildung 7-3**). Hingegen konnte zwischen der Erst- und Zweitbeprobung eine signifikante Erhöhung der Grobporenwerte festgestellt werden (Ausnahme: Unterböden der NW). Besonders gross ist die Zunahme am Standort Buch in beiden Tiefenstufen, während am Standort Seedorf (im Oberboden) eine markante Abnahme festzustellen ist (Anhang II).

Auch der Vergleich zwischen den Produktionsrichtlinien ÖLN und BIO führt weder in den Oberböden noch in den Unterböden zu signifikanten Unterschieden. Sehr hohe Werte von bis über 14 Vol.-% wurden an den Standorten Schlosswil, Seedorf, Buch, Rubigen (ÖLN Standorte) sowie Bantigen und Uettigen (BIO Standorte) gemessen.

Im Vergleich der Grobporenvolumina zwischen den Anbausystemen DS und PF konnten sowohl in den Oberböden als auch in den Unterböden signifikante Unterschiede zugunsten der DS festgestellt werden. In den Oberböden liegen die Werte bei den PF-Flächen durchschnittlich bei 11.3 Vol.-%, bei den DS-Flächen bei 13 Vol.-%. Die Druckbelastungen beim Befahren schädigen die Grobporen der direkt gesäten Flächen weniger als diejenigen der gepflügten (Kapitel 7.3 und 7.4). Noch stärker wirken sich die unterschiedlichen Anbausysteme in den Unterböden aus: DS weist im Durchschnitt sehr hohe Grobporenvolumina von 16.4 Vol.-% aus und liegt damit um 3.5 Vol.-% höher als PF. Sehr hohe Grobporenvolumina über 14 Vol.-% wurden bei allen DS-Flächen gemessen, während sich derart hohe Werte nur bei einem Drittel der PF-Flächen finden. Insbesondere DS-Flächen weisen schon in den Oberböden einen guten Gefügebau auf. Dadurch werden Druckbelastungen vermehrt im Oberboden aufgefangen. Im Systemvergleich Oberacker wurden nur bei der Erstbeprobung im Oberboden signifikante Unterschiede zugunsten des PF nachgewiesen.

Die Resultate der KABO zeigen, dass Nutzung und Produktionsrichtlinie keinen Einfluss auf das Grobporenvolumen haben. Hingegen bewirkt das Anbausystem DS eine Zunahme der Grobporen, insbesondere in den Unterböden.

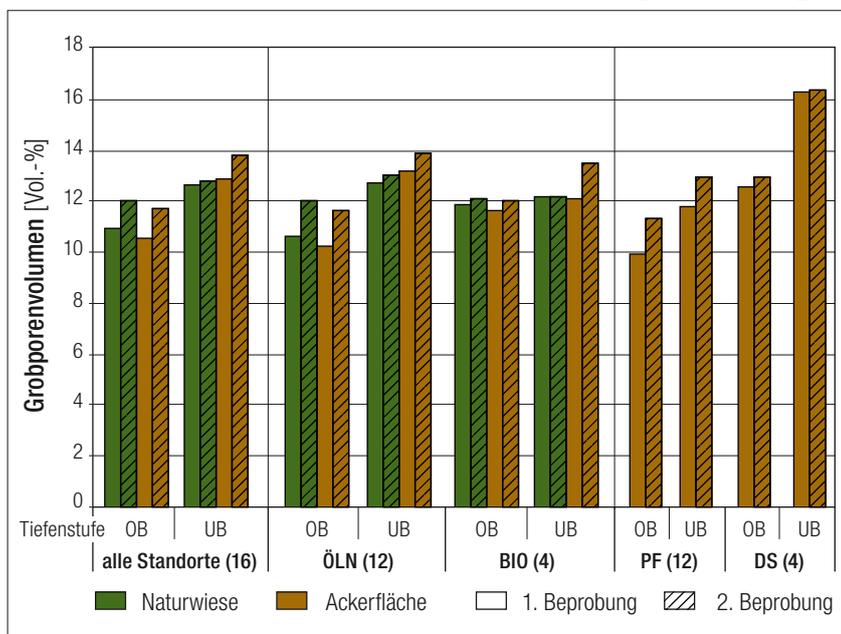


Abbildung 7-3: Grobporenvolumen von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Ober- und Unterboden sowie Erst- und Zweitbeprobung). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

d. Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die Werte der Wasserinfiltration [mm/h], gemessen mit Einfachring-Infiltrometern, streuen so stark, dass eine statistische Auswertung nicht möglich ist. Dagegen führt die Umrechnung in «gesättigte Wasserleitfähigkeit» [cm/s] zu einer Normalverteilung der Werte und erlaubt eine statistische Auswertung.

Der Nutzungsvergleich zwischen den 16 NW und AF zeigt bei beiden Beprobungszyklen signifikante Unterschiede zugunsten der NW und signifikant höhere gesättigte Wasserleitfähigkeitswerte bei der Zweitbeprobung (**Abbildung 7-4**). Dabei veränderte sich die Mittelwertklassifizierung gemäss Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope (2006) bei den AF zwischen der Erst- und der Zweitbeprobung von einer «gemehrten» ($1.17 \cdot 10^{-4}$ cm/s) zu einer «mässigen» ($1.25 \cdot 10^{-4}$ cm/s) Durchlässigkeitsklasse, bei den NW von einer «normalen» ($3.17 \cdot 10^{-4}$ cm/s) zu einer «hohen» ($7.75 \cdot 10^{-4}$ cm/s). NW infiltrieren gegenüber AF deutlich mehr Wasser: bei der Erstbeprobung drei Mal, bei der Zweitbeprobung acht Mal mehr.

Die beim Vergleich zwischen den Produktionsrichtlinien nach der Erstbeprobung nachgewiesenen signifikant höheren gesättigten Wasserleitfähigkeiten auf den AF der BIO Standorte im Vergleich zu den AF der ÖLN Standorte wurden bei der Zweitbeprobung nicht mehr festgestellt. Bei lediglich vier BIO Standorten gewichtete der massive Rückgang der Werte am Standort Clavaleyres überdurchschnittlich (Anhang II). Höchstwerte wurden ausschliesslich auf NW gemessen, so an den beiden BIO

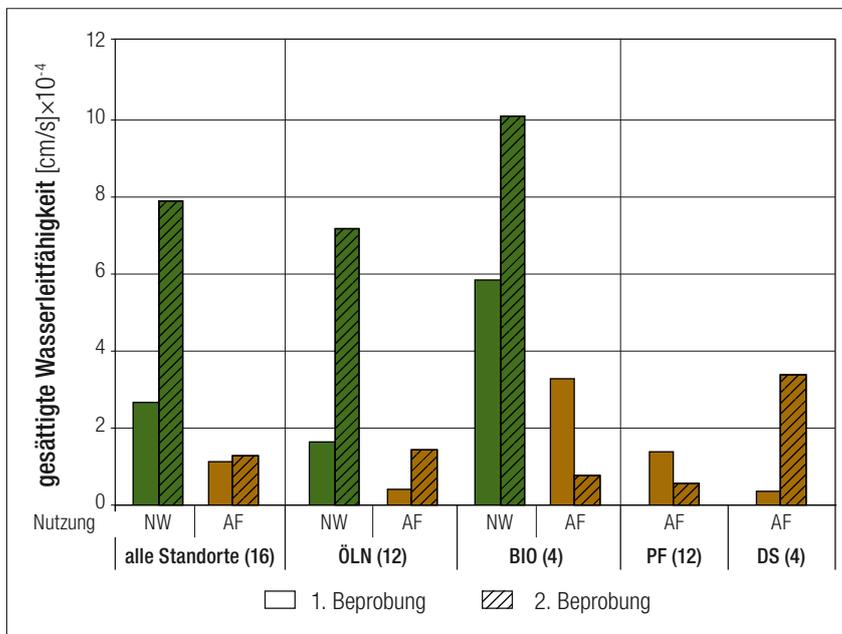


Abbildung 7-4: Gesättigte Wasserleitfähigkeit von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Erst- und Zweitbeprobung). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

Standorten Bantigen (Zweitbeprobung) und Uettligen (Erstbeprobung) sowie am ÖLN Standort Madiswil (Zweitbeprobung).

Auffallend ist der Einfluss des Anbausystems. Wurde bei der Erstbeprobung zwischen DS und PF kein signifikanter Unterschied bei den gesättigten Wasserleitfähigkeiten gemessen, sind die Werte der DS bei der Zweitbeprobung signifikant um den Faktor 4 höher. Mit der Zu-

nahme auf «normal» durchlässige Werte von $3.39 \cdot 10^{-4}$ cm/s gleichen sich die direkt gesäten AF den als «mässig» klassierten Werten der NW-Erstbeprobung ($2.86 \cdot 10^{-4}$ cm/s) an. Wie bei den Grobporen deutet das Infiltrationsverhalten der DS darauf hin, dass sich die Porenkontinuität durch den Pflugverzicht verbessert hat. Regenwürmer und Pflanzenwurzeln bauen Grobporen auf, welche das Niederschlagswasser rasch in grössere Tiefen ableiten. Dies belegt die Bedeutung der DS bei der Erosionsbekämpfung (Kapitel 9.2). Höhere gesättigte Wasserleitfähigkeitswerte durch DS konnten auch im Systemvergleich Oberacker festgestellt werden. Diese Erkenntnis wird hiermit bestätigt und durch eine breitere Datenbasis gestützt.

Bodenruhe, verbunden mit permanenter Bodendurchwurzelung, wie es bei NW und DS der Fall ist, bewirkt hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten. Dies gilt tendenziell auch für die AF der BIO Standorte.

e. Luftdurchlässigkeit

Die Luftdurchlässigkeiten wurden nur bei der Zweitbeprobung durch die ART bestimmt. Dazu wurden pro Fläche und Tiefenstufe neun ungestörte Zylinderproben mit einem Volumen von 235 cm^3 pro Nutzung entnommen. Im Labor wurde den Zylinderproben solange über eine aufgesetzte Glocke ein Luftstrom mit einem Überdruck von 2 hPa eingeleitet, bis die Luft konstant strömte. Wie die Wasserinfiltration beschreibt die Luftdurchlässigkeit die Qualität des Grobporensystems.

Der Nutzungsvergleich über alle 16 Standorte ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen NW und AF (Abbildung 7-5). Gemäss der Einteilung von Van der Veer (2005) werden die Mittelwerte der Oberböden mit knapp $600 \mu\text{m}^2$ als «tief» klassiert, diejenigen der Unterböden mit $1060 \mu\text{m}^2$ (NW) bzw. $881 \mu\text{m}^2$ (AF) als «mässig». Sehr hohe Werte wurden am ÖLN Standort Langnau (nur Unterboden), am DS Standort Auswil (nur AF) sowie am BIO Standort Möriswil (nur Unterboden der NW) festgestellt, während an den ÖLN Standorten Madiswil (nur Oberboden der NW) und Roggwil (nur Unterboden der NW) die tiefsten Luftdurchlässigkeiten gemessen wurden (Anhang II). Auffallend ist jedoch der signifikante Unterschied zwischen den Oberböden und den Unterböden: Ein luftführendes Porensystem ist in den Oberböden schwieriger aufzubauen als in den Unterböden, da das Gefüge in der oberen Bodenschicht vermehrt Witterungs- (Niederschlag, Frost und Trockenheit) und Bewirtschaftungseinflüssen (Druckbelastungen durch Maschinen und Viehtritt) ausgesetzt ist.

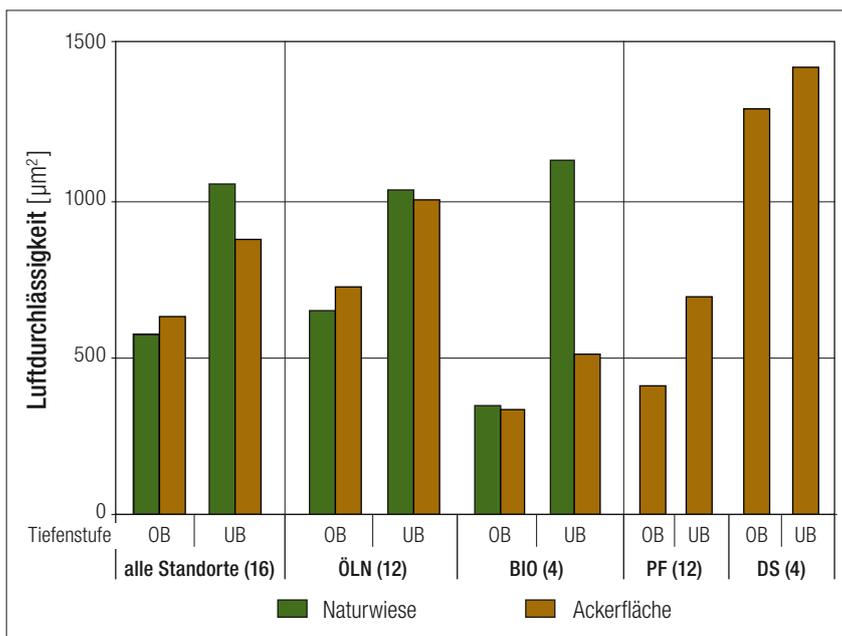


Abbildung 7-5: Luftdurchlässigkeit von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Ober- und Unterboden). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

Beim Vergleich der Produktionsrichtlinien weisen an den BIO Standorten die AF «sehr tiefe» (OB) bis «tiefe» (UB) Luftdurchlässigkeiten auf, während die signifikant höheren Werte

der ÖLN Standorte im Bereich «tief» (OB) bis «mässig» (UB) liegen. Die Produktionsrichtlinie BIO bewirkt bei der Nutzung als NW struktur-stabile Unterböden mit markant erhöhten Luftdurchlässigkeiten.

Beim Vergleich der Anbausysteme fällt auf, dass DS gegenüber PF in beiden Tiefenstufen signifikant höhere Luftdurchlässigkeiten aufweist. Die Werte des Anbausystems DS liegen im Bereich «gut», während diejenigen des Anbausystems PF in beiden Tiefenstufen als «tief» klassiert sind. Stark höhere Luftdurchlässigkeiten im Unterboden konnte auch im Systemvergleich Oberacker gemessen werden. Im Oberboden hingegen, wo nur wenige Monate vor der Entnahme der Zylinderproben ein PF-Einsatz erfolgte, wiesen die PF Parzellen bedeutend höhere Luftdurchlässigkeiten auf.

In den Unterböden sind die Luftdurchlässigkeiten generell höher als in den Oberböden. BIO AF zeigen in den Unterböden eine leicht reduzierte, das Anbausystem DS hingegen stark erhöhte Luftdurchlässigkeiten in beiden Tiefenstufen.

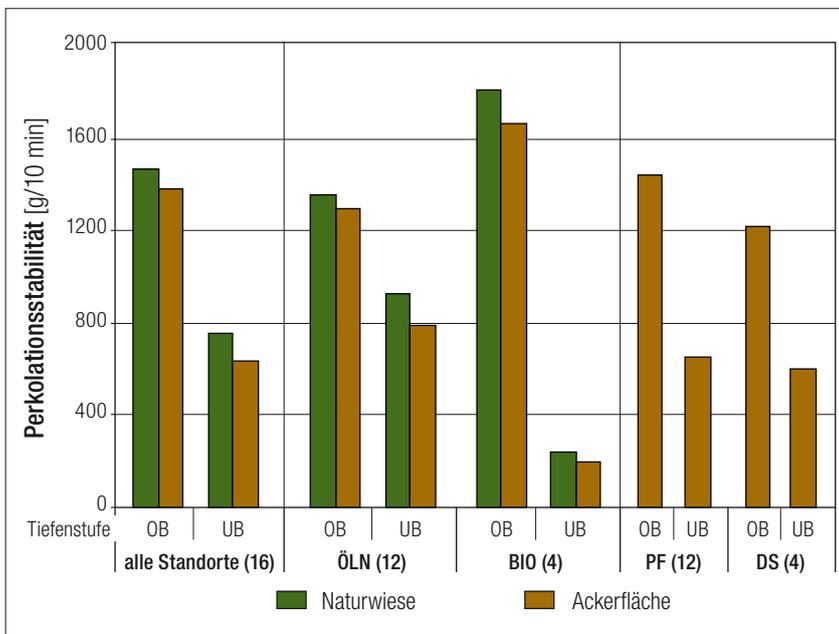


Abbildung 7-6: Perkolationsstabilität von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Ober- und Unterboden). Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

f. Perkolationsstabilität

Die Perkolationsstabilität ist ein Parameter zur Bestimmung der Krümelstabilität und wird erst seit 1997 gemessen. Deshalb sind im Folgenden nur die Auswertungen des zweiten Beprobungszyklus dargestellt.

Auffallend bei der Perkolationsstabilität ist der signifikante Unterschied zwischen den beiden Tiefenstufen bei NW und AF sowie die geringe Differenz zwischen den beiden Nutzungen (**Abbildung 7-6**). Der Grund dafür liegt im tieferen Humusgehalt der Unterböden.

Beim Vergleich zwischen den Produktionsrichtlinien sind die Perkolationsstabilitäten in den Oberböden der ÖLN Standorte signifikant tiefer als diejenigen der BIO Standorte, in den Unterböden dagegen verhält es sich umgekehrt. Bei den BIO Standorten sind die Werte der Oberböden rund achtmal höher als diejenigen der Unterböden, beim ÖLN ist die Differenz zwischen den beiden Tiefenstufen geringer, aber immer noch signifikant.

Der Vergleich der Anbausysteme ergab keine Unterschiede zwischen DS und PF. In beiden Systemen sind die Oberboden-Werte gut doppelt so hoch wie diejenigen im Unterboden. Im Systemvergleich Oberacker dagegen wurden im Oberboden der DS signifikant höhere Perkolationsstabilitäten gemessen als im PF, was auf positive Effekte der Direktsaat in dieser Bodenschicht hindeutet.

Oberböden zeigen generell eine höhere Perkolationsstabilität als Unterböden. Die Bewirtschaftung gemäss BIO Richt-

linien wirkt sich im Oberboden positiv, im Unterboden negativ auf die Stabilität der Bodenkrümel aus.

7.2.2 Biologische Parameter

a. Regenwürmer

Die Auswirkungen der Regenwürmer auf den Boden sind vielfältig: sie vermischen Unterboden mit Oberboden, strukturieren und drainieren ihn. Sie bauen totes organisches Material ab und aktivieren dabei die Mikroorganismen, düngen den Boden mit ihrem Kot und sind selber eine bedeutende Stickstoff-Quelle bzw. fixieren Stickstoff in ihrem Körper. Schliesslich regulieren sie den Boden-pH im neutralen Bereich von etwa 7.

Neben den Gesamtbiomassen werden die Biomassen der folgenden vier Gruppen unterschieden (Anhang II): epigäische Arten (Streubewohner), endogäische Arten (Mineralbodenbewohner) sowie die beiden Tiefgräber anözische *Nicodrilus* (sie verschliessen die Röhren und sind im Sommer inaktiv) und anözische *Lumbricus* (die Gänge bleiben offen und sie ziehen sich in die Tiefe zurück).

Der Nutzungsvergleich aller 16 NW gegenüber den AF zeigt keine signifikanten Unterschiede der Gesamtbiomassen, weder beim ersten noch beim zweiten Beprobungszyklus (**Abbildung 7-7**). Dies steht im Gegensatz zur Aussage im letzten Bodenbericht 2003, dass sich mehr Regenwürmer in NW als in AF finden. Für den vorliegenden Bericht mussten die Werte

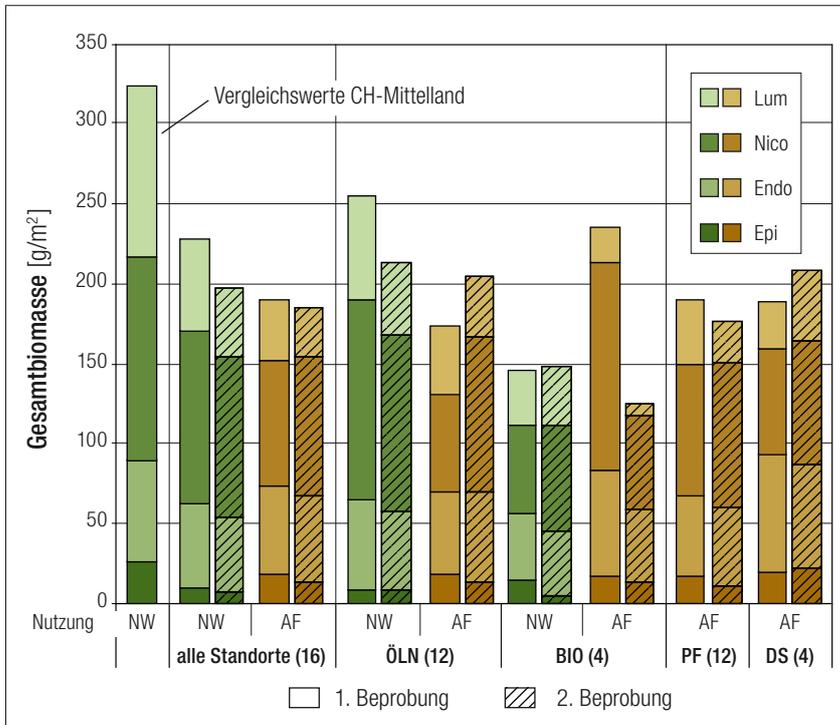


Abbildung 7-7: Summe der Biomassen von endogäischen, epigäischen und anözischen Regenwurmart von Naturwiesen und Ackerflächen (jeweils Erst- und Zweitbeprobung). Bei den anözischen Arten wurde zwischen *Lumbricus terrestris* und *Nicodrilus*-Arten unterschieden. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mediane von 16 Standorten, zusätzlich aufgeteilt nach Produktionsrichtlinie ÖLN (12 Standorte) und BIO (4 Standorte) sowie für die Ackerflächen nach Bearbeitungssystem PF (12 Standorte) und DS (4 Standorte).

neu berechnet werden (Reduktion der Anzahl Standorte von 19 auf 16), wobei insbesondere die drei aufgegebenen Standorte deutliche Unterschiede zugunsten der NW zeigten (VOL 2003). Zwei weitere Faktoren für die Ähnlichkeit von NW und AF innerhalb der KABO könnten der Beprobungszeitpunkt und die Nutzung der AF sein. Die Probenahme erfolgte gut ein Jahr nach der Kunstwiesenansaat. Bekanntlich kann sich die Regenwurmpopulation während einer Kunstwiesenperiode deutlich regenerieren (Jossi 2001), was zu höheren Biomassewerten führt, als dies bei einer Ackerfrucht der Fall wäre. Im Weiteren werden vier AF langjährig mit dem System DS bewirtschaftet, was zu einer Angleichung der Regenwurmbiomassen an diejenigen der NW führt (Maurer et al. 2005). Der Vergleich der mittleren Gesamtbiomassewerte mit den «Vergleichswerten für Wiesenböden im schweizerischen Mittelland» (Stähli et al. 1997) zeigt, dass die NW mit 228 g/m² bzw. 197 g/m² und die AF mit 190 g/m² bzw. 184 g/m² bei beiden Beprobungszyklen unterhalb des unteren (25%)-Quartils von 250 g/m² liegen (Abbildung 7-7). Beim ersten Beprobungszyklus zeigten noch sechs der 16 Standorte höhere Gesamtbiomassen in den NW als in den AF, beim zweiten war dies nur noch an einem Standort der Fall (Anhang II). Standorte mit wiederholt stark vom Mittelwert abweichenden Biomassen sind Niederösch und Rubigen (NW), Rüderswil und Uetligen (NW und AF).

Die beiden anözischen Gruppen *Nicodrilus* und *Lumbricus* sind bezüglich Biomassenanteil und Strukturbildung die wichtigsten. Insbesondere die Art *Lumbricus terrestris* reagiert auf die Bodenbearbeitung (Kapitel 8). Ein signifikanter Unterschied zugunsten der NW konnte nur bei der Gruppe anözische Regenwürmer nachgewiesen werden.

Beim Faktor Produktionsrichtlinie lassen sich bei beiden Beprobungszyklen die ÖLN NW von den BIO NW und die ÖLN AF von den BIO AF statistisch signifikant unterscheiden (Abbildung 7-7). Bei der Bewirtschaftung nach ÖLN zeigen die NW infolge der zunehmenden Extensivierung eine signifikante Abnahme der Regenwurmbiomassen von der ersten zur zweiten Beprobung, während es bei den AF aufgrund der an vier Standorten erfolgten Umstellung auf DS zu einer signifikanten Zunahme kommt. Dieses gegensätzliche Verhalten führt dazu, dass sich ÖLN NW und AF bezüglich ihrer Regenwurmpopulation nicht mehr unterscheiden lassen und mit 214 bzw. 205 g/m² Werte aufweisen, die sich denjenigen des Schweizer Mittellandes annähern. Auch bei der Produktionsrichtlinie BIO gleichen sich NW und AF einander an: Während die NW bei beiden Beprobungszyklen vergleichbare, mit 140–150 g/m² jedoch geringe Regenwurmbiomassen zeigen, ist die Menge in den AF beim zweiten Beprobungszyklus signifikant gesunken. Der Grund für diese tiefen Werte in den BIO NW könnte im geringeren Nahrungsangebot liegen, da biologisch bewirtschaftete Flächen in der Regel weniger gedüngt werden und damit auch der Pflanzenertrag bzw. die Menge an Pflanzenresten für die Tiere weniger gross ist als in den mit Nährstoffen gut versorgten Wiesen der ÖLN Betriebe. Zudem unterscheidet sich auch die Qualität des Regenwurmfutters, liegen doch drei der vier BIO NW unmittelbar am Waldrand und sind im Herbst mit tanninhaltigen Buchen- und Eichenblättern bedeckt, die von den Regenwürmern gemieden werden. In den BIO AF liegt der Grund für die tiefen Biomassenwerte sehr wahrscheinlich im häufigen Pflugeinsatz zur Beikrautregulierung, der insbesondere die anözischen Regenwürmer stark negativ beeinflusst.

Der Vergleich der Anbausysteme PF und DS bestätigt die im Rahmen des Systemvergleichs Oberacker (Kapitel 8) formulierte Aussage, wonach der langjährige Verzicht auf den Pflug zu einer starken Zunahme der Regenwurmpopulation, insbesondere der tief grabenden Art *Lumbricus terrestris*, führt. Beim ersten Beprobungszyklus, wo noch kein Betrieb mit DS arbeitete, unterschieden sich die beiden Anbausysteme nicht. Beim zweiten dagegen zeigen die vier auf DS umgestellten AF signifikant höhere Regenwurmbiomassen als PF, und die durchschnittlichen Werte von gut 260 g/m² sind mit NW vergleichbar. Speziell *Lumbricus terrestris* wird durch die Abkehr vom

Pflug sehr stark gefördert, was dem Luft- und Wasserhaushalt des Bodens zugute kommt.

Die Regenwürmer reagieren auf die unterschiedliche Bewirtschaftung, insbesondere auf die Bodenbearbeitung und die Zufuhr von organischem Pflanzmaterial. Regelmässig gepflügte Böden und solche mit geringerer Düngungsintensität, wie sie im biologischen Landbau häufig vorkommen, weisen geringere Regenwurmpopulationen auf als diejenigen mit DS oder einer Bewirtschaftung gemäss ÖLN. Insbesondere die tief grabende Art *Lumbricus terrestris* trägt mit ihren stabilen Wohnröhren positiv zum Wasser- und Lufthaushalt im Boden bei.

Kasten 7-1: Landwirtschaftliches Umweltziel «Schadstoffe im Boden» (BAFU und BLW 2008)

1. Keine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit und der Gesundheit durch anorganische oder organische Schadstoffe aus der Landwirtschaft.
2. Der Eintrag einzelner Schadstoffe aus der Landwirtschaft in Böden ist kleiner als deren Austrag und Abbau.

Bodenschutzlabor des Kantons Bern (GBL) gemäss VBBo analysierten Resultate der anorganischen und organischen Schadstoffe, eingeteilt in die vier folgenden Klassen:

- Gehalt < 50 % des Richtwerts (weiss)
- Gehalt 50–80 % des Richtwerts (gelb)
- Gehalt 80–100 % des Richtwerts (orange)
- Gehalt > 100 % des Richtwerts (rot)

b. Mikrobiologische Parameter

Die ersten Erhebungen der mikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse (FEM) und mikrobielle Atmung (CO_2) erfolgten ab 1999. 2004 musste das Labor gewechselt werden, seither werden die Analysen von der ART durchgeführt. Dabei werden auch gleichzeitig die für die Referenzwertberechnung (VB 2009) nötigen Bodenparameter pH-Wert, Gehalt an organischer Substanz C_{org} , Ton- sowie Sandgehalt analysiert. Weil noch nicht alle 16 Standorte in dieser Weise beprobt sind, wird hier auf eine Auswertung verzichtet.

7.2.3 Organische und anorganische Schadstoffe

Schadstoffe sind im Boden unerwünschte Stoffe. Man unterscheidet anorganische (Schwermetalle) und organische Schadstoffe (polyaromatische Kohlenwasserstoffe PAK und polychlorierte Biphenyle PCB). Schadstoffe sind im Muttergestein vorhanden (geogen), sie gelangen aber auch durch menschliche Tätigkeiten über die Atmosphäre in den Boden (atmogen). Im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) werden seit 1985 schweizweit auf über hundert Standorten Schadstoffuntersuchungen durchgeführt. Die NABO-Studien ergaben, dass es keine unbelasteten Standorte mehr gibt und dass auf rund 10 % der Böden in der Schweiz der Richtwert nach VBBo überschritten ist (BUWAL 2001). Es ist deshalb ein vordringliches Ziel, Schadstoffeinträge auch aus der Landwirtschaft gemäss dem landwirtschaftlichen Umweltziel «Schadstoffe im Boden» zu minimieren (Kasten 7-1).

Die Resultate der nachfolgenden Schadstoffuntersuchungen verstehen sich als Einzelwerte von Standorten, die nicht nach chemischen, sondern nach physikalischen Aspekten der Bodenbelastung ausgesucht (VOL 1997, 2003) und nicht statistisch ausgewertet wurden. **Tabelle 7-1** zeigt die vom Gewässer- und

a. Schwermetalle

Der Gehalt an Schwermetallen im Boden sowie die Bedeutung des pH-Werts im Zusammenhang mit Schwermetallmobilitäten wurden in Kapitel 5 an forstwirtschaftlich genutzten Böden diskutiert. Landwirtschaftlich genutzte Böden werden regelmässig gedüngt. Aus Gründen der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe wird in den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF 2009) empfohlen, bei schwach sauren Böden (pH-Wert < 5.9) mit geeigneten Düngern ein weiteres Absinken des pH-Werts zu verhindern. Damit wird einer Versauerung vorgebeugt und vermieden, dass die Schwermetalle in die lösliche Form gelangen und ausgewaschen werden können. Dies führt jedoch zu einer Anreicherung der Schwermetalle in den Oberböden.

