

> Physikalischer Bodenschutz im Wald

*Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit
und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften*



> **Physikalischer Bodenschutz im Wald**

*Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit
und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften*

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Peter Lüscher, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL Birmensdorf, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz

Fritz Frutig, WSL, Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme

Oliver Thees, WSL, Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme

unter Mitwirkung von:

Andreas Freuler, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, Kanton Aargau Beat Frey WSL, Forschungsgruppe Rhizosphären-Prozesse

Hans Kremer, TU München, Forstliche Arbeitswissenschaften

Christine Meyer, WSL, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz

Stéphane Sciacca, WSL, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz (bis 2009)

Sandra Thöny (Spjevak), WSL, Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme (bis 2010)

Stephan Zimmermann, WSL, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz

Begleitung BAFU

Hans Peter Schaffer, Abt. Wald (bis 2013)

Silvio Schmid, Abt. Wald (2012 bis 2015)

Christian Küchli, Abt. Wald (2015)

Jean-Pierre Clément, Sektion Boden (bis 2014)

Corsin Lang, Sektion Boden (ab 2014)

Zitierung

Lüscher P., Frutig F., Thees O. 2016: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1607: 159 S.

Gestaltung

Stefanie Studer, 5444 Künten

Titelbild

Marco Walser, WSL, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz

Bezug der gedruckten Fassung und PDF-Download

BBL, Vertrieb Bundespublikationen, CH-3003 Bern

Tel. +41 58 465 50 50

verkauf.zivil@bbl.admin.ch

Bestellnummer: 810.300.134d

www.bafu.admin.ch/uw-1607-d

Klimaneutral und VOC-arm gedruckt auf Recyclingpapier

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

> Inhalt

Abstracts	5		
Vorwort	7		
Zusammenfassung	8		
Einleitung	9		
<hr/>			
1 Rahmenbedingungen für die bodenschonende Waldbewirtschaftung	10		
1.1 Gesetzliche Grundlagen für den physikalischen Bodenschutz im Wald	11		
1.1.1 Gesetzgebung des Bundes	11		
1.1.2 Vollzugsaufgaben der Kantone	13		
1.1.3 Instrumente zur Konkretisierung des Rechts	14		
1.2 Bodenschutzkonzept Schweiz	16		
1.3 Ansprüche der Gesellschaft	17		
1.4 Waldpolitik 2020	18		
1.5 Zertifizierung	18		
1.6 Heterogene Waldböden	19		
1.7 Klimaänderung	20		
1.8 Vermehrte Holznutzung	21		
1.9 Regelungen auf europäischer Ebene	22		
1.10 Situation in Deutschland	22		
<hr/>			
2 Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald	26		
2.1 Ausgangslage	26		
2.2 Zielsetzung	27		
2.3 Vorgehen	28		
2.4 Produkte	28		
2.5 Programm zukunftsfähige Waldnutzung	29		
<hr/>			
3 Bodenkundliche Grundlagen	30		
3.1 Hauptfunktionen der Böden	31		
3.2 Bodenaufbau im Wald	32		
3.2.1 Organische Auflagehorizonte	32		
3.2.2 Humusformen	32		
3.2.3 Mineralbodenhorizonte	34		
3.2.4 Bodentypen	35		
3.3 Bodenmerkmale und Bodeneigenschaften	39		
3.3.1 Stein- und Kiesgehalt	39		
3.3.2 Korngrössenzusammensetzung und Gefüge	39		
3.3.3 Lagerungsdichte und Porenraum	43		
3.3.4 Durchlässigkeit	43		
		3.3.5 Vernässungsmerkmale und Vernässungsgrad	44
		3.3.6 Humusgehalt	45
		3.3.7 Zusammenfassende Wertung	46
		3.4 Wasserhaushalt	48
		3.4.1 Wasserhaushalt und Bodenaufbau	48
		3.4.2 Bodenfeuchte	48
		3.4.3 Messnetze	49
		3.4.4 Desorptionskurven	50
		3.4.5 Bodenfeuchte im Jahresverlauf	51
<hr/>			
4 Spurtypen als Indikatoren für eine schonende Befahrung	53		
4.1 Kategorisierung der sichtbaren Fahrspuren	54		
4.1.1 Spurtypen als Indikatoren für die Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit	54		
4.1.2 Definition Bodenschaden	56		
4.2 Physikalische und mikrobiologische Veränderungen im Boden	58		
4.2.1 Bodenphysik	58		
4.2.2 Bodenmechanische Aspekte	59		
4.2.3 Bodenmikrobiologie	60		
<hr/>			
5 Untersuchungen in der Praxis	64		
5.1 Ziele und Auswahl der Untersuchungsorte	64		
5.2 Versuchsflächen	65		
5.2.1 Überblick und Vorgehen	65		
5.2.2 Messen-Junkholz	66		
5.2.3 Ermatingen-Hohrain	69		
5.2.4 Heitere-Bruucheren	70		
5.2.5 Unteriberg-Schlegwald	71		
5.3 Lotharreservatsflächen	74		
5.4 Fahrversuche zur Spurbildung	75		
5.4.1 Versuchsanlage und Vorgehen	76		
5.4.2 Ergebnisse	78		
5.5 Regenerationsversuch	83		
<hr/>			
6 Praktische Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes	88		
6.1 Planung und Steuerung	88		
6.2 Grundlagen und Voraussetzungen auf betrieblicher Ebene	92		

6.2.1	Ausbildung und Sensibilisierung der Akteure	92
6.2.2	Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit des Bodens	96
6.2.3	Feinerschliessung – Zweck und Planung	99
6.2.4	Feinerschliessung – Anlage und Benützung	101
6.2.5	Qualitätsstandards für den Bodenschutz	103
6.2.6	Verträge und betriebliche Vereinbarungen	105
6.2.7	Terra-mechanische Modelle	106
6.3	Maschinenteknik und Arbeitsverfahren	109
6.3.1	Auf den Boden wirkende Kräfte	109
6.3.2	Technische Massnahmen zur Verringerung des Kontaktflächendruckes	111
6.3.3	Technische Massnahmen zur Verringerung des Schlupfes	117
6.3.4	Grundsätze für die Wahl und den Einsatz von Arbeitsverfahren und Maschinen	119
6.4	Maschineneinsatz	122
6.4.1	Arbeitsauftrag	122
6.4.2	Befahrbarkeit des Waldbodens	122
6.4.3	Reisigmatten	125
6.4.4	Abbruch der Arbeiten	127
6.4.5	Abnahme der Arbeiten	128
6.5	Hoheitliche Lenkungsmassnahmen	128
6.6	Kosten des physikalischen Bodenschutzes	129

7 Heutige Situation und künftiger Handlungsbedarf 132

Anhang	135
A1	Am Projekt Beteiligte 135
A2	Publikationen im Rahmen des Projektes Physikalischer Bodenschutz im Wald 138
A3	Schlüssel zur Bestimmung der Humusformen 143
A4	Verwendete Bezeichnungen für Bodenhorizonte 144
A5	Schlüssel zur Bestimmung der Korngrössenverteilung (Feldansprache) 145
A6	Schlüssel zur Bestimmung des Vernässungsgrades 146
A7	Schätzung des Humusgehaltes im Mineralboden nach Bodenfarbe und Textur 147
A8	Versuchs- und Ausbildungsflächen im Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald 147
A9	Durchgeführte Aus- und Weiterbildungskurse zum Physikalischen Bodenschutz 149
A10	Entscheidungsbaum Bodenempfindlichkeit Kanton Solothurn 151
Literatur	152
Verzeichnisse	155
Glossar	159

> Abstracts

Based on general forest management conditions, known pedological basics and new research findings in the field of soil biology, wheel track types have been developed as indicators of careful use of forest soil by forest machinery. One of the defined wheel track types is indicative of a loss of soil fertility and, accordingly, ecological damage ("track type 3"). The wheel track types form the basis of the management of physical soil protection in forests. To this end, they are incorporated into the planning and monitoring of the wood harvesting operations. This detailed guide for forestry practice provides an insight into the associated theory and concrete tips for its implementation, for example in the selection and use of forestry machines and in relation to the cost of soil protection.

Ausgehend von den Rahmenbedingungen der Waldbewirtschaftung, bekannten bodenkundlichen Grundlagen und neuen Forschungsergebnissen der Bodenbiologie wurden Fahrspurtypen als Indikatoren für eine schonende Befahrung von Waldböden entwickelt. Dabei wird ein Fahrspurtyp definiert, der auf den Verlust der Bodenfruchtbarkeit und somit auf einen ökologischen Schaden hinweist («Spurtyp 3»). Die Fahrspurtypen bilden die Grundlage für das Management des physikalischen Bodenschutzes im Wald. Hierzu werden sie eingebettet in die Planung und Steuerung der Holzernte. Die detaillierte Anleitung für die Praxis vermittelt sowohl einen Einblick in die Theorie als auch konkrete Hinweise für die Umsetzung, zum Beispiel bei Wahl und Einsatz der Forstmaschinen und in der Frage der Kosten des Bodenschutzes.

Une typologie des ornières a été développée en tenant compte des conditions générales de l'exploitation forestière, de données pédologiques connues et de résultats récents de la recherche en biologie du sol pour servir d'indicateurs d'une circulation respectueuse des sols forestiers. L'un d'eux a été défini comme étant le signe d'une perte de fertilité et donc d'un dégât écologique («type d'ornière 3»). Les types d'ornières sont à la base de la gestion de la protection des sols forestiers contre les atteintes physiques. Pour cela, ils sont intégrés dans la planification et le contrôle de la récolte des bois. Ces directives détaillées destinées aux praticiens fournissent d'une part un aperçu des fondements théoriques, d'autre part des indications concrètes pour leur mise en œuvre, par exemple lors du choix et de l'utilisation d'engins forestiers ou pour la question du coût de la protection des sols.

Keywords:

Physical soil protection,
soil compaction,
wheel track types,
skid trails,
wood harvesting

Stichwörter:

Physikalischer Bodenschutz,
Bodenverdichtung,
Fahrspurtypen,
Feinerschliessung,
Holzernte

Mots-clés:

Protection des sols contre
les atteintes physiques,
compaction du sol,
types d'ornières,
desserte fine,
récolte des bois

Partendo dalle condizioni quadro della gestione forestale, dalle basi pedologiche note e dai nuovi risultati della ricerca nell'ambito della biologia del suolo sono stati sviluppati dei tipi di solco come indicatori di un transito rispettoso nei terreni forestali. Al contempo viene definito un tipo di solco che mostra la perdita di fertilità del suolo e i conseguenti danni ecologici («tipo di solco 3»). I tipi di solco costituiscono la base della gestione della protezione fisica del suolo nella foresta e, a tale scopo, figureranno nella pianificazione e nella gestione della raccolta del legname. Al riguardo, la guida pratica dettagliata offre conoscenze teoriche e indicazioni concrete, ad esempio nella scelta e nell'impiego delle macchine forestali e negli aspetti concernenti i costi legati alla protezione del suolo.

Parole chiave:

**Protezione fisica del suolo,
compattazione del suolo,
tipi di solco,
piste di esbosco,
raccolta del legname**

> Vorwort

Boden ist eine nicht erneuerbare Ressource und eine der wichtigsten Grundlagen für das Gedeihen und die Entwicklung der Wälder. Er ist Lebenssubstrat für die Bäume und die Bodenpflanzen des Waldes und damit auch für die vielfältige Tierwelt, die den Wald bewohnt. Die Waldböden sind zunehmend durch ein weites Spektrum menschlicher Aktivitäten beeinflusst. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Einsatz von Forstmaschinen bei der Holzernte.

Die gesetzlichen Regelungen zum physikalischen Bodenschutz im Wald finden sich auf Bundesebene im Umweltschutzgesetz, in der Verordnung über Belastungen des Bodens und im Waldgesetz. Daraus geht hervor, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu erhalten ist. Für die Waldbewirtschaftung bedeutet dies, Bodenbeeinträchtigungen bei der Holzernte zu minimieren. Durch konsequentes Planen und Anlegen der Feinerschliessung kann gewährleistet werden, dass nur ein kleiner Teil der Waldfläche befahren wird und sich die verbleibenden Risiken von Bodenschäden auf einen engen Raum begrenzen.

Die Publikation wurde vom Bundesamt für Umwelt BAFU und der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL ausgearbeitet. Sie enthält Grundlagen zu den wesentlichen Aspekten des physikalischen Bodenschutzes im Wald. Sie zeigt Massnahmen auf, die dazu beitragen können, die Auswirkung von Aktivitäten der Waldbewirtschaftung zu minimieren. Die Publikation richtet sich sowohl an kantonale Forstdienste als auch an Umweltbehörden. Daneben dient sie als Grundlage für die Aus- und Weiterbildung aller, die an der Waldbewirtschaftung beteiligt sind, sowie zur Information der interessierten Öffentlichkeit.

Der Unterzeichnende dankt allen, die in irgendeiner Art zur vorliegenden Publikation beigetragen haben und sich für deren Anwendung einsetzen.

Josef Hess
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Ziel des gemeinsamen Projektes «Physikalischer Bodenschutz im Wald» der Eidg. Forschungsanstalt WSL und des Bundesamtes für Umwelt BAFU war es, die Grundlagen der bodenschonenden Befahrung von Waldböden aufzuarbeiten und weiter zu entwickeln sowie die Ergebnisse in enger Zusammenarbeit mit der Praxis umzusetzen. Ein wichtiges Teilergebnis ist das vorliegende Handbuch.

In diesem werden die Rahmenbedingungen für die bodenschonende Waldbewirtschaftung in der Schweiz ausführlich abgehandelt. Grundlegend sind das Umweltschutzgesetz USG und die Verordnung über Belastungen des Bodens VBBo, an denen sich die Kantone beim Vollzug orientieren müssen. Hinzu kommen die politischen Vorgaben, wie sie in der Waldpolitik 2020 des Bundes festgehalten sind und die zunehmenden Ansprüche der Gesellschaft sowie allfällige Auswirkungen einer Klimaänderung.

Auf der Basis der dargestellten bodenkundlichen Untersuchungen auf verschiedenen Versuchsflächen wurde ermittelt, wie sich die Befahrung mit Forstmaschinen auswirkt. Anhand von Fahrversuchen wurden bodenphysikalische und mikrobiologische Veränderungen unter verschiedenen Fahrspuren analysiert. Die Klassierung der Fahrspuren in drei Spurtypen ist ein praxistauglicher Indikator für den Grad der Beeinträchtigung des Bodens. Beim «Spurtyp 3» ist mit einer langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit zu rechnen.

Seit Beginn der Projektarbeit fand parallel zu den Untersuchungen eine intensive Schulung statt, in die alle an der Waldbewirtschaftung beteiligten Gruppen von Akteuren einbezogen wurden. Die bei der Aus- und Weiterbildung gewonnenen Erkenntnisse flossen laufend in die Projektarbeit ein. Geschult wurden nebst den bodenkundlichen Grundlagen in Bezug auf die Befahrungsempfindlichkeit der Waldböden auch die Klassierung der Fahr-

spuren in die drei Spurtypen sowie die Massnahmen zur Minimierung der Bodenbeeinträchtigungen.

Die Planung und Durchführung von Holzschlägen sowie die Wahl und Ausrüstung der am besten geeigneten Maschinen lässt sich durch bestimmte Massnahmen optimieren. So ist die Planung der Feinerschliessung der Waldbestände für den Bodenschutz sehr bedeutsam. Sie ist standortsabhängig und jeweils für eine ganze Feinerschliessungseinheit zu planen und auf Karten festzuhalten. Wer dies beherzigt, kann über einen längeren Zeitraum immer dieselben Fahrlinien benutzen. So lässt sich das Risiko einer Bodenbeeinträchtigung durch Befahren auf eine minimale, genau festgelegte Fläche beschränken. Technische Massnahmen an den Maschinen helfen, den Kontaktflächendruck sowie den Schlupf zu vermindern. Je nach Bodenaufbau sind dem Maschineneinsatz bei steigender Bodenfeuchte Grenzen gesetzt. Die Wahl der Arbeitsverfahren und Massnahmen bei der Organisation der Maschineneinsätze können den Bodenschutz massiv verbessern. Dazu gehören auch der Verzicht auf bodengestützte Arbeitsverfahren und das Unterbrechen der Arbeit. Einige Massnahmen können beträchtliche finanzielle Konsequenzen zur Folge haben. Daher wurden kostenrelevante Bodenschutzmassnahmen zusammengestellt und für die einzelnen Positionen eine Grössenordnung der zu erwartenden Kosten hergeleitet.

Die Klimaänderung kann zu einer zusätzlichen Einschränkung der risikoarmen Nutzungsperiode führen, in der Bodenschäden gering gehalten werden können. Gleichzeitig zeichnet sich ab, dass der Ressourcenbedarf aus dem Wald steigen wird, was den Druck auf schwieriger zu befahrende Böden erhöht. Steigende Ansprüche der Gesellschaft können weitere Einschränkungen in der Holznutzung zur Folge haben. All dies bedeutet, dass der Bodenschutz in Zukunft eher anspruchsvoller und teurer wird. Der Schutz der Waldböden im Rahmen der Waldbewirtschaftung wird daher auch in Zukunft eine grosse Herausforderung darstellen.

> Einleitung

Mit dem zunehmenden wirtschaftlichen Druck in der Holzproduktion werden leistungsfähigere und schwerere Maschinen im Wald eingesetzt. Damit steigt das Risiko von Bodenschäden.

Mit der Umweltsensibilisierung der Gesellschaft nehmen die ökologischen Ansprüche an die Waldwirtschaft zu. Oft sind diese Ansprüche mit Anschuldigungen an die Bewirtschafter verbunden, sie würden zu wenig sorgfältig mit dem Boden umgehen. Es bestehen zahlreiche Argumente, weshalb das Umweltgut Boden zu schützen sei. Diese Konstellation von Bodenschutz auf der einen und Wirtschaftlichkeit auf der anderen Seite führt oft zu Lösungsansätzen, die kaum umsetzbar und tragfähig sind. Nach Meinung der Autoren gilt es einen Weg zu finden, auf dem alle Beteiligten mit ihren berechtigten Ansprüchen berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel, alle an der Waldbewirtschaftung Beteiligten für den Bodenschutz zu sensibilisieren und entsprechend auszubilden. Wichtig ist es, ein Vorgehen für den Bodenschutz zu formulieren und einzuführen, das ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Ansprüche verbindet. Ein Vorgehen, das als möglichst langfristige Verpflichtung umgesetzt werden kann.

Die vorliegende Publikation befasst sich mit dem physikalischen Bodenschutz, welcher den Boden vor allem vor Verdichtung und Erosion schützt. Im Einzelnen werden Bodenaufbau, Veränderungen im Bodenaufbau durch mechanische Belastungen, Auswirkungen dieser Veränderungen sowie organisatorische und technische Massnahmen zum Schutz des Bodens behandelt. Dabei wird versucht, die Grundlagen für einen zukünftigen Standard zu schaffen, der eine nachhaltig bodenschonende Waldbewirtschaftung ermöglicht.

Die Publikation ist im Rahmen des Projektes «Physikalischer Bodenschutz im Wald» entstanden. Das Projekt wurde an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL durchgeführt und vom Bundesamt für Umwelt BAFU mitfinanziert. Wichtiger Bestandteil des Projektes ist die Aus- und Weiterbildung derjenigen, die in zahlreichen Forstbetrieben im befahrbaren Gebiet des Mittellandes und des Juras an der Waldwirtschaft beteiligt sind. Grundlage dazu ist die bereits erfolgte Herausgabe eines Merkblattes für die Praxis.

1 > Rahmenbedingungen für die bodenschonende Waldbewirtschaftung

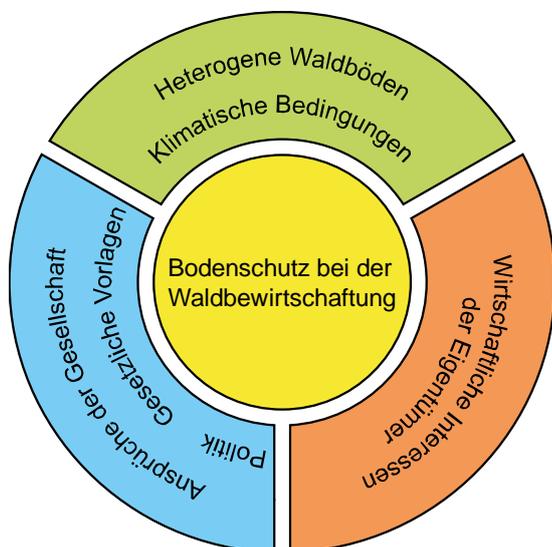
Die Bewirtschaftung der Wälder soll sowohl naturnah als auch rentabel sein. Zusätzlich sollte sie einer Vielzahl von Ansprüchen der Bevölkerung Rechnung tragen. Dieses Spannungsfeld definiert die Rahmenbedingungen für die bodenschonende Waldbewirtschaftung. Zu den ausserbetrieblichen Rahmenbedingungen zählen in erster Linie die schweizerischen gesetzlichen Vorschriften im Umweltschutzgesetz und im Waldgesetz. Auf Bundesebene wurden im Bodenschutzkonzept Schweiz Richt- und Massnahmenwerte für Waldböden festgelegt (gemäss Erläuterungen zur VBBö, BUWAL 2001).

Die Ansprüche der Bevölkerung an die Waldbewirtschaftler sowie die Anliegen des Bodenschutzes werden im Rahmen der Waldpolitik 2020 (BAFU 2013) diskutiert. Zusätzlich zu den gesetzlichen Vorschriften machen auch die schweizerischen Zertifizierungssysteme Vorgaben zum Bodenschutz. Um das Bild zu vervollständigen, wird mit einem Blick über die Grenzen die Situation im benachbarten Ausland aufgezeigt.

Die Heterogenität der Waldböden in der Schweiz sowie die im Jahresverlauf stark wechselnden Bodenfeuchten sind von der Natur vorgegebene, unveränderliche Rahmenbedingungen, welche für die Umsetzung des Bodenschutzes von zentraler Bedeutung sind.

Abb. 1 > Rahmenbedingungen für den Bodenschutz in der Waldbewirtschaftung

Blau: ausserbetriebliche Rahmenbedingungen; grün: natürliche, weitgehend unveränderliche Rahmenbedingungen; rot: betriebliche Rahmenbedingungen.



Der Waldbesitzer will den Wald pflegen und den Rohstoff Holz nutzen. Effiziente Arbeitsverfahren mit leistungsfähigen Forstmaschinen ermöglichen ihm eine wirtschaftliche Ausführung dieser Arbeiten, bergen aber durch die hohen Maschinengewichte auch ein Verdichtungsrisiko für den Boden. Diese Faktoren bilden die innerbetrieblichen Rahmenbedingungen mit Auswirkungen auf den Bodenschutz.

Spannungsfeld zwischen
Wirtschaftlichkeit und
Bodenschutz

1.1 Gesetzliche Grundlagen für den physikalischen Bodenschutz im Wald

Das Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Schutz der Umwelt (Umweltschutzgesetz USG 1983; SR 814.01), die Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo 1998; SR 814.12) und die Waldgesetzgebung des Bundes mit dem Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 über den Wald (Waldgesetz WaG; SR 921.0) und der Verordnung vom 30. November 1992 über den Wald (Waldverordnung WaV 1992; SR 921.01) enthalten Vorschriften zum physikalischen Bodenschutz, die auch bei der Holzernte zu beachten sind. Mit der zunehmenden Mechanisierung der Holzernte in den letzten Jahren stellen sich vermehrt Fragen der Anwendung und Einhaltung dieser Vorschriften. Nachfolgend wird aufgezeigt, was die gesetzlichen Grundlagen der Schweiz für den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte fordern und wie die Vollzugsbehörden für die Einhaltung des Rechts sorgen können. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich in weiten Teilen auf einen Beitrag von Iten (2009).

1.1.1 Gesetzgebung des Bundes

Physikalischer Bodenschutz im Umweltschutzgesetz

Ziel der Bodenschutzgesetzgebung in der Schweiz ist die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Art. 1 Abs. 1 USG, Art. 1 VBBo). Das Element der Langfristigkeit beinhaltet, dass die Bodenfruchtbarkeit auch für kommende Generationen gesichert werden muss. Um dieses Ziel zu erreichen, sind schädliche Einwirkungen auf noch gesunde Böden möglichst zu vermeiden.

Aus dem Bodenschutzziel ergibt sich das Schutzobjekt des schweizerischen Bodenschutzrechts: der fruchtbare Boden. Gemäss Artikel 7 Absatz 4^{bis} USG gilt nur die oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können, als Boden. Boden im Sinne des USG reicht somit bis zur Grenze der Durchwurzelung, womit in der Regel der Oberboden und der Unterboden erfasst werden. Diese Schichten sind biologisch aktiv und können somit fruchtbar sein (BUWAL 2001). Auch im Wald ist Boden in diesem Sinne Schutzobjekt des schweizerischen Bodenschutzrechts.

Boden gilt gemäss Artikel 2 Absatz 1 VBBo als fruchtbar, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind: er weist eine für seinen Standort typische, artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit auf (Art. 2 Abs. 1 Bst. a VBBo); Pflanzen und Pflanzengesellschaften können ungestört wachsen und sich entwickeln und ihre charakteristischen Eigenschaften werden nicht beeinträchtigt (Art. 2 Abs. 1 Bst. b VBBo); die pflanzlichen Erzeugnisse des Bodens weisen eine gute Qualität auf und gefährden die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht (Art. 2 Abs. 1 Bst. c, d VBBo). Für die Beurteilung von Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenverdichtungen sind also vor allem die in den Buchsta-

ben a und b von Artikel 2 Absatz 1 VBBo genannten Aspekte der Bodenfruchtbarkeit von Bedeutung.

Das USG sieht zur Begrenzung von Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit zwei Stufen von Massnahmen vor: Einerseits vom Bund vorgeschriebene, gesamtschweizerische Massnahmen (Art. 33 USG) und andererseits, soweit erforderlich, weitergehende, örtlich begrenzte kantonale Massnahmen (Art. 34 USG).

Auf der Stufe der gesamtschweizerischen Massnahmen des physikalischen Bodenschutzes enthält Artikel 33 Absatz 2 USG die für jedermann verbindliche Verhaltensvorschrift, wonach Boden nur so weit physikalisch belastet werden darf, dass die Bodenfruchtbarkeit nicht nachhaltig beeinträchtigt wird. Eine physikalische Bodenbelastung ist gemäss Artikel 2 Absatz 4 VBBo eine Belastung des Bodens durch künstliche Veränderungen der Struktur, des Aufbaus oder der Mächtigkeit des Bodens. Bodenverdichtungen, also mechanisches Verpressen von Bodenhohlräumen und Aggregatzerstörung sind eine Form von physikalischen Bodenbelastungen. Da praktisch jede Bodenbewirtschaftung mit gewissen, meist vorübergehenden Veränderungen der Bodenstruktur verbunden ist, ist das Verbot auf nachhaltige Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit begrenzt, wobei vorübergehende Beeinträchtigungen akzeptiert werden (Botschaft des Bundesrates 1993, Tschannen 1999). Artikel 6 VBBo konkretisiert die Verhaltensvorschrift von Artikel 33 Absatz 2 USG, wobei Absatz 1 Vorgaben zur Vermeidung von Bodenverdichtungen und Absatz 2 Vorgaben zur Vermeidung von Bodenerosion enthält. Für den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte sind vor allem die Vorgaben zur Vermeidung von Bodenverdichtungen von Bedeutung. Artikel 6 Absatz 1 VBBo verpflichtet jeden, der Anlagen erstellt oder den Boden bewirtschaftet, unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auszuwählen und einzusetzen, dass Verdichtungen und andere Strukturveränderungen des Bodens, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden, vermieden werden.

**Keine langfristige
Beeinträchtigung der
Bodenfruchtbarkeit**

Ist in bestimmten Gebieten die Bodenfruchtbarkeit bereits langfristig nicht mehr gewährleistet, verschärfen die Kantone gemäss Artikel 34 Absatz 1 USG im Einvernehmen mit dem Bund die gesamtschweizerischen Vorschriften zur Vermeidung von Bodenverdichtungen soweit, dass ein weiterer Anstieg der Belastung verhindert wird. Sie können dafür verschärfte Bewirtschaftungsmassnahmen anordnen, beispielsweise auf empfindlichen oder bereits beeinträchtigten Parzellen die Verwendung bestimmter Geräte und Fahrzeuge einschränken oder verbieten.

Bezogen auf die Holzernte stellt sich die Frage, wie diese zu betreiben ist und welche Vorkehrungen zu treffen sind, damit der Boden nicht soweit verdichtet wird, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleistet ist. In der Regel kann man dann von einer langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit sprechen, wenn sie so weit geht, dass sich der Boden nicht mehr innert kurzer Zeit aus eigener Kraft erholen kann (Tschannen 1999). Dies ist vor allem dann der Fall, wenn der Unterboden verdichtet ist (BUWAL 2001). Für den Bodenschutz bei der Holzernte wurden inzwischen zur Beurteilung der Frage, wann von einem durch das Befahren mit Maschinen entstandenen ökologischen Bodenschaden auszugehen ist, verschiedene Typen von Fahrspuren definiert und deren Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit des Waldbodens mittels bodenkundlichen Untersuchungen beurteilt. Der Spurtyp 3 (Kap. 4.1.1) deutet

dabei auf eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit hin. Wichtige Massnahmen zur Verminderung dieses Spurtyps sind in Kapitel 6 thematisiert.

Die Verletzung von Vorschriften über physikalische Bodenbelastungen ist gemäss Artikel 61 Absatz 1 Buchstabe m USG eine strafrechtliche Übertretung, die mit Busse bestraft wird. Strafbar ist danach die vorsätzliche, das heisst wissentliche und willentliche oder zumindest in Kauf genommene Verwirklichung der Übertretung. Die fahrlässige Verletzung dieser Vorschriften ist nach Absatz 2 von Artikel 61 USG bussgeldbewehrt. Fahrlässig begeht ein Verbrechen oder Vergehen, wer die Folge seines Verhaltens ohne die Vorsicht zu beachten, zu der er nach den Umständen und nach seinen persönlichen Verhältnissen verpflichtet ist, nicht bedenkt oder darauf keine Rücksicht nimmt (Art. 12 Abs. 2 und 3 des Schweizerischen Strafgesetzbuches vom 21. Dezember 1937; StGB; SR 311.0).

Physikalischer Bodenschutz in der Waldgesetzgebung

Nebst dem USG und der VBBo sieht die Waldgesetzgebung des Bundes in Artikel 20 Absatz 2 WaG vor, dass die Kantone Planungs- und Bewirtschaftungsvorschriften erlassen und dabei unter anderem den Erfordernissen des naturnahen Waldbaues Rechnung tragen. Artikel 26 Absatz 1 Buchstabe a und Artikel 27 Absatz 1 WaG sehen Massnahmen des Bundes und der Kantone zur Verhütung und Behebung von Waldschäden vor. In diesem Sinne ergreifen gemäss Artikel 28 Buchstabe d WaV die Kantone Massnahmen gegen die Ursachen von Schäden, welche die Erhaltung des Waldes gefährden können wie die physikalischen Belastungen des Bodens.

1.1.2 Vollzugsaufgaben der Kantone

Der Vollzug der Bodenschutzvorschriften des Bundes obliegt gemäss Artikel 36 USG und Artikel 13 Absatz 1 VBBo grundsätzlich den Kantonen. Auch das WaG verpflichtet die Kantone grundsätzlich zum Vollzug der dort enthaltenen Vorschriften (Art. 50 WaG). Der Bund beaufsichtigt gemäss Artikel 38 USG und Artikel 49 WaG den kantonalen Vollzug, wobei er die Kantone auch bei Fragen zum Vollzug berät. Wie die Kantone ihre Aufgaben erfüllen, ist ihnen grundsätzlich freigestellt. Sie können umweltschutzgesetzliche Vollzugsaufgaben auch an Gemeinden übertragen oder öffentlich-rechtliche Körperschaften oder Private damit betrauen. Insbesondere Kontrolle und Überwachungsaufgaben sind für Letzteres geeignet (Art. 43 USG).

Die Kantone erlassen die zum Vollzug des Bundesrechts notwendigen Ausführungsvorschriften, wobei sie insbesondere Vollzugsorgane schaffen und deren Zuständigkeiten festlegen. In ihren Ausführungsvorschriften können die Kantone auch die bundesrechtlichen Bestimmungen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen weiter konkretisieren. Bezüglich Planung und Bewirtschaftung des Waldes verpflichtet Artikel 20 Absatz 2 WaG die Kantone ausdrücklich zum Erlass von Vorschriften. Artikel 18 WaV konkretisiert diese Verpflichtung für den Bereich der forstlichen Planung und hält fest, dass die Kantone in den Vorschriften für die Planung der Waldbewirtschaftung unter anderem die Planarten und deren Inhalt (Bst. a), die Planungspflichtigen (Bst. b) und die Planungsziele (Bst. c) regeln müssen. Bei der Erfüllung dieser Pflicht können die Kantone vorschreiben, dass die Waldeigentümer vor der Holzernte eine geeignete Feinerschliessungsplanung erstellen müssen, die dann für jegliche maschinelle Holzernte

Feinerschliessungsplanung ist ein wichtiges Mittel im Vollzug der Bodenschutzvorschriften

gilt. Die Kantone können in ihren Vorschriften über die Waldbewirtschaftungsplanung auch vorsehen, dass sie selber Waldentwicklungspläne über das gesamte Kantonsgebiet oder über einzelne Waldregionen erlassen. In diesen Waldentwicklungsplänen können beispielsweise Rahmenbedingungen für die Walderschliessung behördenverbindlich festgelegt werden, wobei auf die Eigentumsrechte der Waldeigentümer, insbesondere im Privatwald, Rücksicht zu nehmen ist. Angaben über die Empfindlichkeit der Böden gegen Belastungen können ebenfalls in der Waldentwicklungsplanung enthalten sein.