Die Schwermetallgehalte der 16 KABO Standorte bestätigen diese Aussage (**Tabelle 7-1**): Bei beiden Beprobungszyklen sind die durchschnittlichen Werte in den Oberböden leicht höher als in den Unterböden. Diese Feststellung wird durch die Ergebnisse aus der Bodenschicht 0–5 cm, welche jeweils auf den NW zusätzlich entnommen wurden, gestützt (hier nicht dargestellt). Bei NW sind höhere Schwermetallgehalte festzustellen als bei AF, weil der Humusgehalt in den Oberböden der NW um rund einen Drittel höher ist und sich die Schwermetalle vorwiegend an den Ton-Humus-Komplex binden. Zudem fehlt eine regelmässige Durchmischung bei der Bodenbearbeitung, sodass sich die in schwach sauren bis alkalischen Böden immobilisierten Schwermetalle akkumulieren. Richtwertüberschreitungen sowie erhöhte Werte (> 80 % des Richtwerts) konzentrieren sich folglich auf die Oberböden der NW. Dies ist insbesondere an den Standorten Niederösch, Treiten, Langnau und Roggwil der Fall. Auffallend häufig betroffen ist das Element Kupfer: An den Standorten Niederösch und Langnau wurden offensichtlich in den älteren Hochstamm-Obstanlagen langjährig Kupferpräparate gegen Schadorganismen eingesetzt. Bei der NW in

Tabelle 7-1: KABO Erst- und Zweitbeprobungsergebnisse der organischen und anorganischen Schadstoffe

Standort und Beprobung	Nutzung ¹ und Tiefe [cm]	Pb		Cd		Cr		Cu		Ni		Hg		Zn		PAK _{tot}	
		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Bantigen 1997/2004	NW 0–20	13.3	14	0.13	0.16	24.5	22	7.2	6.8	12	15	0.07	0.07	31	35	0.05	0.10
	NW 20–40	0	11	0	0.12	21.5	18	5.8	5.4	13.1	14	0	0.05	29	30	0.07	0.02
	AF 0–20	14	13	0.11	0.16	26.5	22	15.1	13	13.6	17	0.05	0	38.5	40	0.13	0.01
	AF 20–40	0	11	0	0.11	22.5	21	8.1	9.6	13.8	17	0	0	31.5	36	0.01	0.04
Clavaleyres 1999/2006	NW 0–20	10.2	11	0	0	19.6	18	9.4	10	14.2	17	0	0	30	36	0.07	0.06
	NW 20–40	0	10	0	0	23	20	8.7	8.8	16.7	20	0	0	32	34	0.01	0.01
	AF 0–20	0	10	0	0	18.6	17	10.5	11	11.4	15	0	0	28	33	0.03	0.04
	AF 20–40	0	0	0	0	17.7	16	8.3	8.6	11.8	15	0	0	25	30	0.01	0.03
Möriswil 1995/2002	NW 0–20	12.6	11.9	0.13	0.12	20	18.8	15.4	8.6	14.8	14.3	0	0	41	38	0.07	0.06
	NW 20–40	0	0	0	0	16.5	14.2	9.6	8	16.1	15	0	0	38	35	0.05	0.01
	AF 0–20	15	11.8	0.14	0.13	22	19.1	12	10.2	17	15.5	0.05	0	51	44	0.07	0.05
	AF 20–40	10.7	0	0.11	0.1	20	18.1	11.2	10	19.6	18.9	0	0	47	44	0.04	0.01
Uettligen 1997/2005	NW 0–20	12.6	14	0.12	0.19	23	22	17	20	17.9	23	0	0	40	48	0.05	0.08
	NW 20–40	0	11	0	0.16	21	21	11.3	15	17.9	23	0	0	31	38	0	0.03
	AF 0–20	13.9	15	0.14	0.19	25	23	18.5	18	18	22	0	0	37.5	43	0.04	0.06
	AF 20–40	0	10	0	0.15	22	19	12	14	18.7	21	0	0	31	36	0.01	0.03
RW²-Überschreitungen BIO³		0	0	0	0												
Mittelwert⁴ der BIO Standorte	NW 0–20	12.2	12.7	0.10	0.12	21.8	20.2	12.3	11.4	14.7	17.3	0.02	0.02	35.5	39.3	0.06	0.08
	NW 20–40	0.0	8.0	0.00	0.07	20.5	18.3	8.9	9.3	16.0	18.0	0	0.01	32.5	34.3	0.03	0.02
	AF 0–20	10.7	12.5	0.10	0.12	23.0	20.3	14.0	13.1	15.0	17.4	0.03	0	38.8	40.0	0.07	0.04
	AF 20–40	2.7	5.3	0.03	0.09	20.6	18.5	9.9	10.6	16.0	18.0	0	0	33.6	36.5	0.02	0.03
Grasswil 1996/2004	NW 0–20	20.5	21	0.24	0.3	28.5	26	34	38	20.2	22	0.07	0.06	62.5	65	0.08	0.09
	NW 20–40	13.7	15	0.17	0.22	22.5	23	15.7	19	19	23	0	0	43.5	49	0.06	0.02
	AF 0–20	14.4	15	0.16	0.21	22	18	16.8	16	13.9	16	0	0	40	44	0.05	0.02
	AF 20–40	12.2	14	0.17	0.21	18.5	20	12.1	16	16.2	20	0	0	36.5	44	0.04	0.01
Langnau 1996/2003	NW 0–20	24	20	0.22	0.2	34.5	26	78.5	47	25.5	25	0.28	0.27	62	57	0.13	0.10
	NW 20–40	18.2	15.3	0.18	0.16	28	21	49	26	25.5	27	0.21	0.14	52.5	49	0.06	0
	AF 0–20	16.9	15.4	0.19	0.19	29.5	25	22.5	23	23	23	0.10	0.10	49	52	0.04	0.07
	AF 20–40	13.1	12	0.15	0.15	25.5	22	16.8	16.1	22.5	24	0.07	0.06	41	43	0.03	0.01
Madiswil 1997/2006	NW 0–20	22.5	19	0.12	0.15	23	20	29.5	26	11.8	14	0.05	0.05	40	44	0.14	0.30
	NW 20–40	12.6	30	0	0.1	19.4	19	13.5	14	11.1	15	0	0	29.5	36	0.03	0.14
	AF 0–20	15	16	0.12	0.16	24	22	14.5	15	12.1	15	0	0	36	44	0.07	0.18
	AF 20–40	10.2	12	0	0.12	20.5	20	10.4	12	12.1	16	0	0	29.5	36	0.06	0.13
Niederörsch 1994/2003	NW 0–20	18.4	14.7	0.2	0.2	20	16.3	74	57	18.4	16.7	0.07	0	54	45	0.19	0.03
	NW 20–40	14.6	11.2	0.15	0.17	16.5	13.9	23	24	18.7	17.3	0.06	0	44	36	0.07	0.01
	AF 0–20	15.1	12.8	0.16	0.17	17.7	16.8	26	24	16.9	15.9	0.05	0	45	38	0.06	0.02
	AF 20–40	13.9	11.6	0.15	0.14	17	15.6	19.8	16.2	17.7	17.2	0.05	0	42	34	0.02	0.01
Roggwil 1996/2005	NW 0–20	50	50	0.33	0.33	55.5	46	43	44	24.5	28	0.2	0.16	97	96	0.97	1.35
	NW 20–40	33	34	0.25	0.23	41	38	28.5	29	22	25	0.12	0.10	64.5	63	0.44	0.67
	AF 0–20	18.1	15	0.21	0.17	24.5	18	17.7	15	16.5	17	0.05	0	44	41	0.07	0.20
	AF 20–40	14.3	13	0.16	0.12	22	18	12	12	16.6	18	0	0	35.5	35	0.04	0.05
Rüderswil 2000/2007	NW 0–20	18.5	20	0.23	0.25	23	28	24	24	16.8	18	0.07	0.06	50	55	2.33	1.91
	NW 20–40	17.8	17	0.13	0.16	19.6	23	15.8	18	16.7	19	0.06	0.05	42	48	0.68	0.58
	AF 0–20	15.7	17	0.2	0.21	22	25	12.9	14	15.8	17	0.06	0.05	43	53	0.16	0.11
	AF 20–40	12.8	14	0.15	0.16	19.7	23	9.9	11	16.2	17	0	0	37	43	0.04	0.09
Schlosswil 1994/2006	NW 0–20	28	34	0.3	0.4	17	20	30	33	15.3	18	0.18	0.12	71	66	0.11	0.24
	NW 20–40	24	23	0.24	0.3	15.5	17	21	18	16.1	17	0.14	0.08	62	50	0.14	0.19
	AF 0–20	25	26	0.26	0.23	21	22	27	20	17.9	18	0.09	0.06	64	59	0.17	0.20
	AF 20–40	22	21	0.21	0.28	19.7	19	17.1	16	18.1	18	0.09	0.05	60	52	0.09	0.15
Treiten 1995/2008	NW 0–20	21	24	0.3	0.39	43	37	41	43	36	38	0.09	0.09	68	70	0.15	0.20
	NW 20–40	22	23	0.22	0.31	42	35	34	39	40	40	0.06	0.08	70	69	0.10	0.05
	AF 0–20	16.7	21	0.19	0.3	28	26	33	41	23	30	0.07	0.08	45	57	0.18	0.08
	AF 20–40	17.4	23	0.21	0.3	34	27	34	38	29	33	0.07	0.08	56	57	0.14	0.08

Tabelle 7-1: Fortsetzung

Standort und Beprobung	Nutzung ¹ und Tiefe [cm]	Pb		Cd		Cr		Cu		Ni		Hg		Zn		PAK _{tot}	
		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]		[mg/kg TS]	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Auswil 1998/2003	NW 0–20	19.8	16.7	0.11	0.13	32	25	15.3	14.4	11.7	11.3	0.08	0.07	41	39	0.03	0.03
	NW 20–40	14.2	11.2	0	0	20	17.2	8.8	8.4	11.3	11.4	0.07	0.07	34	34	0.02	0.01
	AF 0–20	16.2	13.4	0.1	0.12	25	21	11.1	10.6	12	11.3	0.07	0.07	39	37	0.04	0.02
	AF 20–40	12.5	10.3	0	0	19.5	16.8	7.7	7.5	11.1	11.3	0.06	0.06	33	33	0.04	0.06
Buch 1998/2005	NW 0–20	10.3	10	0	0	17.8	17	7	7.4	12.9	15	0	0	30	33	0.01	0.02
	NW 20–40	0	0	0	0	14.8	14	5.2	5.8	12.4	15	0	0	26	28	0	0.01
	AF 0–20	11.1	10	0	0	17.8	16	17.5	19	13	14	0	0	33	35	0.07	3.06
	AF 20–40	0	0	0	0	16.5	15	10.4	10	13.9	15	0	0	29	31	0.01	0.03
Rubigen 1994/2004	NW 0–20	18	18	0.18	0.22	18.4	18	16.7	16	13.1	13	0.1	0.06	58	50	0.20	0.28
	NW 20–40	15.9	14	0.15	0.17	14	15	14.1	13	13.3	13	0.09	0.05	44	37	0.16	0.08
	AF 0–20	19.1	17	0.17	0.18	15.6	16	20	21	12.7	13	0.11	0.07	46	40	0.17	0.08
	AF 20–40	16.9	14	0.14	0.15	14.5	14	15.6	15	13.4	14	0.09	0	41	34	0.07	0.01
Seedorf 1995/1999	NW 0–20	15	15.5	0.18	0.17	37	27	40	40	22	15.4	0.05	0	51	40	0.07	0.14
	NW 20–40	11	11.8	0.15	0.13	31	22	23	16.6	21	15.3	0	0	42	32	0.05	0.06
	AF 0–20	12.2	12.5	0.16	0.15	22	18.8	19.5	18.4	15.5	13.1	0.05	0	44	38	0.08	0.14
	AF 20–40	0	0	0.13	0.12	17.9	16.6	12.1	12.3	15	13.7	0	0	31	28	0.03	0.07
RW-Überschreitungen ÖLN⁵		0	0	0	0	1	0	5	5	0	0	0	0	0	0	1	3
Mittelwert der ÖLN Standorte	NW 0–20	22.2	21.9	0.20	0.23	29.1	25.5	36.1	32.5	19.0	19.5	0.10	0.08	57.0	55.0	0.37	0.39
	NW 20–40	16.4	17.1	0.14	0.16	23.7	21.5	21.0	19.2	18.9	19.8	0.07	0.05	46.2	44.3	0.15	0.15
	AF 0–20	16.3	15.9	0.16	0.17	22.4	20.4	19.9	19.8	16.0	16.9	0.05	0.04	44.0	44.8	0.10	0.35
	AF 20–40	12.1	12.1	0.12	0.15	20.4	18.9	14.8	15.2	16.8	18.1	0.04	0.02	39.3	39.2	0.05	0.06
RW-Überschreitungen total		0	0	0	0	1	0	5	5	0	0	0	0	0	0	1	3
Mittelwert aller Standorte	NW / OB	19.7	19.6	0.17	0.20	27.3	24.2	30.1	27.2	17.9	19.0	0.08	0.06	51.7	51.1	0.29	0.31
	NW / UB	12.9	15.3	0.10	0.14	22.9	20.7	17.9	16.8	18.2	19.4	0.05	0.04	42.8	41.8	0.12	0.12
	AF / OB	14.9	15.1	0.14	0.16	22.6	20.4	18.4	18.1	15.8	17.1	0.05	0.03	42.7	43.6	0.09	0.27
	AF / UB	10.2	12.0	0.10	0.13	20.5	18.8	13.6	14.0	16.6	18.1	0.03	0.02	37.9	38.5	0.04	0.05
VBBo-Richtwerte		50		0.8		50		40		50		0.5		150		1	
VBBo-Prüfwerte		200		2		-		150		-		-		-		20	
VBBo-Sanierungswerte		2000		30		-		1000		-		-		2000		100	

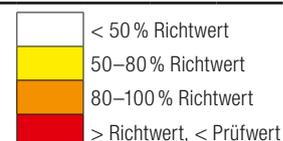
¹ AF = Ackerfläche; NW = Naturwiese

² RW = Richtwert

³ BIO = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des biologischen Landbaus

⁴ Mittelwerte wurden berechnet unter Mitberücksichtigung der Werte unterhalb der Analysegrenze (Pb = < 10 mg/kg TS; Cd = < 0.1 mg/kg TS; Hg = < 0.05 mg/kg TS; PAK_{tot} = < 0.005 mg/kg TS; Werte unterhalb der Analysegrenze erscheinen in der Tabelle mit der Grösse 0)

⁵ ÖLN = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des ökologischen Leistungsnachweis



Roggwil handelt es sich noch heute um eine Wässerplatte, die mehrmals jährlich geflutet wird. Weil die nicht geflutete AF keine erhöhten Schadstoffwerte aufweist, kann angenommen werden, dass das zum Wässern verwendete Flusswasser der Langete mit Schwermetallen aus der Strassenentwässerung – oder sogar infolge einer lateralen Verlagerung von Schwermetallen aus stark versauerten Waldböden belastet ist (Kapitel 5). Ob am Standort Treiten die frühere natürliche Flutung durch die Aare oder eher die landwirtschaftliche Nutzung zu den hohen Schwermetallkonzentrationen führte, kann nicht schlüssig beantwortet werden. Die beim zweiten Beprobungszyklus für das Element Kupfer erstmals festgestellte Richt-

wertüberschreitung auf der AF lässt vermuten, dass es hier im Zusammenhang mit der Torfsackung zu einer langsamen Erhöhung der Schwermetallkonzentration kommen konnte (Kapitel 3).

b. Organische Schadstoffe

Die polychlorierten Biphenyle (PCB) werden heute gemäss der Stockholmer Konvention (2001) nicht mehr hergestellt, angewendet oder verkauft. Dies gilt auch für die Schweiz. Weil sich diese Substanzen im Rahmen der Erstbeprobung bei allen Standorten als problemlos herausgestellt hatten, wurde auf

eine weitere Analyse verzichtet. Archivierte Proben der Zweitbeprobung können jedoch jederzeit nachanalysiert werden.

Die polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) sind organische Verbindungen, die bei der unvollständigen Verbrennung von Holz, Kohle, Erdöl und Müll entstehen. Sie sind daher mehrheitlich anthropogen verursacht. Trotz der verschärften Vorschriften, welche im Zusammenhang mit der Luftreinhaltung seit den 1980er Jahren erlassen wurden, werden PAK-Verbindungen noch heute über die Luft verteilt und gelangen mit dem Niederschlagswasser in den Boden. Vor allem in grösseren Siedlungen und um Industrieareale, aber auch entlang von stark befahrenen Strassen ist mit erhöhten PAK-Gehalten im Boden zu rechnen. Unter der schier endlosen Vielzahl der PAK wurden im Rahmen der Vernehmlassung der VBBo 16 Leitverbindungen definiert. Diese sind in **Tabelle 7-1** unter der Bezeichnung PAK_{tot} zusammengefasst.

Wie bei den Schwermetallen sind auch bei den PAK_{tot}-Gehalten bei beiden Beprobungszyklen die Durchschnittswerte in den Oberböden leicht höher als in den Unterböden (**Tabelle 7-1**). PAK sind im Boden noch stärker als die Schwermetalle an den Ton-Humus-Komplex gebunden, sind extrem schwer löslich und werden daher im Oberboden angereichert.

Im Vergleich von NW und AF sind in den NW höhere PAK-Gehalte festzustellen. Dies kann mit dem höheren Humusgehalt und der erwähnten anthropogenen Akkumulation erklärt werden. Dies könnte aber auch mit einem nutzungsbedingten höheren Schadstoffeintrag über Hofdünger (häufiges Beweiden und früher übliche «Gülleentsorgung» auf NW) oder mit einem Durchmischungseffekt durch die auf den AF erfolgte Bodenbearbeitung in Verbindung gebracht werden.

Während beim ersten Beprobungszyklus lediglich eine PAK-Richtwertüberschreitung festgestellt wurde, sind es beim zweiten deren drei. Bei der NW-Wässeratte am Standort Roggwil gilt dieselbe Begründung wie bei den Schwermetallen. Schwieriger wird die Interpretation der Richtwertüberschreitungen bei den beiden anderen Standorten. Diejenige in Rüderswil ist bisher nicht erklärbar. Am Standort Buch wurden auf der AF hohe PAK-Werte festgestellt. Als Erklärung dient hier der 1999 einmalig erfolgte Austrag von eingedicktem Klärschlamm. Trotz strengen Qualitätsanforderungen gelangten früher mit dem Klärschlamm beträchtliche Schadstoffmengen in den Boden. Seit dem 30. September 2008 ist die Verwertung von Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Kanton Bern untersagt.

Bei einem pH-Wert im schwach sauren oder alkalischen Bereich ist die Nahrungs-

und Futtermittelproduktion kaum durch Schadstoffe gefährdet. Die festgestellte Belastungssituation liegt im Normalbereich, abgesehen von einzelnen Richtwertüberschreitungen bei Kupfer, Chrom und den PAK. Da ausschliesslich auf ÖLN Standorten gegenüber den BIO Standorten höhere Schadstoffmittelwerte und sogar Richtwertüberschreitungen festgestellt wurden, lässt vermuten, dass es bei regelmässiger Anwendung von synthetischen Hilfsstoffen zu einer Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommen kann. Um die Produktion von gesunden Nahrungs- und Futtermitteln auch für künftige Generationen zu gewährleisten, ist auf einen möglichst geringen Schadstoffeintrag zu achten.

7.2.4 Nährstoffe und Bodenkennwerte

Der Landwirt beeinflusst über die Düngung und Bodenbearbeitung den natürlichen Nährstoffkreislauf und damit das Pflanzenwachstum. Anhand der Nährstoffuntersuchungen im Rahmen der KABO wird überprüft, ob die Nährstoffsituation der Böden den Bedürfnissen der Pflanzen entspricht und inwiefern allenfalls dadurch andere Umweltbereiche beeinträchtigt werden.

Die in beiden Beprobungszyklen an allen 16 Standorten in beiden Tiefenstufen gemäss VBBo erhobenen und gemäss GRUDAF (2009) interpretierten, nährstoffrelevanten Bodenkennwerte sind in **Tabelle 7-2** und **7-3** zusammengestellt. Da es sich dabei um Einzelwerte handelt, sind keine statistischen Aussagen möglich, und die Resultate werden nur anhand von Mittelwertvergleichen diskutiert. Zusätzlich zu den eingangs erwähnten Gruppierungen wird im Folgenden bei den NW die Weide- mit der Schnittnutzung verglichen.

a. Tongehalt

Zur Tonfraktion gehören alle Bodenteilchen < 0.002 mm. Aufgrund ihrer chemischen Beschaffenheit fungieren die Tonplättchen als wesentlicher Teil des Austauschers (**Kasten 5-1**). Es binden sich Nährstoff-Kationen an ihren Oberflächen, wodurch es hier bei einem hohen Belegungsanteil mit mehrwertigen Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen zu einer positiven Ladung kommt und – elektrostatisch bedingt – zu einer erhöhten Adsorption von Anionen wie z.B. Phosphaten.

Der Standort Treiten ist als einziger der 16 KABO Standorte ein organischer Boden mit einem Tongehalt von 36 % (toniger Lehm). Er wird im Folgenden nicht in die Vergleiche mit einbezogen, weil er bei der Diskussion des Ver-

sauerungszustands und der Nährstoffsituation nach GRUDAF eine Sonderstellung einnimmt. Die anderen 15 Standorte sind mineralische Böden mit Tongehalten zwischen 11.5% (Madiswil) und 21.5% (Schlosswil). Es handelt sich um neun lehmreiche Sande, fünf sandige Lehme und einen Lehm. Der Durchschnitt liegt bei 14.9%, wobei die Werte bei den NW (OB 15.5%; UB 15.2%) um rund einen Prozent höher sind als bei den AF (OB 14.5%; UB 14.3%).

b. Humusgehalt

Zum Humus werden alle abgestorbenen und nicht vollständig zersetzten tierischen und pflanzlichen Abbaustoffe gezählt. Entsprechend der biologischen Aktivität nimmt der Humusgehalt mit zunehmender Tiefe ab. Neben Ton ist Humus der zweite Austauscher; beide zusammen verbinden sich zu den strukturbildenden Ton-Humus-Komplexen. In mineralischen Böden ist daher ein hoher Humusgehalt erwünscht.

Der organische Boden des Standorts Treiten weist sowohl in der oberen als auch in der unteren Tiefenstufe mit über 10 Gew.-% («humusreich») die höchsten Humusgehalte auf (**Tabelle 7-2**). Bei den Oberböden der 15 mineralischen Standorte handelt es sich sowohl bei den NW als auch AF um mehrheitlich «schwach humose» Böden mit einem Humusgehalt von 2–5 Gew.-%. «Humose» Böden mit gut über 5 Gew.-% Humusgehalt finden sich bevorzugt in NW von futterbaulich geprägten Gebieten (Grasswil, Roggwil, Rüderswil, Schlosswil). Im «humusarmen» Bereich liegt die AF des Standorts Clavaleyres mit 1.7 Gew.-%.

Die Unterböden in den Klassen «humusarm» und «schwach humos» weisen tiefere Humusgehalte auf als in den Oberböden, die Differenz beträgt in den NW im Durchschnitt 2 Gew.-%; in den AF 1 Gew.-%. Damit verfügen die Oberböden der NW im Vergleich zu denjenigen der AF über knapp einen Drittel mehr Humus. Zwischen den beiden Beprobungszyklen ist der Unterschied tendenziell kleiner geworden. Bei einer Lagerungsdichte von 1.4 g/cm³ entspricht die gemessene Differenz einem unterschiedlichen Humusgehalt von rund 30 t/ha. Im Gegensatz zu den NW wurde bzw. werden die AF regelmässig bearbeitet. Dies führt in der bearbeiteten Schicht zu einer verstärkten Oxidation des Humus. Die Unterschiede im Unterboden sind in der Tendenz ähnlich, mit knapp 9 t/ha weniger Humus auf den AF jedoch weit weniger ausgeprägt.

Im Vergleich der Produktionsrichtlinien weisen die ÖLN Standorte generell höhere Humusgehalte auf als die BIO Standorte, wobei auch hier der Unterschied bei den NW grösser ist als bei den AF. Im Gegensatz zu ÖLN Flächen, wo die Gehalte leicht abgenommen haben, konnte bei BIO Flächen zwischen dem ersten

und zweiten Beprobungszyklus eine geringfügige Erhöhung der Humusgehalte festgestellt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Produktionsrichtlinien beträgt bei den NW einen Drittel, bei den AF einen Viertel der gesamten Humusmenge.

Der auf den NW durchgeführte Vergleich zwischen Weide- und Schnittnutzung zeigt bei der Weidenutzung fast doppelt so hohe Humusgehalte wie bei Schnittnutzung. Diese sind vorwiegend ökologische Ausgleichsflächen, was mit einer starken Extensivierung verbunden ist und damit zu einer Humusreduktion führt.

Der Vergleich zwischen den beiden Anbausystemen DS und PF zeigt keinen Unterschied im Humusgehalt.

Der Standort Treiten ist ein organischer Boden mit einem abweichend hohen Ton- und Humusgehalt. Er fliesst daher nicht in die Beurteilung der Nährstoffsituation ein. Oberböden weisen generell einen beinahe doppelt so hohen Humusgehalt auf wie Unterböden. Insbesondere durch eine intensive NW-Nutzung mit Düngung und Beweidung wird Humus angereichert. Demgegenüber zeigt die Produktionsrichtlinie BIO eine geringfügige Erhöhung und die extensive Wiesennutzung eine Abnahme der Humusgehalte.

c. Kalkzustand

Der Kalkzustand im Boden kann anhand des pH-Werts sowie der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität beurteilt werden. Kalkverluste sind auf die Säurepufferung, die damit verbundene Auswaschung (Kapitel 5) sowie auf den Entzug durch die Kulturen zurückzuführen. Die jährlichen Verluste können im humiden Klima bis mehrere hundert kg CaO/ha betragen.

Kalkgehalt und pH-Wert korrelieren stark. Solange im Boden genügend Kalk vorhanden ist, sinkt der pH-Wert nie unter 7 (*Gysi et. al 1997*). Hohe Kalkgehalte von deutlich über 0.5% wurden bei beiden Beprobungszyklen in den NW der ÖLN Standorte Rubigen, Schlosswil und Seedorf, in der AF Treiten sowie in den Oberböden am BIO Standort Uettligen festgestellt. Dies deutet auf bis in die Oberböden reichendes kalkhaltiges Material hin, womit natürlicherweise keine Kalkdüngung notwendig ist. An allen anderen Standorten betragen die Kalkgehalte in beiden Tiefenstufen sowohl auf den NW als auch auf den AF höchstens 0.5%, was insbesondere in den Oberböden und bei hoher Stickstoffdüngung periodische Kalkgaben notwendig macht. Die Einschätzung des Kalkzustands wird insbesondere im Wald mit Hilfe des pH-Werts beurteilt (Kapitel 5). Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne generelle Einschränkung des Düngemittleinsatzes kann

Tabelle 7-2: KABO Erst- und Zweitbeprobungsergebnisse von Humus sowie Parametern zur Abschätzung des Kalkzustandes

Standort	Nutzung ¹	Tiefe [cm]	Humus		Kalkgehalt		pH-Wert (H ₂ O)		erforderliche Kalkgabe ²		KAK _{pot} ³		Basen- sättigung		erforderliche Kalkgabe ⁵ [dt CaO/ha]
			[%]		[%]		[-]		[dt CaO/ha]		[mmol _c /100g]		[%]		
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	VK ⁴	
Grasswil 1996/2004	NW W	0–20	6.1	6.1	0	0.5	6.3	5.7	-	12.5	24.5	16.2	65.9	C	-
	NW W	20–40	2.3	2.2	0	0.5	6.1	5.6	10.0	12.5	16.9	12.0	39.8	A	19.0
	AF PF	0–20	2.1	9.4 ⁶	0	0.4	6.0	6.0	20.0	20.0	11.9	9.2	35.5	A	13.0
	AF PF	20–40	1.1	1.5	0	0.4	5.9	6.0	20.0	20.0	9.9	7.8	33.2	A	13.0
Langnau 1996/2003	NW W	0–20	4.6	3.7	0	0.5	6.0	5.8	10.0	12.5	23.6	18.0	71.5	C	-
	NW W	20–40	2.6	1.9	0	0.3	6.2	6.2	10.0	10.0	20.4	15.4	64.1	C	-
	AF PF	0–20	3.2	3.0	0	0	6.1	6.1	20.0	20.0	17.8	14.0	56.3	B	12.5
	AF PF	20–40	1.8	1.8	0	0.3	6.4	6.4	-	-	14.9	10.2	58.1	B	12.5
Madiswil 1997/2006	NW S	0–20	2.5	3.2	0	0.1	7.6	6.3	-	-	9.2	14.7	63.5	C	-
	NW S	20–40	1.2	1.4	0	0.3	6.7	6.2	-	10.0	6.7	10.2	52.0	C	-
	AF PF	0–20	2.2	2.4	0	0.1	6.8	6.0	-	20.0	6.7	13.2	52.5	B	12.5
	AF PF	20–40	1.1	1.2	0	0.1	6.4	6.1	-	20.0	7.1	10.4	45.9	A	19.0
Niederörsch 1994/2003	NW S	0–20	4.8	2.6	0.4	0	6.1	5.9	10.0	10.0	19.5	13.4	54.8	C	-
	NW S	20–40	1.9	1.2	0	0.5	6.6	6.4	-	-	16.3	8.6	63.8	C	-
	AF PF	0–20	3.2	1.8	0	0	6.0	6.1	20.0	20.0	15.4	9.8	44.2	A	10.0
	AF PF	20–40	2.2	1.1	0.4	0	6.0	6.1	20.0	20.0	14.0	8.7	60.0	C	-
Roggwil 1996/2005	NW S	0–20	6.6	6.1	0	0.4	6.7	6.7	-	-	31.2	31.1	79.2	C	-
	NW S	20–40	3.6	3.2	0	0.5	6.8	7.0	-	-	22.4	26.1	81.0	D	-
	AF PF	0–20	1.7	2.0	0	0.3	6.2	6.8	20.0	-	14.0	14.0	61.1	C	-
	AF PF	20–40	1.3	1.4	0	0.4	6.6	6.9	-	-	13.4	12.2	64.5	C	-
Rüderswil 2000/2007	NW W	0–20	4.7	5.5	0.5	0	5.9	5.7	10.0	12.5	19.6	13.0	47.8	B	12.5
	NW W	20–40	2.0	2.7	0.5	0	6.1	5.7	10.0	12.5	14.7	10.8	46.6	B	12.5
	AF PF	0–20	3.0	4.1	0.3	0	6.0	5.7	20.0	25.0	16.4	12.8	58.9	B	12.5
	AF PF	20–40	1.8	2.5	0.5	0	6.2	5.8	20.0	25.0	13.7	11.0	56.4	B	12.5
Schlosswil 1994/2006	NW S	0–20	6.6	5.2	2.0	1.0	7.4	6.7	-	-	29.4	31.2	82.8	D	-
	NW S	20–40	4.5	3.0	1.8	0.6	7.9	7.2	-	-	24.8	26.1	89.0	D	-
	AF PF	0–20	5.3	4.2	0.6	0.2	6.7	6.6	-	-	24.5	24.9	77.8	C	-
	AF PF	20–40	4.2	3.1	0.4	0.3	6.9	6.9	-	-	23.3	21.7	79.7	C	-
Treiten 1995/2008	NW W	0–20	11.6	14.8	0.3	0.2	7.1	6.0	-	10.0	50.4	52.7	77.1	C	-
	NW W	20–40	8.4	11.8	0.5	0.6	7.1	6.5	-	-	45.4	51.6	81.5	D	-
	AF PF	0–20	10.3	11.2	6.8	3.0	7.5	6.9	-	-	52.7	50.0	90.1	D	-
	AF PF	20–40	11.3	11.6	5.9	3.9	7.6	6.8	-	-	53.6	43.3	91.5	D	-
Mittelwert der ÖLN⁷ PF Standorte (ohne Treiten)	NW	0–20	5.1	4.6	0.4	0.4	6.6	6.1	10.0	11.5	22.4	19.6	66.5		12.5
	NW	20–40	2.6	2.2	0.3	0.4	6.6	6.3	10.0	11.3	17.5	15.6	62.3		15.8
	AF	0–20	3.0	2.9	0.1	0.1	6.3	6.2	20.0	21.0	15.2	14.0	55.2		12.1
	AF	20–40	1.9	1.8	0.2	0.2	6.3	6.3	20.0	21.3	13.8	11.7	56.8		14.3
Auswil 1998/2003	NW W	0–20	4.2	4.3	0	0.4	6.1	5.9	10.0	10.0	17.1	16.9	40.5	B	15.5
	NW W	20–40	2.2	1.9	0	0.3	6.1	6.2	10.0	10.0	11.7	10.8	24.9	A	24.5
	AF DS	0–20	3.7	3.3	0	0	5.7	6.3	25.0	-	9.8	13.4	38.7	A	13.0
	AF DS	20–40	2.4	2.3	0	0.3	5.5	5.8	25.0	25.0	10.3	6.7	10.0	A	13.0
Buch 1998/2005	NW W	0–20	2.2	2.0	0	0.5	5.9	6.1	10.0	10.0	8.2	9.4	41.0	B	7.3
	NW W	20–40	0.9	0.9	0	0.3	5.6	6.5	12.5	-	7.1	6.4	40.8	B	7.3
	AF DS	0–20	2.1	2.2	0	0.3	5.7	6.7	25.0	-	13.3	10.2	72.4	C	-
	AF DS	20–40	1.1	1.1	0	0.2	5.7	6.9	25.0	-	8.2	6.7	58.3	B	7.3
Rubigen 1994/2004	NW S	0–20	4.3	3.9	1.6	0.6	7.1	6.3	-	-	18.3	11.6	49.6	B	12.5
	NW S	20–40	2.4	1.7	2.4	1.0	7.9	7.0	-	-	15.1	7.7	70.8	C	-
	AF DS	0–20	3.2	2.8	0.3	0.4	6.8	6.5	-	-	15.4	9.0	49.2	A	-
	AF DS	20–40	2.3	1.1	0	0.5	6.7	6.5	-	-	14.0	7.2	39.6	A	10.0
Seedorf 1995/1999	NW S	0–20	3.3	3.1	1.3	0.5	7.0	6.7	-	-	19.5	11.0	57.7	C	-
	NW S	20–40	1.8	1.5	2.1	1.0	7.4	7.3	-	-	14.3	7.1	70.7	C	-
	AF DS	0–20	2.1	2.4	0	0.5	6.3	6.8	-	-	11.6	16.1	48.2	A	21.5
	AF DS	20–40	0.7	1.4	0.4	0.5	6.3	6.1	-	20.0	9.0	15.2	35.8	A	21.5
Mittelwert der ÖLN DS Standorte	NW	0–20	3.5	3.3	0.7	0.5	6.5	6.3	10.0	10.0	15.8	12.2	47.2		11.8
	NW	20–40	1.8	1.5	1.1	0.7	6.8	6.7	11.3	10.0	12.1	8.0	51.8		15.9
	AF	0–20	2.8	2.7	0.1	0.3	6.1	6.6	25.0	-	12.5	12.1	52.1		17.3
	AF	20–40	1.6	1.5	0.1	0.4	6.1	6.3	25.0	22.5	10.4	9.0	35.9		13.0

Tabelle 7-2: Fortsetzung

Standort	Nutzung ¹	Tiefe [cm]	Humus		Kalkgehalt		pH-Wert (H ₂ O)		erforderliche Kalkgabe ²		KAK _{pot} ³		Basen- sättigung		erforderliche Kalkgabe ⁵
			[%]		[%]		[-]		[dt CaO/ha]		[mmol _c /100g]		[%]	VK ⁴	[dt CaO/ha]
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2
Bantigen 1997/2004	NW S	0–20	2.6	3.0	0	0.4	6.4	5.8	-	12.5	9.0	12.1	65.7	C	-
	NW S	20–40	1.1	1.3	0	0.5	6.3	6.0	-	10.0	8.0	7.8	42.0	B	10.0
	AF PF	0–20	2.4	2.5	0	0.6	6.2	6.1	20.0	20.0	7.4	9.9	36.9	A	13.0
	AF PF	20–40	1.1	1.2	0	0.4	6.2	6.1	20.0	20.0	7.9	7.9	34.8	A	13.0
Clavaleyres 1999/2006	NW S	0–20	1.9	2.1	0.5	0	6.1	5.7	10.0	12.5	9.4	9.3	49.4	B	7.3
	NW S	20–40	1.1	0.7	0.5	0.2	6.0	5.7	10.0	12.5	9.9	8.7	46.8	B	7.3
	AF PF	0–20	1.7	1.7	0.5	0.3	6.3	6.1	-	20.0	8.4	10.5	51.3	B	12.5
	AF PF	20–40	1.0	1.0	0.5	0.3	6.4	6.2	-	20.0	7.5	8.6	51.7	B	7.3
Möriswil 1995/2002	NW S	0–20	2.3	2.8	0	0.3	6.1	5.8	10.0	12.5	12.8	9.4	46.2	B	7.3
	NW S	20–40	0.6	1.1	0	0.3	6.3	6.4	-	-	9.6	7.3	38.7	A	10.0
	AF PF	0–20	2.1	2.3	0	0.4	6.4	5.8	-	25.0	13.1	9.2	49.5	A	10.0
	AF PF	20–40	1.0	1.2	0	0.3	6.3	6.4	-	-	11.9	8.8	45.1	A	10.0
Uettligen 1997/2005	NW S	0–20	4.7	4.1	0	0.4	7.4	6.5	-	-	15.7	18.6	78.9	C	-
	NW S	20–40	1.1	1.8	3.7	4.9	8.4	7.5	-	-	11.2	14.2	94.4	D	-
	AF PF	0–20	2.7	3.1	0	0.4	7.6	7.0	-	-	14.5	16.2	76.7	C	-
	AF PF	20–40	1.2	1.6	3.8	4.5	8.3	7.4	-	-	12.1	12.4	94.2	D	-
Mittelwert der BIO ⁸ Standorte	NW	0–20	2.9	3.0	0.1	0.3	6.5	5.9	10.0	12.5	11.7	12.4	60.1		7.3
	NW	20–40	1.0	1.2	1.1	1.5	6.8	6.4	10.0	11.3	9.7	9.5	55.5		9.1
	AF	0–20	2.2	2.4	0.1	0.4	6.6	6.2	20.0	21.7	10.9	11.4	53.6		11.8
	AF	20–40	1.1	1.2	1.1	1.4	6.8	6.5	20.0	20.0	9.9	9.4	56.4		10.1
Mittelwert der Naturwiesen (W ohne Treiten)	NW W	0–20	4.4	4.3	0.1	0.4	6.0	5.8	10.0	11.3	18.6	14.7	53.3		11.8
	NW W	20–40	2.0	1.9	0.1	0.3	6.0	6.0	10.5	11.3	14.2	11.1	43.2		15.8
	NW S	0–20	2.4	2.5	0.1	0.3	6.5	6.3	10.0	11.9	12.3	12.0	52.8		9.0
	NW S	20–40	1.4	1.4	0.6	0.7	6.5	6.4	10.0	10.8	11.1	10.2	52.8		9.1
Mittelwert aller Standorte (ohne Treiten)	NW	0–20	4.1	3.8	0.4	0.4	6.5	6.1	10.0	11.5	17.7	15.5	58.8		10.4
	NW	20–40	1.9	1.7	0.8	0.7	6.7	6.5	10.4	11.1	13.8	11.7	57.3		12.9
	AF	0–20	2.7	2.7	0.1	0.3	6.3	6.3	21.3	21.3	13.3	12.8	53.9		13.1
	AF	20–40	1.6	1.5	0.4	0.6	6.4	6.4	21.7	21.3	11.8	10.4	51.2		12.6

¹ NW = Naturwiese (W = Weidenutzung; S = Schnittnutzung);
AF = Ackerfläche (PF = Pflugsystem; DS = Direktsaatsystem)

 = Kalkbedarf gesunken
 = Kalkbedarf gestiegen

² erforderliche Kalkgabe der groben Bemessungsmethode mit pH-Wert und Tongehalt (die Mittelwerte sind nur für Standorte mit Kalkbedarf berechnet)

³ KAK_{pot} = potenzielle Kationenaustauschkapazität

⁴ Kalk-Versorgungsklasse: A = «sehr arm» und «arm»; B = «mässig»; C = «genügend»; D = «Vorrat»

⁵ erforderliche Kalkgabe der vertieften Bemessungsmethode mit Basensättigung und Kationenaustauschkapazität (die Mittelwerte sind nur für Standorte mit Kalkbedarf berechnet)

⁶ infolge Analysen- oder Probenahmefehler ist Humuswert bei der Mittelwertberechnung nicht berücksichtigt

⁷ ÖLN = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des ökologischen Leistungsnachweis

⁸ BIO = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des biologischen Landbaus

die in Anhang I ausführlich beschriebene fortlaufende Abnahme des pH-Werts mit einem fachgerechten Einsatz kalkhaltiger Düngemitteln gestoppt bzw. rückgängig gemacht werden. Hier wird aus Sicht der Pflanzenernährung (GRUDAF 2009) und wegen der Schadstoffmobilität empfohlen, im Oberboden den pH-Wert nicht unter pH < 5.9 absinken zu lassen. Bei den NW der Standorte Langnau, Niederösch und Rüderswil besteht diesbezüglich Handlungsbedarf aufgrund der relativ tiefen pH-Werte und hohen Schadstoffgehalte.