Nebst dem Erlass von Ausführungsvorschriften müssen die Kantone dafür sorgen, dass das Bundesrecht im Einzelfall tatsächlich eingehalten wird und damit eigentliche Vollzugsmassnahmen ergreifen (Art. 50 WaG). Sie müssen sicherstellen, dass die für jedermann geltende Verpflichtung, nachhaltige Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenverdichtungen zu vermeiden, eingehalten wird. Dazu können die Kantone beispielsweise bei bewilligungspflichtigen Tätigkeiten im Wald die entsprechende Bewilligung mit Auflagen, die die Vermeidung von Bodenverdichtungen bezwecken, erteilen. So ist denkbar, dass der Forstdienst zusammen mit einer Bewilligung zur Holznutzung gemäss Artikel 21 WaG eine Auflage verfügt, wonach der Gesuchsteller zur Erstellung und Respektierung einer Feinerschliessungsplanung verpflichtet wird, wenn eine solche nicht bereits besteht. Auch denkbar sind Auflagen, welche die Verwendung bodenschonender Fahrzeuge oder in anderer Weise eine bodenschonende Bewirtschaftung vorschreiben. Eine weitere Möglichkeit für Auflagen besteht immer dann, wenn der Kanton Tätigkeiten im Wald, die zur Holzernte in Bezug stehen, subventioniert. Bei Nichteinhaltung der Auflage kann die zuständige Behörde diese mit hoheitlichem Zwang durchsetzen, beispielsweise indem sie als Ersatzmassnahme eine Feinerschliessungsplanung unter Kostenfolge für den Pflichtigen selbst erstellt.

Soweit es für den Vollzug der umweltschutzgesetzlichen Bodenschutzanforderungen erforderlich ist, können die Kantone von jedermann die erforderlichen Auskünfte, allfällige Abklärungen oder deren Duldung verlangen (Art. 46 USG). Im Bereich des Bodenschutzes im Wald kann diesbezüglich u.U. der Waldeigentümer in die Pflicht genommen werden. Schliesslich gehört zu den Aufgaben der Kantone die strafrechtliche Verfolgung von Verletzungen von Vorschriften über physikalische Bodenbelastungen.

1.1.3 Instrumente zur Konkretisierung des Rechts

Die oben beschriebenen Vorschriften des Bundes im Bereich der physikalischen Bodenbelastungen stellen Grundsätze dar, deren Vollzug sich ohne Konkretisierungen bereits in den Anwendungsfeldern der Bauwirtschaft und der Landwirtschaft als schwierig erwiesen hat. Mit der Entwicklung der Holzerntemaschinen und den damit einhergehenden Bodenbelastungen hat sich gezeigt, dass auch für die Waldwirtschaft Konkretisierungen der Bestimmungen zum physikalischen Bodenschutz notwendig sind. In diesem Sinne kann beispielsweise in Vollzugshilfen, technischen Normen, Branchenvereinbarungen oder Informationspublikationen konkretisiert werden, wie zur Vermeidung von nachhaltigen Beeinträchtigungen der Fruchtbarkeit von Waldböden vorgegangen werden kann.

Vollzugshilfen sind Instrumente der Aufsicht und richten sich an die Vollzugsbehörden. Sie liefern indirekt jedoch auch Anhaltspunkte an Private über die Rechtskonformität ihres Handelns. Sie konkretisieren unbestimmte Rechtsbegriffe von Gesetzen und Verordnungen und sollen eine einheitliche Vollzugspraxis fördern. Berücksichtigen die Vollzugsbehörden die Vollzugshilfen, so können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen; andere Lösungen sind aber auch zulässig, sofern sie rechtskonform sind. Die Vollzugshilfen des BAFU tragen auch oft die Bezeichnungen Richtlinie, Wegleitung, Empfehlung, Handbuch oder Praxishilfe. Auch die Kantone können, alleine oder in Zusammenarbeit mit anderen Kantonen, Vollzugshilfen veröffentlichen.

Technische Normen von Fachverbänden werden freiwillig durch Fachorganisationen erstellt. Sie konkretisieren in der Regel den anerkannten Stand der Technik und erwirken eine Harmonisierung der Rahmenbedingungen für das wirtschaftliche Handeln. Technische Normen sind nicht rechtsverbindlich, erzielen jedoch dann eine indirekte Rechtswirkung, wenn im geltenden Recht auf solche Normen zur Konkretisierung unbestimmter Rechtsbegriffe verwiesen wird. Sie sind nicht an das geltende Recht gebunden, können also über das vom öffentlichen Recht Geforderte hinausgehen. Privatrechtlich können technische Normen dann verbindlich werden, wenn sie beispielsweise in Verträgen oder für die Mitglieder einer Organisation in den Organisationsstatuten als massgeblich erklärt werden. Allfällige technische Normen im Bereich der Waldbewirtschaftung, die auch umweltrechtliche Anforderungen berücksichtigen, könnten zum Beispiel in Bewirtschaftungsverträgen zwischen den Waldeigentümern und den Bewirtschaftungsunternehmen als verbindlich erklärt werden.

Mit Branchenvereinbarungen legen die Mitglieder einer Wirtschaftsbranche auf freiwilliger Basis gegenseitige Rechte und Pflichten fest. So können einerseits Umweltvorschriften konkretisiert werden, andererseits kann auch etwas vereinbart werden, was über das vom Umweltrecht Geforderte hinausgeht. Für die Mitglieder der Branche sind die Vereinbarungen privatrechtlich verbindlich. Branchenvereinbarungen stärken die Eigenverantwortung der betroffenen Wirtschaftskreise zur Einhaltung des Umweltrechts und sind deshalb ein wertvolles Instrument zur Konkretisierung unbestimmter Rechtsbegriffe.

Ein weiteres Instrument zur Konkretisierung des geltenden Umweltrechts sind Publikationen, die sich gezielt an die von den Bestimmungen betroffenen Kreise der Bevölkerung wenden, diese über die einzuhaltenden Bestimmungen und die dazu notwendigen Massnahmen informieren und sie dazu anhalten, diese Massnahmen zu treffen. Zu diesem Zwecke können die Kantone beispielsweise Merkblätter, Broschüren oder Checklisten veröffentlichen.

Die bisherigen Erfahrungen mit den beschriebenen Instrumenten im physikalischen Bodenschutz im Bereich des Bauwesens zeigen, dass damit viel erreicht werden kann. Die im Sinne der Bodenschonung weiterentwickelten Bau- und Rekultivierungstechniken und neue wissenschaftliche Erkenntnisse wurden mit Hilfe von den vom Bundesamt für Umwelt, den Kantonen und von Fachverbänden publizierten Vollzugshilfen, Richtlinien, Merkblättern und weiteren Dokumenten in der Praxis umgesetzt. Auch im Bereich des physikalischen Bodenschutzes im Wald sind Lösungen ähnlich denen der Bauwirtschaft denkbar. So könnte beispielsweise der Fachverein Wald des Schweizeri-

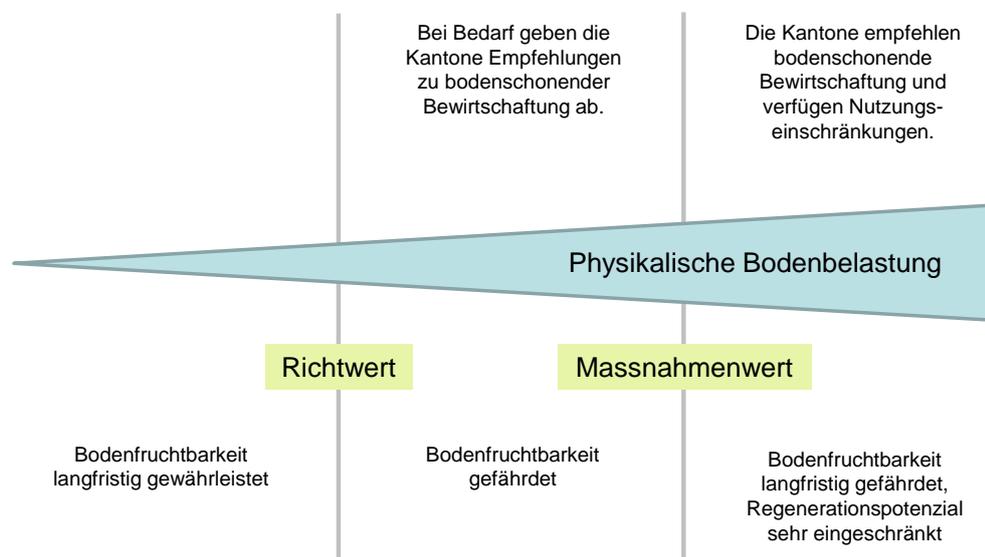
schen Ingenieur- und Architektenvereins technische Normen, welche die Anforderungen an den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte gemäss dem Stand der Technik konkretisieren, erarbeiten. Für eine Branchenlösung im Bereich des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte könnte sich Waldwirtschaft Schweiz als nationale Dachorganisation der schweizerischen Waldeigentümer oder der Verband Schweizerischer Forstunternehmungen einsetzen. Die Kantone ihrerseits können von den Möglichkeiten Gebrauch machen, mittels Vollzugshilfen verfügbungsberechtigte Behörden wie beispielsweise die Forstdienste anzuweisen, sowie Waldeigentümer, Waldbewirtschafter, Förster und private Forstunternehmer mittels Informationsdokumenten über die Notwendigkeit von Massnahmen zum physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte aufzuklären und Massnahmen zu einer möglichst bodenschonenden Holzernte aufzuzeigen.

1.2 Bodenschutzkonzept Schweiz

Das Bodenschutzkonzept (gemäss Erläuterungen zur VBBo, BUWAL 2001) basiert auf der Bodenschutzregelung des Umweltschutzgesetzes (USG) und der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). Dieses Konzept dient dem Bund und den Kantonen insbesondere dazu, Bodenbelastungen und die Fruchtbarkeit des Bodens zu beurteilen und gegebenenfalls allfällige Massnahmen festzulegen. Im Konzept sind Richt- und Massnahmenwerte festgehalten, deren Einhaltung die Kantone überwachen und bei deren Überschreitung dem Bewirtschafter Massnahmen auferlegt werden. Da diese Werte in der VBBo enthalten sind, sind sie verbindlich. Der Bund ist daran, die Grundlagen für eine Bodenstrategie Schweiz zu erarbeiten. Ab 2016 soll darauf basierend zusammen mit den Kantonen eine nationale Bodenstrategie entwickelt werden.

Für den Bereich des physikalischen Bodenschutzes im Wald liegt ein Entwurf eines Konzeptes vor (Buchter und Häusler 2009). Hier wurden Richt- und Massnahmenwerte formuliert, um physikalische Bodenbelastungen zu beurteilen (Abb. 2). Die Ermittlung solcher Werte wird in der Waldpolitik 2020 (Kap. 1.4) gefordert. In Tabelle 1 sind diese Werte für die im Hinblick auf den Grad der Bodenbelastungen wichtigsten physikalischen und mechanischen Messgrössen des Waldbodens ersichtlich. Es sind dies: gesättigte Wasserleitfähigkeit, effektive Lagerungsdichte, Grobporenvolumen und Eindringwiderstand. Die Richt- und Massnahmenwerte gelten grundsätzlich für alle forstwirtschaftlich genutzten Böden und sie gelten für den mineralischen Ober- und Unterboden bis in eine Tiefe von max. 60 cm (Buchter et al. 2004). Unter Berücksichtigung dieser Messgrössen und der dafür definierten Richt- und Massnahmenwerte wurde eine Klassierung der Fahrspuren im Wald vorgenommen (Kap. 4.1.1).

**Messgrössen zum Erfassen
der Bodenbelastung:
Gesättigte Wasserleitfähigkeit,
Lagerungsdichte,
Grobporenvolumen,
Eindringwiderstand**

Abb. 2 > Vorschlag eines Konzepts für den physikalischen Bodenschutz

Buchter et al. 2004, verändert

Tab. 1 > Vorschlag der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz BGS zu Richt- und Massnahmenwerten für den physikalischen Bodenschutz im Wald

	Effektive Lagerungsdichte ¹ g/cm ³		Groporenvolumen ² Vol.-%		Gesättigte Wasserleitfähigkeit ³ m/s		Eindringwiderstand ⁴ MPa	
	Oberboden	Unterboden	Oberboden	Unterboden	Oberboden	Unterboden	Oberboden	Unterboden
Richtwert	1,50	1,7	10	7	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	1,5	2,0
Massnahmenwert	1,65	1,85	7	5	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	3,0	3,5

¹ Effektive Lagerungsdichte: Lagerungsdichte [g/cm³] + 0,009 x Tongehalt [%]² Groporen: enthalten Gravitationswasser, Äquivalentdurchmesser >0,05 mm³ Gesättigte Wasserleitfähigkeit: Durchflussmenge je Flächen- und Zeiteinheit wenn alle Poren gesättigt sind und leiten [cm/d]⁴ Eindringwiderstand: Widerstand (als Druckmass [Pa]), welcher einer Messsonde im Boden entgegengebracht wird.

Buchter et al. 2004, verändert

1.3

Ansprüche der Gesellschaft

Bodenschutz ist auch ein Anliegen von grossen Teilen der Bevölkerung. Sie schätzt zwar den Rohstoff Holz, empört sich aber oftmals über die sichtbaren Fahrspuren nach der Holzernte. Insbesondere im stadtnahen Erholungswald reagieren die Besucher sehr sensibel. Die Nutzung des Waldes zur Erholung und für den Tourismus hat während der Urbanisierung in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Es kommt immer wieder vor, dass in Pressemeldungen und Leserbriefen negativ über Bodenschäden infolge der Holzernte berichtet wird. Um die Akzeptanz der Bevölkerung für Holzernarbeiten zu bewahren und die gute fachliche Praxis der Waldbewirtschaftung einzuhalten, ist dem Bewirtschafter daran gelegen, solche Konflikte möglichst zu vermeiden. Bei einer umfassenden Lösungsfindung in Bodenschutzfragen werden deshalb neben ökologischen und ökonomischen Ansprüchen auch die gesellschaftlichen einbezogen.

1.4 **Waldpolitik 2020**

In der Waldpolitik 2020 stellt der Bundesrat seine waldpolitischen Absichten bis 2020 vor. Eines der elf Ziele ist der Schutz der Waldböden: «Waldböden, Trinkwasser und Vitalität der Bäume sind durch Stoffeinträge, unsachgemässe Bewirtschaftung und entsprechende physikalische Einwirkungen nicht gefährdet» (Ziel 7; BAFU 2013).

Physikalischer Bodenschutz ist eines der Ziele der Waldpolitik 2020

Um dieses Ziel zu erreichen, sieht der Bund die drei folgenden Stossrichtungen vor:

- > Sektorübergreifende Ansätze zur Eindämmung von Stickstoff und Schwermetallen
- > Befahren des Waldbodens
- > Nährstoffhaushalt

Die Stossrichtung «Befahren des Waldbodens» betrifft den physikalischen Bodenschutz. Gemäss dieser Stossrichtung prüft der Bund, wie die Anforderungen und Auflagen für die bodenschonende Bewirtschaftung bei den Subventionen des Bundes (Neuer Finanzausgleich NFA) berücksichtigt werden können. Gleichzeitig entwickelt der Bund Kommunikationsmassnahmen im Bereich des physikalischen Bodenschutzes (Stossrichtung 7.2 «Befahren des Waldbodens»; BAFU 2013).

Geeignete Massnahmen sind:

- > flächiges Befahren vermeiden, d. h. die Fahrbewegungen sollen sich auf Wege und Rückegassen beschränken
- > Rückegassenabstand den standörtlichen Voraussetzungen anpassen
- > Rückegassen dauerhaft im Gelände kennzeichnen und/oder auf Plänen festhalten.

1.5 **Zertifizierung**

Zurzeit sind 56 % der schweizerischen Waldfläche bzw. rund 700 000 ha entweder nach FSC (www.fsc-schweiz.ch), nach PEFC (www.pefc.ch) oder nach beiden Zertifizierungssystemen zertifiziert (www.agr.bfs.admin.ch, Stand 21.07.09). Die Zertifizierungssysteme stellen teilweise unterschiedliche Anforderungen an die Waldbewirtschaftung (BAFU 2009). Der physikalische Bodenschutz ist in den Anforderungen beider Zertifizierungssysteme jedoch mit den gleichen Standards enthalten. Im Folgenden sind die Standards, die den physikalischen Bodenschutz betreffen, wörtlich zitiert (FSC 2009; PEFC 2008):

«Für die bestandes- und bodenschonende Ernte und Bringung des Holzes wird ein, bei Bedarf eigentümerübergreifendes, standortbezogenes Feinerschliessungsnetz festgelegt. Die ausgeschiedenen Gassen werden vor Eingriffen klar markiert. Das Rückegassennetz ist zumindest als Handskizze in Karten dokumentiert.

Das Befahren ist auf Waldwege und Rückegassen beschränkt. Der Waldboden wird nicht flächig befahren. Erschliessungssysteme werden geländeangepasst so angelegt, dass möglichst wenig Waldboden befahren wird. Mindestabstand zwischen Rückegassen 20 m oder maximal 500 Laufmeter pro Hektare.