An allen KABO Standorten liegt der Säurezustand des Bodens mehrheitlich im «schwach sauren» Bereich zwischen pH 5.9–6.7 (Tabelle

7–2). Leicht höhere Werte im «neutralen» (pH 6.8–7.2) oder gar «alkalischen» (pH > 7.6) Bereich sind an den Standorten Roggwil, Rubigen, Schlosswil und Seedorf (jeweils vorwiegend bei den NW) sowie Uettligen und Treiten festzustellen. Grosse Abnahmen des pH-Werts von mehr als einer halben Einheit bei beiden Nutzungen und Tiefenstufen wurden an den Standorten Uettligen und Treiten festgestellt. Deutliche Zunahmen des pH-Werts infolge einer nachgewiesenen Kalkgabe wurde in den AF der ÖLN Standorte Auswil, Buch, Roggwil und Seedorf beobachtet. Auf der Grundlage zur «groben» Bemessung mittels pH-Wert und Tongehalt gemäss GRUDAF, angewendet auch für die Unterböden, sind in Tabelle 7–2 diejenigen

Anzahl Standorte ersichtlich, bei denen sich eine Kalkgabe aufdrängt. Davon abgeleitet sind die entsprechend notwendigen Kalkgaben für beide Beprobungszyklen. Bei den NW nimmt vom ersten zum zweiten Beprobungszyklus die erforderliche Kalkmenge zu. Die berechneten Kalkgaben für die AF sind doppelt so hoch wie diejenigen für die NW.

Seit 1998 wird im Rahmen der Zweitbeprobung auch die Basensättigung (**Kasten 5–2**) erhoben. Entsprechend dem GRUDAF-Beurteilungsschema (2009) für die Kalkversorgung des Bodens gilt bei einer futterbaulichen Nutzung eine Basensättigung von 50 %, bei einer ackerbaulichen Nutzung eine solche von 60 % als «genügend». Das nur für die Oberböden erarbeitete Beurteilungsschema wurde auch für die Unterböden angewendet (**Tabelle 7–2**). Die Basensättigung der 15 NW liegt in beiden Tiefenstufen mit durchschnittlich 60 % um 5 % höher als in den AF. Entsprechend den GRUDAF-Versorgungsklassen ist der Kalkzustand in beiden Tiefenstufen bei 41 % der NW und 69 % der AF «arm» oder «mässig».

Die über alle Standorte gemittelte potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot} , **Kasten 5–3**) liegt in beiden Tiefenstufen und Beprobungszyklen bei den NW um 12–25 % höher als bei den AF (**Tabelle 7–2**). Die enge Korrelation zwischen Humus und KAK_{pot} (VOL 2003) erklärt diese Unterschiede.

Die «vertiefte» Bemessung der Kalkgaben anhand der Basensättigung und der KAK_{pot} gemäss GRUDAF (2009) wurde für beide Tiefenstufen beim zweiten Beprobungszyklus angewendet (**Tabelle 7–2**). Die Abschätzungen bestätigen im Wesentlichen diejenigen der «grobe» Bemessung: Die für beide Tiefenstufen empfohlenen Kalkgaben sind bei den AF um fast die Hälfte geringer als mit der «grobe» Bemessung, wobei die Anzahl aufzukalkender Standorte zunimmt. Den geringsten Kalkbedarf weisen anhand der «vertiefte» Bemessung die BIO Standorte auf.

Drei Viertel der KABO Standorte verfügen über Böden mit geringen Kalkgehalten. Die «grobe» Bemessung von Kalkgaben mittels pH-Wert und Tongehalt schliesst auf einen im Vergleich zu den NW doppelt so hohen Kalkbedarf in den AF. Zwischen den beiden Beprobungszyklen hat sich der Kalkbedarf insbesondere auf den BIO Standorten und auf den als Weide genutzten NW vergrössert. Im Vergleich zur «grobe» führt die «vertiefte» Bemessung mittels Basensättigung und Kationenaustauschkapazität zu geringeren durchschnittlichen Kalkgaben. Die grössten Differenzen zwischen den beiden Bemessungsmethoden zeigen sich auf Standorten mit geringem Düngereintrag wie z. B. BIO und auf NW mit Schnittnutzung. Hingegen ist der Kalkgehalt beim

Anbausystem DS mit der «vertiefte» Bemessung höher.

d. Phosphor

Phosphor ist ein Makronährstoff und kommt im Boden zu ca. 40 % in organischer und zu ca. 60 % in anorganischer Form vor. Gleichzeitig ist Phosphor schlecht löslich und wird kaum ausgewaschen (Scheffer et al. 1998). In den Oberböden ist daher der Phosphorgehalt wegen der Anreicherung von Pflanzenresten (siehe Humus) und infolge der Phosphordüngung höher als in den Unterböden.

Der durchschnittliche Phosphor-Totalgehalt (P_{tot}) der 15 KABO Standorte ist auf den NW und AF etwa gleich hoch (**Tabelle 7–3**). Nach der Erstbeprobung haben die Werte geringfügig abgenommen, wobei die Abnahme bei den NW stärker war als bei den AF. Dies kann mit der Nutzung der NW erklärt werden: Bei einer Schnittnutzung wird dem Boden Phosphor entzogen, wogegen bei einer Weidenutzung über die tierischen Ausscheidungen laufend Phosphor zugeführt wird. Bei den BIO Standorten, wo wenig zugekaufte Düngemittel eingesetzt werden, ist langfristig sogar ein Aushungern der Böden zu befürchten.

Die absoluten Werte der Oberböden von NW und AF sind mit weit über 900 mg P/kg Boden ungefähr doppelt so hoch wie in Deutschland (Behrendt et al. 1999). Alleine zwischen 1989 und 1999 nahm in der Schweiz der Phosphorgehalt um 7 % oder 60 mg/kg Boden zu (Spiess 1999). Solange in der landwirtschaftlichen Praxis auf den – in Bezug auf die landwirtschaftliche Nutzfläche – mehrheitlich intensiv gedüngten Flächen der Phosphoreinsatz den Bedarf um 10 % übersteigen darf (Suisse-Bilanz), wird das landwirtschaftliche Umweltziel «Phosphor» (**Kasten 8–2**) kaum erreicht werden!

Der durchschnittliche Gehalt an löslichem, d. h. Pflanzen verfügbarem Phosphor (Index P_{2O_5}) ist (bei fast gleich hohen Totalgehalten) in den Böden der AF der 15 KABO Standorte höher als bei den NW. Die übermässig starken Zunahmen an den Standorten Madiswil, Rubigen und Schlosswil sind wohl auf Ungereimtheiten bei der Analyse in Zusammenhang mit dem 1998 erfolgten Laborwechsel zurückzuführen. Allgemein sind die vorliegenden Resultate mit denjenigen der Kantonalen Bodenbeobachtung Fribourg FRIBO (IAG 2007) vergleichbar. Obwohl bei der Produktionsrichtlinie BIO keine mineralischen Phosphordünger eingesetzt werden, hat der lösliche Phosphoranteil auch in den Böden dieser Standorte zugenommen. Im Vergleich zu einer Schnittnutzung verringern sich durch das Beweiden die Pflanzen verfügbaren P_{2O_5} -Gehalte der Böden, da ein Teil des über tierische Ausscheidungen eingebrachten Phosphors nicht löslich ist, sondern als P_{tot} im

Boden angereichert wird. Stark erhöht ist die Phosphorverfügbarkeit in den Oberböden des Anbausystems DS.

Die Einteilung nach den GRUDAF-Versorgungsklassen bestätigt die Zunahme beim Pflanzen verfügbaren Phosphor bei der Zweitbeprobung: bei den NW stieg der Anteil der Oberböden in den Klassen «genügend», «Vorrat» oder «angereichert» von 50 % auf 81 %, bei den AF von 75 % auf 94 %.

Bei der Produktionsrichtlinie ÖLN kann insbesondere beim Anbausystem PF in den Oberböden eine Phosphoranreicherung festgestellt werden. Beim Anbausystem DS hingegen ist die in den Oberböden festgestellte hohe Verfügbarkeit bei vergleichsweise mittleren Phosphortotalgehalten bemerkenswert. In den Böden der BIO Standorte nehmen die Totalgehalte bei nach wie vor hohen löslichen Gehalten langsam ab.

e. Kalium

Die Verwitterung von Tonmineralien und die Mineralisierung von Pflanzenresten sind die Hauptquellen für pflanzenverfügbares Kalium. Es wird bei sauren pH-Werten ausgewaschen und bei alkalischen in den Tonmineralien fixiert. Mit hohen Erträgen und entsprechend grossem Biomasseentzug kann die Bilanz des Makronährstoffs Kalium schnell in den negativen Bereich absinken.

Der über 15 Standorte gemittelte Wert an pflanzenverfügbarem Kalium (K_2O) hat zwischen den beiden Beprobungszyklen generell abgenommen, wobei in den Oberböden stärkere Abnahmen festzustellen sind als in den Unterböden (**Tabelle 7-3**). Überdurchschnittlich gross war die Abnahme an den Standorten Auswil, Niederösch und Rubigen (hier nur AF). Verfügten bei der Erstbeprobung die Böden von NW und AF noch über vergleichbar hohe lösliche Kalium-Werte, sind diese bei der Zweitbeprobung bei den NW tiefer. Gründe für die geringere K_2O -Löslichkeit konnten keine gefunden werden. Jedoch wurde im gleichen Zeitraum auch im FRIBO (*IAG 2007*) eine ähnliche Tendenz festgestellt.

Die Ausnahme der Regel bilden die AF der Produktionsrichtlinie BIO. Hier hat die K_2O -

Löslichkeit zwischen Erst- und Zweitbeprobung um einen Drittel zugenommen.

Die Einteilung nach den GRUDAF-Versorgungsklassen bestätigt die Abnahme beim löslichen Kalium bei der Zweitbeprobung: bei den NW nahm der Anteil der Oberböden in den Klassen «genügend», «Vorrat» oder «angereichert» von 63 % auf 44 % ab, bei den AF von 94 % auf 88 %.

Mit Ausnahme der AF der Produktionsrichtlinie BIO hat der K_2O -Gehalt zwischen den beiden Beprobungszyklen abgenommen. Die festgestellte Abnahme ist in den Oberböden grösser als in den Unterböden und in den NW grösser als in den AF.

f. Stickstoff

Der überwiegende Teil des Bodenstickstoffs ist an die organische Substanz gebunden und nicht pflanzenverfügbar. Der Gehalt an totalem Stickstoff (N_{tot}) korreliert daher stark mit dem Humusgehalt (*VOL 2003*). Je mehr Humus im Boden, desto grösser ist sein Stickstoffpool.

Der über 15 KABO Standorte gemittelte N_{tot} -Gehalt hat zwischen den beiden Beprobungszyklen insbesondere in den Oberböden proportional zu den Humusgehalten abgenommen (**Tabelle 7-3**). Dies gilt sowohl für die NW als auch für die AF, die Differenz wurde jedoch zugunsten der AF geringer. Am grössten ist die Reduktion der N_{tot} -Gehalte an den NW der ÖLN Standorte Roggwil und Schlosswil sowie am nicht in den Mittelwert einbezogenen humusreichen Standort Treiten.

Wie bereits beim Humus festgestellt, zeigen einzig die Standorte der Produktionsrichtlinie BIO zwischen den beiden Beprobungszyklen keine Abnahme der N_{tot} -Werte.

Auf den ökologischen Ausgleichsflächen wird das Aushungern des Bodens zugunsten einer höheren Pflanzendiversität angestrebt. Mit den 2007 durchgeführten Vegetationsaufnahmen konnte dies noch nicht bestätigt werden.

Die Abnahme beim Humus führt zu geringeren N_{tot} -Gehalten. Einzig bei den BIO Betrieben wird diesbezüglich keine Reduktion festgestellt.

7.3 Beurteilung der physikalischen Bodenbelastung

Um die Auswirkungen der Bewirtschaftungsmassnahmen auf die gemessenen Bodenparameter zu beurteilen, wurden von den Landwirten sämtliche auf den NW und AF durchgeführten Feldeinsätze protokolliert

und die entsprechenden Maschinendaten zusammengestellt. Zusätzlich messen die Landwirte seit 1996 an fünf KABO Standorten auf den NW und AF mit je fünf Tensiometern die Bodenfeuchte (Wassersaugspannung). Die

Tabelle 7-3: KABO Erst- und Zweitbeprobungsresultate von Nährstoffparametern

Standort	Nutzung ¹	Tiefe [cm]	P _{tot} [ppm]		Index P ₂ O ₅ (Dirks-Scheffer) [P-Test]				Index K ₂ O (Dirks-Scheffer) [K-Test]				N _{tot} (Kjeldahl) [%]	
					Testzahl	VK ²	Testzahl	VK	Testzahl	VK	Testzahl	VK		
			1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	
Grasswil 1996/2004	NW W	0-20	1212	1220	16.7	D	16.9	D	7.9	E	7.7	E	0.40	0.30
	NW W	20-40	709	680	2.4	B	1.9	B	3.5	C	1.9	C	0.17	0.15
	AF PF	0-20	806	890	9.2	C	12.9	C	7.4	D	5.6	D	0.14	0.14
	AF PF	20-40	667	700	3.1	B	5.3	C	2.3	C	2.7	C	0.07	0.10
Langnau 1996/2003	NW W	0-20	1198	1060	6.4	C	5.0	C	1.4	B	1.0	B	0.30	0.25
	NW W	20-40	851	720	2.3	B	2.1	B	0.6	A	0.5	A	0.17	0.10
	AF PF	0-20	1094	1100	6.8	C	8.9	C	3.8	C	2.2	C	0.21	0.18
	AF PF	20-40	770	780	3.5	B	4.8	B	1.3	B	1.3	B	0.12	0.11
Madiswil 1997/2006	NW S	0-20	1054	830	2.6	B	9.5	C	13.0	E	12.9	E	0.18	0.18
	NW S	20-40	915	680	0.8	A	3.2	B	6.2	D	5.8	D	0.11	0.12
	AF PF	0-20	1319	1090	9.2	C	26.9	E	4.5	D	3.9	C	0.13	0.15
	AF PF	20-40	1035	780	0.8	A	10.5	C	3.0	C	2.4	C	0.10	0.11
Niederösch 1994/2003	NW S	0-20	1329	870	14.0	D	11.1	C	2.5	C	1.3	B	0.27	0.19
	NW S	20-40	1011	710	6.3	C	5.0	C	0.9	A	0.8	A	0.13	0.11
	AF PF	0-20	756	790	1.9	A	9.8	C	3.2	C	2.3	C	0.19	0.14
	AF PF	20-40	717	660	4.8	B	3.1	B	0.9	A	0.8	A	0.13	0.08
Roggwil 1996/2005	NW S	0-20	965	870	5.1	C	9.5	C	0.8	B	1.1	C	0.44	0.29
	NW S	20-40	722	630	1.0	B	3.7	B	0.4	A	0.6	A	0.25	0.17
	AF PF	0-20	793	790	5.1	C	10.3	C	1.9	C	3.1	C	0.12	0.12
	AF PF	20-40	674	640	1.6	B	3.1	B	1.9	C	1.4	B	0.09	0.09
Rüderswil 2000/2007	NW W	0-20	1600	2260	8.9	C	5.8	C	2.0	C	1.8	C	0.22	0.23
	NW W	20-40	1070	1730	1.8	A	1.9	A	0.4	A	0.4	A	0.17	0.15
	AF PF	0-20	1390	2140	11.3	C	9.8	C	2.4	C	3.2	C	0.19	0.19
	AF PF	20-40	1060	1720	4.2	B	3.7	B	1.1	A	1.3	B	0.14	0.06
Schlosswil 1994/2006	NW S	0-20	1182	1050	0.0	A	5.8	C	1.4	C	1.1	B	0.39	0.08
	NW S	20-40	995	880	0.0	A	1.9	B	0.9	B	0.6	B	0.28	0.16
	AF PF	0-20	1450	1160	0.0	A	11.6	D	2.7	C	3.2	C	0.31	0.24
	AF PF	20-40	1013	960	0.0	A	6.8	C	1.4	C	1.6	C	0.26	0.17
Treiten 1995/2008	NW W	0-20	1188	1070	7.7	D	13.2	E	4.1	E	4.3	E	0.71	0.47
	NW W	20-40	896	690	3.1	C	4.3	C	2.4	D	1.6	C	0.52	0.47
	AF PF	0-20	1335	1130	6.6	C	7.7	C	3.0	D	4.1	D	0.72	0.49
	AF PF	20-40	1095	900	3.7	C	4.8	C	0.9	C	1.7	C	0.68	0.49
Mittelwert der ÖLN³ PF Standorte (ohne Treiten)	NW	0-20	1220	1166	7.7		9.1		4.1		3.8		0.31	0.22
	NW	20-40	896	861	2.1		2.8		1.8		1.5		0.18	0.14
	AF	0-20	1087	1137	6.2		12.9		3.7		3.4		0.18	0.17
	AF	20-40	848	891	2.6		5.3		1.7		1.6		0.13	0.10
Auswil 1998/2003	NW W	0-20	1113	930	3.7	B	2.9	B	7.3	D	3.1	C	0.19	0.19
	NW W	20-40	648	640	1.0	B	0.5	A	2.9	C	1.9	C	0.13	0.12
	AF DS	0-20	1037	1000	2.6	B	3.4	B	6.2	D	3.2	C	0.19	0.19
	AF DS	20-40	651	640	1.0	A	0.0	A	1.9	C	0.9	A	0.14	0.14
Buch 1998/2005	NW W	0-20	573	470	4.7	B	5.0	C	1.1	A	1.3	B	0.13	0.12
	NW W	20-40	355	300	1.5	A	1.4	A	0.6	A	0.6	A	0.08	0.07
	AF DS	0-20	607	600	14.5	D	31.5	E	2.5	C	2.4	C	0.12	0.12
	AF DS	20-40	484	360	5.5	C	5.5	C	1.8	B	1.0	A	0.07	0.07
Rubigen 1994/2004	NW S	0-20	959	1040	1.1	B	17.1	D	1.1	B	0.9	B	0.25	0.22
	NW S	20-40	729	760	0.0	A	6.5	C	0.6	A	0.4	A	0.16	0.13
	AF DS	0-20	871	880	1.9	B	11.6	C	4.9	D	2.1	C	0.20	0.16
	AF DS	20-40	721	600	1.8	B	2.3	B	2.2	C	0.8	B	0.14	0.09
Seedorf 1995/1999	NW S	0-20	823	810	11.1	C	12.2	C	2.6	C	1.4	B	0.25	0.19
	NW S	20-40	630	520	5.6	C	5.0	C	1.3	B	1.1	A	0.16	0.09
	AF DS	0-20	805	895	24.7	E	25.9	E	2.9	C	6.1	D	0.15	0.12
	AF DS	20-40	553	652	22.3	E	20.3	D	1.3	B	1.6	B	0.08	0.06
Mittelwert der ÖLN³ DS Standorte	NW	0-20	867	813	5.2		9.3		3.0		1.7		0.20	0.18
	NW	20-40	591	555	2.0		3.3		1.4		1.0		0.13	0.10
	AF	0-20	830	844	10.9		18.1		4.1		3.5		0.17	0.15
	AF	20-40	602	563	7.7		7.0		1.8		1.1		0.11	0.09

Tabelle 7-3: Fortsetzung

Standort	Nutzung ¹	Tiefe [cm]	P _{tot} [ppm]		Index P ₂ O ₅ (Dirks-Scheffer) [P-Test]				Index K ₂ O (Dirks-Scheffer) [K-Test]				N _{tot} (Kjeldahl) [%]	
			1	2	Testzahl	VK ²	Testzahl	VK	Testzahl	VK	Testzahl	VK	1	2
					1	2	2	1	2	2				
Bantigen 1997/2004	NW S	0–20	1048	880	4.7	B	11.5	C	2.4	C	1.5	B	0.07	0.17
	NW S	20–40	718	570	0.8	A	4.7	B	0.5	A	0.6	A	0.10	0.11
	AF PF	0–20	1195	1020	6.1	C	19.0	D	2.2	C	6.0	D	0.14	0.15
	AF PF	20–40	909	660	0.8	A	6.3	C	1.7	B	2.0	C	0.09	0.07
Clavaleyres 1999/2006	NW S	0–20	410	390	2.1	B	2.4	B	0.6	A	0.6	A	0.12	0.13
	NW S	20–40	290	290	1.0	A	0.6	A	0.3	A	0.3	A	0.07	0.07
	AF PF	0–20	590	540	6.1	C	5.8	C	1.0	A	1.1	A	0.11	0.12
	AF PF	20–40	420	410	2.7	B	2.6	B	0.4	A	0.9	A	0.08	0.08
Mörswil 1995/2002	NW S	0–20	548	550	3.9	B	4.3	B	0.6	A	0.6	A	0.16	0.12
	NW S	20–40	275	260	0.5	A	1.0	A	0.2	A	0.5	A	0.07	0.05
	AF PF	0–20	676	680	11.5	C	8.5	C	1.8	C	1.0	B	0.17	0.13
	AF PF	20–40	385	330	2.3	B	2.3	B	0.8	B	1.0	B	0.08	0.08
Uettligen 1997/2005	NW S	0–20	960	810	6.8	C	11.6	C	2.7	C	2.1	C	0.24	0.24
	NW S	20–40	773	560	0.8	A	1.3	B	2.5	C	1.4	B	0.11	0.14
	AF PF	0–20	1100	780	5.5	C	13.0	D	2.4	C	2.5	C	0.19	0.18
	AF PF	20–40	818	600	0.8	A	4.7	B	2.1	C	2.0	C	0.11	0.11
Mittelwert der BIO⁴ Standorte	NW	0–20	742	658	4.4		7.4		1.6		1.2		0.15	0.16
	NW	20–40	514	420	0.8		1.9		0.9		0.7		0.09	0.09
	AF	0–20	890	755	7.3		11.6		1.8		2.7		0.15	0.15
	AF	20–40	633	500	1.7		4.0		1.3		1.5		0.09	0.09
Mittelwert der Naturwiesen (W ohne Treiten)	NW W	0–20	1139	1188	8.1		7.1		3.9		3.0		0.25	0.22
	NW W	20–40	727	814	1.8		1.6		1.6		1.1		0.14	0.12
	NW S	0–20	965	819	4.8		10.4		3.2		2.7		0.21	0.17
	NW S	20–40	826	662	3.1		6.3		1.8		1.5		0.15	0.12
Mittelwert aller Standorte (ohne Treiten)	NW	0–20	998	936	6.1		8.7		3.2		2.6		0.24	0.19
	NW	20–40	713	662	1.7		2.7		1.5		1.2		0.14	0.11
	AF	0–20	966	957	7.8		13.9		3.3		3.2		0.17	0.15
	AF	20–40	725	699	3.7		5.4		1.6		1.4		0.11	0.09

¹ AF = Ackerfläche (PF = Pflugsystem; DS = Direktsaatsystem); NW = Naturwiese (W = Weidenutzung; S = Schnittnutzung)

² VK = Versorgungsklasse: A = arm; B = mässig; C = genügend; D = Vorrat; E = angereichert

³ ÖLN = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des ökologischen Leistungsnachweis

⁴ BIO = Standorte mit Bewirtschaftung nach den Richtlinien des biologischen Landbaus

von ihnen dreimal wöchentlich übermittelten Werte sind aktualisiert im Internet öffentlich zugänglich und dienen auch der Baubranche als Leitwerte zur Einhaltung der Einsatzgrenzen (Kapitel 4.1). Bei den KABO Auswertungen ist die Bodenfeuchte ein entscheidender Parameter zur Beurteilung der physikalischen Bodenbelastungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Saugspannung, Feldeinsätze und Maschinendaten sind die Grundlage folgender Auswertungen:

- Aufgrund der Maschinendaten werden für jeden Feldeinsatz und alle Räder die beiden Grössen «Fahrspurfäche» sowie «Kontaktflächendruck bei mittlerer Zulast» berechnet (Schenker 2005; Weisskopf et al. 1988).
- Mit Hilfe eines Druckausbreitungsmodells (Söhne 1953) und dem Kontaktflächendruck wird der in 35 cm Tiefe auftretende Bodendruck berechnet.

- Der berechnete Bodendruck eines jeden Feldeinsatzes wird anschliessend mit der jeweils aktuellen Saugspannung klassiert und beurteilt.

Die auf diese Weise erfassten Bodendrücke werden im Rahmen einer Masterarbeit am Geografischen Institut der Universität Bern (GIUB) vertieft beurteilt. Die wichtigsten schon vorliegenden Resultate von fünf ÖLN Standorten werden hier aufgeführt und diskutiert. Die zwischen 1996 und 2008 durchgeführten maschinellen Feldeinsätze wurden nach den drei Bodenfeuchtezuständen «nass» (< 60 hPa), «feucht» (60 bis 100 hPa) und «trocken» (> 100 hPa) klassiert (**Abbildung 7-8, Grafik oben**). Die bei Weidenutzung durch Viehtritt verursachte Bodenbelastung wird im Folgenden nicht berücksichtigt.

Auf den NW der fünf Standorte wurden mit durchschnittlich 6 pro Jahr 2.5-mal weniger Feldeinsätze ausgeführt als auf den AF mit durchschnittlich 15. Bei den vorwiegend als Weide genutzten NW der Standorte Grasswil, Langnau und Treiten erfolgten deutlich weniger Feldeinsätze als bei den als ökologische Ausgleichsflächen genutzten NW der Standorte Rubigen und Schlosswil. Auf den AF ist die Streuung zwischen den Betrieben klein. Beim DS Standort Rubigen konnte trotz Pflugerzicht seit 1996 keine Abnahme der Feldeinsätze festgestellt werden.

Sowohl bei den NW als auch bei den AF erfolgte die Hälfte (48 bzw. 54 %) der Feldeinsätze unter «nassen», d. h. ungünstigen Bodenbedingungen (< 60 hPa). Demgegenüber wurde der Boden nur bei 25 % (NW) bzw. 29 % (AF) der Feldeinsätze in trockenem Zustand (> 100 hPa) befahren.

Abbildung 7-8 (Grafik unten) stellt die effektiv überfahrene Fahrspurfläche in Abhängigkeit der beiden auf den Unterboden auswirkenden Druckbelastungsklassen < 80 kPa und > 80 kPa dar. Sowohl auf den NW als auch auf den AF verhält sich die Gesamtanzahl an Feldeinsätzen

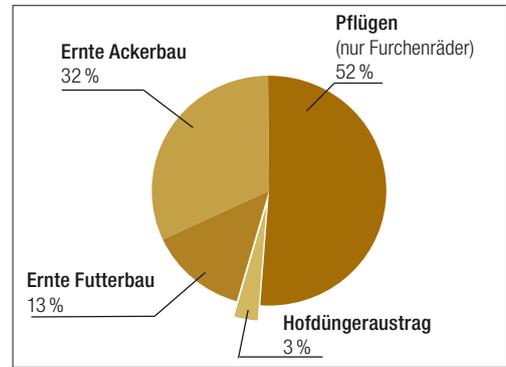


Abbildung 7-9: Nach Fahrspurfläche gewichtete Feldeinsätze, die schon bei halber Zulast einen berechneten Unterbodendruck von > 80 kPa aufweisen und bei einer Bodenfeuchte von < 60 hPa zwischen 1996 und 2008 ausgeführt wurden.

der 13 Bewirtschaftungsjahre proportional zur aufsummierten Fahrspurfläche. In der erfassten Zeitperiode wurden die NW durchschnittlich 2.7-mal pro Jahr flächendeckend überfahren, die AF fast 6.8-mal. Die Mehrheit der Feldeinsätze bewirkte im Unterboden Bodendrücke < 80 kPa. Für einzelne Feldeinsätze wurden jedoch schon bei mittlerer Zulast hohe Druckbelastungen auch für die Unterböden berechnet. Ist die Bodenfeuchte gleichzeitig hoch (< 60 hPa), sind physikalische Schädigungen am Bodengefüge zu erwarten. Bei insgesamt 43 Feldeinsätzen waren beide ungünstigen Kriterien gleichzeitig erfüllt (worst case). Gewichtet nach den Fahrspurflächenanteilen, wird rund die Hälfte dieser belastungsrelevanten Feldeinsätze durch die im Furchengrund laufenden Traktorräder beim Pflügen verursacht (**Abbildungen 7-9 und 7-10**). Dadurch werden die Unterböden der AF im Anbausystem PF am stärksten belastet (Kapitel 7.3, effektive Lagerungsdichte). Demgegenüber laufen die Räder beim On Land-Pflugeinsatz (**Abbildung 7-11**) oder im Anbausystem DS immer auf der Bodenoberfläche. Mit der in Kapitel 7.2.1 festgestellten stark erhöhten Tragfähigkeit in diesem System, ist die Druckbelastung in den Unterböden trotz gleich bleibender Anzahl Feldeinsätze auch bei der Kriterienkombination < 60 hPa > 80 kPa nachgewiesenermassen geringer (Kapitel 4.2). Der Massnahmenbereich I des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» (Kapitel 9) zielt auf diese Tatsache. Weiter führen auch schwere Maschinen für Ernte und Hofdüngerausbringung (hier sollten die Feldeinsätze zur Minimierung der Ammoniak-Verluste vermehrt bei nasser Witterung durchgeführt werden) zu hohen Druckbelastungen, wenn die Kriterienkombination < 60 hPa > 80 kPa erfüllt ist.

In den Bereichen Boden schonende Anbausysteme (Massnahmenbereich I) und Hofdüngerausbringung (Massnahme 10) des Förderprogramm Boden Kanton Bern werden erste Ansätze zur Erreichung des landwirtschaftlichen Umweltziels «Bodenverdichtung» (**Kasten 4-2**) umgesetzt.

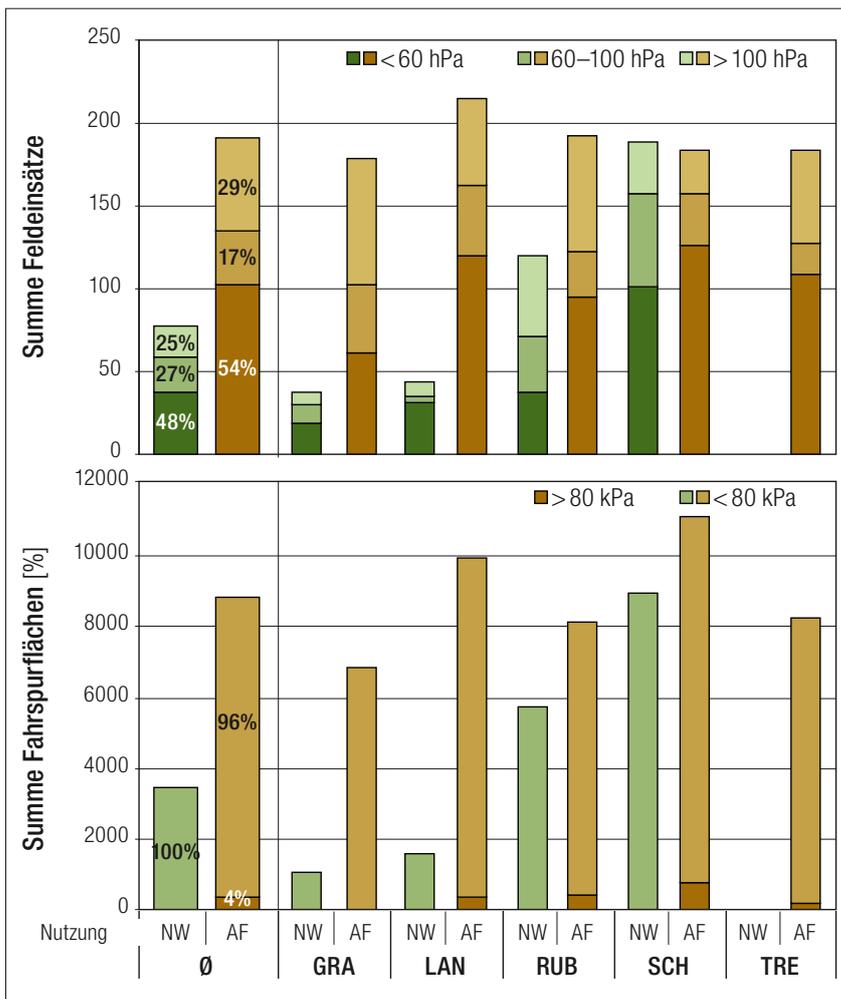


Abbildung 7-8: Summe der Feldeinsätze (1996–2008) von fünf KABO Betrieben, gruppiert in drei Bodenfeuchteklassen (Grafik oben) sowie Summe der durch die Feldeinsätze überfahrenen Fahrspurfläche, gruppiert in zwei bei halber Zulast für den Unterboden berechnete Bodendruckklassen (Grafik unten)

Der konventionelle Pflugeinsatz ist das Standardverfahren bei der Feldbestellung. Insbesondere die im Furchengrund laufenden Traktorräder, aber auch schwere Erntemaschinen sowie Miststreuer und Güllefässer können bei hoher Bodenfeuchte schädigende Druckbelastungen ausüben. Demgegenüber laufen die Räder beim System DS auf der Bodenoberfläche auf tragfähigen Oberböden.



Abbildung 7–10: Konventioneller Pflugeinsatz. Bei dieser Pflugtechnik läuft je ein Schleppervorder- und –hinterrad auf dem Furchengrund, was eine Doppelbereifung verunmöglicht. Das Schleppergewicht wird einseitig abgestützt. Bei nassen Bodenbedingungen ist grosser Schlupf unabwendbar.

7.4 Richtwertvorschläge im physikalischen Bodenschutz

Die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) hat 2004 für vier bodenphysikalische Parameter Richt- und Prüfwerte vorgeschlagen (Häusler und Buchter 2004). In Analogie zu den in der VBBo festgehaltenen Richt-, Prüf- und Sanierungswerten chemischer Stoffe sollen auch für physikalische Bodeneigenschaften Interpretationshilfen für den Vollzug des Bodenschutzes geschaffen werden.

Für die im Rahmen der KABO durchgeführten Untersuchungen sind folgende vorgeschlagenen Richtwerte für landwirtschaftlich genutzte Böden von Interesse:

- Grobporenvolumen bei pF 1.8: 7 Vol.-%;
- Gesättigte Wasserleitfähigkeit: 6×10^{-6} cm/s;
- Effektive Lagerungsdichte: Lagerungsdichte (g/cm^3) + $0.009 \times \text{Tongehalt (\%)} = 1.7 \text{ g/cm}^3$.

Für die Parameter Grobporenvolumen und effektive Lagerungsdichte wurden auf den NW und AF bei beiden Beprobungszyklen an den 16 Standorten insgesamt 1152 ungestörte Zylinderproben aus zwei Tiefenstufen entnommen. Bei der Wasserinfiltration werden keine Tiefenstufen unterschieden, so dass nur 576 Werte vorliegen. Die Richtwertvorschläge der BGS wurden sowohl in Bezug auf eine statistische Einheit (Median aus 9 Messwerten pro Standort und Tiefenstufe) als auch in Bezug auf den einzelnen Messwert betrachtet.

Grobporenvolumen: Insgesamt wurden in Oberböden in fünf Überschreitungen des vorgeschlagenen BGS-Richtwerts festgestellt. Von

total 1152 analysierten Einzelproben liegen insgesamt 67 (5.8%) über dem vorgeschlagenen Richtwert, davon 51 in Oberböden.

Gesättigte Wasserleitfähigkeit: Nur bei einer AF, am DS Standort Auswil, trat bei der Erstbeprobung eine Überschreitung des vorgeschlagenen BGS-Richtwerts auf. Von insgesamt 576 Einzelwerten liegen 28 (4.8%) über dem vorgeschlagenen Richtwert, davon 24 an ÖLN Standorten.



Abbildung 7–11: On Land-Pflugeinsatz. Alle, hinten doppelt bereiften, Schlepperräder laufen bei dieser Pflugtechnik auf der unbearbeiteten, noch biologisch verbauten und abgetrockneten Bodenoberfläche.

Effektive Lagerungsdichte: Insgesamt traten 14 Überschreitungen des vorgeschlagenen BGS-Richtwerts auf, sechs bei der Erst- und acht bei der Zweitbeprobung. Diese konzentrieren sich auf die Unterböden (12 von 14) bzw. auf die AF (10 von 14). Bei beiden Beprobungszyklen betroffen sind die Standorte Roggwil (ÖLN) im Oberboden der AF sowie Möriswil (BIO), Madiswil (ÖLN) und Uettligen (BIO) jeweils im Unterboden der AF. Die Bodenbearbeitung auf den AF führt zu einer Destabilisierung des Bodengefüges. Dies führt wegen der verminderten Tragfähigkeit zu einem Ableiten des Drucks in tiefere Bodenschichten und somit zu einer dichteren Lagerung des Unterbodens.

Von den insgesamt 1152 Einzelwerten liegen 187 (16%) über dem vorgeschlagenen BGS-Richtwert, die Mehrheit (134) in den Unterböden der AF.

Die Resultate der KABO dreier bodenphysikalischer Parameter wurden mit dem von der BGS vorgeschlagenen Richtwert verglichen. Je nach Parameter liegen 1–17 % der Medianwerte über diesem Vorschlag. Betroffen sind in erster Linie die AF: beim Grobporenvolumen die Oberböden, bei der effektiven Lagerungsdichte die Unterböden. Bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist keine Tendenz bezüglich Nutzung ersichtlich.

7.5 Gesamtbeurteilung der KABO-Resultate

Die Resultate der KABO zeigen, dass zwischen der Erst- und Zweitbeprobung die Humusgehalte generell abgenommen haben. Die Oberböden weisen im Vergleich zu den Unterböden einen beinahe doppelt so hohen Humusgehalt auf. Die höchsten Werte finden sich bei der NW Weidenutzung. Demgegenüber zeigen die AF tiefere Humusgehalte infolge vermehrter Oxidation durch die Bodenbearbeitung, die Produktionsrichtlinie BIO aufgrund extensiverer Bewirtschaftung sowie bei NW, wo bei Schnittnutzung bedeutende Mengen an Biomasse und damit Nährstoffen abgeführt werden.

Drei Viertel der KABO Standorte verfügen über schwach saure Böden mit geringen Kalkgehalten. Je nach Nutzung der Böden und Bemessungsmethode ist der Kalkbedarf unterschiedlich. Die «grobe» Methode mittels pH-Wert und Tongehalt schliesst auf einen doppelt so hohen Kalkbedarf bei den AF im Vergleich zu den NW. Der Kalkbedarf bei den BIO Standorten und den durch Weide intensiv genutzten NW hat sich zwischen den beiden Beprobungszyklen vergrössert. Mit der «vertiefen» Methode mittels Basensättigung und Kationenaustauschkapazität hingegen weisen Standorte mit geringer Düngeintensität wie z. B. BIO Standorte oder NW mit Schnittnutzung einen geringeren Kalkbedarf aus.

Bei einem pH-Wert im schwach sauren oder alkalischen Bereich sind Schadstoffe nicht löslich und die Nahrungs- und Futtermittelproduktion nicht durch eine Aufnahme gefährdet. Im Vergleich zu den BIO Standorten weisen die ÖLN Standorte höhere Schadstoffgehalte oder sogar Richtwertüberschreitungen bei Kupfer und Chrom sowie bei den PAK auf. Offensichtlich kann es bei regelmässiger Anwendung von synthetisch hergestellten Hilfsstoffen zu einer Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommen. Um auch künftigen Generationen die Produktion von gesunden

Nahrungs- und Futtermitteln zu gewährleisten, ist bei den ÖLN Standorten auf einen möglichst geringen Hilfsstoffeinsatz zu achten.

Entsprechend dem Humusgehalt weisen NW in den Oberböden höhere Gesamtporenvolumina auf als AF, ÖLN Standorte höhere als BIO Standorte. Zudem haben Unterböden weniger Hohlräume als Oberböden. Analog den Gesamtporenvolumina und dem Humus sind NW lockerer gelagert als AF und Böden von BIO Standorten dichter als Böden von ÖLN Standorten. Nach der Umrechnung in effektive Lagerungsdichte werden in den Unterböden der AF vermehrt Werte über dem von der BGS vorgeschlagenen Richtwert festgestellt. Aufgrund der Bewirtschaftungsmassnahmen durchgeführte Druckberechnungen zeigen, dass insbesondere von dem im Furchengrund laufenden Traktorhinterrad, von Erntemaschinen sowie von Fahrwerken beim Hofdüngeraustrag hohe physikalische Belastungen auf den Unterböden ausgeübt werden.

Die Grobporenvolumina zeigen nur beim Vergleich der Anbausysteme Unterschiede: Die DS bewirkt insbesondere in den Unterböden eine markante Zunahme der Grobporen und eine stabile Bodenstruktur, so dass physikalische Druckbelastungen vermehrt im Oberboden aufgefangen werden. In der KABO wurden allgemein Werte über dem von der BGS vorgeschlagenen Richtwert nur in den Oberböden gemessen.

Regelmässig gepflügte sowie Böden von BIO Standorten haben kleinere Regenwurmpopulationen als Böden von ÖLN Standorten oder DS Böden. Insbesondere die tief grabende Art *Lumbricus terrestris* beeinflusst mit ihren stabilen Wohnröhren den Wasser- und Lufthaushalt der Böden positiv, sodass sich NW und AF mit DS bezüglich Regenwurmpopulationen nicht mehr unterscheiden lassen. Eine langjährige Bodenruhe, verbunden mit

permanenter Bodendurchwurzelung, bewirkt dabei auch erhöhte Wasserleitfähigkeitswerte.

In Abhängigkeit der Humusgehalte zeigen Oberböden generell stabilere Bodenkrümel als Unterböden. Böden gemäss BIO Bewirtschaftung weisen zwar die geringsten Humusgehalte auf, die Oberböden sind aber trotzdem sehr stabil. Der Verzicht auf synthetisch hergestellte Hilfsstoffe und damit die geringe Schadstoffbelastung im Boden führen offensichtlich zu einem stabileren Lebendverbau und einer entsprechend geringeren Verschlammung dank hoher Perkulationsstabilität und gesättigter Wasserleitfähigkeit.

Zwischen den beiden Beprobungszyklen zeigten sich beim löslichen Kalium und beim N_{tot} -Gehalt starke Abnahmen in den NW. Bei den AF sind die Werte nur leicht zurück-

gegangen, bei den nach BIO Richtlinien bewirtschafteten AF haben die K_2O -Werte sogar zugenommen, und die N_{tot} -Gehalte sind gleich geblieben.

Die Nutzung der NW als Weide sowie die Bewirtschaftung der AF nach ÖLN führt zu einer Anreicherung von Phosphor (P_{tot}). Im Gegensatz dazu werden die vorwiegend als ökologische Ausgleichsflächen genutzten NW mit Schnittnutzung und insbesondere langjährige BIO NW tendenziell ausgehungert. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem P_2O_5 erhöhte sich zwischen der Erst- und Zweitbeprobung überall mit Ausnahme der NW Weidenutzung. Die hohe Düngeintensität gemäss der Suisse Bilanz führt zu erhöhten bis überhöhten Totalgehalten, nicht aber zwangsläufig zu höheren Verfügbarkeiten für die Pflanzen.

7.6 Schlussfolgerungen

Zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit auf lange Sicht und zur Erreichung der vom Bund vorgegebenen landwirtschaftlichen Umweltziele, ist bei der Bodennutzung auf folgende Punkte zu achten:

- Es ist ein hoher Humusgehalt anzustreben, um den Boden zu beleben und zu stabilisieren sowie die Nährstoffbasis für die Pflanzen zu verbessern.
- Der pH-Wert ist aus Gründen der Schadstoffmobilität und Nährstoffverfügbarkeit im schwach sauren bis neutralen Bereich zu regulieren.
- Die Schadstoffkonzentration im Boden ist möglichst gering zu halten, indem synthetisch hergestellte Hilfsstoffe gezielt eingesetzt werden.
- Bodenstruktur schädigende physikalische Druckbelastungen sind zu vermeiden.
- Auf wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist wenn möglich zu verzichten.

7.7 Ausblick

Die detaillierten Daten der KABO erlauben es, Veränderungen einzelner Bodeneigenschaften langfristig zu erfassen und Rückschlüsse auf die Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit zu ziehen. Zudem wird die Aussagekraft der Beobachtungen mit zunehmender Dauer erhöht.

Die vorliegenden Resultate beschreiben auch den Ausgangszustand des Wirkungsmonitorings im Rahmen des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» (Kapitel 9). Der dritte Beprobungszyklus wird der Dokumentation des Bodenzustands nach Abschluss des sechs Jahre dauernden Programms dienen. Auf dieser Basis können Rückschlüsse über dessen Wirksamkeit gezogen werden. Es liegen dann die Daten einer 20-jährigen Beobachtungsperiode vor, die vermehrt mit anbautechnischen Hintergrunddaten überlagert werden. Zusätzlich können Ökobilanzen gerechnet werden, die ein indirektes Abschätzen der Umweltwirkungen auf die Ressource Boden an der Schnittstelle

zu Wasser und Luft ermöglichen, dies in Verbindung mit weiteren Langzeitbeobachtungen aus den Bereichen Luftqualität (Ammoniak- und Ozon-Emissionen) des Amts für Wirtschaft und Arbeit (beco, Abteilung Immissionsschutz) sowie des Grundwasserschutzes (NAQUA) des BAFU.

Das beschriebene Vorgehen wurde zusammen mit der ART und dem Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) erarbeitet. Deren Fachleute begleiten das seit dem 1. August 2009 gestartete Förderprogramm bei Planung, Auswertung und Interpretation. Ergänzende Auswertungen der KABO Daten sowie zusätzliche Messungen und Analysen von Bodenparametern werden von ART und FiBL durchgeführt.

8 Lösungsstrategien entwickeln zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit



8 Lösungsstrategien entwickeln zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit

Im Hinblick auf die Entwicklung von Handlungsstrategien für den Bodenschutz in der Landwirtschaft werden seit 1994 auf der Dauerbeobachtungsfläche «Oberacker» am Inforama Rütli in Zollikofen (BE) die beiden Anbausysteme Direktsaat (DS) und Pflug (PF) innerhalb einer Ackerfruchtfolge mit ausschliesslich mineralischer Düngung und ohne Bracheperioden verglichen und weiterentwickelt. Der schwach humose sandige Lehm ist ein tiefgründiger, nährstoffreicher Boden.

Die bisherigen Untersuchungen belegen, dass ein langjährig kontinuierliches DS-System eine Alternative zum herkömmlichen PF-System darstellt: Es ist in der agronomischen Anwendung praxisreif, bewirkt einen biologisch aktiven, strukturstabilen und somit tragfähigen Boden, reduziert das Erosionsrisiko und die Anzahl Überfahrten, vermindert den Treibstoffverbrauch und weist insgesamt eine günstigere Ökobilanz auf. Im Vergleich zum PF-System werden nach siebenjähriger Umstellungszeit im DS-System dank mehr konserviertem Bodenwasser und kontinuierlicherer Nachlieferung sowie besserer Stickstoff-Effizienz leicht höhere Pflanzenerträge mit vergleichbarer Qualität geerntet.

Kasten 8-1: Definition Direktsaat (Sturny et al. 2001)

Direktsaat («no-tillage») ist ein eigenständiges Anbausystem, bei dem das Saatgut – ohne vorherige Bodenbearbeitung – direkt in den langjährig un- bearbeiteten, mit Pflanzen(-resten) bedeckten Boden abgelegt wird. Mittels speziellen Scheiben-, Meissel- oder Kreuzschlitz-Säscharen («Cross Slot») wird lediglich ein Schlitz im Boden geöffnet und nach der Saatgutablage geschlossen. Beim Sävorgang werden höchstens 50 % der Bodenoberfläche bewegt. Hilfsmittel wie (Mikro-)Nährstoffe können gleichzeitig in den Boden eingebracht werden.

Beim Bodenschutz des Kantons Bern wird auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit – speziell der Bodenstruktur – grosses Gewicht gelegt. Zum besseren Schutz der Bodenstruktur wurde ein konservierendes Bodennutzungssystem gesucht, das im Vergleich zu herkömmlichen pflugbasierten Bearbeitungsverfahren einen geringeren Einsatz von Arbeitskraft und Kapital erfordert (Schwarz et al. 2007). Die Direktsaat, ein in Amerika und Ozeanien verbreitetes Anbausystem ohne jegliche Bodenbearbeitung (Kasten 8-1), war 1994 in Europa noch kaum bekannt. Es schien aber für die Sicherstellung der Bodenfruchtbarkeit am besten geeignet.

8.1 Direktsaat und Pflug im Systemvergleich

Um die technische Realisierbarkeit und die Praxistauglichkeit der Direktsaat unter schweizerischen Verhältnissen zu testen, wurde im August 1994 am Inforama Rütli in Zollikofen (BE) auf der Parzelle «Oberacker» ein Systemvergleich angelegt. Vor- und Nachteile eines Direktsaat- bzw. Pflug-Systems sollten dabei aufgezeigt und Lösungsansätze für erkannte Probleme entwickelt werden (Abbildung 8-1).

Dieser im Streifendesign angelegte Systemvergleich ohne Wiederholungen findet auf

einer tiefgründigen, grundfeuchten Braunerde statt, die im Oberboden einen Tonanteil von 15 % und einen Humusgehalt von 3 % hat (Chervet et al. 2001). Sechs nebeneinanderliegende Fruchtfolgeschläge à 14 Aren werden je zur Hälfte direkt angesät (DS) bzw. gepflügt und konventionell bestellt (PF). Die sechsjährige Fruchtfolge, wie sie auch auf einem viehlosen Ackerbaubetrieb möglich ist, besteht aus Winterweizen/GD – Sommerweiss- erbsen/GD – Winterroggen/GD – Silomais – Wintergerste/GD – Zuckerrüben (GD =

Gründüngung mit hohem Kreuzblütleranteil). Der Anbau aller Kulturpflanzen erfolgt unter «Extenso»-Vorgaben.

Betreut wird der Systemvergleich Oberacker von der Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern (BSF) und vom Inforama Rütli. Neben agronomischen Erhebungen werden bodenphysikalische, -biologische und -chemische Parameter erfasst. Ein Teil der Untersuchungen wird von der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) in Zollikofen, ein anderer Teil von der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) in Zürich durchgeführt.

Mit Bezug auf bereits publizierte Agrarforschungsartikel folgt eine Synthese der Ergebnisse und Erkenntnisse der beiden ersten Fruchtfolgeperioden 1994–2006 des Systemvergleichs.



Abbildung 8–1: Systemvergleich Oberacker am Inforama Rütli in Zollikofen; Luftaufnahme vom 29. Juni 2004

8.1.1 Pflanzenschutz

Bei identischem Aufwand an Nachauflaufherbiziden wurde bisher in beiden Anbausystemen ein gleich hoher Druck der Begleitflora festgestellt. Während sich nach einer Bodenbearbeitung insbesondere Dikotyledonen und Lichtkeimer etablieren, sind es in den mulchbedeckten DS-Parzellen Monokotyledonen.

Die im Vergleich zum PF-System fehlende Bodenbearbeitung im DS-System erfordert eine ganzheitliche Vorsaatstrategie zur Kontrolle der Begleitflora, da deren regelmässige mechanische Bekämpfung entfällt. Faktoren wie Fruchtfolge (konsequenter Wechsel zwischen Halm- und Blattfrucht), Gründüngung (permanente Bodenbedeckung und -durchwurzelung), ein der heutigen Technik angepasstes Management der Ernterückstände (Strohhäcksler und Spreuverteiler am Mähdrescher) sowie chemische Bekämpfungsmassnahmen ermöglichen bei optimaler Abstimmung die Unterdrückung der unerwünschten Flora. Im Systemvergleich Oberacker wurde diese Strategie laufend verbessert. Mittlerweile werden das Getreide im Hochschnitt gedroschen und unverzüglich die Folgekultur oder eine möglichst hoch wachsende Gründüngung angesät (**Abbildung 8–2**). Die Gründüngungen werden so gewählt, dass diese den Boden auch noch nach der DS der darauf folgenden Hauptkulturen bedecken. So erfolgt zum Beispiel die DS von Zuckerrüben in durch Frosteinwirkung abgestorbene Ölrettich- bzw. Sareptasenbestände, und Silomais wird direkt in blühende Rübsenbestände gesät. Um den Glyphosataufwand zu vermindern, werden winterharte Gründüngungsbestände nach der DS der Hauptkultur mechanisch reguliert (*Reinhard et al. 2001*).

Generell konnte bei DS kein erhöhter Krankheitsdruck festgestellt werden. Das von DS-



Abbildung 8–2: Die Direktsaat der Gründüngung erfolgt in das im Hochschnitt gedroschene, gleichmässig verteilte und noch brüchige Stroh des gleichentags geernteten Getreides.

Kritikern befürchtete erhöhte Risiko von Mykotoxinbildung bei pfluglosem Anbau von Wintergetreide nach Mais konnte eingedämmt werden, indem die Fruchtfolge systemangepasst umgestellt, Maisstroh und -stoppeln vor der nachfolgenden Getreideaussaat fein säuberlich zerkleinert (dezimiert auch Maiszünslerlarven) sowie nur wenig fusariumanfällige Sorten verwendet wurden. Seit 1999 werden sämtliche Getreideproben auf die Pilzgifte Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEA) hin untersucht. Bei keiner der bisher analysierten Proben wurde der Schweizer Toleranzwert von 1 mg/kg (entsprechend 1000 ppb) in Müllereiprodukten überschritten. Seitdem die Silomais-Stoppeln gemulcht werden, liegen die Analysenwerte der Wintergerste-Körner sogar unter der chemischen Nachweisgrenze

von 12 ppb (*Chervet et al. 2005*). Zur Förderung des fusarienreduzierenden Anbaus wurde von der landwirtschaftlichen Beratung (Agridea) zusammen mit der Fachstelle für Pflanzenschutz des Kantons Bern, der BSF, der ART und den Getreideabnehmern (fenaco) das Merkblatt «Fusarien in Getreide» ausgearbeitet (*Agridea 2008*).

In Bezug auf Schädlinge führen die fehlende Bodenbearbeitung sowie die Mulchdecke im DS-System zu günstigen Unterschlupfmöglichkeiten für Schnecken und damit auch zu einem erhöhten Befallsrisiko. Andererseits wurde ein geringerer Zünslerbefall der Maispflanzen in den DS-Parzellen festgestellt.

Die fehlende Bodenbearbeitung im DS-System erfordert vor der Saat eine ganzheitliche Strategie, welche eine systemangepasste Fruchtfolge, Einbezug der Ernterückstände und Gründüngung sowie chemische Massnahmen beinhaltet. Der Aufwand an Nachaufaflerbiziden und der Befall von Schadorganismen sind in beiden Anbausystemen vergleichbar.

8.1.2 Bodenleben und Bodenstruktur

a. Bodenleben

Durch die Bodenbearbeitung in den PF-Parzellen werden die Wasser und Luft leitenden Regenwurmgänge im Oberboden regelmässig zerstört, und die grossen Regenwürmer können – sofern sie sich nicht in tieferen Bodenschichten aufhalten – verletzt oder gar getötet werden. Dagegen bleiben in den DS-Parzellen die Gänge der dort zahlreicher auftretenden Regenwürmer als kontinuierliche Transportbahnen für Wasser und darin gelöste Stoffe sowie für Luft erhalten – auch nach Befahrungen. Auf PF-Flächen befinden sich 94 g/m² Regenwürmer, auf direkt gesäten 190 g/m². Die Regenwurmpopulation ist damit doppelt so gross. Der Anteil der für die Drainage des Bodens wichtigen grossen tief grabenden Regenwürmer – insbesondere von *Lumbricus terrestris* – beträgt bei PF 25 %, bei DS dagegen über 50 %. Deren stabiles Gangsystem ist der Hauptgrund dafür, dass Wasser im DS-Boden rund dreimal rascher infiltriert als im gepflügten Boden (*Chervet et al. 2001; Maurer-Troxler et al. 2005*).

Die grosse Regenwurmpopulation im DS-System garantiert auch – in Zusammenarbeit mit anderen Bodenorganismen, insbesondere den Mikroorganismen – die Einmischung des Pflanzenmaterials in den Boden und die rasche Umsetzung der darin enthaltenen Nährstoffe in pflanzenverfügbare Formen.

b. Gefügeeigenschaften des Bodens

Beim Beurteilen von Spatenproben fällt auf, dass der Boden im System PF infolge von Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung ausgeprägter geschichtet und im Oberboden deutlich lockerer ist als der un bearbeitete DS-Boden. Er weist häufig eine verschlammte Bodenoberfläche, eine Strohmatratze an der Bearbeitungsgrenze und eine verschmierte bzw. verdichtete Pflugsohle auf (*Chervet et al. 2001*).

Die 1999 unter zu nassen Bodenverhältnissen durchgeführte Zuckerrübenenernte (Kapitel 4) verursachte Verdichtungen bis in den Unterboden. Die von 2000 bis 2004 auf dieser Parzelle getätigten bodenphysikalischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Gefügebrau des Unterbodens seither in beiden Anbausystemen stetig verbessert hat, nicht zuletzt wohl auch dank der häufig trockenen Sommerwitterung. Der Gefügebrau in den Unterböden des DS- und PF-Systems war vergleichbar – erstaunlicherweise jeweils meist deutlich günstiger als in den Oberböden. Im Oberboden zeigte sich in zwei von fünf Jahren ein lockerer Gefügebrau im PF-System, währenddem das Unterbodengefüge im DS-System in zwei von fünf Jahren günstiger war als im PF-System.

Hingegen ist die Gefügestabilität des DS-Oberbodens und somit seine Tragfähigkeit in vier von fünf Jahren erheblich grösser als im PF-System. Dort sind die Oberböden wegen der jährlich wiederholten ganzflächigen Lockerungsmassnahmen stärkeren Stabilitätsschwankungen unterworfen (*Weisskopf et al. 2005*).

Die eher günstigeren Gefügeeigenschaften des DS-Systems dürften einerseits auf den stabileren DS-Oberboden mit besserem Druckabbau und andererseits auf die nur halb so vielen Überfahrten in diesem Anbausystem zurückzuführen sein. Im Weiteren wurde der PF-Unterboden vermutlich durch das bis 2002 praktizierte herkömmliche Pflügen stärker beansprucht, bei dem die Traktorräder auf dem Furchengrund laufen.

c. Bodenerosion

Die grössere Stabilität der Bodenteilchen und ihr zusätzlicher Schutz durch die oberflächennahen Pflanzenreste, die mit den Wurzeln noch im Boden verankert sind, wirkt der physikalischen Kraft der Regentropfen entgegen, sodass die Verschlämmungsgefahr beim DS-Boden markant geringer ist als beim PF-Boden. Dieser Umstand dürfte mit den fehlenden Bodenlockerungsmassnahmen, mit der im DS-System stärkeren Anreicherung organischer Substanzen in der obersten Bodenschicht sowie mit einem intensiveren und ungestörten Lebendverbau der Boden-

aggregate zusammenhängen. Zudem verringern die zahlreichen kontinuierlichen Regenwurmgänge das Erosionsrisiko durch rasches Ableiten von Oberflächenwasser erheblich. Im PF-System werden die Ernterückstände dagegen in die Ackerkrume eingearbeitet bzw. vergraben. Deshalb ist die überlockerte Bodenoberfläche der gepflügten Parzellen von der Aussaat bis zum Reihenschluss der Kultur oftmals während Monaten der Witterung beinahe schutzlos ausgesetzt (Chervet et al. 2005; Chervet et al. 2006). Modellrechnungen zeigen für DS denn auch eine massive Abnahme des Abschwemmriskos für Feinerde, Humus und Nährstoffe, insbesondere Phosphor (Schaller et al. 2006). DS unterstützt durch die reduzierte Auswaschung die Erreichung des landwirtschaftlichen Umweltziels «Phosphor» (**Kasten 8–2**). Die verringerte Bodenerosion im Anbausystem DS entspricht insgesamt den drei landwirtschaftlichen Umweltzielen «Erosion» (**Kasten 9–3**).

d. Wassergehalt des Bodens

Beim DS-System geht während Starkniederschlägen nur wenig Wasser durch Oberflächenabfluss verloren. Nach Trockenperioden verteilt sich das mit den ersten Niederschlägen eindringende Wasser im direkt gesäten Boden rasch über das gesamte Profil, während im gepflügten Boden die kontinuierliche Wassereinsickerung durch die Pflugsohle gestört wird. Die permanente Mulchdecke auf der DS-Bodenoberfläche bremst die Wucht der Regentropfen und vermindert die Verdunstung. Zudem ist der kapillare Wasseraufstieg im DS-System besser, da er nicht durch «Schichtsprünge» wie im PF-Boden gestört wird. Im Vergleich zum PF-System steht den Kulturen bei DS so über längere Zeit mehr pflanzennutzbare Wasser zur Verfügung. Folglich tritt im DS-System Wasserstress sowohl für Pflanzen als auch für Bodenorganismen weniger ausgeprägt bzw. erst später auf als im PF-System. Diese bessere Wasserversorgung bewirkt zudem eine kontinuierlichere und länger anhaltende Mineralisierung von organisch gebundenen Nährstoffen und ermöglicht den Pflanzen, Nährstoffe während längerer Zeit aufzunehmen (Chervet et al. 2006).

Der Verzicht auf die Bodenbearbeitung fördert ein aktives Bodenleben und bringt eine deutliche Verbesserung der Bodenstruktur mit sich. Das Gefüge eines DS-Bodens wird stabiler, infiltriert mehr Wasser, und das Erosionsrisiko wird dank der konstanten Bodenbedeckung deutlich verkleinert. Der Wasserhaushalt des Bodens wird durch die praktisch ungestörte Bodenstruktur sowie die permanente Abdeckung des Bodens im DS-System positiv beeinflusst.

Kasten 8–2: Landwirtschaftliches Umweltziel «Phosphor» (BAFU und BLW 2008)

Der Gesamtphosphor-Gehalt in Seen, deren Phosphor-Eintrag hauptsächlich aus der Landwirtschaft stammt, beträgt weniger als 20 µg P/l Wasser. Besondere natürliche Verhältnisse bleiben vorbehalten.

8.1.3 Humus- und Nährstoffdynamik

a. Kohlenstoffgehalt des Bodens

Nach elf Versuchsjahren wurden im DS-System die höchsten Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) erwartungsgemäss in den obersten 5 cm des Bodens gemessen. Sie nehmen nach unten kontinuierlich ab, da die Pflanzenreste an der Bodenoberfläche verrotten und nicht durch Bearbeitung tiefer eingemischt oder gar vergraben werden. Anders ist das im PF-System, wo die Gehalte an C_{org} in den obersten 30 cm ausgeglichen sind. Zwischen 30 und 40 cm Tiefe befindet sich mehr C_{org} im gepflügten als im direkt gesäten Boden. Dies dürfte dadurch zu erklären sein, dass beim Pflügen der grösste Teil der Ernterückstände auf die Pflugsohle zu liegen kommt und dort nur langsam abgebaut wird (Zihlmann et al. 2001; Müller et al. 2007).

Der Gesamtgehalt an C_{org} über alle beprobten Bodentiefen ist in beiden Anbausystemen auf ähnlichem Niveau. Zwar liegen unter DS die Gehalte in 0 bis 20 cm Tiefe meist höher als in den PF-Böden, doch wird dies durch die fast durchwegs höheren Werte in den tieferen Schichten des gepflügten Bodens kompensiert.

Die Hypothese, dass Böden unter DS als C-Senke dienen, kann mit den vorliegenden Untersuchungen nach elf Versuchsjahren (noch) nicht bestätigt werden. Allerdings verursacht das DS-System wegen des markant geringeren Treibstoffverbrauchs auch einen wesentlich geringeren CO_2 -Ausstoss als das PF-System (Schaller et al. 2006).

b. Stickstoffdynamik im Boden

Bei ähnlich hoher gesamter Nachlieferung von mineralischem Stickstoff verläuft die Stickstoff-Mineralisierung unter DS kontinuierlicher und dauert im Verlauf der Vegetationsperiode länger an als unter PF. Die seit 1998 durchgeführten Stickstoff-Untersuchungen belegen, dass sich dies vor allem beim direkt gesäten Getreide in einer höheren Ertragsleistung pro gedüngte Stickstoff-Einheit auswirkt. Bei Zuckerrüben und Mais variiert die Stickstoff-Nachlieferung witterungsbedingt von Jahr zu Jahr ziemlich stark. So verzögert sie sich bei DS gegenüber PF in kühlen Frühjahren stärker als in milden. Beschleunigte Stickstoff-Freisetzung nach der Saat wurden bei Zuckerrüben und Mais sowie bei Winterroggen nach Eiweisserbsen unter PF beobachtet, wodurch

in diesen Perioden auch das Stickstoff-Verlust-risiko durch Auswaschung ansteigt (Kapitel 6).

Wegen der Gefahr von Nitratauswaschung sollten Mais und Zuckerrüben in beiden Systemen keine zu hohen Stickstoff-Gaben zur Saat erhalten. Nach der Umstellungsphase von PF zu DS und nach der Einführung einer Leguminose in die Fruchtfolge konnte ab Herbst 2001 in beiden Anbausystemen die verabreichte Stickstoff-Düngemenge gegenüber der Norm um rund 40 % reduziert werden. Die auf 50 bis 60 kg/ha reduzierte Stickstoff-Gesamtmenge kann bei DS-Zuckerrüben in einer Unterfuss-Startgabe erfolgen, bei PF sind nach wie vor zwei Stickstoff-Gaben zu empfehlen (Zihlmann et al. 2001; Zihlmann et al. 2006).

c. Phosphorgehalt des Bodens

Trotz der seit 1995 realisierten 60 %igen Reduktion der Phosphor-Düngegaben gegenüber der Norm ist der Versuchsboden mit pflanzenverfügbarem Phosphor angereichert. Dies gilt insbesondere für die obersten 30 cm mit leicht höheren Gehalten im PF-System. Die tendenzmässig höchsten Phosphor-Gehalte wurden unter DS in der Schicht zwischen 15 und 20 cm, unter PF zwischen 20 und 30 cm Tiefe gemessen.

Zwischen 30 und 40 cm Bodentiefe werden deutlich tiefere Werte gemessen. Hier liegen die Phosphor-Gehalte im PF-System klar höher als im DS-System: Mit dem Unterpflügen der

Ernterückstände gelangt ein Teil der Nährstoffe in tiefere Schichten (Zihlmann et al. 2001; Müller et al. 2010).

d. Kaliumgehalt des Bodens

Beim pflanzenverfügbaren Kalium ist nach elf Versuchsjahren im DS-System die starke Anreicherung in den obersten 5 cm des Bodens augenfällig, dies trotz einer Reduktion der Kalium-Düngegaben um 80 % gegenüber der Norm in beiden Anbausystemen. Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die Kalium-Werte kontinuierlich ab.

Im PF-System ist diese Differenzierung weit weniger ausgeprägt: Die Kalium-Verteilung in den obersten 30 cm ist relativ gleichförmig, in 30 bis 40 cm Tiefe werden – wie schon beim Phosphor – höhere Kalium-Gehalte gemessen als bei DS (Zihlmann et al. 2001; Müller et al. 2010).

Auf DS-Flächen konnte im Oberboden ein höherer Humusgehalt nachgewiesen werden. Die Stickstoffnachlieferung verläuft im DS-System kontinuierlicher und dauert im Verlauf der Vegetationsperiode länger. Zudem sind in der obersten Schicht mehr pflanzenverfügbares Phosphor und Kalium vorhanden, was auf die Optimierung der Stoffumsetzungsvorgänge hindeutet.

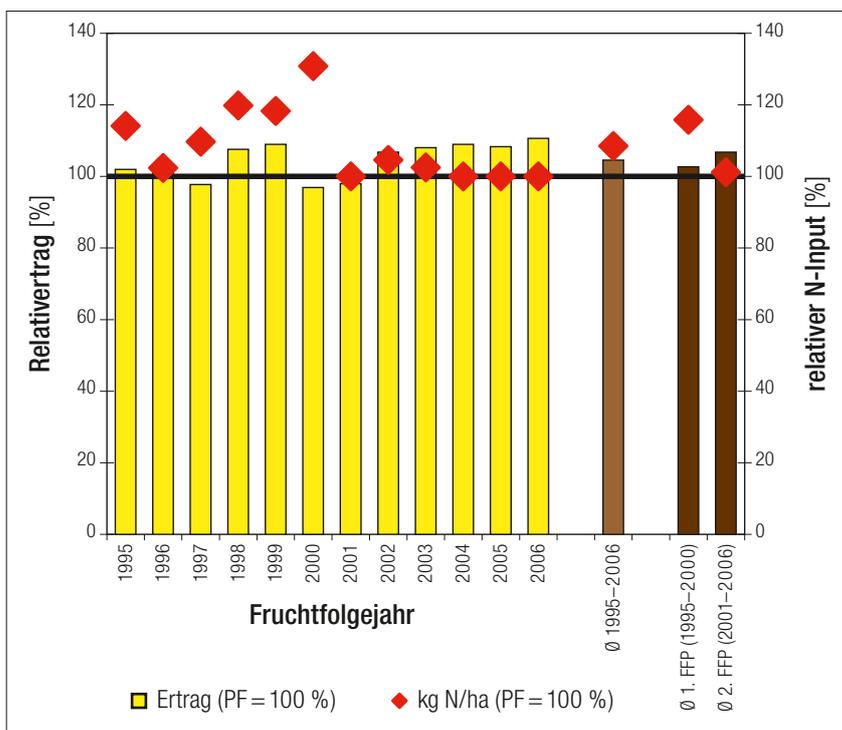


Abbildung 8–3: Relativerträge und relative Stickstoff-Zufuhr durch Düngung bei Direktsaat (DS) und Pflug (PF) im Systemvergleich; Durchschnitt von sechs Fruchtfolgeschlägen. Systemvergleich Oberacker am Inforama Rütli in Zollikofen (1. Fruchtfolgeperiode (FFP): 1995–2000, 2. FFP: 2001–2006)

8.1.4 Pflanzenerträge

Im DS-System wird das Saatgut mittels spezieller Sämaschinen direkt in den unbearbeiteten, mit Pflanzen(-resten) bedeckten Boden abgelegt. Aufgrund einer in den ersten Jahren noch nicht ausgereiften Sätechnik sowie wegen vermehrten Schneckenfrasses wies das DS-System im Vergleich zum PF-System oft einen geringeren Feldaufgang auf. Dank des kompensatorischen Wachstums, das allen Kulturpflanzen eigen ist, sowie wegen der leicht erhöhten, auf N_{min} basierenden Stickstoff-Gaben konnten die am Anfang geringeren Bestandesdichten bis zur Ernte ertragsmässig meistens ausgeglichen werden (Reinhard et al. 2001).

Mit Beginn der zweiten Fruchtfolgeperiode (2001–2006) waren technische Fortschritte bei der Sätechnik erzielt sowie weitere Erfahrungen mit der Handhabung von DS-Systemen gesammelt worden; ausserdem näherten sich die DS-Böden nach der mehrjährigen Umstellungsphase einem neuen «Gleichgewichtszustand». Diese Umstände führten in den folgenden sechs Jahren im DS-System bei vergleichbarer Qualität zu (statistisch nicht auszuwertenden) Mehrerträgen von bis zu 10 % bei den zur Totreife gedroschenen Getreide- und Eiweisspflanzen. Demgegenüber waren die Silomais-

und Zuckererträge nur geringfügig höher als im PF-System.

Wird der Relativertrag in Abhängigkeit von der relativen Stickstoff-Düngegabe dargestellt, so war in der zweiten Fruchtfolgeperiode die Stickstoff-Effizienz im DS-System erhöht (**Abbildung 8–3**). Ab dem siebten Versuchsjahr übertrafen die Relativerträge im DS-System jene im PF-System beständig – dies bei einer ab dem neunten Versuchsjahr für beide Anbausysteme identischen Stickstoff-Zufuhr durch die Düngung (*Chervet et al. 2005*).