Der Waldboden wird nicht flächig befahren

Auf Rückegassen müssen Fahrspuren, welche die Struktur und Fruchtbarkeit des Ober- und des Unterbodens langfristig zerstören, verhindert (Fahrspurtyp 3 gemäss Merkblättern WSL) oder zumindest minimiert (Fahrspurtyp 2 gemäss Merkblättern WSL) werden. Das Verbot des flächigen Befahrens gilt auch im Kalamitätsfall. Hierzu werden die Empfehlungen des Bundesamts für Umwelt berücksichtigt.

Nach erfolgter Holzernte wird eine Kontrolle durchgeführt, um Boden- und Bestandeschäden zu erheben. Werden Schäden festgestellt, welche über das intern resp. vertraglich festgelegte Mass hinausgehen, werden geeignete Korrekturmassnahmen ergriffen.

Bei der Zertifizierung trägt der Waldeigentümer die Verantwortung für die Einhaltung der Prinzipien, Kriterien und Indikatoren, ausser er delegiert die Waldbewirtschaftung und damit sämtliche strategischen und operativen Tätigkeiten, sofern sie von diesen Nationalen Waldstandards betroffen sind, an eine Drittpartei.

Die gemeinsamen Standards der Labels FSC und PEFC sind auf die Waldpolitik 2020 abgestimmt (Kap. 1.4).

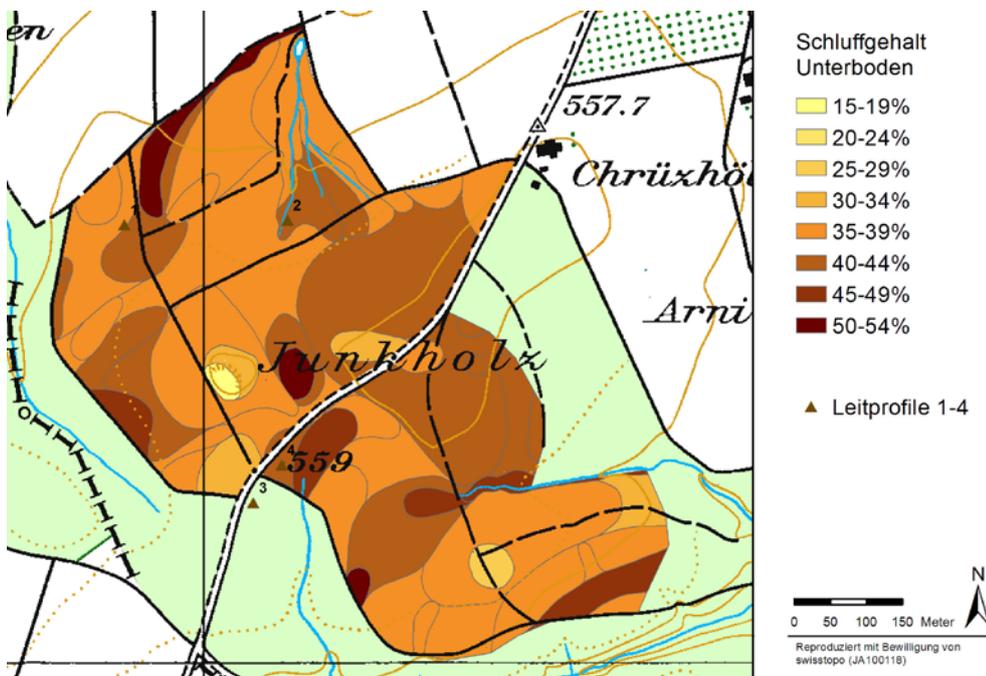
1.6

Heterogene Waldböden

Waldböden haben meist einen natürlichen Aufbau und sind bezüglich ihrer Eigenschaften kleinräumig oft sehr heterogen. Die homogenen und besser bearbeitbaren Böden wurden in den meisten Fällen bereits seit jeher für landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Aufgrund der natürlichen Heterogenität der Waldbodeneigenschaften können die Bedingungen für vorgesehene Feinerschliessungssysteme (Rückegassen) nicht grossflächig als einheitlich beurteilt werden. Selbst auf einer von der Bodenoberfläche aus als homogen erscheinenden Fläche können die Bodeneigenschaften kleinflächig variieren. Dazu gehören beispielsweise Körnungsunterschiede, Unterschiede im Skelettgehalt, im Vernässungsgrad und im Humusgehalt – alles Eigenschaften die zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens entscheidend sind. Mit Bodenkarten können diese Eigenschaften für den Ober- und den Unterboden dargestellt werden. In Abbildung 3 werden die Körnungsunterschiede anhand des Schluffgehaltes im Oberboden auf der Versuchsfläche Messen-Junkholz dargestellt. Es zeigt sich, dass der Schluffgehalt mit 30 bis 60 %_g in den bei der Bodenkartierung ausgeschiedenen Polygonen erheblich variiert. Damit ist es relativ schwierig und aufwändig, die Verdichtungsempfindlichkeit abzuschätzen. In Abbildung 39 im Kapitel 5.2.2 wird für den ausgewählten Kartenausschnitt die Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens dargestellt und erläutert.

Die Heterogenität der Waldböden erschwert die Beurteilung ihrer Verdichtungsempfindlichkeit

Abb. 3 > Versuchsfläche Messen-Junkholz mit den unterschiedlichen Körnungseigenschaften (Schluffgehalt) im Unterboden



Bodendaten: Amt für Umwelt, Kanton Solothurn.

1.7 Klimaänderung

Gemäss dem Bericht des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung (OCCC 2008) an das BAFU sind aufgrund der Klimaänderung für die bodenschonende Waldbewirtschaftung folgende Auswirkungen zu erwarten:

Die mittlere Sommertemperatur (Juni, Juli, August) wird bis 2070 im Vergleich mit dem Mittelwert von 1961–1990 um 2,5–7,5 °C steigen. Dabei wird die untere Grenze in einem Szenario mit Intervention zum Klimaschutz (sofortige, radikale Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen) erreicht. Ein Temperaturanstieg ist immer an eine höhere Verdunstung gekoppelt. Der Niederschlag wird im Sommer um bis zu 40 % abnehmen. Im Winter wird im Vergleich mit dem Mittelwert von 1961–1990 eine Erwärmung von 1–5 °C erwartet. Der Niederschlag wird im Winter leicht zunehmen (+8 %). Die Anzahl starker Frosttage wird abnehmen.

Höhere Temperatur, höhere Verdunstung und abnehmender Niederschlag im Sommer führen zu trockeneren und damit grundsätzlich zu besser befahrbaren Böden. Höhere Temperatur, zunehmender Niederschlag und abnehmende Anzahl starker Frosttage im Winter bedeuten, dass die Böden im Winter feuchter und damit die Bedingungen für eine bodenschonende Befahrung ungünstiger sind. Da die Haupteinschlagsperiode der Holzernte auch die Wintermonate umfasst, wirken sich diese ungünstigen Bedingungen umso stärker aus. Die Waldbewirtschaftler werden damit noch mehr unter Druck gesetzt, die Holzschläge vermehrt in der Vegetationsperiode durchzuführen und damit das Risiko von höheren Schäden am verbleibenden Bestand einzugehen.

Im Gegensatz zu den vorangehend besprochenen Veränderungen (Temperatur, Niederschlag) sind die Unsicherheiten bei den Wetterextremen wie Hitzewellen und Stürme erheblich. Als Folge davon ist eine Zunahme der Zwangsnutzungen zu erwarten. Damit steigt die Gefahr, dass Waldböden bei den Räumungsmassnahmen ohne besonderes Augenmerk auf die Bodenschonung befahren werden.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass sich die klimatischen Rahmenbedingungen für die bodenschonende Holzernte verschlechtern dürften. Mildere und feuchtere Winter sowie zunehmende Extremereignisse schränken die günstigen Perioden für die Befahrung des Bodens weiter ein, womit das Risiko der Befahrung unter ungünstigen Bedingungen ansteigt.

Die Klimaänderung kann die bodenschonende Holzernte stark erschweren

1.8

Vermehrte Holznutzung

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff und weist im Vergleich mit fossilen Energieträgern in der Regel eine deutlich bessere Ökobilanz auf (Steubing 2013). Zum Beispiel lässt es sich nach der stofflichen Verwendung noch für die Energieproduktion nutzen, womit gleichzeitig auch das Problem der Entsorgung oder des Recyclings weitgehend gelöst ist. Die vielfältigen Vorteile führen zukünftig zu einer steigenden Nachfrage nach Holz.

Damit ein Anreiz für die Holznutzung besteht, muss die Holzbereitstellung für den Waldeigentümer kurzfristig mindestens kostendeckend, längerfristig aber gewinnbringend sein. Mit dem Holzerlös sind auch die gesamten Leistungen ohne Holzertrag zu finanzieren, wie zum Beispiel Pflegemassnahmen, Wegunterhalt und Verwaltungskosten. Die Verkaufspreise für das Produkt Holz werden jedoch in hohem Masse vom Weltmarkt beeinflusst und sind damit in der Schweiz im Verhältnis zu den Produktionskosten tief. Folglich müssen die Holzerntekosten soweit wie möglich gesenkt werden. Diese Vorgabe hat in den letzten 20 Jahren zu einer starken Mechanisierung der Holzernte in den befahrbaren Lagen des Mittellandes, der Voralpen und des Jura geführt. Die grosse aufzurüstende Holzmenge und der Preiszerfall nach den Orkanen Vivian (1991) und Lothar (1999) haben diese Entwicklung noch stark beschleunigt. Der Kostendruck führt bis heute dazu, dass immer leistungsfähigere und damit in der Regel auch schwerere Maschinen eingesetzt werden. Damit steigt, je nach Standort, das Risiko von Beeinträchtigungen des Bodens bei der Holzernte. Hinzu kommt, dass durch die vermehrte Holznachfrage die Nutzung auf schwieriger zu befahrende Standorte ausgedehnt wird.

Vermehrte Holznachfrage führt zu einem höheren Risiko von Bodenschäden

Eine weitere Ursache für mögliche Konflikte zwischen Holzernte und Bodenschutz liegt in der optimierten Logistik in der Holzerntekette. Enge Terminvorgaben und geringe Lagerhaltungen der Holzverarbeitenden Betriebe lassen oftmals wenig Handlungsspielraum bei schlechten Witterungsverhältnissen, d. h. bei nassen Böden zu. Die in den hochmechanisierten Holzernteverfahren eingesetzten Maschinen sind teuer und müssen demzufolge eine entsprechend hohe jährliche Auslastung erreichen. Das kurzfristige Umsetzen der Maschinen an einen anderen Arbeitsort mit günstigeren Bodenverhältnissen verursacht zusätzliche Kosten, weshalb vielfach trotz ungünstiger Bodenverhältnisse am gleichen Standort weitergearbeitet wird. Zudem verfügen die privaten

Forstunternehmungen oftmals über weniger organisatorischen Spielraum in Bezug auf Schlechtwetterarbeiten und sie müssen einen längerfristigen Terminplan einhalten.

1.9 Regelungen auf europäischer Ebene

Auf der Ebene der Europäischen Union gibt es bislang keine verbindlichen Regelungen, die sich unmittelbar mit dem Bodenschutz befassen. Es liegt aber ein Entwurf einer EU-Bodenschutz-Rahmenrichtlinie von 2006 vor. Über diesen Entwurf fanden zwar Diskussionen statt, es wurden aber keine Entscheide getroffen. Mit der Einführung der Rahmenrichtlinie sollen künftig europaweit Gefährdungen des Bodens erfasst und bewertet werden. Die Bodenverdichtung gehört zu den acht ausgewiesenen Bodengefährdungen (www.umweltbundesamt.at, Stand 24.07.09) und beinhaltet auch die bei der Forstwirtschaft bzw. forstwirtschaftlichen Bodennutzung entstehende Verdichtung (Kommission der europäischen Gemeinschaften 2006).

Im Rahmen der freiwilligen Massnahmen wird auf europäischer Ebene beispielsweise das Modell DPSIR (Abkürzung für Driving forces, Pressures, States, Impacts and Responses) verwendet. Damit werden unter anderem Bodenschutzprobleme erfasst, deren zeitliche Veränderung überwacht sowie die dahinter stehenden Kräfte, Einflüsse und Aktionen kontrolliert und gesteuert. Dieses Modell erlaubt es, Umweltbelastungen und Umweltschutzmassnahmen systematisch und nachvollziehbar darzustellen. Es wird zum Beispiel von der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency EEA), dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme UNEP) und dem Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) verwendet. Dieses Modell bezweckt die Umsetzung einer nachhaltigen Bodennutzung (Lüscher et al. 2008). Zunächst werden die treibenden Kräfte (D) bestimmt, die ihrerseits wieder Belastungen (P) auslösen, die zu einem bestimmten Zustand (S) führen. Aus diesem Zustand ergeben sich direkte und indirekte Wirkungen (I). Diese rufen Gegenmassnahmen im Sinne einer Reaktion (R) hervor. Dieser Ansatz zeichnet einen Weg für eine direkte Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik auf. Ebenfalls lässt sich eine Strategie für den Wissenstransfer daraus ableiten (Lüscher et al. 2008).

Auf europäischer Ebene orientiert sich die nachhaltige Bodennutzung am Modell DPSIR

1.10 Situation in Deutschland

In der deutschen Waldwirtschaft hat der Physikalische Bodenschutz einen hohen Stellenwert. Er ist auf Bundesebene im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998), im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2002) und im Bundes-Waldgesetz (BWaldG 1975) verankert. Von den Anforderungen her werden die deutlichsten Ziele im Bundesnaturschutzgesetz formuliert; es schreibt vor, dass die Funktionsfähigkeit, Regenerationsfähigkeit und nachhaltige Nutzbarkeit des Bodens auf Dauer gesichert sein müssen (Kremer et al. 2009). Das Bundesbodenschutzgesetz hingegen beschränkt sich auf Aussagen zur nachhaltigen Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktionen. Das Bundes-Waldgesetz hebt die Funktion der Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes hervor und sieht auch mögliche Nutzungseinschränkungen vor. Der Erhalt des

Waldes dient der Sicherung der Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, einschliesslich der Bodenfruchtbarkeit (BWaldG 1975; Choudhury et al. 2001).

Auf der Ebene der Bundesländer gelten die jeweiligen Ausführungsgesetze (z. B. BayBodSchG 1999). Ihre praktische Bedeutung für die Forstwirtschaft blieb gering, da das Bodenschutzrecht hinter den Waldgesetzen als spezielleres Recht grundsätzlich zurücktritt. Ähnliches gilt für das 2007 in Kraft gesetzte Umweltschadengesetz (USchadG). Landeswaldgesetze, wie etwa für Baden-Württemberg (LWaldG 1995) oder Bayern (BayWaldG 2005), greifen also hauptsächlich über ihre Bewirtschaftungsvorschriften. In ersterem steht im Hinblick auf den Bodenschutz die Erhaltung der Fruchtbarkeit des Waldbodens im Mittelpunkt, in letzterem ist der Waldboden «pfleglich zu behandeln». In beiden Fällen kommt dem Bodenschutz eine auch flächenmässig hervorgehobene Bedeutung zu, da auch die Feinerschliessungslinien dem «Waldboden» zuzurechnen sind.

Auf Anregung der Forstchefkonferenz konnte man sich in der Arbeitsgruppe Boden beim KWF 2009 auf folgende Aspekte einigen:

- > Befahrung nur auf Rückegassen
- > Rückegassen unabhängig vom aktuellen Bestand planen, permanent anlegen und Lage dokumentieren
- > Rückegassen so nutzen, dass die Befahrbarkeit erhalten bleibt, keine Erosion entsteht und die waldästhetischen Ansprüche erfüllt werden
- > Massnahmen zur Schonung der Rückegassen (organisatorische und technische) im Voraus planen
- > Kosten der Behebung von Schäden internalisieren (Verursacherprinzip).

Zu den Umsetzungsmechanismen, die Anliegen des Bodenschutzes enthalten, zählen bundesweit Richtlinien von Forstverwaltungen, Merkblätter und Leitlinien zur Zertifizierung. Die Richtlinien mit Bezug zum physikalischen Bodenschutz im Wald fast aller Bundesländer beziehen sich auf die Feinerschliessung. Alle fordern derzeit ein permanentes Rückegassennetz sowie den Erhalt der technischen Befahrbarkeit. Sie verbieten Maschinenbewegungen ausserhalb von Rückegassen und sonstigen Wegen (Schack-Kirchner und Hildebrand 2009).