Während der ersten Fruchtfolgeperiode fielen die Erträge trotz leicht erhöhter Düngergaben im DS-System tiefer aus. Nach einer Umstellungsphase von sechs Jahren wurden bei identischen Düngergaben im DS-System höhere Erträge erzielt.

8.1.5 Ökobilanz positiv für DS-System

Aufgrund der aus den Grunddaten des Systemvergleichs Oberacker berechneten Ökobilanz für die Fruchtfolgeperiode 1999–2005 können alle Umweltwirkungen eines auf DS umgestellten Ackerbausystems gegenüber dem PF-System als «tendenziell günstiger» bis «günstiger» beurteilt werden (*Schaller et al. 2006*). Beispielsweise reduzierte sich der Energiebedarf dank 50 % weniger Überfahrten um 10 %, was 36 Liter Dieseläquivalenten pro Hektare und Jahr entspricht. Das Ozonbildungspotenzial ist gar um 20 % günstiger. Die Verbesserung der Luftqualität entspricht den landwirtschaftlichen Umweltzielen «Dieselruss» (**Kasten 8–3**) und «Treibhausgase» (**Kasten 3–1**). Gleichzeitig wird die Bodenqualität bei einigen der untersuchten Parameter wie beispielsweise Grobporenvolumen und Regenwurmbiomasse verbessert.

Beim Ressourcen- und Nährstoffmanagement ist allerdings der Einfluss der energieintensiven Mineraldüngung grösser als jener der Bodenbearbeitung. Erfolgt die Beurteilung flächenbezogen (pro ha und Anbaujahr), werden die nicht oder wenig gedüngten Kulturen wie Eiweisserbsen und Winterroggen günstiger bewertet als die stärker gedüngten. Bei der ertragsbezogenen Betrachtungsweise (pro Kilogramm geerntete Trockensubstanz) werden

Kasten 8–3: Landwirtschaftliches Umweltziel «Dieselruss» (BAFU und BLW 2008)

Die Dieselermissionen der Landwirtschaft betragen maximal 20 t pro Jahr.

hingegen die ertragsstarken Kulturen wie Zuckerrüben und Silomais am günstigsten beurteilt.

Die Umweltwirkungen des Schadstoffmanagements werden entscheidend durch die mit den Pflanzenschutzmitteln ausgebrachten Wirkstoffe (vor allem selektive Herbizide) geprägt. Deren Wirkungsbeurteilungen variieren allerdings je nach angewandeter Ökobilanzierungs-Methodik sehr stark.

Für alle Managementbereiche der Ökobilanz fällt das DS-System «tendenziell günstiger» bis «günstiger» aus. Durch die um 50 % reduzierten Überfahrten liegen insbesondere der Energiebedarf um 10 %, das Ozonbildungspotenzial um 20 % tiefer.

8.1.6 Wirtschaftlichkeit im Vergleich

Bisherige Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsberechnungen lassen den Schluss zu, dass mit einer Umstellung auf das DS-System vor allem im kleinflächigen, getreidebetonten Ackerbaubetrieb, im Nebenerwerbsbetrieb und in Betrieben, welche vor grösseren Ersatzinvestitionen stehen (Bodenbearbeitungsgeräte/-maschinen und Traktoren), betriebswirtschaftlich sehr vorteilhafte Kostensenkungen erreicht werden können (*Steingruber et al. 2001*).

Anhand einer Vollkostenrechnung «Ackerbau» eines Betriebs (Fläche 10.4 ha) konnte gezeigt werden, dass trotz sinkender Produktpreise das Ziel der gewinnbringenden Bewirtschaftung erreicht wurde. Insbesondere konnten durch die konsequente Abstossung der unnötigen Maschinen die Strukturkosten gesenkt und auch die Direktkosten reduziert werden. Das DS-System führt zu einer massiven Zeitersparnis und bricht die Arbeitsspitzen im Frühjahr und Herbst. Die Nutzung dieser Zeit für andere Betriebszweige oder einen Nebenerwerb bringt ein zusätzliches Einkommen (*Chervet et al. 2008*).

8.2 Schlussfolgerungen zum Systemvergleich

Die Resultate des Systemvergleichs Oberacker belegen, dass unter den Standortverhältnissen des Versuchs ein langjährig kontinuierliches DS-System eine echte Alternative zum herkömmlichen PF-System darstellt. In der agronomischen Anwendung ist DS inzwischen

praxisreif, bewirkt einen strukturstabilen, biologisch aktiven und somit tragfähigen Boden, reduziert das Erosionsrisiko, die Anzahl Überfahrten sowie den Treibstoffverbrauch und weist günstigere Umweltwirkungen auf. Im Vergleich zum PF-System werden im DS-

System nach siebenjähriger Umstellungszeit dank mehr gespeichertem Bodenwasser und kontinuierlicherer Nachlieferung desselben sowie besserer Stickstoff-Effizienz leicht höhere Pflanzenerträge mit vergleichbarer Qualität geerntet – bei einer Stickstoff-Düngemenge, die in beiden Anbausystemen nur rund 60% der Normdüngung entspricht. DS ermöglicht eine nachhaltige Bodennutzung, indem sie natürliche Ressourcen schont, sie die Produktionskosten

inklusive der externen Kosten und der Energiekosten verringert und indem sie ökonomisch sowie sozial tragbar ist. Eine bezüglich Umweltwirkungen optimierte Fruchtfolge enthält nach ertragsstarken Kulturen wie Mais und Zuckerrüben Kulturen mit einem bescheideneren Nährstoffbedarf wie Leguminosen. Von diesem Nutzungssystem ausgenommen sind zurzeit noch der Kartoffel- und Gemüsebau.

8.3 Ausblick

In den kommenden Jahren wird sich der Anstieg der Energiepreise zunehmend auf die landwirtschaftlichen Produktionskosten auswirken (*Sturny et al. 2007*). Ackerbausysteme der Zukunft sollten auf einer möglichst geringen Zufuhr an nicht-erneuerbaren Energieträgern basieren und dabei die einfallende Sonnenenergie optimal durch die Pflanzen ausnutzen. Das DS-System als energiesparende Bodennutzung birgt diesbezüglich ein noch nicht ausgeschöpftes Potenzial. Um auch die energieintensive Stickstoff-Mineraldüngung zu reduzieren, wird durch den vermehrten Anbau von Leguminosen als Hauptkultur oder in Gründüngungsgemengen eine verstärkte biologische Stickstoff-Fixierung sowie eine effizientere Stickstoff-Nutzung durch die Pflanzenbestände angestrebt. Hinzu kommt, dass mit einem ganzheitlich optimierten DS-System durch weniger Auswaschung bzw. reduzierten Oberflächenabfluss zum Gewässerschutz sowie durch geringere Emissionen zur Luftreinhaltung beigetragen wird (*Schaller et al. 2006*). Stickstoff-Verluste in die Atmosphäre (Lachgas) sollen künftig mittels einer ammoniumbasierten Stickstoff-Düngungsstrategie vermindert werden. Schliesslich könnte bei einer Klimaerwärmung das Wasser immer öfter zum limitierenden Wachstumsfaktor werden. Auch hier bringt die DS markante Vorteile mit sich – dies alles sind Themen, mit denen sich auch der UNO-Klimarat auseinandersetzt (**Kasten 8–4**).

Dies sind wichtige Gründe, weshalb der Kanton Bern Landwirte bei der Umstellung

auf DS begleitet und im Rahmen des Förderprogramms Boden die Unterstützung ausgebaut hat (Kapitel 9). Gleichzeitig werden mittels des Systemvergleichs Oberacker weiterhin praxisrelevante Erfahrungen gesammelt und die neusten Erkenntnisse umgesetzt. In den kommenden Jahren sollen beide Systeme durch vermehrten Anbau von Leguminosen, ammoniumbasierte Stickstoff-Düngung, reduzierte Glyphosat-Anwendung bei DS sowie reduzierte Bearbeitungsintensität bei PF noch energiesparender und umweltschonender im Praxisversuch erprobt werden. Nach der Auswertung aller Untersuchungen in den ersten zwei sechsjährigen Fruchtfolgeperioden haben die Projektverantwortlichen im Sommer/Herbst 2006 – zu Beginn der dritten Fruchtfolgeperiode – folgende Anpassungen bei den zwei Systemen vorgenommen:

- Neue Fruchtfolge in beiden Anbausystemen: Winterweizen/GD – Ackerbohnen – Wintergerste/GD – Zuckerrüben/Grünschnittroggen – Mais – Eiweisserbsen/GD (GD = frostempfindliche Gründüngung mit hohem Leguminosenanteil, **Abbildung 8–4**).
- Im PF-System wird künftig eine flache Furche (10 bis 15 cm tief) mit dem Onland-Pflug gezogen. Auf die übliche Saatbettbereitung mit einem Zapfwellengerät wird ganz verzichtet. Es wird höchstens ein Zwischenrad-Frontpacker am Traktor bei der Saat mit der DS-Maschine in die raue Pflugfurche eingesetzt.
- Zur Regulierung der hoch wachsenden Gründüngungsbestände wird künftig im DS-System, wenn immer möglich, eine (Messer-)Walze eingesetzt, damit auf den Glyphosat-Einsatz teilweise oder ganz verzichtet werden kann. Winterharte Gründüngungen werden nicht mehr angebaut.
- Speziell bei Mais und Zuckerrüben wird durch den Einsatz einer DS-Maschine mit einem Cross Slot-Säeschar eine Verbesserung punkto Ablagegenauigkeit von Saatgut und (Mikro-)Nährstoffen erwartet, verbunden mit geringerem Risiko für Lachgasbildung (*Zihlmann et al. 2007*).

Kasten 8–4: 3. Bericht des UNO-Klimarats (*IPCC 2007*)

Der Weltklimabericht 2007 listet Möglichkeiten auf, wie neben anderen Massnahmen die Landwirtschaft den Ausstoss von Treibhausgasen bis 2030 vermindern kann:

- Verbesserte Landnutzung, um die Speicherkapazität der Böden für Kohlendioxid zu erhöhen
- Wiederherstellung von degradierten Flächen
- Verminderung des Ausstosses von Lachgas durch gezieltere Anwendung von Stickstoffdüngern
- Ersatz von fossilen durch pflanzliche Energieträger, effizientere Energienutzung
- Verbesserung der Erträge

- Die Stickstoff-Düngung wird in beiden Anbausystemen mit dem CULTAN-Verfahren (Kapitel 6) ergänzt. Gleichzeitig wird die Nährstoffversorgung der Kulturen (inkl. Spurenelemente) mit dem Kinsey-Düngungskonzept sichergestellt. Dabei wird auf ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis im Boden geachtet und sowohl das Gesetz des Minimums als auch jenes des Maximums (im Sinne einer Optimierung) berücksichtigt.



Abbildung 8–4: Gründüngungsgemenge unterdrücken Beikräuter/-gräser und Ausfallerntegut. Mit der Direktsaat in solche frostempfindliche Gründüngungsbestände soll künftig auf einen Glyphosateinsatz verzichtet werden können.

9 Umsetzung Ressourcen schonender Massnahmen



Einreichung des Gesuchs «Förderprogramm Boden Kanton Bern»

9 Umsetzung Ressourcen schonender Massnahmen

Die Praxis der Landbewirtschaftung erfüllt heute weitgehend die gesetzlichen Auflagen des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN). Trotzdem bedingt die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit auf lange Sicht zusätzliche Massnahmen zur Verbesserung und Stabilisierung der Bodenstruktur. Deshalb fördert der Kanton Bern die Umstellung der Bewirtschaftung auf Boden schonende Anbausysteme. Landwirte haben in Zusammenarbeit mit Bodenfachleuten auf der Basis des Programms zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen gemäss Art. 77a und b des Landwirtschaftsgesetzes das «Förderprogramm Boden Kanton Bern» erarbeitet. Ziel dieses Projekts ist, einen ganzheitlichen und nachhaltigen Lösungsansatz zur Schonung der Ressource Boden an der Schnittstelle zu Wasser und Luft zu formulieren. Das Förderprogramm basiert auf einer freiwilligen Teilnahme und setzt finanzielle Anreize für die Umsetzung Ressourcen schonender Massnahmen. Nach der Projektlaufzeit von sechs Jahren sollen die Betriebe genügend Fachwissen und Erfahrungen gesammelt haben, um die auch wirtschaftlich vorteilhaften Umstellungsmassnahmen mit Überzeugung und ohne weitere finanzielle Anreize weiterzuführen.

Kasten 9–1: Boden schonende Anbausysteme (*Sturny 1993; Sturny et al. 2007*)

Der Begriff «Boden schonende Anbausysteme» umfasst alle Systeme der pfluglosen (konservierenden) Bodenbearbeitung («conservation tillage»). Das Hauptmerkmal dieser Systeme ist der Verzicht auf die wendende Pflugarbeit, mit dem Ziel den Boden, das Wasser und die Nährstoffe zu bewahren – zu «konservieren». Ernterückstände oder Pflanzenreste der Haupt- bzw. Zwischenfrucht bleiben auf oder nahe der Ackeroberfläche. Die unerwünschte Begleitflora wird im Moment noch grösstenteils chemisch reguliert. Neben der Zielvariante Direktsaat (Kasten 8–1) werden folgende Systeme der konservierenden Bodenbearbeitung zugeordnet:

Mulchsaat: Unter Mulchsaat versteht man die Saat in eine Mulchschicht auf oder nahe der Ackeroberfläche. Diese Mulchschicht kann aus Ernterückständen oder Pflanzenresten der Haupt- bzw. Zwischenfrucht bestehen. Zur Mulchsaat bieten sich zwei Verfahren an: Mulchsaat mit Saatbettbereitung und Mulchsaat ohne Saatbettbereitung.

Streifenfrässaat bei Mais: Mit einer Bestellkombination werden im Frühjahr meist in Wiesenbestände 30 cm breite Saatstreifen eingefräst. Im gleichen Arbeitsgang wird der Boden mit den vorlaufenden Grubberzinken knapp unterhalb der Bearbeitungsgrenze gelockert sowie das Saatgut, der Dünger und nötigenfalls das Herbizid in die Saatstreifen eingebracht.

Gestützt auf die Erkenntnisse aus der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO, Kapitel 7) und dem Systemvergleich Oberacker (Kapitel 8) legt die Bodenschutzfachstelle in ihrer Handlungsstrategie ein besonderes Gewicht auf die Förderung der Boden schonenden Anbausysteme (Kasten 9–1). Insbesondere die Direktsaat, das Anbausystem ohne jegliche Bodenbearbeitung, stabilisiert die Bodenstruktur dauerhaft (Abbildung 9–1). Nach einer rund fünfjährigen Regenerierungsphase stellt sich im Boden ein neues «dynamisches Fließgleichgewicht» ein (*Sá 2004*). Im Vergleich zum wendenden Pflugsystem kann bei 50 % weniger Überfahrten (*Chervet et al. 2005*) und deutlich weniger Bodenabtrag durch Erosion (*Schaller et al. 2006*) von ähnlich hohen Erträgen ausgegangen werden (*Derpsch 2006*). Angesichts sinkender Produkte- und steigender Energiepreise gewinnen die wirtschaftlichen Vorteile der Boden schonenden Anbausysteme zunehmend an Bedeutung (*Sturny et al. 2007*).

9.1 Beginn der Umsetzung

Die Anwendung der Boden schonenden Anbausysteme in der Landwirtschaft setzt in erster Linie ein Umdenken bei den Landwirten voraus. Insbesondere die während der mehr-

jährigen Regenerierungsphase des Bodens oft befürchteten Ertragsdepressionen nach Direktsaaten bzw. die vielerorts vorhandene Eigenmechanisierung für wendende Boden-

bearbeitung hat bisher eine breitflächige Anwendung dieses neuen Anbausystems verhindert.

Mit Publikationen, Demonstrationen und Beratungen im Feld sollten den Landwirten die pfluglosen Anbausysteme, insbesondere die Zielvariante Direktsaat, näher gebracht werden. Ein wichtiges Element der Umsetzungsstrategie bildeten gezielte finanzielle Anreize. Mit der Unterstützung zweier innovativer Lohnunternehmer, welche bereit waren, in teure Spezialmaschinen zu investieren, finanzierte der Kanton 1993 und 1994 versuchsweise die Säkosten von interessierten Landwirten. Die anschliessend in beiden Jahren als Erfolgskontrolle durchgeführte Umfrage ergab, dass die Landwirte nur dank den finanziellen Anreizen des Kantons bereit gewesen waren, die Direktsaat zu testen – und nur mit weiteren finanziellen Anreizen während der Regenerierungsphase des Bodens würden sie diesem System den Vorzug geben. Die Umfrage belegte weiter, dass viele Landwirte nur dann bereit waren, die Direktsaat anzuwenden, wenn in der Nachbarschaft eine gelungene Feldbestellung besichtigt werden konnte (BSF 1994).

Überzeugt von den Vorteilen der Bodenschonenden Anbausysteme hat der Regierungsrat des Kantons Bern in der «Bernischen Agrarstrategie 2000» der Förderung der Bodenschonenden Anbausysteme, insbesondere der Zielvariante Direktsaat, eine noch heute aktuelle hohe Priorität eingeräumt (LANA 1994).



Abbildung 9–1: Die Landtechnik hat sich im Laufe der Zeit enorm gewandelt. Die Arbeit mit Zugtieren hat früher den Boden kaum beeinträchtigt. Heute muss der Boden die hohen Gewichte der Einsatzfahrzeuge tragen können. Somit müssen die Eingriffe in dessen Struktur reduziert werden, beispielsweise mit Direktsaat.

9.1.1 Mehrjährige Massnahmen konsequent umsetzen

Mit dem Inkraftsetzen des kantonalen Landwirtschaftsgesetzes (KLWG 1997) und dessen Ausführungsverordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und Kulturlandschaft (LKV 1997) hat der Kanton Bern die rechtlichen Grundlagen geschaffen, um in besonders verdichtungs-, nitrat- und erosionsgefährdeten Gebieten auf ackerbaulich genutzten Flächen vorbeugende Massnahmen zur Regenerierung der Bodenstruktur ergreifen zu können. Die Umsetzung der Verordnung sah vor, dass sich ein Landwirt vertraglich verpflichtete, seine ackerbaulich genutzten Böden während fünf Jahren nur oberflächlich oder gar nicht mehr zu lockern. Als Umstellungsanreiz und Gegenleistung für die zusätzlich zum ÖLN erbrachten Mehrleistungen erhielt er Beiträge. Deren Höhe richtete sich nach der gewählten Kultur und den in **Tabelle 9–1** aufgeführten Anbausystemen. Während der Vertragsdauer mussten zwei Hauptkulturen und die Hälfte der Zwischenkulturen als Direktsaat angebaut werden. Die restlichen Haupt- und Zwischenkulturen waren mindestens mit Mulchsaaten zu bestellen. Der Betriebsleiter entschied selbst, welche und wie viele Parzellen er vertraglich

Tabelle 9–1: Vollzug der LKV¹ im Kanton Bern, Beitragshöhe für pfluglose Anbausysteme in Abhängigkeit der Kultur während der fünfjährigen Vertragsdauer

Kulturen	Pfluglose Anbausysteme	
	Übergangsvariante Mulchsaat [CHF je ha & Jahr]	Zielvariante Direktsaat [CHF je ha & Jahr]
1 Wintergetreide ²	150.–	300.–
2 Sommergetreide	150.–	300.–
3 Winter-/Sommerraps	300.–	500.–
4 Mais als Streifenfrässaat	450.–	–
5 Silo-/Körnermais	300.–	500.–
6 Kartoffeln	500.–	600.–
7 Zucker-/Futtermülsen	350.–	550.–
8 Eiweisserbsen, Sojabohnen, Ackerbohnen ³	250.– (ab 2008: 400.–)	400.– (ab 2008: 550.–)
9 Kunstwiese, Grünbrache ⁴	–	200.–
10 Sonnenblumen	300.–	500.–

¹ LKV = Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (1997)

² Zur Bekämpfung von Fusarien werden seit 2008 keine Beiträge mehr für Weizen und Triticale ausbezahlt, sofern diese nach Mais angebaut werden.

³ Ab 2008 Erhöhung des Beitrags zur Förderung der Leguminosen

⁴ Kunstwiesen und Grünbrachen werden nur im 1. Hauptnutzungsjahr entschädigt.

binden wollte. Bei den jährlichen Kontrollen konnten mit dem Kontrolleur Erfahrungen ausgetauscht und das weitere Vorgehen (Fruchtfolge, Anbauvariante) diskutiert werden. Nach Ablauf der fünfjährigen Vertragsdauer bestand bis 2002 die Möglichkeit, einen Anschlussvertrag mit strengeren Vertragsbedingungen abzuschliessen. Aus finanzpolitischen Gründen wurde der damals ursprüngliche Kredit von Fr. 2 Mio. auf Fr. 600 000.– pro Jahr begrenzt und die Option, Anschlussverträge abzuschliessen, gestrichen (Schwarz et al. 2007).

9.1.2 Erfolg der Förderung Boden schonender Anbausysteme

Kurz nach der Einführung der LKV im Jahr 1997 standen die Landwirte der Direktsaat noch sehr skeptisch gegenüber. Im ersten Jahr wurde lediglich mit 92 Landwirten ein Vertrag abgeschlossen (Tabelle 9–2). Die Zahl der Vertragsabschlüsse stieg anschliessend bis 2002 kontinuierlich an. Seit der Begrenzung der finanziellen Mittel hat sich die jährliche Gesamtfläche bei 2500 ha und 420 Landwirten eingependelt, was einem Anteil von 2.9% aller ackerbaulich genutzten Böden des Kantons Bern entspricht. Wurde 1996 auf nur 18% der Vertragsflächen die Direktsaat gewählt, waren es in den Folgejahren knapp zwei Drittel der vertraglich gebundenen Flächen (Tabelle 9–2). Oft begannen die Landwirte zögernd mit einer ersten Parzelle; dank guter Erfahrungen vergrösserten sie dann die Vertragsfläche sukzessive. Die Vertragsfläche konnte sich seit 2002 durch die Begrenzung des finanziellen Rahmens nicht weiter ausdehnen. Eine Warte-

liste belegte jedoch eine weit grössere Nachfrage (Schwarz et al. 2007).

Eine 2005 vom Kanton Bern durchgeführte Evaluationsumfrage (Rücklaufquote knapp 70%) besagt, dass rund 90% der Landwirte mit dem Angebot des Kantons zufrieden bis sehr zufrieden sind (BSF 2006). Geschätzt wurden nicht nur die Beiträge während der Regenerierungsphase, sondern auch die kompetente Beratung sowie die einfache Administration. Einzig die Höhe der Beiträge für die erbrachten Mehrleistungen scheint, verglichen mit den Beiträgen für den ÖLN, als zu gering bemessen. Knapp 85% der Landwirte sind nach Ablauf ihres Fünfjahresvertrages von den pfluglosen Anbausystemen, insbesondere der Direktsaat, überzeugt und wenden sie auch nach dem Auslaufen des Vertrages weiter an. Erfolgte der Einstieg meist aus rein finanziellen Überlegungen, erkannten sie nach fünf Jahren, dass es genügend ökonomische, aber auch ökologische und soziale Gründe gibt, ihre Felder weiterhin pfluglos zu bewirtschaften. Da mit den Beiträgen ökologische Mehrleistungen abgegolten werden, würden die Landwirte eine Kürzung oder gar eine Streichung überhaupt nicht verstehen (BSF 2006).

Im Rahmen eines Syntheseberichts des europäischen Erosionsprogramms Cost 634 untersuchten Ledermann und Schneider (2008) am Centre for Development and Environment (CDE) des Geographischen Instituts der Universität Bern die räumliche Verbreitung der Direktsaat. In der Schweiz stieg die direkt gesäte Fläche von 60 ha 1992 auf über 12 000 ha im Jahr 2006. Dies entspricht einem Anteil von rund 3.0% der Ackerfläche. Im Kanton Bern wird anteilmässig die grösste Fläche direkt ge-

Tabelle 9–2: Vollzug der LKV¹ im Kanton Bern, jährliche Vertragsflächen mit Mulch-, Streifenfräs- und Direktsaaten, Zeitperiode 1996–2008

Jahr ²	Anzahl Betriebe mit Vertrag	Fläche unter Vertrag [ha]	Hauptkulturen Direktsaat [ha]	Hauptkulturen Mulchsaat [ha]	Mais-Streifenfräs-saat [ha]	Kunstpflanzen ³ [ha]	Anteil Direktsaat [%]
1996	92	209	38	142	2	27	18.18
1997	151	594	276	290	8	20	46.46
1998	205	865	491	340	9	25	56.76
1999	265	1253	801	352	30	70	63.93
2000	355	1720	1081	448	53	138	62.85
2001	446	2289	1473	469	67	280	64.35
2002	446	2433	1563	477	56	337	64.24
2003	458	2474	1436	472	67	499	58.04
2004	437	2509	1471	455	65	518	58.63
2005	420	2467	1588	372	69	438	64.37
2006	420	2517	1593	426	86	412	63.29
2007	415	2426	1568	455	103	300	64.63
2008	443	2628	1526	481	135	482	58.07

¹ LKV = Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (1997)

² Seit 2002 sind die jährlichen Beiträge für die Vertragsflächen auf Fr. 600 000 beschränkt.

³ Kunstpflanzen werden nur im 1. Hauptnutzungsjahr entschädigt.

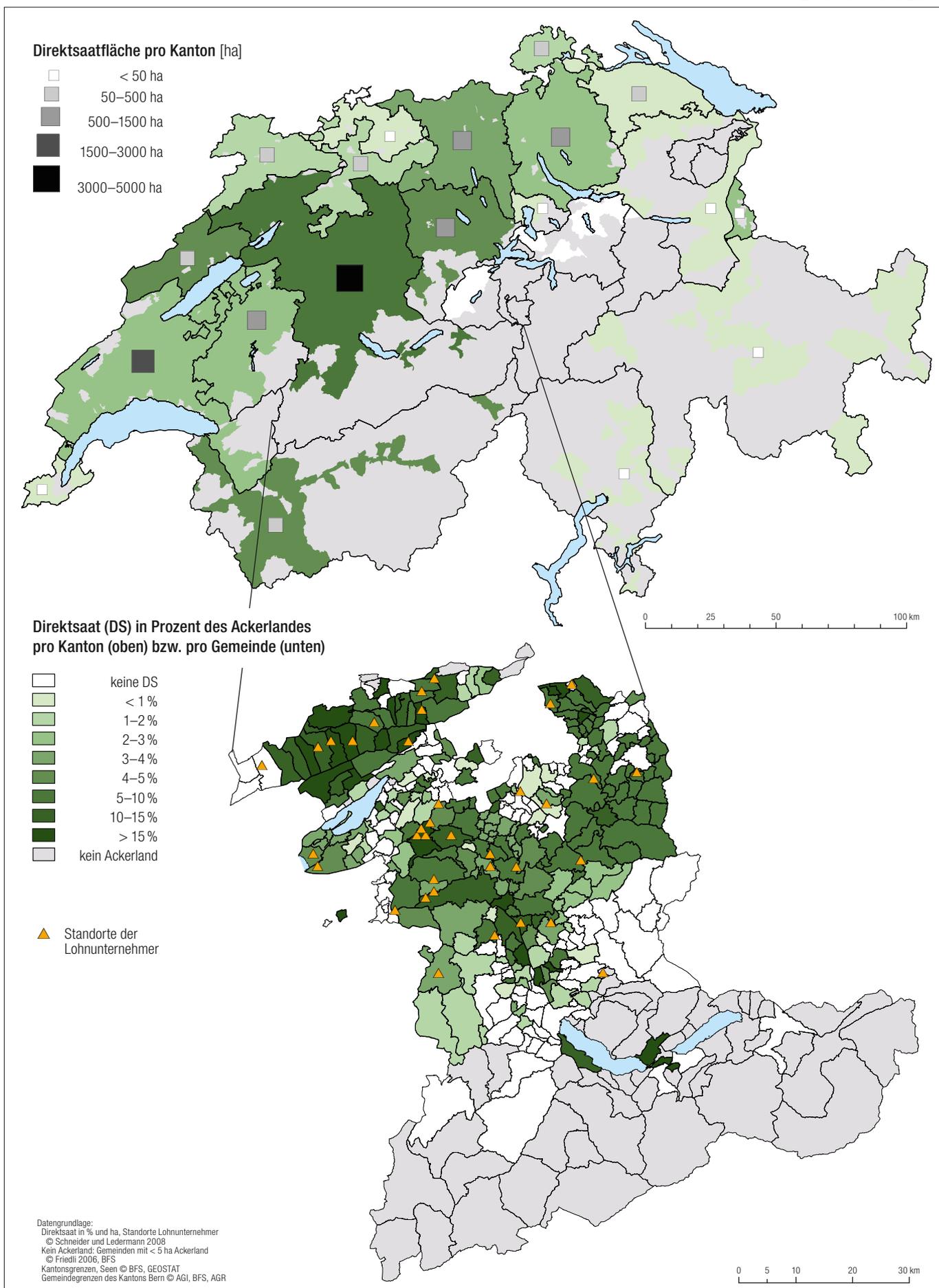


Abbildung 9–2: Direktsaatflächen (Stand 2006) der Schweiz, aufgeteilt nach Kantonen (Karte oben) und im Kanton Bern, aufgeteilt nach Gemeinden mit den Standorten der Lohnunternehmer (Karte unten)

sät (4426 ha oder 5.1 % der Ackerfläche (**Abbildung 9–2**). Davon sind jedoch nur 1526 ha (Stand 2008) vertraglich unterstützte Direktsaaten (**Tabelle 9–2**). Dies zeigt deutlich, dass Landwirte auch nach der fünfjährigen Vertragsdauer mit der Direktsaat zufrieden sind und diese ohne finanzielle Anreize weiterführen.

In der deutschen Schweiz ist das Interesse an der Direktsaat grösser als in der Romandie. Dies lässt sich auch dadurch erklären, dass bisher nur Deutschschweizer Kantone (AG, FR, LU, SO und BE) finanzielle Anreize anbieten (*SWISS NO-TILL 2005*). In den Kantonen AG, LU, FR und SO sind sie jedoch räumlich, personell oder finanziell weniger umfassend als diejenigen im Kanton Bern (*Ledermann und Schneider 2008*) und/oder später eingeführt worden, was die geringeren Anteile direkt gesäter Flächen teilweise erklärt.

Trotz vieler positiver Erfahrungen erfolgt die Umstellung auf Boden schonende Anbausysteme aufgrund befürchteter Ertragseinbussen und der oft vorhandenen pfluglastigen Eigenmechanisierung nur langsam. Die seit zehn Jahren umgesetzte

Strategie mit finanziellen Anreizen während der fünfjährigen Umstellungsphase des Bodens hat dazu geführt, dass im Kanton Bern der schweizweit höchste Anteil Ackerflächen Boden schonend bestellt wird. Ein neu entstandenes Netzwerk von erfolgreichen Anwendern und die wachsende Anzahl Lohnunternehmer mit Direktsämaschinen bewirken ein langsames Umdenken und eine zunehmende Verbreitung der direkt gesäten Flächen.

9.1.3 Wissenstransfer

Die Direktsaatfläche in der Schweiz war Anfang der 90er Jahre sehr gering. Bei der Verbreitung von Spezialwissen über Boden schonende Anbausysteme und Direktsaat nehmen die Lohnunternehmer selbst (zurzeit sind in der Schweiz über hundert Direktsämaschinen verschiedener Fabrikate im Einsatz) eine zentrale Stellung ein: Gegen 60 % aller Direktsaaten werden im Lohn ausgeführt (**Abbildung 9–3**). Anfangs fehlte jedoch eine breite Plattform, wo die Direktsaat schweizweit diskutiert und Erfahrungen ausgetauscht werden konnten. Mit der Gründung der «IG NO-TILL Direktsaat» im Jahr 1995, die 2000 in «SWISS NO-TILL – Schweizerische Gesellschaft für bodenschonende Landwirtschaft» umbenannt wurde, konnte diese Lücke geschlossen werden. Seither nimmt diese Plattform eine zentrale Stellung im Wissenstransfer ein, indem den Mitgliedern Informationen in Form von Rundschreiben und Merkblättern zugestellt und Fachtage bzw. Flurbegehungen organisiert werden. Das Wissen wird unter Landwirten vor allem in Diskussionen mit Gleichgesinnten ausgetauscht und weitergegeben. Das sowohl vom Bund (BAFU und BLW) als auch von verschiedenen kantonalen Fachstellen und landwirtschaftlichen Institutionen getragene Projekt «Von Bauern für Bauern» basiert auf demselben Prinzip (**Kasten 9–2**). Das grenzüberschreitende Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique (ITADA) hat zudem das Schweizer Know-how über Direktsaat erfahrener Landwirte und Lohnunternehmer aufgearbeitet und als Stichwortsammlung im Internet als «Direktsaat-ABC» veröffentlicht (www.no-till.ch).



Abbildung 9–3: Lohnunternehmer tragen massgeblich zur Verbreitung des Wissens über neue Anbautechniken bei: Ungefähr 60 % der direkt gesäten Flächen werden im Lohn ausgeführt.

Kasten 9–2: «Von Bauern für Bauern» (*Fry 2006*)

Das Projekt «Von Bauern für Bauern – Erfolgsgeschichten für eine schonende Bodennutzung» hat zum Ziel, bäuerliches Wissen zum Bodenschutz zu identifizieren und dieses über das Medium Film weiterzuvermitteln. Neun Kurzfilme wurden als Gemeinschaftsprojekt von Akteuren aus der Landwirtschaft und dem Bodenschutz erstellt. Darin geben erfahrene Praktiker, die ihren Boden seit Jahren Ressourcen schonend bewirtschaften, ihr angeeignetes Fachwissen in praxisnaher Terminologie an Berufskollegen weiter. Das Projekt soll Umsetzungsschwierigkeiten überwinden, indem eine Verbreitung von angewandtem Wissen nicht in einem Top-down-Ansatz, sondern direkt «von Bauern für Bauern» angestrebt wird.