Als Beispiel kann die Broschüre zum Bodenschutz der Bayerischen Staatsforsten herangezogen werden, wo neben dem Verbot flächiger Befahrung eine systematische Feinerschliessung mit dauerhaften Rückegassen vorgeschrieben wird, sowie weitere technische Parameter der Feinerschliessung und der eingesetzten Maschinen entsprechend ihrer Relevanz behandelt werden (Kremer et al. 2009, BaySF 2010). Weiter wird festgehalten, dass bestehende Rückegassen nach Möglichkeit in eine neue Planung übernommen werden und in der Regel bei Rückegassen keine Erdbauarbeiten erfolgen sollen. Diese Aspekte eröffnen dem Bewirtschafteter die Möglichkeit, schon in der Planungsphase und bei der Ausschreibung von Holzerntearbeiten adäquate Arbeitsverfahren und angepasste Technik zu fordern, was in der Regel auch konsequent umgesetzt wird. Desgleichen wird nach Abschluss jeder Massnahme eine gründliche Kontrolle unter dem Aspekt des Bodenschutzes gefordert, die auch zu dokumentieren ist. Damit wird ein Qualitätssicherungssystem geschaffen, in dem stetige Verbesserung oberstes Ziel bleibt.

Zahlreiche Richtlinien zum Bodenschutz in den deutschen Bundesländern

Als weiteres Beispiel kann die umfassende «Richtlinie Feinerschliessung» der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg aufgeführt werden (ForstBW 2003), der ein ausgeprägt vorsorgeorientiertes Konzept zugrunde liegt. Nachfolgend werden einige wichtige Punkte aus dem Inhalt aufgeführt:

- > Abteilungsübergreifende Erfassung und Analyse der Feinerschliessungssituation
- > Anpassung vorhandener Feinerschliessungsnetze
- > Neuanlage von Rückegassen-Netzen
- > Kennzeichnung von Rückegassen-Netzen zur Sicherung der Wiederauffindbarkeit
- > Erhaltung und (Wieder-) Herstellung der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen: Vermeidung von Spurbildung
- > Vorgehen bei Kalamitäten
- > Bodenkundliche Erkenntnisse und Folgerungen
- > Rahmenbedingungen

Bei der Planung der Feinerschliessung wird von folgenden Grundsätzen ausgegangen:

1. flächiges Befahren ist zu unterlassen
2. Rückegassen sind permanente Feinerschliessungslinien
3. Rückegassen werden grundsätzlich nicht befestigt
4. Rückegassen sind maximal 4 Meter breit
5. Rückegassen sind dauerhaft zu kennzeichnen und auf Karten zu dokumentieren
6. bestehende Gassen sind auch bei suboptimaler Lage in eine neue Planung zu übernehmen.

Dem Konzept liegt eine Klassifikation der ökologischen und technischen Befahrungsempfindlichkeit nach Bodenarten- bzw. Substratgruppen, die aus der Standortkarte abzugreifen sind, zugrunde. Danach richten sich die Wahl der Feinerschliessungsmittel und die Linienführung.

In der Praxis soll die Schutzstrategie mit Hilfe eines Ablaufschemas umgesetzt werden. Dieses bietet zu den wichtigen Punkten «Zustandserfassung, Analyse und Anpassung» folgende Entscheidungshilfen:

1. Entscheidungshilfe «Technischer Standard von Feinerschliessungsmitteln»
 - Neigung
 - Breite
 - Ausbaustandard
2. Entscheidungshilfe «Feinerschliessungsmittel in Abhängigkeit von Morphologie und Substrat»
 - Flach/Hang jeweils 2-stufig nach Empfindlichkeitsklassen
3. Entscheidungshilfe «Linienführung von Feinerschliessungsmitteln»
 - Linienverlauf
 - Linienführung
 - Abstände

Als Maxime wird verlangt, dass die technische Befahrbarkeit erhalten bleiben muss. Zur Wiederherstellung der Rückegassen wird sogar deren Befestigung empfohlen. Dies kann zum vollständigen Erliegen der ökologischen Funktionalität der Böden führen. Bodenschäden werden zwar bei jeder Belastung unabhängig vom Substrat postuliert, jedoch nicht konkret definiert. Maschinenparameter finden keine Berücksichtigung bei den Entscheidungshilfen.

Als letztes Beispiel sollen zwei Broschüren der Forstverwaltung des Freistaats Thüringen erwähnt werden: «Bodenschutz und Holzernte» (ThüringenForst 2008) sowie «Bodenschutz und Walderschliessung» (ThüringenForst 2009). Sie sind übersichtlich aufgebaut und als Hilfe für den Forstpraktiker bei der Holzernte und Walderschliessung gedacht, mit einem besonderen Akzent auf der Bodenschonung. Auch hier werden permanente Feinerschliessungslinien angestrebt. Erwähnenswerte Punkte finden sich in folgenden Kapiteln:

1. Definitionen

- Bodenschäden (Verlust der Bodenfunktion infolge Verdichtung)
- technische Befahrbarkeit (Erhalt des Rückegassennetzes über die Produktionszeit des Bestandes hinaus)
- Bodenreaktion (Typisierung, Einflussgrößen und Kriterienkomplex)
- Ansprache im Gelände (Spurbildung 3 Klassen: 0–30 cm tolerierbar, 30–60 cm kritisch, >60 cm nicht vertretbar). Wenn mit kritischer Spurbildung zu rechnen ist, soll die Massnahme nicht begonnen werden. Bei 20 % kritischen Spuren wird die Massnahme unterbrochen (diese Art der Verformung ist als alleiniges Kriterium nach neuen Erkenntnissen fragwürdig).

2. Technische Massnahmen

- Traktionsprobleme vermeiden
- Mindeststandards für Forstmaschinen (Antriebe, Achslastverteilung, Bereifung, Bänder).

3. Bodenschonende Holzernteverfahren

- Beurteilt werden Bestandesschäden, Bodenbelastung, Arbeitsbelastung und Unfallgefahr jeweils in 5 Klassen von sehr gering bis sehr hoch.

4. Praxisbezug

- Detaillierte Umsetzungsstrategien von der Verantwortung bis zu den Kosten des Bodenschutzes werden aufgeführt. Spezielle Arbeitsauftragsbegleitblätter dienen der Dokumentation von Vorbereitung, Nachbereitung und Unterbrechung der Massnahmen. Vorgaben zur Formulierung von Risiken in Ausschreibungen und schriftlicher Dokumentation der Unterbrechungen sowie der dadurch entstehenden Mehrkosten sind zu befolgen. Letztendlich werden Zahlen zur Erhöhung der Festmeterkosten geliefert sowie die Möglichkeiten von Zuschlägen für Erschwernisse angesprochen.

Die drei oben angeführten Beispiele sollen das Spektrum der Ansätze sowie unterschiedliche Schwerpunkte aufzeigen. Deutlich wird dadurch, dass sich trotz ähnlicher Ziele und gemeinsamen Anstrengungen kein einheitliches Herangehen an den Bodenschutz in der Waldbewirtschaftung abzeichnet.

2 > Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald

Die Räumungsarbeiten nach dem Orkan Lothar führten vielerorts zu gravierenden Bodenschäden. Daraus entstand in der Forstpraxis das Bedürfnis nach Aus- und Weiterbildung im Bodenschutz bei der Holzernte, so dass die WSL im Jahr 2001 bei der Burgergemeinde Bern einen ersten Kurs zu diesem Thema durchführte. In der Folge weiterer Kurstätigkeit zeigte sich bald einmal der Bedarf nach umfassenderen Grundlagen. Nach verschiedenen kleineren Projekten wurde 2004 an der WSL das Projekt Physikalischer Bodenschutz entwickelt und mit dem BAFU abgestimmt. Es handelt sich um ein gemeinsames, interdisziplinäres Projekt der Forschungseinheit Waldböden und Biogeochemie und der Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme. Fachlich unterstützt wurde das Projekt vom Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaften und angewandte Informatik der Technischen Universität München. Eine Begleitgruppe mit Vertretern aus der Praxis (Anhang A1-2) hat das Projekt von Anfang an begleitet und stets wichtige Anregungen eingebracht. Die Projektdauer wurde auf vier Jahre festgelegt (2006–2010). Zum Projektinhalt gehörten sowohl Forschungsarbeiten als auch Weiterbildungskurse für die verschiedenen Akteure in der Waldbewirtschaftung. Mehrjährige Vereinbarungen mit der Abteilung Wald des Kantons Aargau (2009–2011) erlaubten zusätzlich das Erarbeiten von umfassenden Umsetzungsmassnahmen auf Stufe Kanton.

Das Projekt Regeneration von verdichteten Böden durch Schwarzerlen, finanziert durch den Wald- und Holzforschungsfonds und gemeinsam durchgeführt mit der ETH, lieferte ergänzende Resultate im Bereich der aktiven Verbesserung von Wurzelraumfunktionen nach Bodenschäden (Kap. 5.5).

2.1 Ausgangslage

Mit Untersuchungen auf Lothar-Reservatsflächen (Kap. 5.3) konnte gezeigt werden, dass bei Räumungsarbeiten Bodenbeeinträchtigungen und Schäden in unterschiedlichem Ausmass entstanden sind. Die Verdichtungsgefährdung des Bodens wurde damals zum Teil bei der Konzeption und Durchführung der Räumungsarbeiten nur wenig berücksichtigt.

Im Rahmen des dritten Landesforstinventars LFI (Brändli 2010) wurden auf dem Stichprobenraster von 2004–2006 erstmals die sichtbaren Fahrspuren erfasst und so ein gesamtschweizerischer Überblick erarbeitet. Dabei wurden die Spurtypen «leicht», «mässig» und «stark» unterschieden, welche den im Kapitel 4.1.1 klassierten Spurtypen 1, 2 und 3 entsprechen. Ein Auszug aus den Ergebnissen des Landesforstinventars LFI3 (Schwyzer und Keller 2009) ist in Tabelle 2 aufgeführt. Danach sind 2 % der gesamten befahrbaren Waldfläche der Schweiz durch Fahrspuren beeinträchtigt, was

Erhebung der Bodenschäden
im Landesforstinventar LFI3

einer Fläche von 13 300 ha entspricht. Für die Forstregion Mittelland, mit dem höchsten Anteil an befahrbarer Waldfläche, sind es knapp 4 %. Der Anteil stark gestörter Fläche (Spurtyp 3) beträgt gesamtschweizerisch 0.2 % der befahrbaren Waldfläche bzw. knapp 1400 ha. Die befahrbare Waldfläche wurde im Landesforstinventar anhand der auf den Stichprobenflächen zum Einsatz kommenden Arbeitsverfahren ermittelt. Folglich handelt es sich um Waldflächen mit Hangneigungen bis ca. 45 % und genügender Bodentragfähigkeit. Neben den aktuellen Ergebnissen des Landesforstinventars sind insbesondere die Folgeaufnahmen von Interesse, da sich damit auf dem Stichprobenraster zeigen wird, wie sich die Befahrungssituation entwickelt.

Tab. 2 > Fahrspuren im Schweizer Wald gemäss Landesforstinventar LFI3

Forstliche Produktionsregion	Waldfläche mit Fahrspuren (Spurtyp 1–3). 100 % = gesamte befahrbare Waldfläche der Schweiz		davon Waldfläche mit Spurtyp 3 (Spurtyp 3 = Bodenschaden aus ökologischer Sicht)	
	%	ha	%	ha
Mittelland	3,6	8 075	0,2	449
Voralpen	1,2	1 535	0,3	384
Alpen	0,4	435	0,1	109
Alpensüdseite	0,1	27	0,0	0
Jura	1,8	3 425	0,3	381
Schweiz	2,0	13 566	0,2	1 357

nach Schwyzer und Keller 2009, verändert

2.2

Zielsetzung

Das Projekt hatte zum Ziel, Grundlagen für den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte zu schaffen und alle an der Waldbewirtschaftung beteiligten Akteure für eine schonende Befahrung der Waldböden zu sensibilisieren. Im Einzelnen umfasste das Projekt folgende Aktivitäten:

- > Bereitstellen von Grundlagen zu den Bereichen Boden und Maschineneinsatz, angepasst an die Verhältnisse im Schweizer Wald
- > Einrichten von Versuchsflächen für Forschung und Ausbildung (Kap. 5.2)
- > Durchführen von Befahrungsversuchen zur Spurbildung unter kontrollierten Bedingungen (Kap. 5.4)
- > Analysieren der Bodenbeeinträchtigung und ableiten einer praxisgerechten Formulierung auf der Grundlage von verschiedenen Fahrspurtypen (Kap. 4)
- > Verknüpfen von bodenphysikalischen und biologischen Prozessen um die Spurtypen abzugrenzen (Kap. 4.2.3)
- > Untersuchen von Regenerationsmassnahmen für mechanisch belastete Böden (Kap. 5.5)
- > Integrieren der betrieblichen und hoheitlichen Prozesse des physikalischen Bodenschutzes in das forstliche Managementsystem (Kap. 6)
- > Aufzeigen, in welchen Bereichen der physikalische Bodenschutz Kosten verursacht und in welcher Grössenordnung diese liegen (Kap. 6.6)
- > Entwickeln stufengerechter Ausbildungsunterlagen und zielgruppenorientierter Weiterbildungsangebote (Kap. 6.2.1).

Umfassende Einbindung des Bodenschutzes in die forstlichen Massnahmen

2.3

Vorgehen

In verschiedenen Regionen des schweizerischen Mittellandes wurden auf typischen Waldstandorten Versuchsflächen mit unterschiedlichen boden- und vegetationskundlichen Grundlagen ausgewählt. Diese wurden detailliert analysiert und für Untersuchungs- und Ausbildungszwecke eingerichtet (Kap. 5.2). Die Versuchsflächen wurden auch bezüglich ihrer Feinerschliessung und deren Zustand kartiert. Beurteilt wurden die Fahrlinien auf der Grundlage der entwickelten Fahrspurtypisierung. Diese Erhebung bildete eine Basis zur Untersuchung der bodenphysikalischen und -biologischen Zusammenhänge. Befahrungsversuche (Kap. 5.4) unter kontrollierten Bedingungen schufen die Voraussetzungen um die Spurbildung unter bekannten Rahmenbedingungen zu untersuchen. Auf Lothar-Reservatsflächen wurden unterschiedliche Befahrungskonzepte angesprochen sowie auch Regenerationsmassnahmen eingeleitet. Schliesslich wurden zahlreiche Flächen als Kursobjekte für Weiterbildungsveranstaltungen vorbereitet.

Ein bis zwei Mal pro Jahr wurde die aus Vertretern vom BAFU, forstlichen Ausbildungsinstitutionen, forstlichen Verbänden und Forstpraxis zusammengesetzte Begleitgruppe (Anhang A1-2) über die durchgeführten und die geplanten Arbeiten im Projekt orientiert. Angesichts des hohen Stellenwertes der Aus- und Weiterbildung im physikalischen Bodenschutz sowie der Schaffung entsprechender Kursunterlagen wurde zusätzlich eine spezielle Gruppe für Ausbildungsfragen gebildet, die sich aus Vertretern der forstlichen Bildungsinstitutionen sowie einer Vertreterin des BAFU für didaktische Fragen zusammensetzte (Anhang A1-3).

Projektbegleitung durch
Fachleute aus der Praxis

2.4

Produkte

Aufgrund der thematischen Vielfalt des Projektes und des breiten Zielpublikums ist auch die Palette der aus dem Projekt entstandenen Produkte entsprechend vielfältig (Anhang A2):

- > Publikationen in forstlichen und landwirtschaftlichen Fachzeitschriften
- > Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften
- > Artikel in der Tagespresse
- > WSL-Merkblatt für die Praxis, bei Bedarf Ergänzung durch Faltblätter
- > vorliegende Publikation

Parallel zu den Arbeiten im Projekt wurden von Projektbeginn an zahlreiche Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen für alle an der Waldbewirtschaftung beteiligten Akteure durchgeführt: Waldeigentümer, Betriebsleiter, Forstunternehmer, Maschinenführer, Forstdienste und Forstbehörden, Bodenschutzfachstellen, Umweltorganisationen sowie Zertifizierungsverantwortliche. Insgesamt konnten so bisher rund 1900 Teilnehmer geschult werden. Eine detaillierte Zusammenstellung über die sehr umfangreiche Kurstätigkeit findet sich im Anhang A9.

Breite Umsetzung der Ergebnisse
in die Praxis

In der Ausbildungstätigkeit wurden verschiedene Schwerpunkte gesetzt. So wurden 2006 insbesondere Vertreter der kantonalen Bodenschutzfachstellen geschult, 2007 waren es Ausbildungsverantwortliche der Kantone und 2008 kantonale forstliche Berufsschullehrer.

Der Inhalt der eintägigen Kurse umfasst den natürlichen Bodenaufbau, die Merkmale verdichteter Böden, die verschiedenen Spurtypen sowie mögliche organisatorische und forsttechnische Massnahmen zum Schutz des Bodens.

2.5 Programm zukunftsfähige Waldnutzung

Das Forschungsprogramm der WSL «Management zukunftsfähige Waldnutzung» hatte zum Ziel, Grundlagen, Methoden und Instrumente für das forstbetriebliche Management zu entwickeln, um die Waldnutzung vor allem in ökonomischer Hinsicht effizienter und effektiver zu gestalten und zu lenken. Dabei wurde auf die Holznutzung fokussiert und mittels innovativer praxistauglicher Lösungen eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Betrieben und Produkten angestrebt.