Die sozialen Hintergründe einer Umstellung auf Boden schonende Anbausysteme wurden am CDE im Rahmen von Cost 634 untersucht (*Schneider 2008*). Eine grosse Schwierigkeit bei der Umsetzung besteht darin, die Hürde zwischen dem eher engen, dafür tief reichenden Blick der Wissenschaft und dem eher breiten Blick der Praxis zu überwinden. Die Übersetzung zwischen diesen Sichtweisen ist anspruchsvoll und kann nicht einseitig durch sogenannten Wissenstransfer erfolgen. Direktsaat muss praktikabel und effizient sein und sich in die tägliche Arbeitsroutine ein-

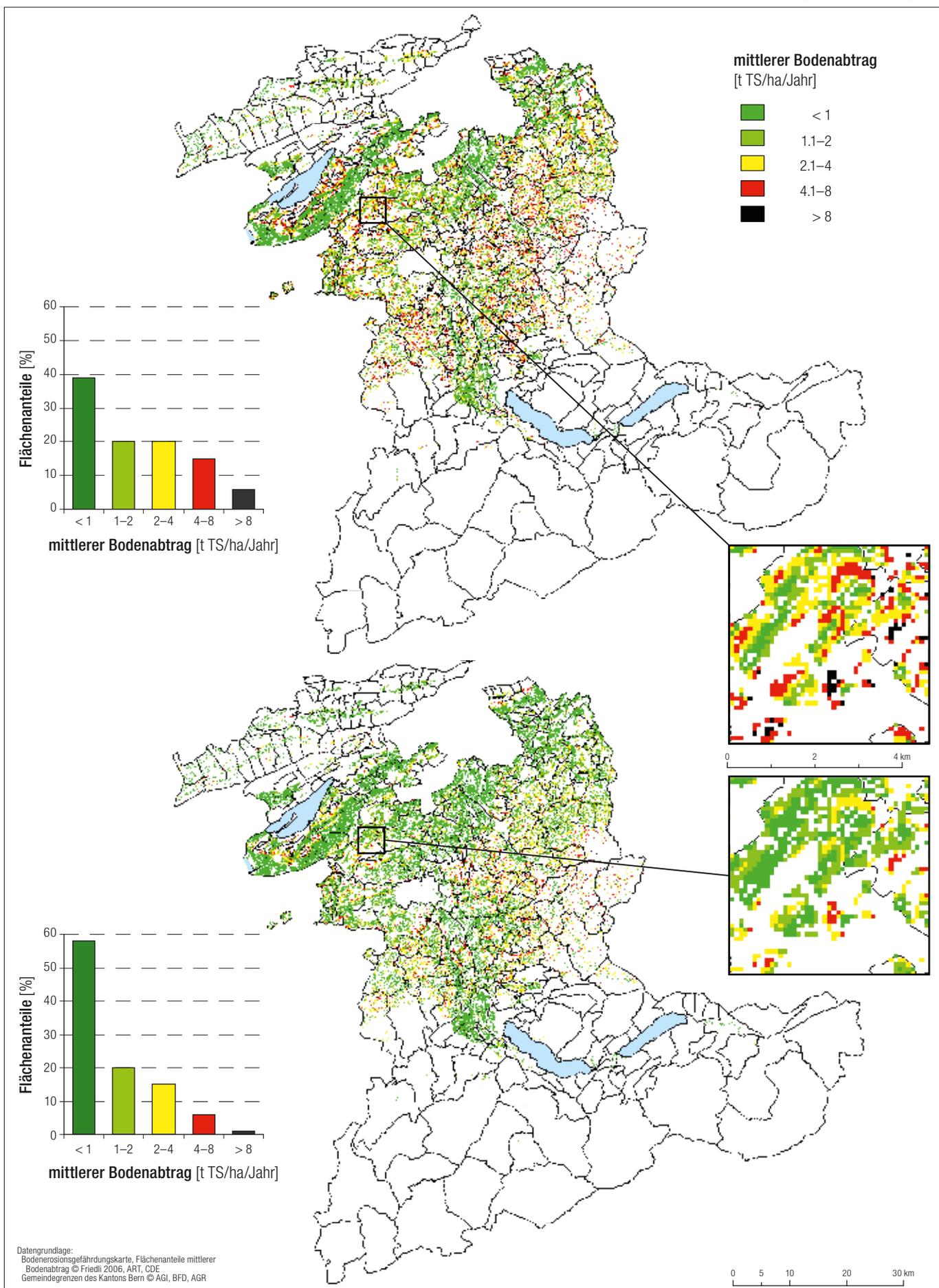


Abbildung 9–4: Erosionsgefährdungskarte des Kantons Bern. Dargestellt (modelliert) ist der mittlere Bodenabtrag (t TS/ha/Jahr) der Ackerflächen bei wendender Bodenbearbeitung (oben) und flächendeckender Direktsaat (unten) sowie die vom Bodenabtrag betroffenen Flächenanteile (%). Jeweils hervorgehoben ist ein Kartenausschnitt der Region Frenenberg.

fügen. Bevorzugt möchte ein Landwirt die vorhandene Eigenmechanisierung beibehalten und von Lohnunternehmern unabhängig bleiben. Häufig wird das Pflügen als eine urbäuerliche Tätigkeit angesehen, die nicht von allen gerne aufgegeben wird. Ein neues Anbausystem bedeutet einen Verzicht auf bisherige Traditionen

und damit eine Abgrenzung von Familienmitgliedern und Nachbarn. Die Umsetzungs politik darf deshalb nicht nur einseitig auf technische oder ökonomische Aspekte zielen, sondern sollte auch soziale Prozesse berücksichtigen (Schneider 2008).

9.2 Erosionsbekämpfung



Abbildung 9–5: Die Böden sind das Kapital der Landwirte. Nachhaltig produzieren bedeutet, nicht vom Kapital, sondern nur von den Zinsen zu leben. Abgeschwemmte Feinerde ist ein Kapitalverzehr und verursacht Kosten für die Allgemeinheit.

Kasten 9–3: Landwirtschaftliches Umweltziel «Erosion» (BAFU und BLW 2008)

1. Keine Richtwertüberschreitungen für Erosion und Verhinderung der Talwegerosion auf Ackerflächen.
2. Keine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit durch Erosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.
3. Keine Beeinträchtigung der Gewässer und naturnaher Lebensräume durch abgeschwemmtes Bodenmaterial aus landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Kasten 9–4: Landwirtschaftliches Umweltziel «Pflanzenschutzmittel» (BAFU und BLW 2008)

1. Keine Beeinträchtigung von Umwelt und Gesundheit durch Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft.
2. Für Gewässer, deren Pflanzenschutzmittel-Eintrag hauptsächlich aus der Landwirtschaft stammt: maximal 0.1 µg organische Pflanzenschutzmittel und relevante Metaboliten pro Liter je Einzelstoff in oberirdischen Gewässern sowie im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist. Vorbehalten bleiben andere Werte aufgrund von Einzelstoffbeurteilungen im Rahmen des Zulassungsverfahrens.
3. Das Umweltrisiko durch Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft ist so weit wie möglich zu reduzieren. Dabei sind naturräumliche Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Im Kanton Bern weisen insbesondere ackerbaulich genutzte Standorte aufgrund ihrer Hangneigung und Körnung ein erhöhtes Erosionsrisiko auf. Im Jahr 2006 wurde speziell für den Kanton Bern eine Karte mit den potenziell erosionsgefährdeten Flächen erstellt (Abbildung 9–4). Dabei wurde auch auf das Anbausystem eingegangen, indem je eine Karte mit wendender Bodenbearbeitung (Karte oben) und eine mit Direktsaat (Karte unten) modelliert worden ist.

Landwirte, die erosionsgefährdete Flächen ackerbaulich nutzen, sind nach Art. 33 des Umweltschutzgesetzes (USG 1983) und nach Art. 6 der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1996) verpflichtet, dafür zu sorgen, dass die Bewirtschaftung die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht durch Erosion gefährdet (Abbildung 9–5). Dabei gilt grundsätzlich das Vorsorgeprinzip. Ist an einem Standort trotzdem mehrmals ein Bodenabtrag festgestellt worden, gilt dies als Bewirtschaftungsfehler, und die Landwirte können entsprechend den Richtlinien des ÖLN und der Direktzahlungsverordnung (DZV 1998) mit Kürzungen der Direktzahlungen belangt werden. Es liegt folglich im Interesse des Bewirtschafters, wiederholte Erosionsereignisse mit einem geeigneten Bodenschutz zu vermeiden.

Der ÖLN beinhaltet bis 2004 mit dem Bodenschutzindex ein wirkungsvolles Instrument zur Erosionsbekämpfung, weil hiermit die winterliche Schwarzbrache minimiert werden konnte. Auf das Anbaujahr 2004/05 hin wurde jedoch dieser in der Praxis akzeptierte Index aus dem ÖLN gestrichen, was in der Folge vermehrt zu Erosionsereignissen führt. Davon betroffen sind insbesondere gepflügte Flächen. Dies steht im Widerspruch zu Art. 27 des Gewässerschutzgesetzes (GSchG 1991), wonach Böden entsprechend dem Stand der Technik so zu bewirtschaften sind, dass die Gewässer nicht durch Abschwemmung und Auswaschung von Düngern und Pflanzenbehandlungsmitteln beeinträchtigt werden. BAFU und BLW (2008) formulierten dazu die drei landwirtschaftlichen Umweltziele «Erosion» (Kasten 9–3) und ein landwirtschaftliches Umweltziel «Pflanzenschutzmittel» (Kasten 9–4).

Die Erosionsbekämpfung wird durch die Kantone vollzogen. Um auf Erosionsmeldungen angemessen reagieren zu können, wurde

im Kanton Bern 2005 zusammen mit den Kontrollorganisationen ein Vollzugsschema ausgearbeitet (**Abbildung 9–6**). Zusammen mit den betroffenen Bewirtschaftern wird eine Situationsanalyse durchgeführt (Identifikation der Erosionsprobleme, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung etc.) sowie standortsbezogen ein geeigneter und verbindlicher Massnahmenplan zur Vermeidung eines weiteren Bodenabtrags ausgearbeitet. Wird der Massnahmenplan eingehalten und kommt es trotzdem zu

Erosionsschäden, ist der Bewirtschafter nicht von Direktzahlungskürzungen betroffen. Ein zentrales Element des Massnahmenplans sind unter anderen die Boden schonenden Anbausysteme. Gemäss der LKV (1997) können die Landwirte in besonders erosions-, verdichtungs- und nitratgefährdeten Gebieten zur Umsetzung dieser Anbausysteme angehalten werden. Bisher kam das Vollzugsschema in rund 25 Fällen zur Anwendung.



Abbildung 9–6: Vollzug «Erosionsschutz» im Kanton Bern (Anhang 5.2 DZV 2007)

9.3 Förderprogramm Boden Kanton Bern

Die Erfahrungen mit der Förderung der Boden schonenden Anbausysteme (Art. 2 LKV) konnten gezielt in ein Folgeprojekt eingebracht werden. Die Resultate der Waldbodenuntersuchung (Kapitel 5), die Immissionsmessungen des beco (Kapitel 6) sowie die Resultate der kantonalen Bodenbeobachtung (Kapitel 7) machten jedoch deutlich, dass der Ansatz noch breiter gewählt werden muss. Die landwirtschaftliche Produktion ist hinsichtlich Bodenbelastung und Stickstoff-Verluste noch besser auf die landwirtschaftlichen Umweltziele (BAFU und BLW 2008) abzustimmen. Diese Erkenntnisse haben zur Entwicklung von Handlungsstrategien geführt, die unter anderem im Systemvergleich Oberacker (Kapitel 8) langjährig getestet und für die breite Umsetzung weiterentwickelt werden.

Aufgrund des neu geschaffenen Art. 77 a/b des Landwirtschaftsgesetzes (LwG 1998) kann der Bund im Rahmen der Agrarpolitik 2011 Projekte, die einen Beitrag zur Schonung der natürlichen Ressourcen leisten, finanziell unterstützen. Vor dem Hintergrund dieser agrarpolitischen Ver-

änderungen und motiviert durch betriebs-eigene Beobachtungen und Erfahrungen, haben innovative ÖLN- und Bio-Landwirte den Anstoss zur Einreichung eines Projektgesuchs beim BLW gegeben. Der Kanton Bern hat deshalb sein langjähriges Förderprojekt Boden schonende Anbausysteme weiterentwickelt und zusammen mit einer breit abgestützten Trägerschaft im Frühjahr 2008 ein entsprechendes Gesuch beim BLW eingereicht (VOL 2008). Die rechtliche Grundlage hat der Regierungsrat mit einer Änderung der LKV (2008) geschaffen. Das Finanzierungsgesuch wurde vom BLW in angepasster Form als «Förderprogramm Boden Kanton Bern» anerkannt.

Die breit abgestützte Trägerschaft besteht aus

- der Bernischen Fachorganisation für den ökologischen Leistungsnachweis und für tierfreundliche Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere (BFO),
- der Fachgruppe Boden der Bio Suisse (FGB) und
- dem Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT)

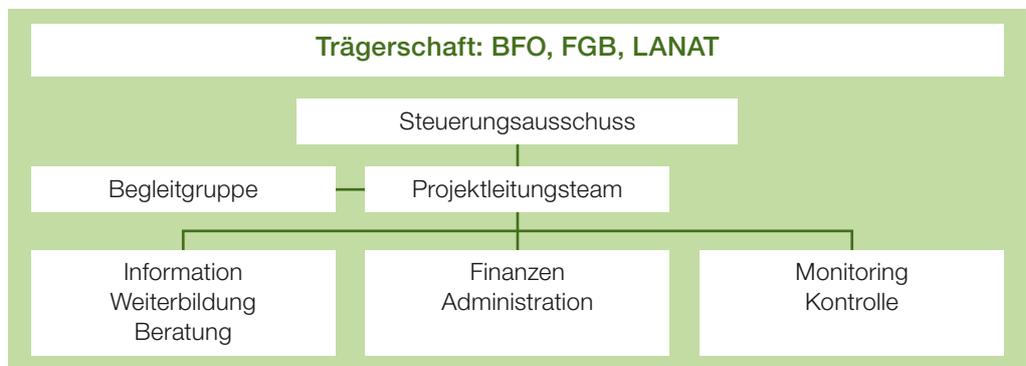


Abbildung 9–7: Projektorganisation und Trägerschaft des «Förderprogramm Boden Kanton Bern». BFO = Bernische Fachorganisation für den ökologischen Leistungsnachweis und für tierfreundliche Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere; FGB = Fachgruppe Boden der Bio Suisse; LANAT = Amt für Landwirtschaft und Natur

und war als Netzwerk ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Konzeption des Förderprogramms Boden (Abbildung 9–7). Das Konzept basiert auf den drei Säulen Weiterbildung und Beratung, Förderbeiträge für Massnahmen in den Bereichen «Boden schonende Anbausysteme», «Bodenaufbau und Kulturmassnahmen» und «Ammoniak reduzierende Ausbringsysteme» sowie Kontrolle und Monitoring (Abbildung 9–8).

9.3.1 Bildung und Beratung

Die Erfahrungen mit den finanziellen Anreizen zur Förderung von Boden schonenden Anbausystemen haben gezeigt, dass unter den Landwirten der direkte Austausch von Wissen eine zentrale Rolle für eine erfolgreiche Verbreitung der Massnahmen spielt. Dementsprechend sollen Ausbildung und Beratung in den Bereichen «Bodenschonung» und «Stickstoff-Effizienz» den Landwirten nicht nur neues Wissen zugänglich machen, sondern auch gezielt den gegenseitigen Austausch fördern. Dabei werden die programminternen Weiterbildungsveranstaltungen auf ausgewählten Betrieben der KABO (Kapitel 7) durchgeführt. Gleichzeitig werden Plattformen geschaffen, damit die Erfahrungen bei der Umsetzung der Massnahmen direkt im Sinne des Projekts «Von Bauern für Bauern» weitergegeben

werden können (Kasten 9–2). Aufbauend auf diesen Grundlagen sollen die Landwirte ihre Produktionsweise nach dem heutigen Stand des Wissens beurteilen und auf die landwirtschaftlichen Umweltziele abstimmen können.

9.3.2 Massnahmenkatalog

Die einzelnen Massnahmen des Förderprogramms sind das Ergebnis eines breiten und intensiven Konsultationsprozesses und Bereinigungsverfahrens zwischen der Trägerorganisation und dem BLW. Teilnehmer des Förderprogramms optimieren ihre Produktionsweise, indem sie auf die landwirtschaftlichen Umweltziele (BAFU und BLW 2008) abgestimmte Massnahmen umsetzen. Durch eine Steigerung der Effizienz beim Ressourceneinsatz sollen ökologische Verbesserungen erzielt werden, um bei vergleichbarem Produktionsniveau mittelfristig wirtschaftlicher zu produzieren. Den Programmteilnehmenden stehen zehn Einzelmassnahmen offen. Diese sind in drei Bereiche gebündelt, die jeweils Lösungen für entsprechende Problemfelder bieten (Tabelle 9–3). Für den Einstieg müssen mindestens zwei Massnahmen aus zwei verschiedenen Massnahmenbereichen ausgewählt werden. Im ersten Projektjahr kann im Sinne einer Übergangslösung in nur einen Massnahmenbereich eingestiegen werden.

<p>Bildung & Beratung</p> <p>Flurbegehungen Weiterbildungs-Veranstaltungen Projekt «Von Bauern für Bauern» (Leitidee)</p>	<p>Massnahmenkatalog</p> <p>Umweltziele Freiwillige Teilnahme Wahlmöglichkeiten Förderbeiträge</p>	<p>Monitoring & Kontrolle</p> <p>Monitoring auf Pilotbetrieben: – Bodenschutz – Pflanzenschutz – Luftreinhaltung (regional) Umsetzungskontrolle</p>
<p>Ziele:</p> <p>Neues Wissen aneignen Erfahrungen austauschen</p>	<p>Ziele:</p> <p>Erfahrungen sammeln Produktion anpassen</p>	<p>Ziele:</p> <p>Wirkungen aufzeigen Transparenz sicherstellen</p>

Abbildung 9–8: Dreisäulenprinzip des «Förderprogramm Boden Kanton Bern»

Tabelle 9–3: Übersicht der einzelnen Massnahmen des «Förderprogramm Boden Kanton Bern» mit Vertragsflächen bzw. -mengen im ersten Projektjahr

Nr.	Massnahme	Qualitätsnachweis für Förderbeiträge	Entschädigung [CHF/Jahr]	Vertragsfläche bzw. -tonnen per 01.08.2009
	Boden schonende Anbausysteme (Massnahmenbereich I)	Beiträge nur, wenn die gesamte Ackerfläche (inkl. Kunstwiesen) des Betriebes unter Vertrag ist	ÖLN-Betrieb BIO-Betrieb	
1	Mulchsaat	<ul style="list-style-type: none"> nach Definition Mulchsaat Fünflibertest nach der Saat bzw. Pflanzung 	150.–/ha	3394 ha
2	Streifenfrässaat oder Direktsaat	<ul style="list-style-type: none"> nach Definition Streifenfrässaat bzw. Direktsaat 	300.–/ha	2729 ha
3	On Land-Pflug	<ul style="list-style-type: none"> Tiefenbegrenzung maximal 15 cm Fünflibertest nach der Saat bzw. Pflanzung 	150.–/ha nur in Kombination mit Nr.7	247 ha
	Bodenaufbau und Kulturmassnahmen (Massnahmenbereich II)	Beiträge je ha oder t		
4	Fruchtfolge	<ul style="list-style-type: none"> mindestens 6 Hauptkulturen beitragsberechtigt sind nur Kunstwiesenflächen (KW) mit mindestens 2 Hauptnutzungsjahren und/oder Leguminosenflächen 	200.–/ha KW und/oder Leguminosen	3759 ha
5	Winterbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Folgemassnahme frühestens 21 Tage vor Frühjahrskultur mindestens 30 % Bodenbedeckungsgrad vor Folgemassnahme 	200.–/ha	2655 ha
6	Untersaat	<ul style="list-style-type: none"> zum Erntezeitpunkt der Hauptkultur ist die Untersaat auf der ganzen Fläche sichtbar 	200.–/ha	128 ha
7	Herbizidverzicht	<ul style="list-style-type: none"> im Erntejahr, das heisst von der Ernte der Vorkultur bis nach der Ernte der Hauptkultur 	300.–/ha	224 ha
8	Mistkompostierung	<ul style="list-style-type: none"> nach Weisungen effektiv kompostierte Frisch-Mistmenge ist beitragsberechtigt, maximal 20 t pro ha und Jahr 	20.–/t oder 10.–/m ³	12924 t
	Ammoniak reduzierende Ausbringssysteme (Massnahmenbereich III)	Beiträge maximal für 4 Gaben pro ha und Jahr		
9	Verschlauchung	<ul style="list-style-type: none"> Verschlauchung ab Güllegrube oder Feldrand 	80.–/ha und Gabe	29711 ha
10	Boden schonende Fahrwerke	<ul style="list-style-type: none"> Boden wird mit Güllefass im Feld befahren Qualitätsnachweis ab 5 t Achslast 	60.–/ha und Gabe	11754 ha

Betriebe mit weniger als 3 ha offener Ackerfläche können an lediglich einer Massnahme teilnehmen.

a. Förderung Boden schonender Anbausysteme

Der in intensiv ackerbaulich genutzten Böden reduzierte Humusgehalt (Kapitel 3 bzw. 7) beeinflusst die Nährstoffversorgung der Pflanzen mittelfristig negativ. Die zu intensive Bodenbearbeitung kann wegen der verminderten Wasserinfiltration (Kapitel 7) zu Hangrutschungen und Hochwasser führen. Dies wird insbesondere dann relevant, wenn in Zukunft starke Unwetterereignisse zunehmen sollten. Intensive Bodenbearbeitung gefährdet somit nicht nur die Bodenfruchtbarkeit, sondern kann in Kombination mit Naturereignissen zu kostspieligen Folgen für die Volkswirtschaft führen.

Der erste Massnahmenbereich (**Massnahmen 1 bis 3 in Tabelle 9–3**) zielt dementsprechend auf die Erhaltung und Förderung der Bodenstruktur als wichtigen Grundpfeiler der Bodenfruchtbarkeit. Boden schonende Anbausysteme wie Mulch-, Streifenfräs- oder Direktsaat (Massnahmen 1 und 2) können dazu beitragen, Bodenverdichtungen und Erosion zu vermeiden sowie die Wasserinfiltrationsrate und den Wasserhaushalt des Bodens zu verbessern (Kapitel 8). Gleichzeitig wird die organische Substanz im Boden angereichert, was die Bindung von Kohlendioxid (CO₂) ermöglicht. Wirtschaftlich bewirkt eine reduzierte Bodenbearbeitung eine Ersparnis an Arbeits-, Energie-, Maschinen- und Strukturkosten (Kapitel 8). Während der Umstellungsphase auf Direktsaat kann es vorübergehend zu Ertragseinbussen und zu Problemen mit überdurchschnittlichem Beikrautwuchs kommen. Schliesslich sind mit dem Förderprogramm Boden neu auch biologisch produzierende Betriebe dank dem flachen Einsatz von On Land-Pflügen im grösseren Umfang beitragsberechtigt (Massnahme 3).

b. Bodenaufbau und Kulturmassnahmen

Trotz zahlreicher Bemühungen liegt im ackerbaulich intensiv genutzten Mittelland der Nitrat-Eintrag ins Grundwasser vielerorts immer noch über dem Anforderungs- bzw. Qualitätsziel von 25 mg Nitrat pro Liter Trinkwasser (Kapitel 6). Mit der Streichung des Bodenschutzindex aus den ÖLN-Richtlinien im Jahr 2004 nahm der Anteil über Winter brachliegender Ackerflächen zu (VOL 2008). Dies begünstigt die Nitrat-Auswaschung. Gleichzeitig kommt es aufgrund der fehlenden Bodenbedeckung und -durchwurzelung vermehrt zu erosivem Bodenabtrag.

Primäres Ziel des zweiten, breit gefächerten Massnahmenbereichs (**Massnahmen 4 bis 8 in**

Tabelle 9–3) ist der Humusaufbau zugunsten einer standortgerechten Bodenentwicklung. Eine Ganzjahresbegrünung der Felder vermindert die Nitrat-Auswaschung und fördert mit einer abwechslungsreichen Fruchtfolge das Bodenleben und die Pflanzengesundheit. Pflanzenverfügbarer Stickstoff kann durch die erhöhte biologische Aktivität in den Humus eingebaut werden. Die Mistkompostierung führt zu einer erhöhten Nährstoffeffizienz, womit stickstoffhaltige Mineraldünger eingespart und das Auswaschungsrisiko zusätzlich vermindert werden können.

c. Ammoniak reduzierende Ausbringsysteme

Die Ammoniak-Deposition übersteigt im Kanton Bern auf einem Grossteil der Waldfläche und anderen naturnahen Ökosystemen die kritischen Eintragungswerte (Critical Loads). Dies führt zu einer beschleunigten Versauerung und einer Gefährdung der Artenvielfalt (Kapitel 5). Da der grösste Teil des Ammoniaks aus der Landwirtschaft stammt (Kapitel 6), geht viel Stickstoff, der für das Pflanzenwachstum zentral ist, verloren. Das grösste Reduktionspotenzial für diesen Stickstoff-Verlust liegt beim Gülleausstrag. Dabei ist die Verflüchtigung von Ammoniak in erster Linie ein Problem der verwendeten Ausbringtechnik.

Das Ziel des dritten Massnahmenbereichs (**Massnahmen 9 und 10 in Tabelle 9–3**) ist die Reduktion der Ammoniak-Emissionen mit verlustarmen Verteiltechniken (Schleppschauch, Schleppschuh und Schlitzdrill). Erfolgt der Gülleausstrag ohne Verschlauchung, wird dem Trend zu immer grossvolumigeren, d.h. den Boden belastenden Güllefässern insofern entgegengewirkt, als die in Aussicht gestellten Beiträge ab einer Achslast von 5 t nur bei einem vorliegenden Nachweis Bodendruck vermeidender Massnahmen (Druckregelanlage) gewährt werden.

9.3.3 Monitoring und Kontrolle

a. Wirkungsmonitoring

Das vom BLW verlangte Wirkungsmonitoring des Förderprogramms basiert auf der KABO (Kapitel 7) und den Immissionsmessungen des beco. Im Bereich Bodenschonung (Massnahmen 1 bis 8) entsprechen die KABO-Resultate (Kapitel 7) des zweiten Beprobungszyklus dem Ausgangszustand der Wirkungskontrolle. Entsprechend der Vorgaben einer Dauerbeobachtung werden in den nächsten Jahren die Analysen und Auswertungen des dritten Beprobungszyklus durchgeführt. Die Resultate des dritten Zyklus lassen aufgrund des Vergleichs mit dem Förderprogramm-Ausgangszustand (zweiter Zyklus) die Veränderungen der Bodenfruchtbarkeit be-

urteilen. Die nach unterschiedlichen Richtlinien wirtschaftenden KABO-Betriebe erlauben es, innerhalb der Wirkungskontrolle sowohl dem ÖLN- wie auch dem Bio-Standard gerecht zu werden.

Im Bereich der Stickstoff-Effizienz (Massnahmen 9 und 10) werden vor allem Ammoniak-Emissionen mit dem Messnetz des beco (Kapitel 6) erfasst. Ausgangs- und Endzustand werden anhand von Berechnungsprogrammen (Agrammon) der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) ausgewiesen.

Die Fachstelle für Pflanzenschutz des Kantons Bern begleitet das Förderprogramm mit einem gezielten Pflanzenschutzmonitoring.

b. Umsetzungskontrolle

Die Kontrolle auf den Betrieben ist ein wichtiges Element zur zielgerichteten Steuerung der Umsetzungsarbeiten. Dabei werden die am Förderprogramm Boden partizipierenden Betriebe wie Label-Betriebe kontrolliert. Die Überprüfung der Massnahmenumsetzung wird von erfahrenen, akkreditierten Kontrollorganisationen durchgeführt und mit den üblichen landwirtschaftlichen Kontrollen koordiniert. Zusätzlich sind Stichprobenkontrollen während der Vegetationsperiode Teil der Umsetzungskontrolle.

9.3.4 Kosten und Finanzierung

Gestützt auf Berechnungen und vorsichtige Schätzungen hat die Projektleitung anhand der Vorgaben des BLW anrechenbare Kosten von

rund 57 Mio. Franken für alle sechs Projektjahre veranschlagt. Die Schätzungen basieren in erster Linie auf Beteiligungserwartungen. Das BLW hat sich im Juli 2009 zu rund 46 Mio. Franken verpflichtet, was einem Bundesanteil von 80 % entspricht. Der Kanton trägt grossmehrheitlich die Restfinanzierung.

Zu Projektbeginn am 1. August 2009 haben sich 1460 Betriebe vertraglich zu Massnahmen verpflichtet. **Tabelle 9–3** zeigt die Vertragsfläche pro Massnahme bzw. die Anzahl zugesicherter Tonnen oder Kubikmeter bei der Massnahme 8. Die Kosten für das erste Projektjahr belaufen sich schätzungsweise auf 6.1 Mio. Franken. In den folgenden fünf Projektjahren wird mit einem kontinuierlichen Anstieg der Vertragsfläche und damit der Förderbeiträge gerechnet.

Die drei Massnahmenbereiche des Förderprogramms Boden Kanton Bern setzen die von BAFU und BLW (2008) formulierten landwirtschaftlichen Umweltziele um. Zur Erreichung dieser Ziele werden finanzielle Anreize gesetzt, die zu 80 % vom BLW getragen werden. Die Teilnahme am Förderprogramm Boden basiert auf Freiwilligkeit. Jeder Landwirt kann diejenigen Massnahmen umsetzen, die seiner Betriebsstruktur entsprechen. Das Förderprogramm Boden nutzt vorhandene Strukturen: Die finanziellen Abteilungen (GELAN) und Betriebskontrollen (akkreditierte Kontrollorganisationen) werden durch die bestehenden Organe ausgerichtet bzw. ausgeführt. Das Wirkungsmonitoring basiert auf einer Ausgangserhebung der KABO und auf Immissionsmessungen des beco.

9.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

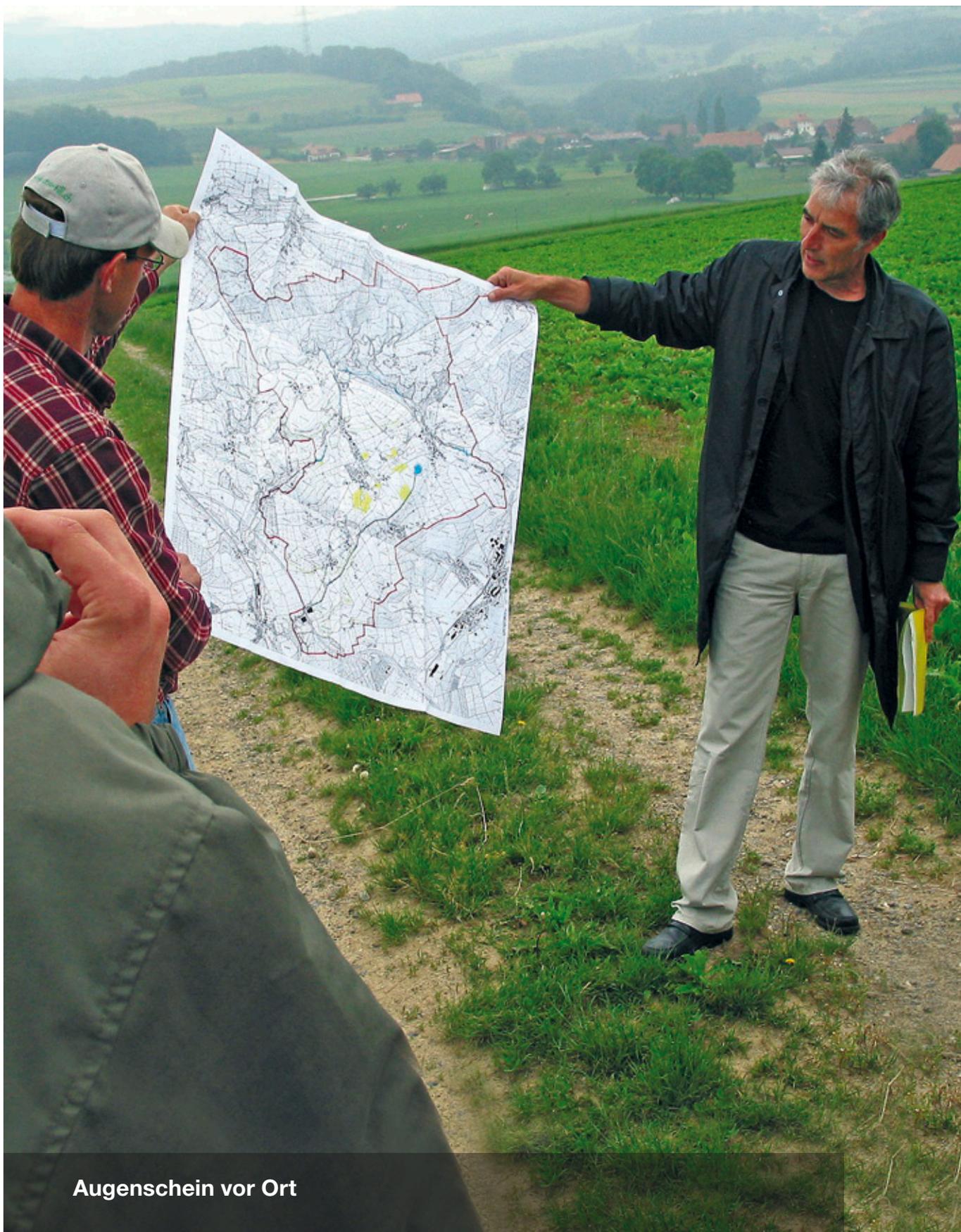
Durch ihre Teilnahme am Förderprogramm Boden erzielen die Landwirte ökologische und ökonomische Wirkungen, die sowohl den Betrieben wie auch der Öffentlichkeit Vorteile bringen:

- Die Bodenfruchtbarkeit wird auf lange Sicht erhalten, womit eine hohe Nahrungsmittelsicherheit gewährleistet ist.
- Schädliche Stickstoff-Einträge ins Trinkwasser und in die Luft werden vermindert.
- Die biologische Artenvielfalt wird im Boden durch reduzierte Bearbeitung, in Wäldern, Gewässern und anderen naturnahen Ökosystemen durch reduzierte Stickstoff-Einträge erhalten.

- Mittel- und langfristig erfolgt eine Reduktion bzw. Optimierung der Produktionskosten bei mindestens gleich hohem Ertragsniveau.
- Nicht erneuerbare Ressourcen wie Phosphor oder fossile Energieträger werden durch zielgerichtetes Ausbringen effizienter eingesetzt, d. h. die Ökobilanz wird insgesamt besser.
- Das Image für eine Landwirtschaft, die nachhaltig und effizient produziert, wird gefördert.

Das Förderprogramm Boden soll im 2010 mit weiteren gezielten Massnahmen zur Verminderung der Ammoniak-Emissionen ergänzt werden. Nach Ablauf des Projekts im Jahr 2015 sollen die Massnahmen ohne weitere Anreize für die Landwirte wirtschaftlich tragbar sein und weiterhin umgesetzt werden. Es wird zu überprüfen sein, ob nach dem Vertragsablauf die Massnahmen weiterhin umgesetzt werden.

10 Vollzugskonzept Boden Kanton Bern



Augenschein vor Ort

10 Vollzugskonzept Boden Kanton Bern

Im Kanton Bern ist die Bodenschutzfachstelle die Fachstelle nach Umweltschutzgesetz. Ihr obliegt die strategische Steuerung beim Vollzug Boden relevanter Fragestellungen. Der Bereich «Land- und Forstwirtschaft» wird im Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT), der Bereich «Bauen» im Amt für Wasser und Abfall (AWA) umgesetzt. Um den vielfältigen Nutzungs- und Schutzansprüchen an die Ressource Boden gerecht zu werden, koordiniert die «Fachgruppe Boden Kanton Bern» seit dem 1. Januar 2009 die Zusammenarbeit zwischen den Ämtern. Damit wird der Vollzug effektiver, effizienter und kundenfreundlicher organisiert und der landwirtschaftliche Bodenschutz gestärkt.

Die Ressource Boden liegt an der Schnittstelle zu Wasser und Luft und ist die Lebensgrundlage für Mensch und Tier. Sowohl als Standort für Pflanzen als auch für Bauobjekte nimmt der Boden eine zentrale Funktion in unserem Leben

ein. Um dieser Vielseitigkeit gerecht zu werden, sind die Zuständigkeiten beim kantonalen Vollzug von bodenrelevanten Fragestellungen neu geregelt worden.

10.1 Neues Vollzugskonzept im Bodenschutz

Die Zuständigkeit im Vollzug des baulichen Bodenschutzes war im Kanton Bern aus historischen Gründen auf zwei Ämter verteilt. Anlagen mit Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), Grossprojekte sowie grossvolumige Terrainveränderungen wurden durch die Bodenschutzfachstelle des Amtes für Landwirtschaft und Natur (LANAT) beurteilt und be-

treut. Bauvorhaben im Siedlungsgebiet, kleinere Terrinauffüllungen sowie Rekultivierungen von Kiesgruben und Deponien lagen in der Zuständigkeit der Abteilung Bodenschutz und Stoffe des Amtes für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (GSA). Diese Aufgabenteilung führte im Vollzug immer wieder zu Unklarheiten und Überlappungen.