Als Ergebnisse des Forschungsprogramms liegen Grundlagen, Methoden und Instrumente für das forstbetriebliche Management vor. Im Rahmen des Programmabschlusses im Oktober 2009 wurde ein Buch erstellt, das die wichtigsten Projekte bzw. Ergebnisse dokumentiert (Thees und Lemm 2009). Diese Dokumentation ist als eine Sammlung von über 30 reviewten Fachbeiträgen aufgebaut. Für die Darstellung der Programmresultate wurden sechs Themenbereiche unterschieden, einer davon umfasst den physikalischen Bodenschutz. Darin sind einzelne in vorliegender Publikation vorhandene Aspekte vertieft beschrieben. Diese betreffen insbesondere die Grundlagen für das Management des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte. Dabei liefern rechtliche, ökologische und ökonomische Analysen die Grundlagen, um die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes im Wald zu professionalisieren. Es handelt sich im Einzelnen um folgende Beiträge:

- > Gesetzliche Grundlagen für den physikalischen Bodenschutz (Iten 2009)
- > Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung (Lüscher et al. 2009b)
- > Konzeptionelle Überlegungen zum Management des physikalischen Bodenschutzes (Spjevak und Thees 2009a)
- > Modellgestützte Bestimmung des Nutzens von Forstmaschinenausrüstungen für den physikalischen Bodenschutz (Spjevak et al. 2009b).

Einbindung des Bodenschutzes in
das forstbetriebliche Management

3 > Bodenkundliche Grundlagen

Boden stellt einen Grenzbereich zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Geosphäre dar. Grenzschichtphänomene sind meist komplex und daher nicht einfach zu verstehen. Wer diese Grenzbereiche nutzt – wie beispielsweise die Waldwirtschaft – muss Rahmenbedingungen erkennen und akzeptieren. Daher sind Kenntnisse über das Schutzgut Boden unabdingbar.

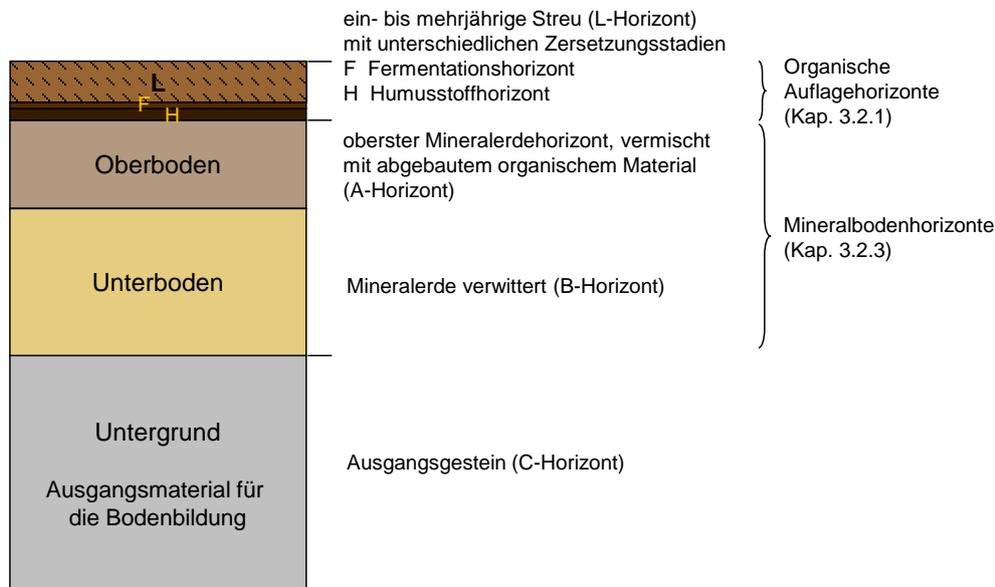
Böden bilden die oberste Schicht der Erdkruste und reichen in ihrer Mächtigkeit von der Bodenoberfläche bis zum Ausgangsgestein. Boden besteht aus Festsubstanz und Porenraum, der mit Wasser und Luft ausgefüllt ist. Die Bodenfestsubstanz enthält mineralische und organische Bestandteile mit spezifischen Eigenschaften. In den mit Luft und Wasser gefüllten Poren findet ein Stoff- und Energieaustausch zwischen der Bodenfestsubstanz, dem Ausgangsgestein, der Atmosphäre, der Hydrosphäre sowie den Bodenlebewesen und den Pflanzen statt.

Boden besteht aus festen Bestandteilen und Hohlräumen, die mit Wasser und Luft gefüllt sind

Die Bodenbildung ist ein kontinuierlicher Entwicklungsprozess, der durch die Bodenbildungsfaktoren gesteuert wird. Dazu gehören Ausgangsgestein, Klima, Relief und Organismen, welche alle im Laufe der Zeit – meist seit der letzten Vergletscherung – auf die Bodenbildung einwirken.

Zu den wichtigsten Bodenbildungsprozessen gehören Verwitterung (physikalisch, chemisch, biologisch), Humusbildung, Gefügebildung, Mineralneubildung sowie Verlagerung von Tonmineralien, Nährstoffen und Humusstoffen. Der Einfluss der einzelnen Bodenbildungsfaktoren führt zur Bildung von unterschiedlich aufgebauten Böden (Kap. 3.2.4) mit bestimmten Bodenmerkmalen und Eigenschaften (Kap. 3.3) in meist oberflächenparallel verlaufenden Schichten, die zu Bodenhorizonten zusammengefasst werden.

Für die Beurteilung des Verdichtungsrisikos sind der Bodenaufbau und bestimmte Bodeneigenschaften, die Kräfte abstützen können, entscheidend (Lüscher 2013). In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen für diese Beurteilung präsentiert.

Abb. 4 > Schematischer Bodenaufbau

3.1

Hauptfunktionen der Böden

Ein intakter Boden erfüllt eine Vielzahl von Funktionen. Nachfolgend werden die Wichtigsten davon erläutert:

- > Böden dienen am Standort höheren Pflanzen als Wuchsort, wo sie Wasser, Nährstoffe und Verankerungsmöglichkeiten finden. Die Bodenfruchtbarkeit ist deshalb die bedeutsamste Eigenschaft eines Bodens, denn die Vegetation muss sich den natürlichen Gegebenheiten anpassen. Für die Land- und Waldwirtschaft ist der Boden die Produktionsgrundlage.
- > Böden besitzen eine enorme Pufferkapazität gegen Versauerung und bilden zudem einen wirksamen Filter für unerwünschte Stoffe, die das Grundwasser belasten und dadurch die Trinkwasserqualität gefährden können. Durch diese Filterwirkung werden viele solcher unerwünschter Stoffe, zum Beispiel Schwermetalle, im Boden für eine sehr lange Zeit gespeichert und können über den Nährstoffkreislauf wieder in die Biosphäre zurückgelangen.
- > Böden sind Lebensraum für unzählige tierische und pflanzliche Bodenlebewesen wie Bakterien, Milben, Insekten, Nematoden, Würmer und Pilze. Alle diese Lebewesen bilden eine Zersetzerkette und haben bestimmte Funktionen beim Abbau, Umbau und Neuaufbau der organischen Substanz. Darüber hinaus tragen sie durch die Ausscheidung organischer Säuren zur Gesteinsverwitterung sowie zur Mobilisierung von Mikronährstoffen bei. Mykorrhizapilze begünstigen die Wasser- und Nährstoffaufnahme vieler Pflanzen, insbesondere von Waldbäumen. Durch die Aktivität der Wurmfauna entstehen Ton-Humus-Komplexe, günstige Gefügeformen und leitende Hohlräume. Diese Bodenlebewesen sind in ihrer Gesamtheit kaum sichtbar oder zählbar, aber dank der grossen Diversität all dieser Lebensformen bleiben die wichtigsten Funktionen unserer Böden gewährleistet.

Der Boden lebt

3.2 Bodenaufbau im Wald

Waldböden unterscheiden sich von Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung vor allem durch die organischen Auflagehorizonte und die ungestörte Abfolge der Horizonte. Der ungehinderte Abbau von organischem Material (keine mechanische Bearbeitung des Bodens, keine Zugabe von Hilfsstoffen) führt zur Ausbildung von standortstypischen Oberböden, den sogenannten Humusformen, welche Rückschlüsse auf die biologische Aktivität und Abbaufähigkeit eines Standortes ermöglichen (Kap. 3.2.2) – indirekt können dadurch auch Aussagen zum Verdichtungsrisiko und zur Regenerationsfähigkeit eines Standortes gemacht werden.

Eine weitere Eigenheit von Waldböden sind die kleinräumig stark variierenden Bodeneigenschaften.

Unter Wald ergeben sich auch unterschiedliche Durchwurzelungssituationen, die den Porenraum je nach Baumartenzusammensetzung und Bestandesaufbau während unterschiedlich langer Zeit beanspruchen und mit den verholzten Wurzeln beeinflussen.

Waldböden haben einen natürlichen Aufbau

3.2.1 Organische Auflagehorizonte

Frische Vegetationsrückstände werden durch die Bodenorganismen je nach biologischer Aktivität unterschiedlich schnell umgewandelt. Es entstehen verschiedene Zersetzungsstadien, die als organische Auflagehorizonte beschrieben werden: Der L-Horizont, welcher weitgehend aus unzersetzter, frischer Streu besteht, der F-Horizont, in welchem die Pflanzenreste vermodert (fermentiert) vorliegen und der H-Horizont, in dem das organische Material vorwiegend zu Huminstoffen abgebaut ist (Abb. 6–8).

3.2.2 Humusformen

Humusformen werden aufgrund der Horizontfolge und der Ausprägung der einzelnen organischen Auflagehorizonte beschrieben und definiert (Abb. 5). Ein weiteres Kriterium ist die Mächtigkeit des humushaltigen Mineralerdehorizontes (A-Horizont, Kap. 3.2.3). Humusformen sind ein integraler Indikator für das Nährstoffumsetzungsvermögen im Oberboden und damit auch für die biologische Bodenaktivität an einem Standort. Störungen im Oberboden hemmen die Nährstoffumsetzung und -verfügbarkeit. Bei starker Beeinträchtigung ist die Keimbeetfunktion des Oberbodens für die natürliche Verjüngung gefährdet. Die Humusformen, ihr Aufbau und ihre Lagerung erlauben erste Hinweise auf das Verdichtungsrisiko eines Bodens. Je höher der Anteil an organischer Substanz im Oberboden ist, umso geringer ist das Verdichtungsrisiko. Die Verdichtung kann sich bis in den Unterboden auswirken, wo die Regenerationsfähigkeit eingeschränkter ist.

Die Humusformen geben Hinweise auf die Befahrungsempfindlichkeit und das Regenerationsvermögen eines Bodens

Typische Humusformen (Mull, Moder, Rohhumus, Abb. 6–8) entstehen vorwiegend unter aeroben Bedingungen. Mull entsteht, wenn die Vegetationsrückstände innerhalb eines Jahres zersetzt werden und das abgebaute organische Material tiefgründig mit dem Mineralboden vermengt wird (A-Horizont). Rohhumus zeichnet sich durch eine langsame Zersetzung der Vegetationsrückstände und dementsprechend mächtige organische Auflagehorizonte sowie durch eine geringe Durchmischung mit dem darunter-

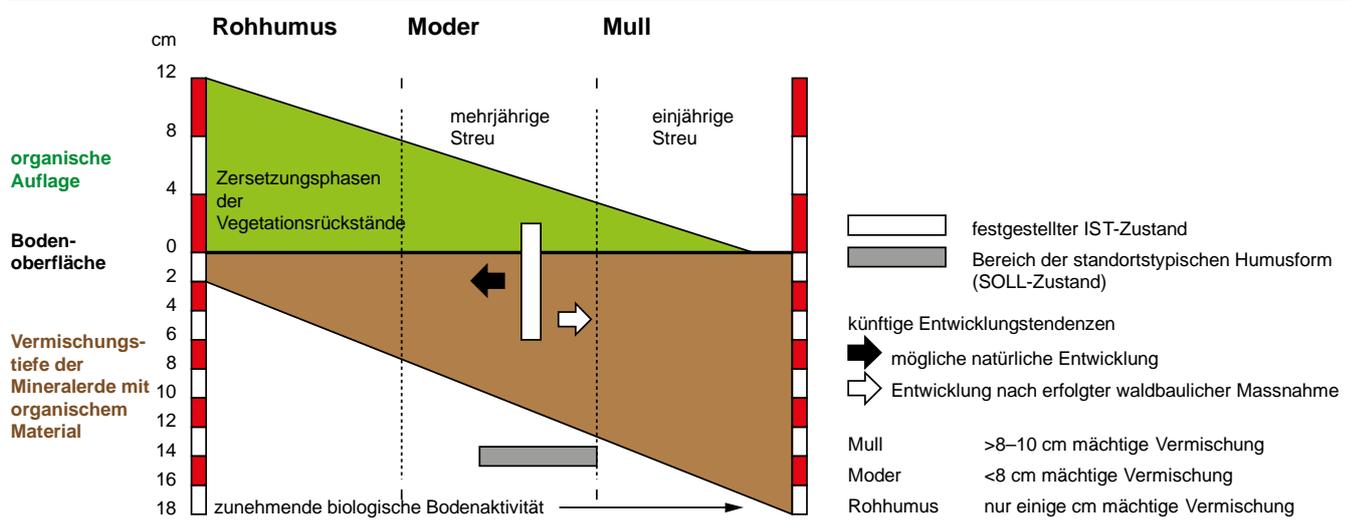
liegenden Mineralboden aus. Die Humusform Moder liegt zwischen Mull und Rohhumus und zeugt von einer leicht eingeschränkten biologischen Bodenaktivität.

Neben den typischen Humusformen werden je nach Wasser- und Lufthaushalt im Oberboden noch Xerohumusformen (trockene Ausprägung), Feuchthumusformen (feuchte Ausprägung), Nasshumusformen (nasse Ausprägung) und spezielle Humusformen unterschieden. Liegt ein Torf oder ein Anmoor vor, ist von einer Befahrung abzusehen.

Je nach dem standortspezifischen Auftreten der Humusform ergibt sich für den Oberboden ein unterschiedliches Bild. Die Mächtigkeit des Oberbodens ist an der dunkleren Farbe, hervorgerufen durch den Humusgehalt, erkennbar. Je höher der Humusgehalt umso dunkler bis schwärzlich ist in der Regel die Bodenfarbe. In den standortkundlichen Grundlagenwerken der einzelnen Kantone oder in der Wegleitung für Pflegemassnahmen im Schutzwald (Frehner et al. 2005) sind SOLL-Werte für die Humusformen der einzelnen Waldstandortstypen aufgeführt. Damit sind unter idealen, naturnahen Voraussetzungen die Mächtigkeiten der Oberböden mittels der Humusform indirekt definiert. Differenzen zwischen dem SOLL-Zustand einer Humusform und der beobachteten Mächtigkeit des Oberbodens (IST-Zustand) lassen sich meist durch waldbauliches Handeln in der Vergangenheit erklären (Abb. 5).

Die waldbaulichen Massnahmen beeinflussen die Humusform

Abb. 5 > Typische Humusformen und Entwicklungstendenzen durch die waldbauliche Tätigkeit



Zur Humusform Mull (L-Ah) gehören eine grosse biologische Aktivität mit raschem Abbau der Vegetationsrückstände (meist innerhalb eines Jahres) und die innige Vermischung von Humusstoffen und mineralischer Feinerde. Diese Vermischung, insbesondere durch Regenwürmer, führt zu stabilen Ton-Humus-Verbindungen und in der Regel zu Krümelstrukturen. Der Säuregrad reicht von stark sauer bis alkalisch. Die Mächtigkeit des Ah-Horizontes beträgt mehr als 8 cm (Abb. 6).

Im Moder (L-F-(H)-Ah) ist die biologische Aktivität reduziert. Die Streuzersetzung verläuft langsam und unvollständig. Es entsteht ein Fermentationshorizont aus mehrjährigen Vegetationsrückständen. Der Ah-Horizont ist meistens geringmächtiger und

weniger strukturiert als beim Mull. Der Säuregrad liegt im sauren bis sehr stark sauren Bereich (Abb. 7).

Im Rohhumus (L-F-H-Ah oder L-F-H-AE) ist die biologische Aktivität gering. Der Abbau der Vegetationsrückstände verläuft gehemmt. Die organischen Auflagehorizonte sind deutlich ausgeprägt und können mächtig sein. Der Ah-Horizont ist nur wenig strukturiert und geringmächtig, mit einem Säuregrad im sehr stark sauren Bereich. Oft sind unter der organischen Auflage Anzeichen einer Bleichung zu erkennen. Dieser Bereich (AE-Horizont) verarmt durch Auswaschung von Eisen und organischer Substanz (Abb. 8).

Abb. 6 > Mull

Wenig empfindlich bis empfindlich: locker gelagert, z. T. stabile Krümel, je nach Abbaumilieu unterschiedlich regenerationsfähig.

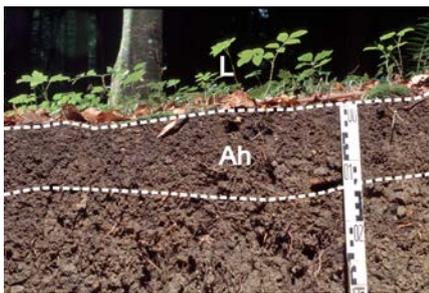


Abb. 7 > Moder

Empfindlich bis extrem empfindlich: geringe Vermischungstiefe, nur eingeschränkt regenerationsfähig.

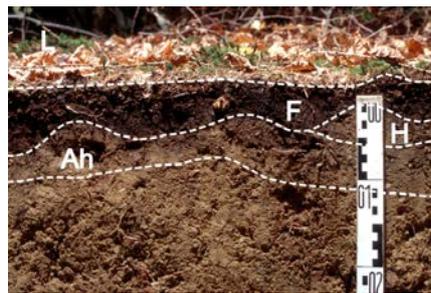
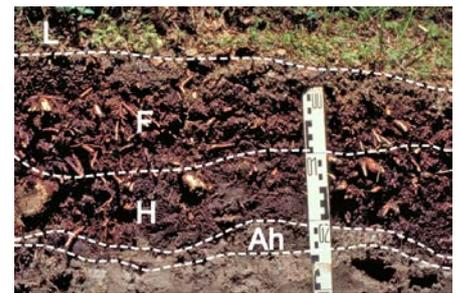


Abb. 8 > Rohhumus

Extrem empfindlich bis empfindlich: z. T. mächtige organische Auflagen, kaum regenerationsfähig.



Im Anhang A3 findet sich ein vereinfachter Schlüssel zur Bestimmung der Humusformen.

3.2.3 Mineralbodenhorizonte

Die Mineralbodenhorizonte (Abb. 4) werden in Oberboden (A-Horizont) und Unterboden (B-Horizont) eingeteilt. Darunter liegt das Ausgangsgestein (C-Horizont). A-, B- und C-Horizonte bestehen hauptsächlich aus mineralischen Bestandteilen. Der A-Horizont ist mit organischer Substanz vermischt. Die Mineralbodenhorizonte können anhand von Humusgehalt (Oberboden), Gefüge, Verbraunung, Vernässung sowie Verlagerung (Auswaschung, Anreicherung) unterteilt werden.

Bodenhorizonte entstehen durch die Bodenentwicklung

Der A-Horizont ist ein dunkler Durchmischungshorizont aus mineralischer Feinerde und abgebautem organischem Material. Er ist ein Milieu mit vielen Bodenlebewesen, meist intensiv durchwurzelt und locker gelagert.

Der B-Horizont wird auch als Mineralerdeverwitterungshorizont bezeichnet. Als Folge von Verwitterung, Verlagerung, Anreicherung und/oder Tonneubildung ist er braun gefärbt. Das Ausgangsgestein verwittert mit fortschreitender Bodenentwicklung. Es bilden sich neue, stabilere Mineralien und Aggregate. Üblicherweise erfolgt die Einmischung von organischem Material nicht bis in den B-Horizont. Ausnahmen bilden Einwaschungshorizonte, welche je nach Bedingungen auch mit Humusstoffen durch

Verlagerungsprozesse angereichert werden (Podsolierung). Weitere Verlagerungsprozesse betreffen den Ton (Lessivierung) und führen zur Parabraunerde (Kap. 3.2.4).

Der C-Horizont besteht aus mehr oder weniger verwittertem Ausgangsgestein. Dieses kann carbonatisch (>75 Masse-% Carbonate), mergelig (2 bis 75 Masse-% Carbonate) oder silikatisch (<2 Masse-% Carbonate) sein und als Lockergestein, Blöcke oder massives Gestein vorliegen.

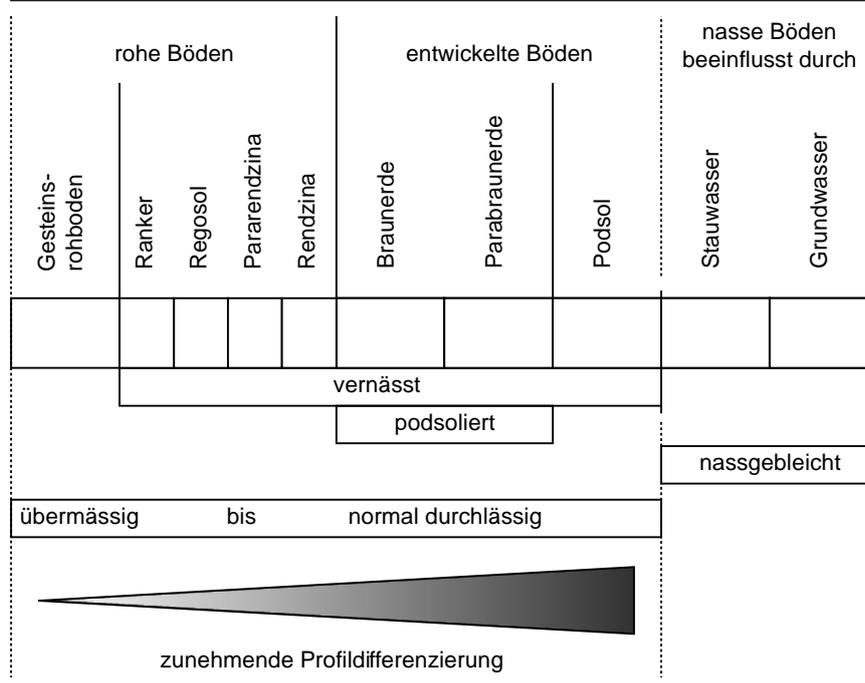
3.2.4 Bodentypen

Die Bodenbildung ist ein kontinuierlicher Entwicklungsprozess, der durch die Bodenbildungsfaktoren gesteuert wird. Dazu gehören Ausgangsgestein, Klima, Relief und Organismen, welche alle im Laufe der Zeit auf die Bodenbildung einwirken.

Zu den wichtigsten Bodenbildungsprozessen gehören Verwitterung (physikalisch, chemisch, biologisch), Humusbildung, Gefügebildung, Mineralneubildung sowie Verlagerung von Tonmineralien, Nährstoffen und Humusstoffen. Sie bestimmen das Aussehen (Morphologie) und die Eigenschaften von Böden. Diese Prozesse führen zur Ausbildung von Merkmalen und Eigenschaften in meist oberflächenparallel verlaufenden Schichten, die zu Bodenhorizonten zusammengefasst werden. Diese unterscheiden sich in ihrem Erscheinungsbild, aber auch durch ihre physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften. Je stärker und länger die Prozesse gewirkt haben, desto weiter entwickelt sind die Böden. Die Entwicklung geht von Gesteinsrohböden und Rohböden über Verwitterungsböden bis hin zu Böden mit Auswaschungs- und Anreicherungshorizonten. Nasse Böden werden durch Stau-, Hang- oder Grundwasser beeinflusst.

Bodenhorizonte kennzeichnen den Bodenaufbau und damit den Bodentyp

Abb. 9 > Vereinfachte schematische Übersicht zur Bodenentwicklung



Im Folgenden werden die in der Schweiz häufig vorkommenden Bodentypen vorgestellt und ihre Verdichtungsempfindlichkeit beurteilt. Weitere Hinweise bezüglich Verdichtungsrisiko auf Stufe Merkmal und Bodeneigenschaften folgen im Kapitel 3.3.

Rohe Böden

Der Gesteinsrohboden (Lithosol) (Ai bis (A)-C) besteht aus Humusauflagehorizonten auf Festgestein oder Lockergestein, meist extrem flachgründig (<15 cm), skelettreich, feinerdearm, z. T. mit vielen Kluft- und Spaltenfüllungen im Fels oder/und Hohlräumfüllung zwischen dem Skelett (Abb. 10).

Der Ranker (Ah-AC-C) besteht aus karbonatfreiem bzw. -armem Festgestein. Flach- bis mittelgründig, oft skelettreich. Ein Ranker kann verbraunt oder/und podsoliert sein (Abb. 11).

Der Regosol (Ah-AC-C) ist ein Boden aus karbonatfreiem bzw. -armem Lockergestein. Flach- bis mittelgründig, oft skelettreich. Ein Regosol kann verbraunt und/oder podsoliert sein. Auch vernässte Formen kommen vor (Abb. 12).

Die Rendzina (Ah-AC-C) entstand aus festem oder lockerem Karbonatgestein. Sie ist flach- bis mittelgründig, z. T. aber feinkörnig verwittert, oft skelettreich und verfügt in der Regel über eine aktive Humusform. Verbraunte sowie vernässte Formen kommen vor (Abb. 13).

Abb. 10 > Gesteinsrohboden

Nicht empfindlich.



Abb. 11 > Ranker

Auch mittelgründige Ranker sind nicht oder wenig empfindlich, wenn skelettreich.



Abb. 12 > Regosol

Auch mittelgründige Regosole sind nicht oder wenig empfindlich, wenn skelettreich.



Abb. 13 > Rendzina

Auch mittelgründige Rendzinen sind nicht oder wenig empfindlich, wenn skelettreich.



Entwickelte Böden

Die Braunerde (Ah-Bv-BC-C) verfügt über einen ausgeprägten braunen Verwitterungshorizont (Verbraunungshorizont, Bv). Es herrschen optimale Wasser- und Nährstoffspeicherverhältnisse, normale Durchlüftung, normale Wasserdurchlässigkeit und schwach bis stark saure pH-Verhältnisse. Sie ist mittel- bis sehr tiefgründig und kann podsolisiert und/oder vernässt sein (Abb. 14).

Die Parabraunerde (Ah-El-Bt-BC-C) ist durch Tonverlagerung aus dem lessivierten (aufgehellten) Oberboden (El) in den rotbraunen bis braunen Unterboden (Bt) gekennzeichnet. Damit wird in tieferen Bereichen des Profils die Wasser- und Nährstoffspeicherleistung, jedoch auch die Gefahr von Phasen mit örtlicher Staunässe, erhöht (Abb. 15).

Der Podsol (Ah-E-Bh-Bs-B-BC-C) verfügt über einen hellgrauen, säuregebleichten, an organischer Substanz verarmten Auswaschungshorizont E. Darunter liegen die nährstoffreichen Anreicherungshorizonte Bh und Bs; die dunklen Huminstoffe werden in den oberen Teil (Bh) eingewaschen, Fe- und Al-Oxide fallen darunter aus (Bs) und färben den Horizont rötlich-braun (Abb. 16).

Abb. 14 > Braunerde

Je nach Bodenart und -feuchte gering bis extrem empfindlich.



Abb. 15 > Parabraunerde

Je nach Bodenart und -feuchte gering bis extrem empfindlich.



Abb. 16 > Podsol

Gering bis mässig empfindlich da i.d.R. auf grobkörnigen, schnell drainierenden Bodenarten auftretend



Von Nässe geprägte Böden

Staunasse Böden

Ein Pseudogley (Ah-Sw-Sd) ist durch einen verdichteten Horizont mit geringer Wasserleitfähigkeit gekennzeichnet. Phasenweise, abhängig von den Niederschlagsverhältnissen, treten Staunässe und Trockenheit auf, wodurch ausgeprägte Vernässungsmerkmale entstehen (Abb. 17).

Oberflächennah staunasse Böden

Ein Stagnogley (Ah-ES-Sw-Sd) mit einem stark gebleichten Horizont kann bei langandauernden Wassersättigungsphasen bis zur Oberfläche entstehen. Die Auswaschung erfolgt mit absinkendem Wasserspiegel. (Abb. 18).

Nassböden

Ein Gley (Ah-Go-Gr) ist durch einen ständig hohen Grundwasserspiegel beeinflusst und besitzt dadurch einen wassergesättigten, blau-grau-grünlich gefärbten, wurzelfreien Reduktionshorizont (Gr). Der darüberliegende, rostfleckige Oxidationshorizont (Go) liegt im Schwankungsbereich des Wasserspiegels (Abb. 19).

Abb. 17 > Pseudogley

Je nach Bodenart und -feuchte gering bis extrem empfindlich.



Abb. 18 > Stagnogley

Je nach Bodenart und -feuchte gering bis extrem empfindlich.



Abb. 19 > Gley

Je nach Bodenart und -feuchte gering bis extrem empfindlich.



3.3 Bodenmerkmale und Bodeneigenschaften

Das Verdichtungsrisiko von Waldböden lässt sich anhand ausgewählter Bodenmerkmale, Bodeneigenschaften und der Geländeneigung abschätzen und beurteilen. Es sind dies der Stein-/Kiesgehalt, die Korngrössenzusammensetzung (Bodenart), das Gefüge, die Lagerungsdichte, die Durchlässigkeit, die Vernässung als Ausdruck für die durchschnittliche Durchlüftungssituation und der Humusgehalt. Die Bedeutung der aktuellen Bodenfeuchte für die Bodentragfähigkeit zum Zeitpunkt des Befahrens wird im Kapitel 6.4.2 erläutert.

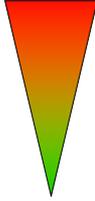
3.3.1 Stein- und Kiesgehalt

Zum Stein- bzw. Kiesgehalt (Skelettgehalt) eines Bodens werden alle mineralischen Bodenbestandteile mit einem Durchmesser von mehr als 2 mm gezählt (Kiesel, Steine und Blöcke). Der Skelettgehalt wird in Volumenprozenten (%_v) ausgedrückt. Mit zunehmendem Skelettgehalt nehmen der Feinerdeanteil und somit das für die Wurzeln nutzbare Bodenvolumen ab. Aufgrund der geringeren Verankerungsmöglichkeiten nimmt die Standfestigkeit der Bäume ab.

Das Skelett hat eine Stützfunktion und verleiht dem Boden eine gute Stabilität gegen mechanische Belastungen. Ein stark skeletthaltiger Boden ist gegen Verdichtung beim Befahren mit schweren Maschinen widerstandsfähiger als ein Boden mit geringerem Skelettgehalt (Tab. 3). Ab 50 %_v Skelett kann von unempfindlichen Böden und damit sehr geringem Verdichtungsrisiko ausgegangen werden.

Steine im Boden haben eine Stützfunktion bei mechanischen Belastungen

Tab. 3 > Einteilung des Skelettgehaltes nach Arbeitskreis Standortkartierung (1996)

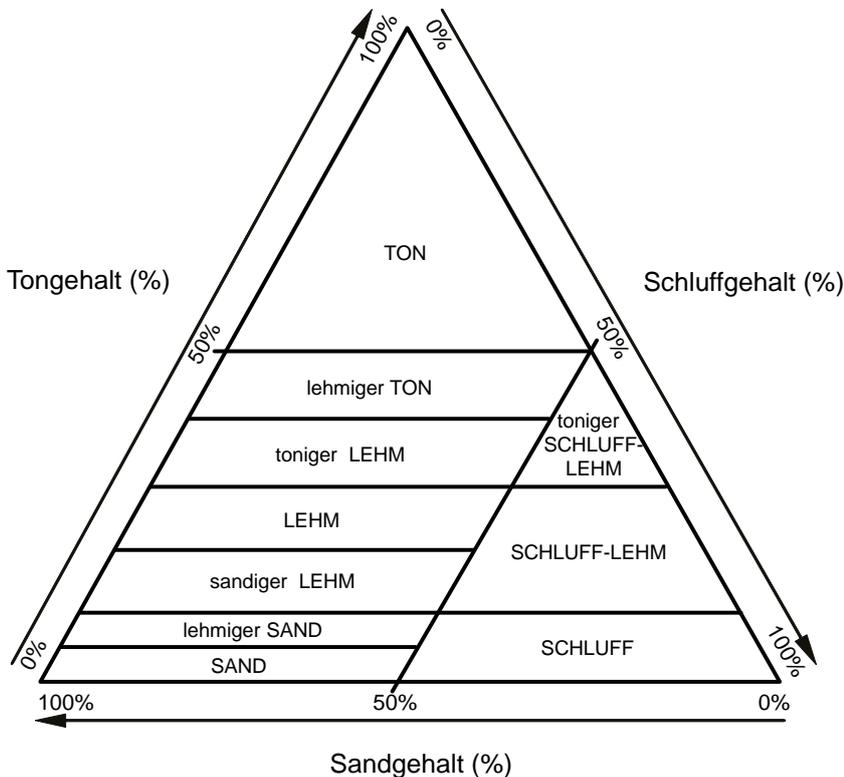
Skelettgehalt	Volumenprozent [% _v]	Empfindlichkeit
sehr schwach skeletthaltig	<2 % _v	
schwach skeletthaltig	2–10 % _v	
mittel skeletthaltig	11–25 % _v	
stark skeletthaltig	26–50 % _v	
sehr stark skeletthaltig	>50 % _v	
extrem stark skeletthaltig	>75 % _v	

3.3.2 Korngrössenzusammensetzung und Gefüge

Die Körnung, auch als Bodenart bezeichnet, kann zur groben Beurteilung des Verdichtungsrisikos, des Wasser- und Nährstoffspeichervermögens, des Lufthaushaltes sowie des Verwitterungszustandes eines Bodens verwendet werden. Sie ist Ausdruck der prozentualen Verteilung von Ton (Korndurchmesser <0,002 mm), Schluff (Korndurchmesser 0,002–0,063 mm) und Sand (Korndurchmesser 0,063–2 mm) in der Feinerde. Walthert et al. (2004) unterscheiden 10 verschiedene Körnungen. Deren Zusammensetzung kann aus dem Körnungsdreieck in Abbildung 20 herausgelesen werden. Im Anhang A5 ist ein Bestimmungsschlüssel für die Bodenart aufgeführt (Ansprache im Feld mittels Fühlprobe).