Tabelle 10-1: Regelung des Vollzugs «Boden» im Kanton Bern, in Kraft seit 1. Januar 2009

<ol style="list-style-type: none"> 1. Fachgruppe Boden Kanton Bern (Koordinationsgremium) 2. Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) 3. Landwirtschaft und landwirtschaftliche Produktionssysteme <ul style="list-style-type: none"> – Schutz vor physikalischen Belastungen – Schutz vor biologischen Belastungen – Schutz vor stofflichen Belastungen 4. Wald und Waldwirtschaft 5. Freizeitveranstaltungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (ohne bauliche Massnahmen) 	<p>Amt für Landwirtschaft und Natur (LANAT)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bodenschutzfachstelle (BSF) <p>Rütti, 3052 Zollikofen Tel.: 031 910 53 30 (Sekretariat) www.vol.be.ch</p>
<ol style="list-style-type: none"> 6. Bauen <ul style="list-style-type: none"> – Bauvorhaben im Siedlungsraum und in der Landwirtschaftszone (Bauen i. e. S.) – Stoffliche Belastungen im Siedlungsraum – Belastete Standorte und Altlasten – Verwertbare Stoffe (Bodenaushub, Kompost, Gärgut) aus der Abfallwirtschaft – Aufwertung degradierter Böden 	<p>Amt für Wasser und Abfall (AWA)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fachbereich Boden <p>Reiterstrasse 11, 3011 Bern Tel.: 031 633 39 16 oder 031 633 39 56 www.be.ch/awa</p>

Seit dem 1. Januar 2009 besteht für den gesamten Bodenschutz ein neues Vollzugskonzept. Mit der Zusammenlegung des GSA und des Wasserwirtschaftsamts (WWA) zum Amt für Wasser und Abfall (AWA) wurden innerhalb der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion (BVE) die Aufgaben und Prozesse des baulichen Bodenschutzes überprüft und neu geregelt sowie in den Organisationsverordnungen von Volkswirtschaftsdirektion (VOL) und BVE verankert.

Das Vollzugskonzept entstand in enger Zusammenarbeit mit dem LANAT. Die Regelung zeichnet sich durch eine bessere Abstimmung der Aufgaben aus. Der Vollzug (Schutz und Nutzung des Bodens) wird in die zwei Haupt-

bereiche «Land- und Forstwirtschaft» (Zuständigkeit LANAT) und «Bauen» (Zuständigkeit AWA) unterteilt. Bildlich gesehen ist das LANAT für den Vollzug beim Einsatz land- und forstwirtschaftlicher Maschinen und das AWA für den Vollzug in Zusammenhang mit dem Einsatz von Baumaschinen zuständig. Dank der Eliminierung von Schnittstellen und Doppelspurigkeiten wurde der Vollzug effektiver, effizienter und kundenfreundlicher organisiert. Dies gewichtet sowohl den Schutz des Bodens als auch denjenigen des Wassers stärker. Insgesamt ist der landwirtschaftliche Bodenschutz im LANAT verstärkt worden. **Tabelle 10-1** informiert über die Zuständigkeit der jeweiligen Ämter bzw. Fachstellen bei bodenrelevanten Themen.

10.2 Ämter übergreifende Zusammenarbeit

Bodenrelevante Fragestellungen betreffen im Vollzug nicht nur das LANAT und das AWA. Auch das Amt für Wald (KAWA), das Tiefbauamt (TBA) und das Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR) befassen sich mit bodenrelevanten Aufgaben bzw. haben Interessen im Bereich Boden. Zur Koordination der kantonalen Aufgaben wird provisorisch für zwei Jahre die Fachgruppe Boden als ein Ämter über-

greifendes Gremium eingesetzt (**Abbildung 10-1**). Die Fachgruppe koordiniert den operativen Bereich Boden, soweit notwendig und erforderlich. Damit soll ein einheitlicher Vollzug sichergestellt werden. Die Fachgruppe Boden fördert den fachlichen Informations- und Wissensaustausch und übernimmt insbesondere bei Ämter übergreifenden Fragestellungen eine Beratungsfunktion.

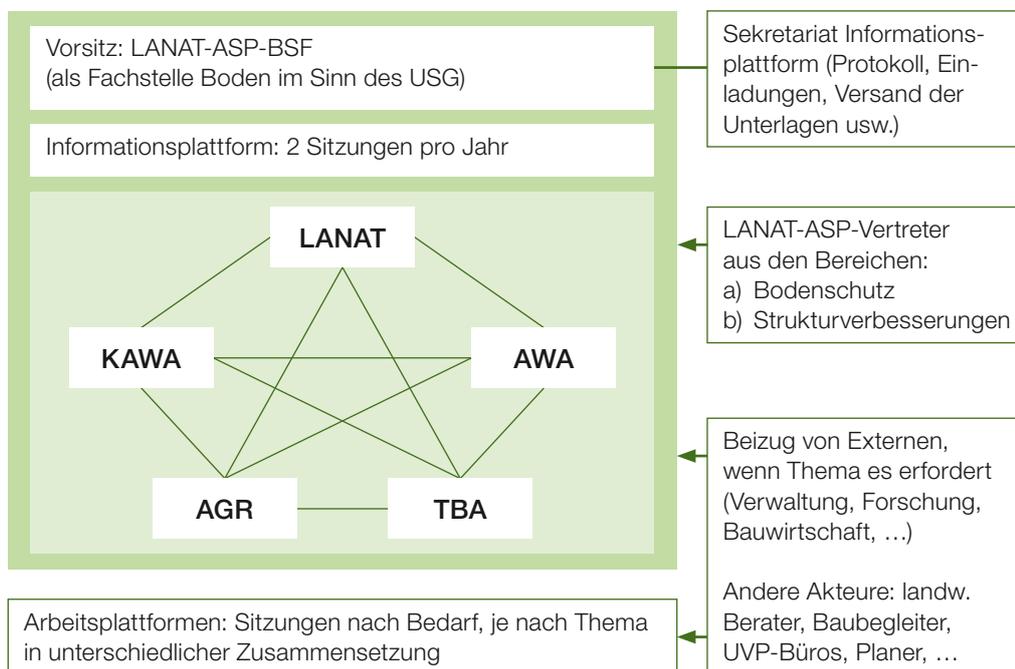


Abbildung 10-1: Organigramm der Fachgruppe Boden Kanton Bern

Verzeichnisse

Abkürzungen

AG	Aargau
AGI	Amt für Geoinformation des Kantons Bern
AGR	Amt für Gemeinden und Raumordnung des Kantons Bern
Al	Aluminium
ART	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon
Art.	Artikel
AUE	Amt für Umweltkoordination und Energie des Kantons Bern
AWA	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BBB	Bodenkundlicher Baubegleiter
beco	Berner Wirtschaft, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern
BEW	Bundesamt für Energiewirtschaft (heute BFE)
BFE	Bundesamt für Energie
BFO	Bernische Fachorganisation für den ökologischen Leistungsnachweis und für tierfreundliche Nutztierhaltung
BGS	Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
BI-CH	Bodeninformation Schweiz
BIO	Biologischer Landbau
BL	Baselland
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BODAT	Bodendatenbank
BOGA	Verein für bodenschonenden Gasleitungsbau
BS	Basensättigung
BSF	Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU)
BVE	Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern
Ca	Calcium
cbar	Centibar
Cd	Cadmium
CDE	Centre for Development and Environment der Universität Bern
cm	Zentimeter
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CULTAN	Controlled Uptake Long Term Ammonia Nutrition
DS	Direktsaat
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FAL	Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (heute ART)
FAP	Eidgenössische Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau (heute ART)
FEM	Mikrobielle Biomasse
FGB	Fachgruppe Boden der Bio Suisse
FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
FR	Freiburg
FSK	Fachverband für Sand und Kies (heute FSKB)
FSKB	Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie
FUB	Forschungsstelle für Umweltbeobachtung
GBL	Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern
GD	Gründüngung
GE	Genf
GIS	Geoinformationssystem
GIUB	Geographisches Institut der Universität Bern

GSA	Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (heute AWA)
ha	Hektare
hPa	Hektopascal
IAP	Institut für Angewandte Pflanzenbiologie
IG UWS	Impulsgruppe Umweltschutz der Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern
ITADA	Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
JGK	Justiz-, Gemeinde- und Kirchendirektion des Kantons Bern
K	Kalium
KABO	Kantonale Bodenbeobachtung
KAK	Kationenaustauschkapazität
KAK _{pot}	potentielle Kationenaustauschkapazität
KAWA	Amt für Wald des Kantons Bern
KBNL	Konferenz der Beauftragten für Natur- und Landschaftsschutz
KOK	Konferenz der Kantonsförster
kPa	Kilopascal
KVU	Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz
LANAT	Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern
LU	Luzern
m	Meter
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
N	Stickstoff
Na	Natrium
NABO	Nationale Bodenbeobachtung
NABODAT	Nationale Bodendatenbank
NAQUA	Nationales Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
Ni	Nickel
NO ₃ ⁻	Nitrat
N _{tot}	Stickstoff-Gesamtgehalt
NUS	Netzwerk Umweltbeobachtung Schweiz
NW S	Naturwiese Schnittnutzung
NW W	Naturwiese Weidenutzung
NW	Naturwiese
OB	Oberboden
ÖLN	Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis
OSTLUFT	Zusammenschluss der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Lichtenstein zur gemeinsamen Überwachung der Luftqualität
P	Phosphor
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PF	Pflugsystem
P _{tot}	Phosphor-Gesamtgehalt
SANU	Schweizerische Ausbildungsstätte für Natur- und Umweltfachleute
SHL	Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft
SO	Solothurn
t	Tonnen
TBA	Tiefbauamt des Kantons Bern
TBS	Mittlere totale Basensättigung
TG	Thurgau
TKAK	Mittlere totale Kationenaustauschkapazität
TS	Trockensubstanz
UB	Unterboden
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VOL	Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
WWA	Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern (heute AWA)
ZG	Zug
ZH	Zürich
Zn	Zink

Verzeichnis der Gesetze und Verordnungen

ChemRRV	Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (<i>Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung</i>) vom 18. Mai 2005. SR 814.81.
DZV	Verordnung über die Direktzahlungen in der Landwirtschaft (<i>Direktzahlungsverordnung</i>) vom 7. Dezember 1998. Stand 1. Januar 2007. SR 910.13.
FIV	Verordnung über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (<i>Fremd- und Inhaltsstoffverordnung</i>) vom 26. Juni 1995. SR 817.021.23.
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.
GSchG	Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (<i>Gewässerschutzgesetz</i>) vom 24. Januar 1991. SR 814.20.
GSchV	Verordnung über den Gewässerschutz (<i>Gewässerschutzverordnung</i>) vom 28. Oktober 1998. SR 814.201.
kLwG	Kantonales Landwirtschaftsgesetz vom 16. Juni 1997. BSG 910.1.
LKV	Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft vom 5. November 1997. BSG 910.112.
LRV	Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985. SR 814.318.142.1.
LwG	Bundesgesetz über die Landwirtschaft (<i>Landwirtschaftsgesetz</i>) vom 29. April 1998. SR 910.1.
StrVV	Kantonale Verordnung über den Strassenverkehr vom 20. Oktober 2004. BSG 761.111.
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (<i>Umweltschutzgesetz</i>) vom 7. Oktober 1983. SR 814.01.
VBBö	Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998. SR 814.12.
WaG	Bundesgesetz über den Wald (<i>Waldgesetz</i>) vom 4. Oktober 1991. SR 921.0.
–	Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft (<i>Nachhaltigkeitsverordnung</i>) vom 7. Dezember 1998. SR 919.118.

Verzeichnis der Normen, Richtlinien und Merkblätter

- BEW Bundesamt für Energiewirtschaft, 1997. Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (*Bodenschutzrichtlinien*). Bern. Vormalig BEW 1993.
- BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 2001. Leitfaden Umwelt Nr. 10: «Bodenschutz beim Bauen».
- FSK Schweizerischer Fachverband für Sand und Kies (seit 2003 Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie, FSKB), 2001. FSK-Rekultivierungsrichtlinie: Richtlinie für den fachgerechten Umgang mit Böden. Vormalig FSK-Rekultivierungsrichtlinie 1987.
- GSA Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft, 1997. Richtlinien Folgebewirtschaftung rekultivierter Flächen.
- ÖLN Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis vom 18. Juli 2001. Koordinationsgruppe Richtlinien Tessin und Deutschschweiz (KIP).
- OSPAR Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordatlantiks (OSPAR-Übereinkommen) vom 22. September 1992, in der Schweiz in Kraft seit 25. März 1998.
- UNECE United Nations Economic Commission for Europe, 1999. Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. Done at Gothenburg (Sweden) 30 November 1999. www.unece.org/env/lrtap
- UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997. Kyoto Protocol.
- VSS Schweizer Norm der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, 2000. Erdbau, Boden: Grundlagen. Erdbau, Boden: Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes. SN 640 581-583.
- Arbeitsgruppe «Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und Luzern», 2005. Merkblatt «Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht».
- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, GSA, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Geotest AG, 2005. Merkblatt Bodenschutz «Verwertung von organischem Aushub».
- Kantonale Bodenschutzfachstellen und BAFU, Bundesamt für Umwelt 2008. Bodenschutz lohnt sich. Für einen wirksamen Bodenschutz im Hochbau. Tipps und Richtlinien für die Planung.
- Freizeitveranstaltungen auf der «Grünen Wiese», 2004. Merkblatt der Kantone AG, AI, BE, BL, FR, GE, GR, JU, LU, NE, SG, SO, SZ, TG, UR, VD, VS, ZG, ZH, des Fürstentums Liechtenstein sowie der Sektion Boden und allgemeine Biologie des BUWAL.
- Stockholmer Konvention, 2001. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <http://chm.pops.int>

Literatur

- AFU, Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, 2001–2009. *Projekthandbuch Bodenkartierung Kt. Solothurn.*
- AGR, Amt für Gemeinden und Raumordnung, 2006. *Richtplan des Kantons Bern. Erhaltung des Bodens / Fruchtfolgeflächen. Berichterstattung zu Händen des Bundes.*
- Agridea (hrsg), 2008. Merkblatt «Fusarien in Getreide». *UFA-Revue* **7–8**, 39–42.
- Amt für Wald und Natur des Kantons Bern und Kantonsforstamt des Kantons Freiburg, 1995. *Bericht zum standortkundlichen Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg.*
- ARE, Bundesamt für Raumentwicklung, 2006. *Sachplan Fruchtfolgeflächen FFF. Vollzugshilfe 2006.*
- BAFU und BLW, Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, 2008. *Umweltziele Landwirtschaft.* www.umwelt-schweiz.ch/uw-0820.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2008. *NABODATnewsletter 1, Information über den aktuellen Stand.* (nicht publiziert)
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2008. *Netzwerk Umwelt Schweiz NUS Fachgruppe Boden: Vom Punkt zur Fläche – Bodennutzung für NABODAT. Sitzungsunterlagen vom 27. Mai 2008.*
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2009. *Das Grundwasser konsequent schützen.* <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01022/index.html?lang=de>
- beco, Berner Wirtschaft, 2005. *Massnahmenplan zur Luftreinhaltung 2000/2015, Standortbestimmung 2005.*
- Behrendt, H., Huber, P., Kornmilch, M., Opitz, D., Schmoll, O., Scholz, G. und Uebe, R., 1999. *Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben Wasser. Forschungsbericht 296 25 515, UBA-Texte 75/99.*
- BFS, Bundesamt für Statistik, 1997. *Arealstatistik 1979/85 (revidierte Daten) und 1992/97, Auswertung der Kantonsdaten.*
- BFS, Bundesamt für Statistik, 2009. *Statistik des jährlichen Bevölkerungsstandes (ESPOP) und der natürlichen Bevölkerungsbewegung (BEVNAT) 2008. Provisorische Ergebnisse.* www.statistik.admin.ch
- BGS und FAL, Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz und Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 2002. *Klassifikation der Böden der Schweiz.*
- BGS, Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz, 1998. *Schlüssel zur Klassifikation der Böden der Schweiz.*
- BGS, Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz, 2009. *Homepage.* www.soil.ch
- Blaser, P., Walthert, L., Zimmermann, S., Graf Pannatier, E. und Luster, J., 2008a. *Classification Schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland.* *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **171**: 163–170.
- Blaser, P., Walthert, L. und Graf Pannatier, E., 2008b. *The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminium toxicity.* *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **171**: 605–612.
- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, 1994. *Direktsaat im Kanton Bern – heute und morgen. Umfrage 1994, Umfrage 1993 im Vergleich, Zukunftsperspektiven.* (nicht publiziert)
- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, 1996. *Methoden-Sammlung landwirtschaftlicher Dauerbeobachtungsstandorte.* (nicht publiziert)
- BSF, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, 2006. *Ermittlung der Kundenzufriedenheit bezüglich LKV Art. 2, bodenschonende Anbausysteme.* (nicht publiziert)
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1996. *Handbuch Waldbodenkartierung, Vollzug Umwelt.*
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 2001. *Böden der Schweiz – Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990–1996).* *Umwelt-Materialien* Nr. 139.
- Chervet, A., Maurer-Troxler, C., Sturny, W. G. und Müller, M., 2001. *Direktsaat im Praxisversuch. Einfluss auf die Struktur des Bodens.* *Agrarforschung* **8**(1), 12–17.
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G. und Tschannen, S., 2005. *Direktsaat und Pflug im 10-jährigen Systemvergleich.* *Agrarforschung* **12**(5): 184–189.
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G., Weisskopf, P., Zihlmann, U., Müller, M. und Schafflützel, R., 2006. *Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug.* *Agrarforschung* **13**(4), 162–169.

- Chervet, A., Streit, B. und Fehr, M., 2008. Direktsaat spart Kosten und Zeit. *UFA-Revue* **4**, 52–54.
- Derpsch, R. 2006. Das System Direktsaat: Auswirkungen, Möglichkeiten, Grenzen und Verbreitung sowie sinnvolle Umstellung – die Bedeutung der Fruchtfolge und Gründüngung. Vortrag zu den Oberwinkler Direktsaatseminar vom 05. 09. 2006. Organisiert von Landwirtschaftsbetrieb A. Müller und GKB; Oberwinkel, Sachsen. (nicht publiziert)
- Fachkommission Nitratbekämpfung / Projektgruppe Nitrat, 1996. Programm zur Ursachenbekämpfung der Nitratwaschung im Kanton Bern 1989–1995. Schlussbericht. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion, Volkswirtschaftsdirektion sowie Gesundheits- und Fürsorgedirektion.
- FAL, Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 1997. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Schriftenreihe FAL 24.
- FAT, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, 1997. FAT-Berichte Nr. 496. Hofdüngerandwendung: Wie Ammoniakverluste vermindern?
- Fenner, S., 2007. Torfeigenschaften und Moorsackungsraten von landwirtschaftlich genutzten Böden im Gebiet Witzwil. Diplomarbeit am Geografischen Institut der Universität Zürich.
- Forni, D., Gujer, H.-U., Nyffenegger, L., Vogel, S. und Gantner, U., 1999. Evaluation der Ökomassnahmen und Tierhaltungsprogramme. *Agrarforschung* **6**(3): 107–110.
- Frei, E., Peyer, K. und Jäggi, F., 1972. Verbesserungsmöglichkeiten der Moorböden des Berner Seelandes. *Mitteilungen für die Schweizerische Landwirtschaft* **20** (11): 197–210.
- Frei, E., Vökt, U., Flückiger, R., Brunner, H. und Schai, F., 1980. Bodeneigungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung. Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Landwirtschaft und Bundesamt für Forstwesen.
- Fry, P. und Liechti, K., 2009. Wiederverwendung von abgetragenen, sauberem Boden in der Landwirtschaft, Erarbeitung der Grundlagen für die Entwicklung eines akteurorientierten Lösungsansatzes, Abschlussbericht Juni 2009. (nicht publiziert)
- Fry, P., 2006. Von Bauern für Bauern – Erfolgsgeschichten für eine schonende Bodennutzung. DVD. Wissensmanagement Umwelt.
- GEOTEST 2009. Auftrag Nr. 08450; Text Bodenkartierung. (nicht publiziert)
- Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, F.-X. und Sticher, H., 1997. Bodenökologie. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- GRUDAF, 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* **16**(2).
- Gutachterbüro TerraAquat, 2006. Vergleich der N-Austräge unter Direktsaat und unter konventioneller Bodenbearbeitung, Versuchsanlage Oberacker, Inforama Rütli. Erstellt für das Amt für Landwirtschaft (LANAT).
- Häusler, S. und Buchter, B., 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Teil 2: Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zur Definition von Bodenschadverdichtungen. BGS Dokument 13, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen (LMZ): 17–35.
- Huber, R., 2002. Pflanzenernährung und Düngung (4. Auflage). Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen (LMZ).
- IAG, 2007. Le réseau d'observation des sols agricoles FRIBO: Évolution des paramètres agronomiques et biologiques ainsi que des teneurs en métaux lourds des sols fribourgeois 1987–2006. Canton de Fribourg.
- IAP, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, 2008. Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes, Synthesebericht.
- IAP, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, 2009. Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU, Ergebnisse von 1984 bis 2008, Bericht 3.
- IG UWS, Impulsgruppe Umweltschutz der VOL, 2008. Auftrag Nr. 5. Klimaänderung: Verschärfung möglicher Konflikte zwischen «Lebensraum Bäche» und «Wasserentnahmen für landwirtschaftliche Bewässerungen». Interner Bericht.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). www.ipcc.ch
- Jampen, M. und Möri, Th., 2006. Torfsackung im Seeland. Diplomarbeit Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL.
- Jossi, W., 2001. Burgrain: Einfluss unterschiedlicher Anbausysteme auf Regenwurmfauna. *Agrarforschung* **8**(2). S. 60–65.
- Kantonales Laboratorium, 1986. Jahresbericht des Kantonalen Laboratoriums Bern für das Jahr 1986.

- Kantonales Laboratorium, 2008. Jahresbericht des Kantonalen Laboratoriums Bern für das Jahr 2008.
- Kooistra, M. J. und Boersma, O. H., 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams – loosening practices and effects. *Agriculture, Soil Science, Elsevier Science BV. PO BOX 211, 1000 AE.*
- LANA, Amt für Landwirtschaft des Kantons Bern, 1994. *Bernische Agrarstrategie 2000. Bericht des Regierungsrates des Kantons Bern.*
- Ledermann, T. und Schneider, F., 2008. Verbreitung der Direktsaat in der Schweiz. *Agrarforschung* **15**(8). 408–413.
- Leifeld, J., Bassin, S. und Fuhrer, J., 2003. Carbon stocks and carbon sequestration potentials in agricultural soils in Switzerland. *Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL). Schriftenreihe der FAL* 44.
- Lüscher, C., 2004. Leitfaden Bodenkartierung, Bodendaten – ein Werkzeug für Planung, Nutzung und Schutz des Lebensraums Boden. *Projekt Bodeninformation Schweiz BI-CH / Teilprojekt 3. ARCOPLAN.*
- Lüscher, P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak, S. und Thees, O., 2009. Merkblatt für die Praxis. *Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).*
- Luster, J., Zimmermann, S., Zwicky, C.N., Lienemann, P. und Blaser, P., 2006. Heavy metals in Swiss forest soils: modification of lithogenic and anthropogenic contents by pedogenetic processes, and implications for ecological risk assessment. In: Frossard, E., Blum, W.E.H. und Warkentin, B. (Eds.): *Function of soils for human societies and the environment. Geological Society, London, Special Publications* 266: 63–78.
- Maurer-Troxler, C., Chervet, A., Sturny, W. G. und Zimmermann, S., 2009. Schwermetallbelastung und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern. *Teil 1 Schwermetallbelastung. (nicht publiziert)*
- Maurer-Troxler, C., Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G. und Oberholzer, H.-R., 2005. Bodenbiologie nach 10 Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **12**(10), 460–465.
- Müller, M., Chervet, A., Schafflützel, R., Sturny, W. G., Weisskopf, P. und Zihlmann, U., 2007. Humusgehalte des Bodens nach 11 Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **14**(9), 394–399.
- Müller, M., Chervet, A., Schafflützel, R., Sturny, W. G., Weisskopf, P. und Zihlmann, U., 2010. Phosphor- und Kaliumgehalte des Bodens nach 11 Jahren Direktsaat und Pflug. (in Vorbereitung)
- Polasek, W., 1994. *EDA – Explorative Datenanalyse. Einführung in die deskriptive Statistik. 2. Auflage. Springer-Verlag.*
- Ramseier, L., Chervet, A., Sommer, M., Sturny, W. G. und Weisskopf, P., 2009. Bodenbeeinträchtigungen durch Tractor Pulling. *Agrarforschung* **16**(3): 52–57.
- Reidy, B. und Menzi, H., 2005. *Neues Emissionsinventar 1990 bis 2000 mit Hochrechnungen bis 2003, technischer Schlussbericht, Stand Okt. 2005. (nicht publiziert)*
- Reinhard, H., Chervet, A. und Sturny, W. G., 2001. Direktsaat im Praxisversuch. Erträge der Kulturen (1995–1999). *Agrarforschung* **8**(1), 6–11.
- Rytz, I., 2001. Bodenbelastung «Scherbenland Witzwil», *Schlussbericht. Zollikofen. (nicht publiziert)*
- Sá, J. C. M., 2004. *Adubaçõ Fosfatada no Sistema de Plantio Direto. In: Fósforo na Agricultura Brasileira. eds. Yamada, T. und Abdalla, S. R. S., Sao Pedro-SP, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potasse e Fosfato, Priciciaba, SP. 201–222.*
- Schaller, B., Chervet, A., Nemecek, Th., Streit, B., Sturny, W. G. und Zihlmann, U., 2006. Vergleichsöko-bilanz bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **13**(11–12): 482–487.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H. und Schwertmann, U., 1998. *Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage. Ferdinand Enke Verlag.*
- Schenker, W., 2005. *Veränderungen der Achslasten von landwirtschaftlichen Fahrzeugen durch Anbaugeräte, Anhänger oder Zulasten. SHL, 2005. (nicht publiziert)*
- Schneider, F., 2008. *The Quest for Sustainable Soil Cultivation in Swiss Agriculture – Co-creation of Knowledge through Network Building and Social Learning. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.*
- Schwarz, R., Chervet, A., Hofer, P., Sturny, W. G. und Zuber, M., 2007. Kanton Bern fördert Ressourcen schonenden Ackerbau. *Agrarforschung* **14**(3): 128–133.
- Söhne, W., 1953. *Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik* 5/1953, S. 49–63.

- Sommer, K., 2005. *CULTAN-Düngung. Physiologisch, ökologisch, ökonomisch optimiertes Düngungsverfahren für Ackerkulturen, Grünland, Gemüse, Zierpflanzen und Obstgehölze.* Verlag Th. Mann, D-45894 Gelsenkirchen-Buer.
- Spiess, E. und Prasuhn, V., 2007. Einfluss der Ökologisierung in der Landwirtschaft auf den Nitratgehalt des Grundwassers. *Bulletin 29 der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen (LMZ):* 21–26.
- Spiess, E., 1999. Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. *Schriftenreihe der FAL* 28.
- Stähli, R., Suter, E. und Cuendet, G., 1997. Die Regenwurm-Fauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes. *Synthesebericht. Schriftenreihe Umwelt Nr. 291.* BUWAL.
- Steingruber, E. und Hofer, P., 2001. Direktsaat im Praxisversuch. *Wirtschaftlichkeit. Agrarforschung* 8(1), 23–28.
- Sturny, W. G., 1993. *Bodenbearbeitung: Eine umfassende Übersicht.* Landwirtschaft Schweiz. 6(3): 153–168.
- Sturny, W. G., Chervet, A., Maurer-Troxler, C., Müller, M., Ramseier, L., Richner, W., Schafflützel, R., Streit, B., Weisskopf, P. und Zihlmann, U., 2007. Direktsaat und Pflug im Systemvergleich – eine Synthese. *Agrarforschung* 14(8): 350–357.
- Sturny, W. G., Hofer P., Chervet A. und Providoli I., 2001. Direktsaat im Praxisversuch. Erfahrungen und Beobachtungen. *Agrarforschung* 8(1), I–VI. (Merkblatt in Heftmitte)
- SWISS NO-TILL, 2005. *Direktsaat als Anbausystem. Ergebnisse einer Umfrage. Interner Bericht der Geschäftsstelle, Ligerz.*
- Thöni, L. und Seidler, E., 2009. *Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2008. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), der OSTLUFT und der Kantone Bern, Freiburg, Luzern, Thurgau und Zug. Bezugsquelle: BAFU, Abteilung Luftreinhaltung, 3003 Bern.*
- Van der Veer S., 2005. *Bodenverdichtung bei der Zuckerrübenenernte – die zwei Hauptverfahren im Vergleich. Diplomarbeit im Fachbereich Landtechnik der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL):* 83.
- Van der Veer, S., Chervet, A., Meyer, M., Sturny, W. G. und Weisskopf, P., 2005. *Physikalische Bodenbelastungen bei der Zuckerrübenenernte. Agrarforschung* 12(10): 472–477.
- VanMechelen, L., Groenemans, R. und VanRanst, E., 1997. *Forest Soil Condition in Europe, Results of a large-scale soil survey. Technical Report. EC, UNECE, Ministry of the Flemish Community, Brussels, Geneva.* 261 S.
- VBB, 2009. *Arbeitsgruppe «Vollzug Bodenbiologie»: Arbeitshilfen zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter.*
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 1997. *Bodenbeobachtung im Kanton Bern: Ein physikalisch-biologisch-chemischer Ansatz.*
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2003. *Bodenbericht 2003.*
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2008. *Ressourcen schonende Bodennutzung für einen nachhaltigen Pflanzenbau. Gesuch Pilotprojekt Ressourcenprogramm Boden im Rahmen der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen (Bereich Boden), Art. 77 a und b LwG. Projektgesuch an das Bundesamt für Landwirtschaft:* 85.
- Von Rohr, G., 1996. *Auswirkungen des Rohrleitungsbaus auf Bodenphysikalische Kenngrössen. Geographisches Institut der Universität Bern. Geographie für die Praxis, P 33. S. 108.*
- Walther, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J. und Lüscher, P., 2004. *Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Hep Verlag.*
- Weisskopf, P. und Keller, Th., 2008. *Konzeptionelle Überlegungen zur bodenschonenden Mechanisierung als Bestandteil von precision agriculture. Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf. Tagungsband zur Fachveranstaltung von ilu, GKB und KTBL am 5. und 6. Dezember 2007 in Bonn. Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft (FLN); Heft 15: 71–81.*
- Weisskopf, P. und Nievergelt, J., 2003. *Bodenkartierung in der Schweiz: Geschichte und Ausblick. Referat an der Jahrestagung 2003 der BGS.*
- Weisskopf, P., Schwab, P., Jäggli, F., Kramer, E., Peyer, K. und Studer, R., 1988. *Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden.*
- Weisskopf, P., Zihlmann, U., Chervet, A. und Sturny, W. G., 2005. *Entwicklung des Bodengefüges bei Direktsaat und Pflug. Agrarforschung* 12(8): 362–367.

- Zihlmann, U., Weisskopf, P., Müller, M., Schafflützel, R., Chervet, A. und Sturny, W. G., 2001. Direktsaat im Praxisversuch. Einfluss auf die Nährstoff- und Humusgehalte im Boden. *Agrarforschung* **8**(1), 18–22.
- Zihlmann, U., Chervet, A. und Müller, M., 2007. N-Düngung bei Mais-Direktsaat. *UFA-Revue* **4**, 38–40.
- Zihlmann, U., Weisskopf, P., Müller, M., Schafflützel, R., Chervet, A., und Sturny, W. G., 2006. Stickstoff-Dynamik im Boden bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **13**(5): 198–203.
- Zimmermann, S., 2009. Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Gruppe Bodenschutz, im Auftrag der Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern. (nicht publiziert)

Anhang I:

Bodensäure und Versauerung – unter spezieller Betrachtung des Stickstoff-Kreislaufs

Stephan Zimmermann, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Gruppe Bodenschutz, Birmensdorf, 15. Juni 2009

1. Die natürliche Säureproduktion im Boden

Auch unter Ausschluss von anthropogenen Säurequellen ist ein Boden einer natürlichen Säureproduktion und Versauerung ausgesetzt. Eine der wichtigsten natürlichen Säurequellen ist das Kohlendioxid (CO₂), welches in der Luft in einer Konzentration von zurzeit ca. 360 ppm_v enthalten ist. Es reagiert mit Wasser zur Kohlensäure (H₂CO₃) und gelangt über die Niederschläge in den Boden. Die Kohlensäure liegt allerdings nicht als kompaktes Molekül vor, sondern dissoziiert im Wasser zu Bikarbonationen (HCO₃⁻) und Protonen (H⁺), wobei die Protonen die Säureeigenschaften definieren. Zwischen dem CO₂-Gehalt der Luft und der gelösten Kohlensäure stellt sich ein Gleichgewicht ein, womit bei steigendem CO₂-Partialdruck mehr Kohlensäure entsteht und somit der pH-Wert im Wasser sinkt. Folgende Gleichung beschreibt dieses Gleichgewicht:

$$pH = \frac{7.82 - \log P_{CO_2}}{2}$$

Bei einem CO₂-Partialdruck von 360 ppm_v (0.00036 atm) resultiert ein pH-Wert von 5.63. Im Wurzelraum des Bodens kann der CO₂-Partialdruck bis zu 100-mal grösser als in der freien Atmosphäre sein, weil durch die Atmung der Pflanzen und Mikroorganismen CO₂ an die Bodenluft abgegeben wird und sich die

Bodenluft mit der Atmosphäre nur langsam austauscht. Bei hundertmal grösserem CO₂-Partialdruck resultiert ein pH-Wert von 4.63. Aus diesem Grund dürfte sich der Boden-pH in Gebieten, in welchen die Niederschlagsmengen die Evapotranspirationen übersteigen, natürlicherweise und ohne Einfluss von organischen Säuren auf einen Wert um 5 einpendeln.

Werden in einem Boden tiefere pH-Werte gefunden, so müssen diese durch andere, stärkere Säuren verursacht sein. Solche Säuren stammen vor allem aus der unvollständigen Mineralisierung der organischen Substanz, wobei im Allgemeinen Streu von Nadelhölzern mehr organische Säuren produziert als jene von Laubhölzern. Durch den unvollständigen Abbau entstehen eine Vielzahl von aliphatischen und aromatischen organischen Säuren, welche entweder direkt durch Dissoziation ihrer Säuregruppen Protonen abgeben oder im Laufe der Mineralisation von stickstoff- und schwefelhaltigen Gruppen teilweise in starke Säuren umgewandelt werden. Die Bildung einer wenig zersetzten Rohhumusaufgabe und die damit verbundene Auswaschung von organischen Säuren in den Mineralboden ist eine sehr wichtige natürliche Säurequelle, besonders in den Nadelwäldern der Voralpen und Alpen.

2. Die Säurepufferung

Diesen Protonenquellen stehen im Boden sogenannte Protonensenken gegenüber. Jeder Boden setzt der Versauerung einen natürlichen Widerstand entgegen, den man Säurepufferung nennt. Wird einem Boden Säure zugeführt, so verändert sich der pH-Wert nicht proportional der zugegebenen Säuremenge, sondern stufenweise. Diese Pufferung kommt zustande, weil im Boden ganz bestimmte chemische Reaktionen mit unterschiedlichen Raten ablaufen,

bei denen Protonen verbraucht werden. Diese Säurepufferung ist im Bericht «Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern» detailliert beschrieben, und **Tabelle 1** fasst die dort verwendeten Säureklassen und dominanten Pufferreaktionen zusammen.

Tabelle 1: Definition der Säureklassen mit entsprechenden dominanten Pufferreaktionen und -effizienzen

Säureklasse	pH-Wert [0.01 M CaCl ₂]	Dominante Pufferreaktion	Puffereffizienz
1	> 7.00	Karbonatverwitterung	gross
2	5.61–7.00	Protonierung variabler Ladungen, Silikatverwitterung	gering
3	4.61–5.60	wie Säureklasse 2, jedoch beginnende Auflösung von Al-Verbindungen	gering
4	3.81–4.60	Auflösung von Al-Verbindungen	gross
5	< 3.80	Protonierung der organischen Substanz, Auflösung von Al- und Fe-Verbindungen	mittel

3. Der Boden als offenes System

Sollen die Protonen-Transferreaktionen im Boden verstanden werden, muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass der Boden ein offenes System ist, das mit allen anderen Kompartimenten des Ökosystems in einer engen, wechselseitigen Beziehung steht. Bezogen auf den Protonentransfer sind die wichtigsten benachbarten Kompartimente

- die Atmosphäre;
- die Niederschläge (nasse und trockene Deposition);
- die Vegetation;
- das Bodenwasser-Grundwasser-System.

Die Vegetation und das Bodenwasser sind für die Protonierungsreaktionen von grosser Be-

deutung. Aus diesem Grund muss zum Verständnis der Versauerungsprozesse im Boden das kombinierte System «Vegetation-Boden-Bodenwasser» zusammen betrachtet werden. Die Pflanzen und die Mikroorganismen benötigen für den Aufbau ihrer Biomasse Nährstoffe, die sie dem Boden in ionischer Form entziehen. Zur Erhaltung der Elektroneutralität muss bei der Aufnahme eines Kations eine positive, im Fall einer Anionenaufnahme eine negative Ladung an den Boden abgegeben werden. Vereinfacht gesagt bewerkstelligt die Pflanze dies durch äquivalente Ausscheidung von Säuren (H⁺) bzw. Basen (HCO₃⁻). Im Allgemeinen ist die Kationenaufnahme grösser als die Anionenaufnahme, womit der Boden in der

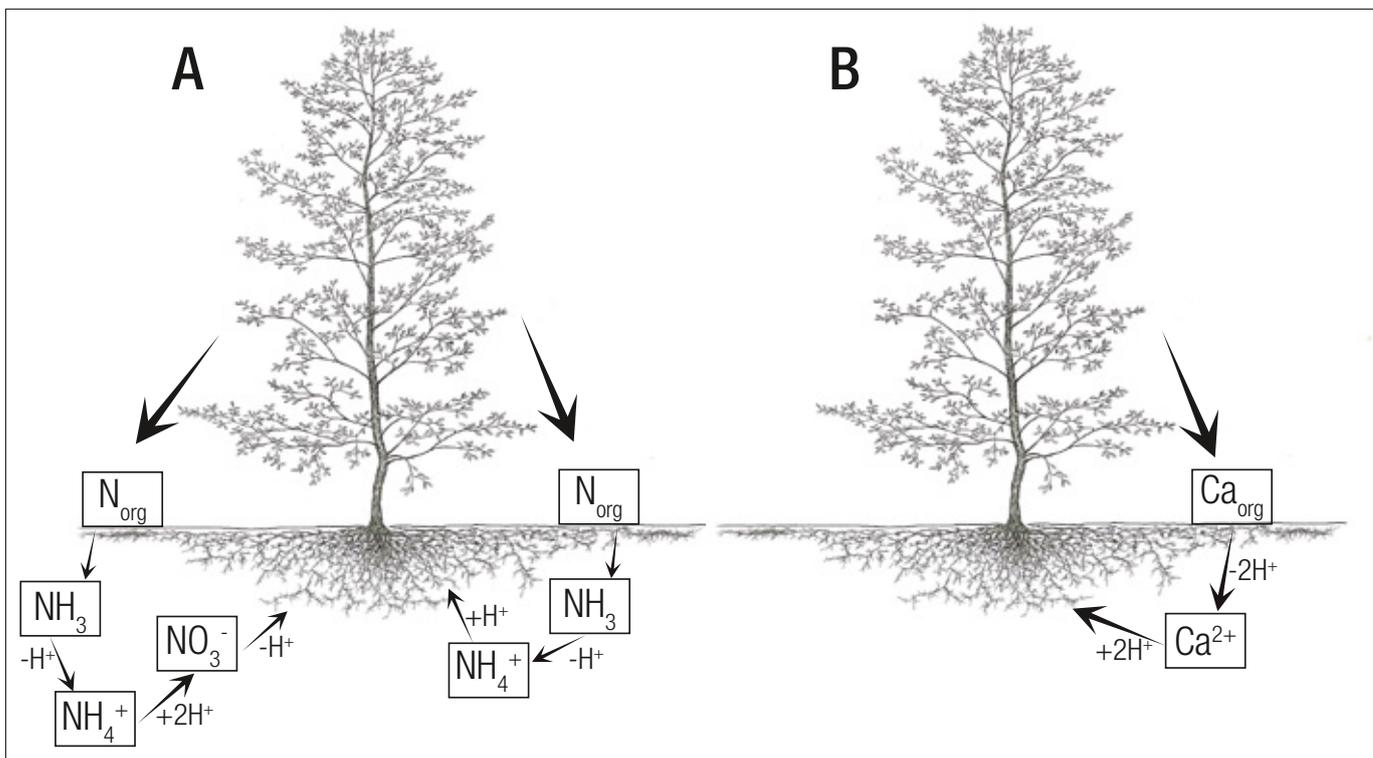


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des Stickstoff- (A) und des Kalziumkreislaufs (B) in einem geschlossenen System. Sowohl bei der Aufnahme von Stickstoff in Form von Nitrat (A, linke Seite) als auch in Form von Ammonium (A, rechte Seite) ist die Protonenbilanz im geschlossenen System ausgeglichen.

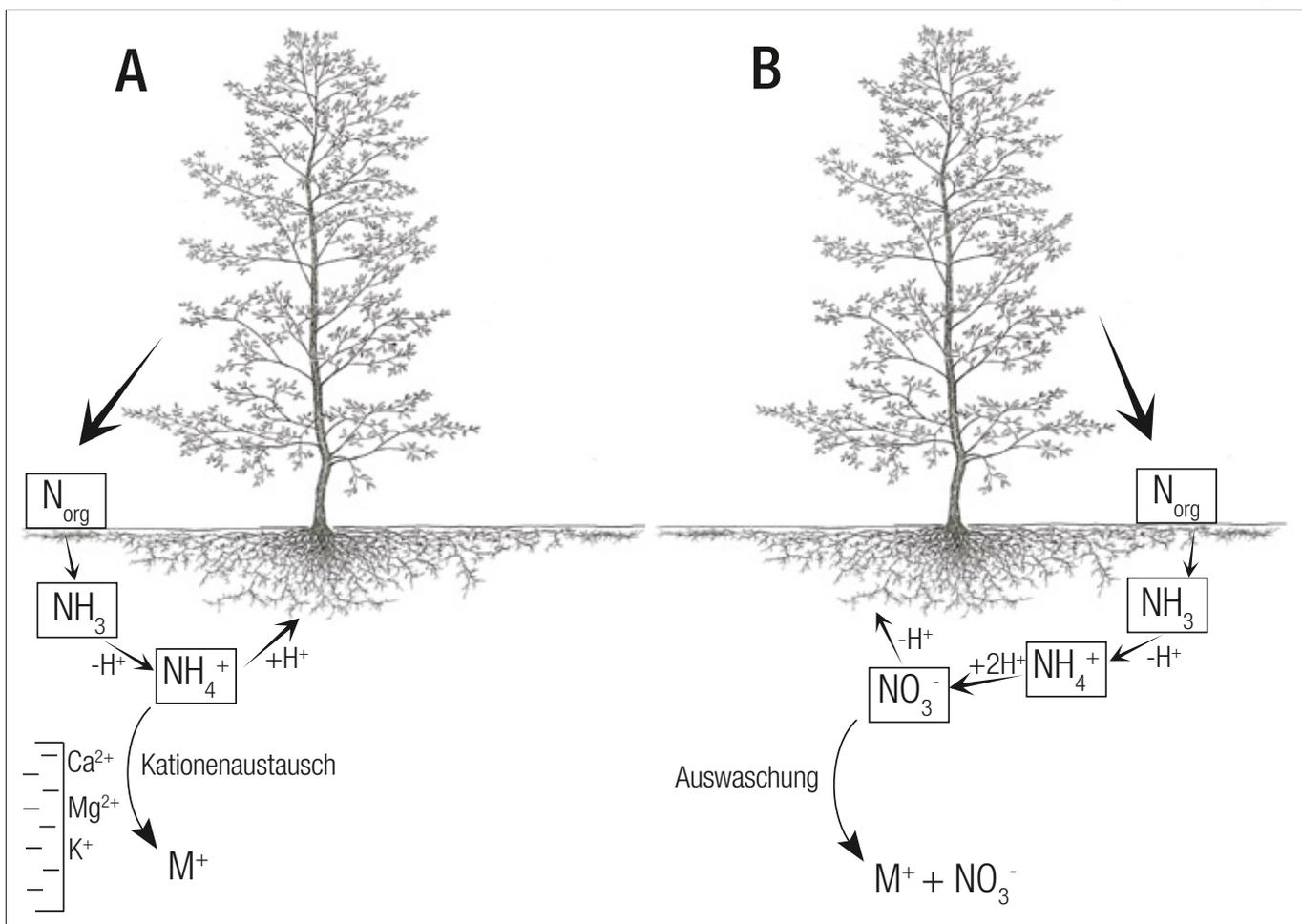


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Stickstoffkreislaufs in einem offenen System.

A: Ammonifizierung des organischen Stickstoffs und entweder Aufnahme des NH_4^+ oder Adsorption desselben unter Verdrängung eines anderen Kations (M^+ steht allgemein für Metallkation).

B: Ammonifizierung und Nitrifizierung des organischen Stickstoffs und entweder Aufnahme von NO_3^- oder Auswaschung unter Begleitung eines anderen Metallkations.

durchwurzelten Zone meistens einen tieferen pH-Wert aufweist als in der übrigen nicht durchwurzelten Bodenmatrix.

Wird die Biomasse nach dem Absterben wieder mineralisiert, so werden diese Prozesse rückgängig gemacht. Für jede Freisetzung eines Kations aus der Streu wird im Endeffekt eine äquivalente Menge Protonen verbraucht, wogegen bei der Mineralisierung der stickstoff-, phosphor- und schwefelhaltigen organischen Verbindungen starke Säuren entstehen. Langfristig wäre deshalb in einem geschlossenen System die Protonenbilanz ausgeglichen. Dies ist in **Abbildung 1** am Beispiel des Stickstoff- und Kalzium-Kreislaufs schematisch dargestellt. Im Fall des Kalziums (**Abbildung 1B**) werden bei der Mineralisierung pro Ca^{2+} -Ion zwei Protonen konsumiert, andererseits gibt die Pflanzenwurzel pro aufgenommenes Ca^{2+} -Ion zwei Protonen an die Rhizosphäre ab.

Bezüglich der Protonenbilanz spielt die Stickstoffaufnahme eine Schlüsselrolle, weil dieses Element sowohl als Ammonium (NH_4^+ , **Abbildung 1A**, rechte Seite) wie auch als Nitrat (NO_3^- , **Abbildung 1A**, linke Seite) aufgenommen

werden kann. Unter aeroben Bedingungen ist Nitrat die thermodynamisch stabilste Stickstoff-Form. In normal durchlüfteten Böden findet deshalb die Nitrifikation, d. h. die Umwandlung von Ammonium in Nitrat statt. Dieser Prozess wird von Mikroorganismen bewerkstelligt und erfolgt in zwei Stufen, wobei insgesamt zwei Protonen abgegeben werden. Die Nitrifikation wirkt deshalb versauernd, wobei diese Versauerung durch die Ammonifikation (Umwandlung von organisch gebundenem Stickstoff zu Ammonium) und die Nitrat-Aufnahme kompensiert wird, weil diese beiden Prozesse ein Proton konsumieren (**Abbildung 1**).

In einem offenen System sind solche geschlossenen Kreisläufe jedoch eher die Ausnahme als die Regel. Eine Unterbrechung der Kreisläufe findet dann statt, wenn beispielsweise Biomasse exportiert wird (Ernte) oder wenn bestimmte Ionen ins Bodenwasser gelangen und mit diesem das System «Boden-Pflanze» verlassen (Auswaschung). Immissionen sind in einem offenen System eine weitere Form der Störung dieser Kreisläufe (Kapitel 5). Eine solche Entkoppelung stört die Protonenbilanz, welche in den geschlossenen Kreisläufen ausgeglichen war (**Abbildung 1**). Je nach

Grad der Entkoppelung bzw. je nach Art der Komponente, welche den Kreislauf verlässt oder diesem zugefügt wird, resultiert eine mehr oder weniger positive oder negative Protonenbilanz, was zu einer Versauerung oder Umkehr der Versauerung führt. Diese Zusammenhänge sind in **Abbildung 2** am Beispiel des Stickstoffkreislaufs illustriert.

Stickstoff fällt in organisch gebundener Form mit der ober- sowie unterirdischen Streu im Boden an. In einem ersten Abbauschritt, welcher als Ammonifikation bezeichnet wird, werden stickstoffhaltige organische Verbindungen aus der Streu zu Ammonium abgebaut, wobei pro Ammonium-Molekül ein Proton konsumiert wird (Protonenbilanz bis zu diesem Schritt: -1). Ammonium kann durch viele Pflanzen unter äquivalenter Protonenabgabe direkt aufgenommen werden, was wiederum zu einer ausgeglichenen Protonenbilanz führt. Ammonium ist ein Kation und als solches befähigt, an den Kationenaustauschprozessen im Boden teilzunehmen. Tritt es in grösseren Konzentrationen auf, so können andere Nährstoffe vom Kationenaustauscher verdrängt und unter ungünstigen Bedingungen aus dem Boden ausgewaschen werden.

Unter aeroben Bedingungen ist Ammonium allerdings nicht die stabilste Stickstoff-Form

und wird unter Abgabe von zwei Protonen zu Nitrat oxidiert (Protonenbilanz: +1). Im Gegensatz zu Ammonium wird Nitrat im Boden nur schwach adsorbiert. Wenn es nicht sofort von der Vegetation oder den Mikroorganismen aufgenommen wird, was die Protonenbilanz durch Konsumation von einem Proton ausgleichen würde, hat es die Tendenz, ausgewaschen zu werden. Auswaschung eines Anions bedeutet immer, dass zur Wahrung der Elektroneutralität auch ein Kation das System verlassen muss. Handelt es sich bei diesem Kation um ein Proton, ist die Protonenbilanz wieder ausgeglichen. Wird aber eine äquivalente Menge irgendeines anderen Kations ausgewaschen, was viel wahrscheinlicher ist, so verbleibt pro Mol des neu gebildeten und anschliessend ausgewaschenen Nitrats ein Mol Protonen im Boden zurück, sodass eine Protonenbilanz von +1 und damit eine Versauerung resultiert. Daraus wird ersichtlich, dass eine permanente Bodenversauerung nur dann stattfindet, wenn Nitrat ausgewaschen wird. Wie stark diese Versauerung ist, hängt vom begleitenden Kation ab. Wird andererseits die Gesamtheit des mineralisierten Stickstoffs, gleichgültig in welcher Form, von Vegetation und Mikroorganismen aufgenommen, so bleibt die Protonenbilanz des Stickstoff-Kreislaufs ausgeglichen.

4. Anthropogene Beeinflussung des Stickstoff-Kreislaufs

Aufgrund dieser Überlegungen wird nun die Beeinflussung der Protonenbilanz durch Immissionen im Stickstoffkreislauf des Pflanzen-Boden-Wasser-Systems untersucht. In industrialisierten Gebieten sowie in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung werden in Form von nasser und trockener Deposition verschiedene chemische Verbindungen in ein Ökosystem eingebracht, die nicht am selben Ort entstanden sind und deshalb unter anderem auch für die Protonenbilanz eine Belastung darstellen. Viele dieser Stoffe sind Säurebildner, die aus SO_x , NO_x , Ammonium- und chlorierten Verbindungen hervorgegangen sind. Neben der Tatsache, dass mit diesen Stoffen zum Teil direkt Protonen ins System gelangen, ist den meisten dieser Verbindungen gemeinsam, dass sie ein sehr mobiles Anion (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) ins System importieren, das letztlich die Auswaschung wichtiger Nährstoffe aus dem Boden provoziert. In **Abbildung 3** sind mögliche Konsequenzen eines Eintrags von Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) diskutiert.

Ammoniumnitrat ist ein Neutralsalz, welches in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt wird, zugleich jedoch auch als Immissionsstoff bekannt ist. In einer Lösung dissoziiert dieses Salz zu Ammonium (NH_4^+) und Nitrat

(NO_3^-). Die möglichen Schicksale dieser beiden Dissoziationspartner sind genau die gleichen, wie sie in der **Abbildung 2** dargelegt wurden. Bezüglich des Protonenhaushalts besteht jedoch der Unterschied, dass kein Proton zur Bildung von Ammonium konsumiert wird. Die Protonenbilanz ist deshalb nur dann ausgeglichen, wenn das gesamte eingetragene Ammonium und Nitrat von Vegetation und Mikroorganismen aufgenommen wird. Dieser Fall dürfte jedoch eher selten sein. Wahrscheinlich ist, dass ein Teil des Ammoniums nitrifiziert wird, wobei durch die Nitrifizierung zwei Protonen freigesetzt werden. In Zeiten, in welchen die Vegetation ruht oder keine nennenswerte Nährstoffaufnahme stattfindet, dürfte ein beträchtlicher Teil des Nitrats ausgewaschen werden. Wiederum hängt die resultierende Intensität der Versauerung von den begleitenden Kationen ab, die zusammen mit dem Nitrat das System verlassen. Die Protonenbilanz kann deshalb 0, +1 oder +2 sein. Wie stark sie tatsächlich ist, kann nicht vorausgesagt werden, da zahlreiche Faktoren die Prozesse im Boden beeinflussen. In den meisten Fällen resultiert durch den Eintrag dieses Neutralsalzes jedoch eine Netto-Versauerung, wobei die Nitrifizierung des eingetragenen Ammoniums einen wesentlichen Beitrag dazu leistet.

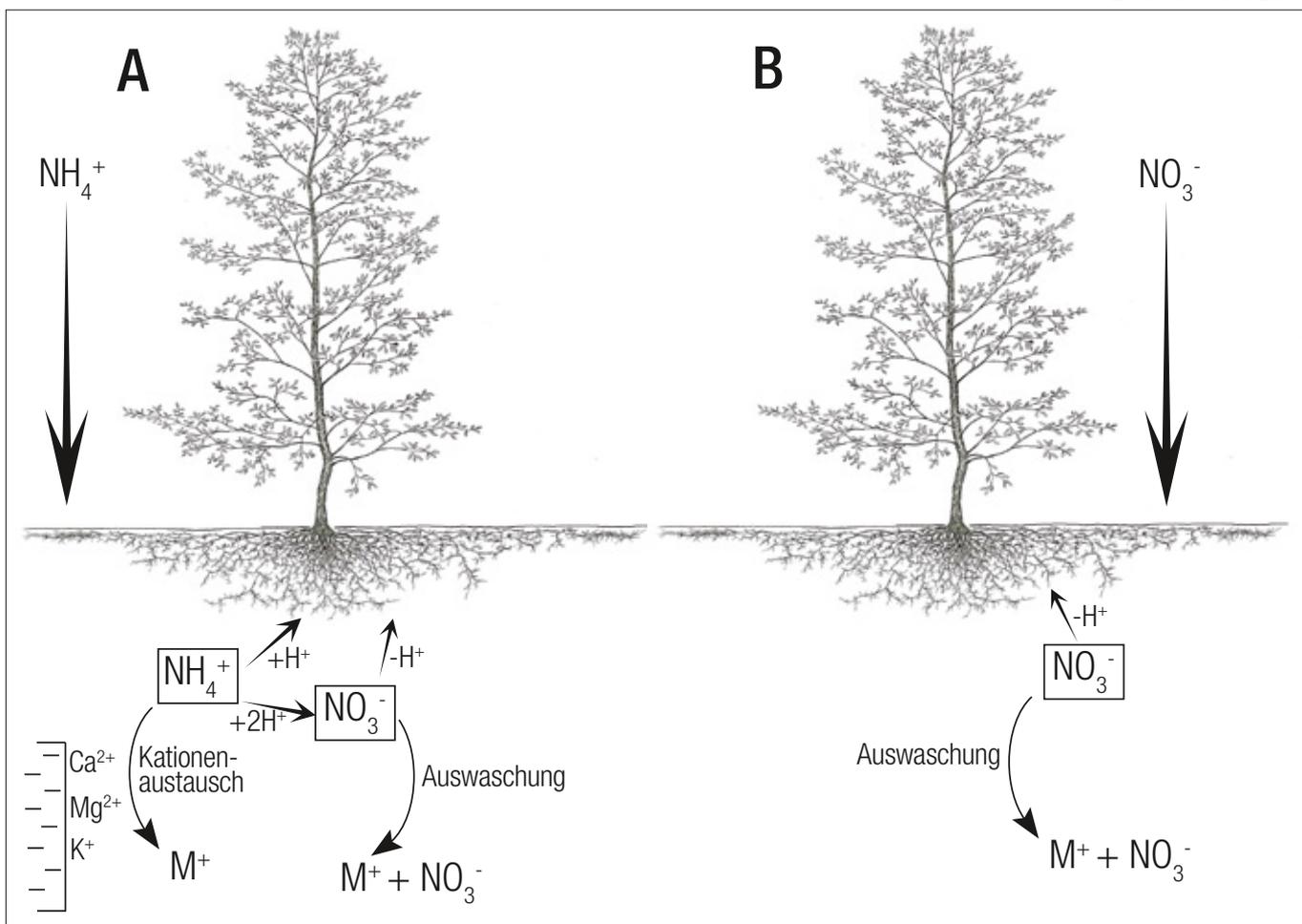


Abbildung 3: Mögliche Wirkungen eines Ammoniumnitrat-Eintrags auf einen Boden

Literatur

Die Literatur über die Wirkung von sauren Depositionen ist sehr umfangreich. Hier seien einige klassische Arbeiten aus den 1980-er Jahren, welche eine rasche Vertiefung in die Materie erlauben, angegeben:

- Adams, F. (Ed.), 1984. *Soil acidity and liming*, 2nd Ed., American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Reuss, J. O., Johnson, D. W., 1986. *Acid deposition and the acidification of soils and waters*. Springer-Verlag.
- Binkley, D., Richter, D., 1987. *Nutrient cycles and H+ budgets of forest ecosystems*. *Advances in Ecological Research* 16: 1–51.
- Sposito, G., 1989. *Soil acidity*. Chapter 11 in: *The chemistry of soils*. Oxford University Press.
- Binkley, D., Driscoll, H. L., Allen, H. L., Schoenenberger, P. and McAvoy, D., 1989. *Acid deposition and forest soils*. Springer-Verlag.
- Stumm, W., Sigg, L. and Schnoor, J. L., 1987. *Aquatic chemistry of acid deposition*. *Environ. Sci. Technol.* 21: 8–13.
- Ulrich, B., Mayer, R. und Khanna, P. K., 1981. *Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling*. 2. Auflage, Sauerländer-Verlag.
- Kinniburgh, D. G., 1986. *Towards more detailed methods for quantifying the acid susceptibility of rock and soils*. *J. Geol. Soc. (London)*. 143: 679–690.
- VanBreemen, N., Mulder, J. and Driscoll, C. T., 1983. *Acidification and alcalinization of soils*. *Plant and Soil*. 75: 283–308.
- Longhurst, J. W. S. (Ed.), 1989. *Acid deposition. Sources, effects and controls*. British Library, Technical Communications.

Anhang II: Erst- und Zweitbeprobungsresultate der physikalischen und biologischen Parameter

Standort	Tiefenstufe ¹	Grasswil		Langnau		Madiswil		Niederörsch		Roggwil		Rüderswil		Schlosswil		Treiten		Bantigen		Clavaleyres		Möriswil		Uettligen		Auswil		Buch		Rubigen		Seedorf		Anzahl stat. ges. Unterschiede EP ²		Anzahl stat. ges. Unterschiede ZP ³		Anzahl Standorte		Mittelwert der Mediane	
		1996	2004	1996	2003	1997	2006	1994	2003	1996	2005	2000	2007	1994	2006	1995	2008	1997	2004	1999	2006	1995	2002	1997	2005	1998	2003	1998	2005	1994	2004	1995	2003	NW>AF	NW<AF	NW>AF	NW<AF	EP	ZP	EP	ZP
Gesamtporenvolumen [Vol.-%] (Median von 9 Einzelwerten) ⁴	NW/OB	54.1	51.2	54.6	53.4	49.6	49.8	47.6	45.7	60.6	57.5	52.0	51.7	54.6	54.1	63.3	60.8	51.9	48.4	44.3	44.6	47.8	47.3	49.1	49.2	54.1	54.2	43.8	48.5	48.1	50.3	52.9	50.8	9	0	8	2	16	16	51.8	51.1
	AF/OB	45.7	47.7	49.2	49.2	46.7	47.0	44.2	44.4	39.8	42.8	53.1	52.7	51.3	53.5	60.9	59.0	48.4	44.7	45.2	47.3	45.8	45.4	49.5	50.6	56.1	53.5	45.5	47.4	45.5	46.7	47.2	46.0	0	2	3	2	10	16	48.4	48.6
Poren > 128 µm (pF 0–1.4)	NW/OB	4.3	6.6	4.6	6.0	6.5	10.1	9.0	5.0	7.0	5.4	8.2	11.1	9.7	9.3	10.1	3.5	5.0	6.8	8.3	13.1	6.7	6.3	5.7	11.2	13.5	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	0	2	3	2	10	16	5.9	8.8	
	AF/OB	8.2	8.2	4.7	6.0	6.8	7.7	8.7	4.4	8.0	5.4	6.5	11.4	9.7	8.3	7.4	6.9	8.7	7.5	7.9	12.2	7.2	10.8	6.6	11.5	10.0	8.9	10.0	8.9	8.9	8.9	8.9	0	2	3	2	10	16	6.6	9.0	
Poren 128–50 µm (pF 1.4–1.8)	NW/OB	3.1	4.0	3.4	3.8	3.1	2.9	2.8	2.9	2.9	3.8	3.9	3.2	2.4	5.0	4.5	2.7	2.5	3.4	4.4	4.2	3.9	3.2	2.8	4.2	4.8	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	3	1	9	1	10	16	3.5	3.5	
	AF/OB	3.0	3.2	2.3	2.7	3.4	2.5	2.8	1.5	2.0	3.8	3.7	2.5	2.4	3.9	3.2	4.2	3.2	3.0	3.7	2.8	3.5	3.1	2.7	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3	1	9	1	10	16	3.2	2.9
Poren 50–3.2 µm (pF 1.8–3.0)	NW/OB	13.4	13.2	10.0	10.0	13.6	13.1	3.7	7.6	10.1	9.0	12.7	11.0	5.1	9.3	2.8	7.8	11.0	12.4	12.1	10.9	4.7	8.6	10.2	9.3	11.9	12.0	10.3	10.7	4.9	11.3	5.0	10.4	7	1	8	2	16	16	8.8	10.4
	AF/OB	7.9	9.6	7.7	7.9	10.3	9.8	4.1	7.9	4.2	5.3	11.7	12.2	3.4	8.6	4.0	8.5	8.3	9.7	11.7	12.4	4.3	7.1	9.6	9.2	12.2	10.0	10.0	10.0	3.5	9.4	5.7	11.7	7	1	8	2	16	16	7.4	9.3
Poren 3.2–0.2 µm (pF 3.0–4.2)	NW/OB	17.8	13.7	20.8	19.4	14.2	9.6	14.1	22.6	20.2	15.6	13.4	13.8	24.2	11.2	13.2	10.1	16.3	13.1	21.6	19.5	12.2	9.9	19.1	19.0	16.1	13.0	8.9	20.5	17.8	17.8	17.8	5	3	6	5	13	16	18.0	14.2	
	AF/OB	15.9	14.8	21.9	19.5	14.5	12.9	14.3	18.5	14.5	18.2	15.3	10.5	19.0	10.3	14.9	12.1	13.7	11.6	21.0	17.1	14.6	14.4	20.4	17.6	17.1	13.3	11.0	16.3	12.2	12.2	12.2	12.2	5	3	6	5	13	16	17.4	13.8
Poren < 0.2 µm (pF 4.2–ofentrocken)	NW/OB	15.4	13.8	15.2	15.1	14.5	13.0	11.7	19.2	18.1	14.3	15.3	17.2	22.7	31.2	11.8	12.1	10.4	12.9	10.7	9.0	13.4	12.5	11.6	13.4	8.8	9.4	13.1	13.8	11.9	11.9	11.9	11.9	6	1	5	1	13	16	14.0	14.4
	AF/OB	11.1	11.5	12.7	12.7	10.9	13.5	11.2	11.6	13.7	15.2	15.6	18.2	23.7	29.8	12.4	12.2	8.7	11.1	10.1	10.7	13.4	12.2	12.6	13.2	8.6	9.4	13.0	9.1	9.2	9.2	9.2	9.2	6	1	5	1	13	16	12.3	13.6
Poren > 50 µm (pF 0–1.8)	NW/OB	6.8	10.6	9.5	9.7	9.7	12.8	10.5	11.5	8.3	10.2	9.2	11.8	12.3	14.4	11.4	11.9	16.2	14.4	6.4	7.4	12.2	9.8	12.8	16.9	11.4	9.2	8.8	15.7	17.3	19.0	17.2	9.8	3	2	4	3	16	16	11.3	12.2
	AF/OB	11.4	11.4	6.6	8.3	10.6	10.3	10.0	11.0	5.9	10.0	8.4	10.8	10.5	13.9	13.5	12.3	12.6	10.9	11.1	11.7	10.4	10.6	12.4	15.1	11.0	14.0	9.4	14.6	12.1	13.2	17.7	11.8	3	2	4	3	16	16	10.8	11.9
Poren < 3.2 µm (pF 3.0–ofentrocken)	NW/OB	33.5	27.5	35.9	34.1	28.2	22.9	32.7	25.3	42.1	38.3	30.0	28.5	36.6	30.2	47.8	42.4	24.9	21.7	26.2	26.0	32.4	28.4	26.2	22.8	30.7	32.1	24.8	22.6	27.2	21.0	34.3	30.2	9	3	6	5	16	16	32.1	28.4
	AF/OB	27.5	26.1	33.2	32.9	25.5	25.8	29.7	25.0	30.2	27.8	32.4	30.9	36.9	29.6	42.9	38.4	27.0	23.8	22.1	22.7	30.8	27.7	27.4	26.5	32.1	30.9	25.7	22.6	30.0	24.0	25.5	21.8	9	3	6	5	16	16	29.9	27.3
Gesamtporenvolumen [Vol.-%] (Median von 9 Einzelwerten)	NW/UB	46.8	44.9	46.9	46.9	41.6	42.0	42.1	40.6	45.7	44.6	50.0	47.6	44.6	45.2	54.7	56.4	41.4	41.6	42.5	44.3	41.8	39.9	44.3	42.6	52.0	51.4	39.6	41.6	46.9	45.8	45.4	42.5	6	4	2	3	16	16	45.4	44.9
	AF/UB	40.7	42.1	49.1	47.7	39.2	42.0	41.4	40.4	42.3	43.4	52.8	50.9	48.0	49.2	58.9	55.2	42.6	42.6	41.4	43.7	39.4	39.4	41.6	43.7	50.2	50.6	40.1	43.5	43.5	44.2	44.6	40.6	6	4	2	3	16	16	44.7	45.0
Poren > 128 µm (pF 0–1.4)	NW/UB	9.1	10.6	7.1	8.2	9.4	12.5	9.1	7.6	8.9	9.9	11.4	11.6	9.2	10.7	10.4	5.2	7.1	8.3	12.2	13.1	11.0	10.6	8.4	10.5	12.7	10.5	12.7	10.5	10.5	10.5	10.5	1	1	1	5	10	16	9.1	10.3	
	AF/UB	7.7	10.2	6.7	7.3	7.9	10.8	9.9	8.9	11.4	9.3	12.2	15.3	5.9	11.7	10.9	7.7	10.7	7.7	11.1	14.3	10.1	10.1	9.6	13.8	12.2	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	1	1	1	5	10	16	9.1	11.0
Poren 128–50 µm (pF 1.4–1.8)	NW/UB	3.9	3.4	3.3	2.5	3.9	2.9	2.2	3.1	2.5	3.9	2.9	1.7	1.6	3.4	2.8	1.9	2.1	2.2	2.2	2.4	2.2	2.2	3.2	2.4	4.0	3.9	2.5	2.4	3.8	3.0	3.0	3.0	3	1	6	4	10	16	3.3	2.6
	AF/UB	2.5	2.3	3.4	2.7	3.1	2.3	2.3	2.5	1.9	4.1	2.7	2.4	1.3	3.0	2.8	2.4	2.2	2.4	2.2	2.7	2.7	2.3	3.4	3.3	3.1	2.7	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3	1	6	4	10	16	3.0	2.6
Poren 50–3.2 µm (pF 1.8–3.0)	NW/UB	8.3	7.9	9.2	9.1	7.9	7.6	3.5	5.8	5.3	5.3	9.7	7.7	3.6	5.6	3.4	6.0	5.9	6.9	8.4	9.5	4.4	4.2	6.9	5.7	9.7	10.3	5.9	6.3	3.3	7.6	4.5	6.8	4	4	3	3	16	16	6.2	7.0
	AF/UB	4.7	5.3	11.4	12.5	7.3	7.5	4.7	5.9	5.0	5.0	9.8	8.7	2.3	6.5	3.7	6.0	6.2	6.5	8.7	10.5	4.7	4.6	5.8	6.4	8.1	8.9	7.1	7.8	4.0	7.0	6.6	7.0	4	4	3	3	16	16	6.3	7.3
Poren 3.2–0.2 µm (pF 3.0–4.2)	NW/UB	15.4	11.9	18.0	17.4	11.5	7.8	13.4	17.4	13.9	16.3	12.7	7.1	21.4	9.6	11.9	9.0	14.9	10.7	17.0	16.2	9.7	8.0	17.8	16.9	13.6	9.9	10.2	15.9	13.1	13.1	13.1	3	2	4	1	13	16	15.4	11.7	
	AF/UB	14.8	11.1	18.0	16.3	12.5	8.5	11.8	14.8	10.9	15.1	13.3	7.4	24.1	7.4	12.0	10.3	13.9	9.6	14.4	14.1	11.5	8.4	19.7	18.3	14.1	10.6	9.5	9.4	8.5	8.5	8.5	8.5	3	2	4	1	13	16	15.0	11.0
Poren < 0.2 µm (pF 4.2–ofentrocken)	NW/UB	9.9	11.4	9.2	11.0	9.2	12.0	10.5	12.2	13.4	10.4	13.1	18.8	22.2	33.4	9.5	11.2	11.5	14.9	8.8	9.6	11.1	12.0	9.1	10.3	9.0	11.1	11.7	7.5	8.8	8.8	8.8	3	3	5	2	13	16	10.7	13.3	
	AF/UB	11.0	12.9	8.9	8.3	9.1	12.4	10.0	12.0	14.6	14.0	13.3	17.4	21.7	35.3	10.0	11.4	8.1	10.9	10.1	9.9	10.7	12.4	9.2	9.9	7.0	8.8	11.2	6.7	7.4	7.4	7.4	7.4	3	3	5	2	13	16	10.6	12.9
Poren > 50 µm (pF 0–1.8)	NW/UB	13.0	13.5	10.9	10.6	12.6	15.4	13.7	11.1	11.4	11.4	13.0	14.4	11.4	13.2	9.3	10.8	14.1	13.8	7.4	9.0	12.0	10.3	15.4	15.5	14.9	14.6	10.9	12.9	17.9	16.5	16.5	13.4	2	3	1	5	16	16	12.8	12.9
	AF/UB	10.2	12.3	9.5	10.0	11.0	13.5	12.9	12.2	11.5	13.1	13.1	15.0	16.1	17.6	9.5	7.2	14.8	14.1	9.9	12.9	10.0	10.3	13.7	16.7	13.7	13.6	12.7	16.4	16.9	15.4	21.9	17.6	2	3	1	5	16	16	13.0	13.6
Poren < 3.2 µm (pF 3.0–ofentrocken)	NW/UB	25.3	23.5	27.7	27.5	21.6	19.9	25.0	23.7	29.3	27.6	26.6	26.5	30.3	18.8	43.0	43.0	21.6	19.9	26.2	25.7	25.9	25.5	21.2	20.5	26.8	27.1	22.1	21.3	26.2	22.2	23.3	21.5	5	3	7	1	16	16	26.4	24.6
	AF/UB	25.8	24.6	26.7	24.3	21.2	20.7	23.4	21.9	26.9	25.8	29.6	26.1	29.4	17.4	45.8	42.7	21.8	21.6	22.1	20.5	24.7	24.0	22.3	20.7	29.1	28.1	21.1	19.2	23.7	21.3										