Die Körnung hat einen entscheidenden Einfluss auf das Verdichtungsrisiko

Abb. 20 > Körnungsdreieck mit der an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft verwendeten Unterteilung



Walther et al. 2004

In der Schweiz ebenfalls gebräuchlich ist eine Verfeinerung dieses Systems mit einer Einteilung in 13 Klassen, welche bei der Waldbodenkartierung verwendet wird (Ruef und Peyer 1996).

In Deutschland und in Teilen der Schweiz (z. B. Kanton BL) wird die Körnung in 31 Klassen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5 2005) unterteilt. Diese Unterteilung unterscheidet sich deutlich von den Systemen mit 10 oder 13 Klassen.

Je feinkörniger ein Boden ist, desto plastischer und empfindlicher wird er – in Abhängigkeit vom Wassergehalt – und reagiert er auf eine mechanische Belastung.

Je feinkörniger ein Boden ist, desto höher ist das Verdichtungsrisiko

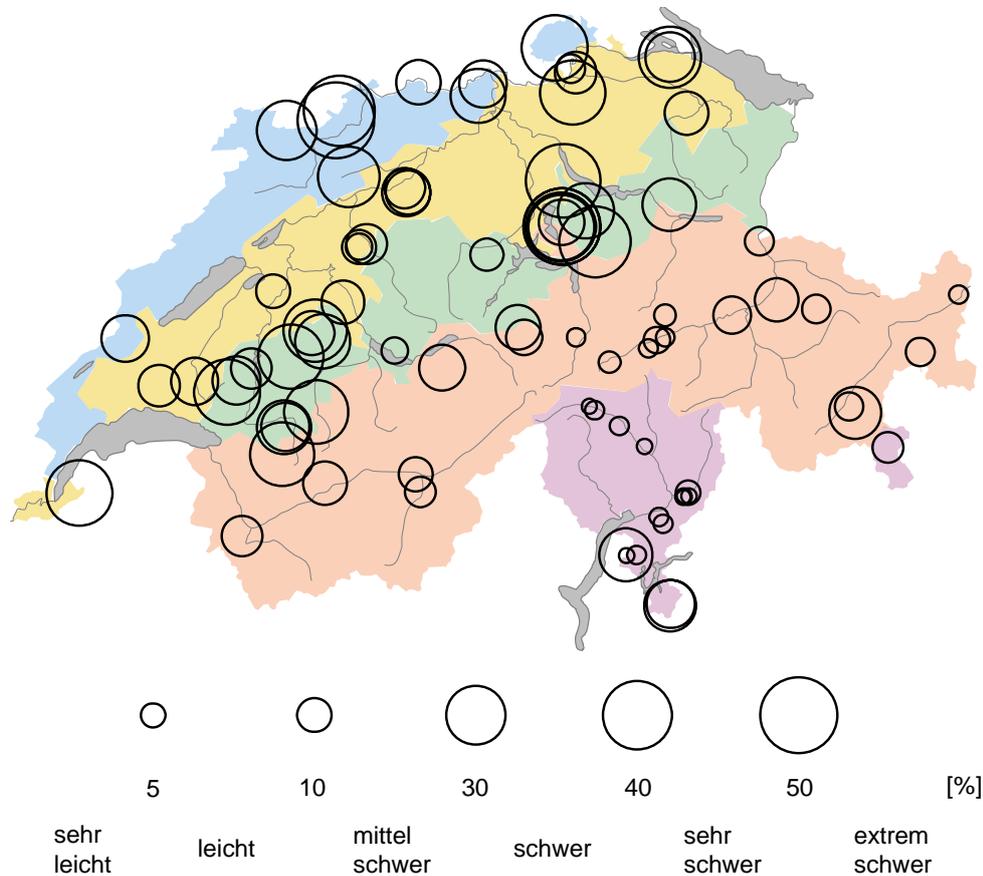
Tonreiche Böden (Tonanteil >40 %_g) sind im trockenen Zustand extrem hart und tragfähig (Abb. 21). Mit zunehmender Feuchtigkeit werden sie plastischer und stärker verformbar, was ihre Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung erhöht. Tonböden binden das Bodenwasser in den Feinporen sehr stark, trocknen also langsamer aus, weshalb sie nach einem Regen erst nach entsprechend längerer Zeit wieder schonend befahren werden können.

Schluffböden (Schluffanteil >50 %_g) erreichen bei Niederschlägen wesentlich früher als Tonböden den plastischen Bereich, sie sind deshalb sehr empfindlich und bei einsetzenden Niederschlägen rascher gefährdet. Nach einem Starkregen können sie wegen

ihres grossen Anteils an Fein- bzw. Mittelporen erst nach drei Tagen oder später schonend befahren werden.

Sandböden (Tonanteil <10 %_g) verformen sich bei Nässe nur wenig und die Entwässerung der mehrheitlich groben Poren erfolgt innerhalb von drei Tagen, so dass sie nach Niederschlägen rasch wieder befahrbar sind. Bereits geringe Schluffanteile können jedoch eine drastische Erhöhung der Empfindlichkeit von solchen Böden bewirken.

Abb. 21 > Durchschnittlicher Tongehalt in Mineralbodenhorizonten der 95 untersuchten Profile aus der Publikation *Waldböden der Schweiz*



Zimmermann et al. 2006, abgeändert

Die Darstellung des Tongehaltes in Mineralbodenhorizonten (Abb. 21) aus den Profilen der Publikation *Waldböden der Schweiz* (Zimmermann et al. 2006) zeigt die Unterschiede in den einzelnen Regionen deutlich. Die Tonfraktion ist eine wichtige physikalische Eigenschaft des Bodens und wird in der Praxis als Schwere des Bodens bezeichnet. Neben anderen Bodeneigenschaften hängt die Tragfähigkeit von der Feinheit der Bodenkörner ab. Je feinkörniger, desto höher ist die Verdichtungsempfindlichkeit. Im Jura sind die Böden aus Karbonatgestein entstanden und daher schwer bis extrem schwer. Im Mittelland sind die Moräneböden meist mittelschwer, aus Grundmoränen können auch schwere bis sehr schwere Böden entstanden sein. In den Voralpen sind vor allem in den Flyschgebieten mit relativ viel Ton schwere bis extrem schwere

Böden klassiert worden. In den Alpen zeigen die untersuchten Böden mehrheitlich sehr leichte bis mittelschwere Verhältnisse an. Auf der Alpensüdseite sind auf kristallinem Untergrund sehr leichte bis leichte Böden typisch. Für den Praktiker in der Waldbewirtschaftung finden sich Informationen zur Bodenart in Standorts- und Bodenkarten. Vor Ort empfiehlt sich zur Beurteilung der Befahrbarkeit jedoch eine Überprüfung dieser Befunde mittels Spaten und Bohrstock (Kap. 6.2.2).

Unter dem Einfluss von Bodenlebewesen sowie durch chemische und physikalische Prozesse bildet sich das Bodengefüge. Je nach Form und Anordnung der festen Bodenbestandteile unterscheidet sich der Zusammenhalt der Bodenpartikel und damit die Reaktion auf eine Belastung des Bodens z. B. durch ein Forstfahrzeug. Es wird zwischen Einzelkorn-, Kohärent- und Aggregatgefüge unterschieden (Abb. 22–24). Das Aggregatgefüge lässt sich in verschiedene Aggregatstrukturen gliedern (Krümel, Polyeder- und Subpolyederstruktur).

Je nach Gefügeform besitzt ein Boden ein unterschiedlich grosses und verzweigtes Hohlraumssystem. Dieses ergibt dann eine für natürlich gewachsene Böden typische Lagerungsdichte. Durch das Gefüge werden auch wichtige Eigenschaften wie der Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt beeinflusst.

Einzelkorngefüge: Die Bodenpartikel sind nicht zusammen geklebt sondern liegen lose nebeneinander. Diese Böden sind bei grosser Belastung kaum empfindlich, da die Räume zwischen den Einzelkörnern (Groporen) nicht beeinträchtigt werden. Einzelkorngefüge sind vor allem in ton- und humusarmen Sandböden vorhanden (Abb. 22).

Aggregatgefüge: Die Bodenpartikel bilden zusammenhängende Aggregate, welche sich von ihrer Umgebung deutlich absetzen. Aggregate entstehen aus den Losungen von Bodentieren, durch Verkittung von Humus, Pilz- und Bakterienkolonien sowie von Feinwurzeln. Aggregatgefüge verleihen dem Boden dank der erhöhten Kohäsion der Bodenpartikel eine bessere Resistenz gegen Verdichtung (Abb. 23).

Kohärentgefüge: Die einzelnen Bodenpartikel sind stark durch Kohäsionskräfte miteinander verkittet und bilden eine zusammenhaftende, nicht gegliederte Masse. Das Ausmass der Kohärenz ist stark vom Wassergehalt abhängig. Im trockenen Zustand ist diese Struktur sehr tragfähig und daher wenig empfindlich. Je feuchter der Boden ist, desto schwächer werden die Kohäsionskräfte zwischen den Bodenpartikeln und der Boden wird verdichtungsempfindlicher (Abb. 24).

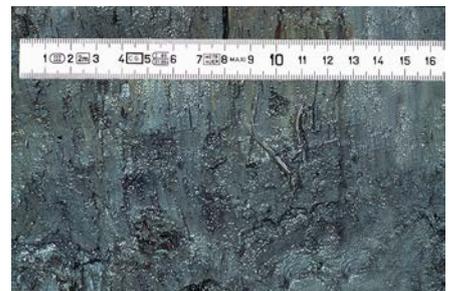
Abb. 22 > Einzelkorngefüge



Abb. 23 > Aggregatgefüge



Abb. 24 > Kohärentgefüge



3.3.3 Lagerungsdichte und Porenraum

Die Kenntnis der Lagerungsdichte eines Bodens ist wichtig, weil damit Rückschlüsse auf den Luft- und Wasserhaushalt sowie die Durchwurzelbarkeit gezogen werden können. Die Dichte hat zudem einen Einfluss auf die Befahrbarkeit des Bodens.

Unter Lagerungsdichte versteht man die feste Bodensubstanz (getrocknet) in natürlicher Lagerung pro Volumeneinheit Boden (kg/dm^3). Sie weist im Tiefenverlauf des natürlich gelagerten Bodens einen typischen Gradienten auf. Bis in eine Tiefe von ca. 20 cm ist im Oberboden ein signifikanter Anstieg der Lagerungsdichte zu verzeichnen; im darunter liegenden B-Horizont bzw. im Ausgangsmaterial ist die Zunahme jedoch geringer.

Zur Messung der Dichte werden ungestörte Volumenproben mit Stechzylindern entnommen. Dichtewerte in Waldböden können mit gravimetrischen oder radiometrischen Methoden sowie mit Hilfe von Penetrometern (Abb. 52) ermittelt werden.

Das Porensystem ist die Gesamtheit der Hohlräume im Boden. Es ist das wichtigste Strukturmerkmal, da es die bedeutsamen ökologischen Funktionen trägt. Beschrieben wird es durch drei Parameter: Porenvolumen, Porengrößenverteilung und Porenvernetzung.

Das Porenvolumen beschreibt den räumlichen Anteil aller Hohlräume im Boden. Es nimmt mit der Tiefe ab, zunächst stark und bleibt dann im B-Horizont je nach Bodenentwicklung auf fast konstantem Niveau. Die räumlichen Anteile einzelner Porengrößenbereiche werden durch die Porengrößenverteilung beschrieben. Grob-, Mittel- und Feinporen nehmen im natürlich gelagerten Zustand jeweils rund 1/3 bis 1/2 des Gesamtbodenvolumens ein. Jeder Porengrößenbereich hat ganz spezielle ökologisch bedeutsame Bodenfunktionen zu erfüllen, wie zum Beispiel:

- > Grobporen: Drainage und Durchlüftung
- > Mittelporen: pflanzenverfügbares Wasser
- > Feinporen: Nährstoffpool

Damit der Porenraum seine Funktionen erfüllen kann, müssen die Poren untereinander verbunden sein. Man nennt dies Porenvernetzung oder auch Porenkontinuität.

Für ein optimal funktionierendes Porensystem müssen drei Bedingungen erfüllt sein: ausreichendes Porenvolumen, ausgewogene Porengrößenverteilung und gute Porenvernetzung.

Liegt nur eine der Bedingungen unter dem kritischen Wert, versagt das ganze System.

3.3.4 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit für Wasser und Luft ist im bodenökologischen Sinn von zentraler Bedeutung. Mangelhafte Leitfähigkeiten führen zu Vernässung, Durchlüftungsschwierigkeiten oder unter Umständen auch zu Erosion. Kurz- bis mittelfristig wird der Boden anaerob und damit lebensfeindlich. Sowohl Wasser- als auch Luftbewegung nutzen den

Mangelnde Durchlässigkeit führt zu Vernässung und zu Durchlüftungsproblemen im Boden

Grobporenraum. Gute Drainage bedeutet gute Durchlüftung und damit gute Lebensbedingungen. Befahrungsbedingte Strukturveränderungen, z. B. eine Verdichtung, wirken sich insbesondere auf den Grobporenraum – die schwächste Komponente – aus. Daher reagieren die Leitfähigkeiten äusserst sensibel auf Verdichtung. Leitfähigkeiten für Luft und Wasser können sowohl in situ mit Infiltrometern, als auch an Stechzylindern im Labor gemessen werden.

3.3.5 Vernässungsmerkmale und Vernässungsgrad

Die Tiefe des Auftretens von Vernässungsmerkmalen und ihre Ausprägung geben Hinweise auf die Durchlüftungssituation im Wurzelraum. Die Ursache für Vernässungen kann gehemmte Wasserdurchlässigkeit sein (Stauwasser). Sie entstehen aber auch unter dem Einfluss von Grund- oder Hangwasser. Je nach Dauer der durch eine Wassersättigung verursachten Phase mit Durchlüftungsproblemen erscheinen unterschiedlich ausgeprägte Vernässungsmerkmale.

Vernässungsmerkmale
kennzeichnen die Durchlüftungssituation im Boden

Mangankonkretionen: Die kleinen dunkelvioletten bis schwarzen Flecken kennzeichnen die schwächste Stufe der Vernässung. Durchlüftungsprobleme stellen sich nur kurzfristig und örtlich beschränkt ein (Abb. 25).

Rostflecken bilden sich vorzugsweise in relativ feinkörnigen Horizonten, weil hier die Wasser- und Luftleitfähigkeit gering ist und die reduzierten Eisen- und Manganionen nur zögernd und lokal mit Sauerstoff in Kontakt kommen. Dadurch entstehen rostfarbene Flecken unterschiedlicher Grösse (Abb. 26).

Marmorierung (Fahl-Rotfärbung) entsteht durch allseitig gerichtete Verlagerungen in Wassersättigungsphasen, oft hervorgerufen durch Stauwasser. Es entstehen fahle Streifen (Zone der Verarmung), rote Bänder aus Eisenanreicherungen, Mangan- und Rostflecken (Zonen der Anreicherung) in kleinräumigem Wechsel. Marmorierungen sind typisch für stauwasserbeeinflusste Horizonte (Abb. 27).

Abb. 25 > Mangankonkretionen

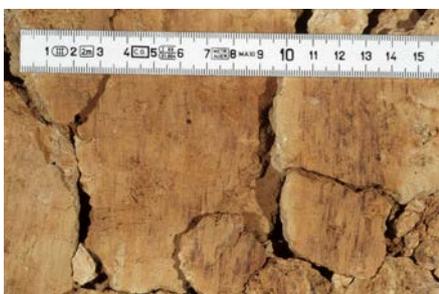


Abb. 26 > Rostflecken (mm bis cm)



Abb. 27 > Marmorierungen



Nassbleichung (Fahlfärbung): Eine Fahlfärbung der Mineralerde erfolgt, wenn ein Bereich des Bodens durch Auswaschung verarmt ist. Bei Wassersättigung bis zur Oberfläche, mit daraus folgenden reduzierenden Bedingungen und nachfolgendem Absinken des Stauwassers, können Stoffverlagerungen in tiefere Horizonte auftreten (Abb. 28).

Reduktionsfarben entstehen dort, wo ein Bereich des Bodens ständig wassergesättigte Poren aufweist. Bedingt durch den Sauerstoffmangel entsteht die kennzeichnende blau-grau-grünliche Farbe. Eine Durchwurzelung ist praktisch ausgeschlossen (Abb. 29).

Abb. 28 > Nassbleichung



Abb. 29 > Reduktionsfarben



Um eine nachvollziehbare und einheitliche Beurteilung der Vernässung zu gewährleisten, wird die in Anhang A6 gezeigte Übersicht der Merkmale verwendet. Im Schema wird unterschieden zwischen Böden, die vom Grundwasser beeinflusst sind (Gleye) und solchen, die vom Stauwasser geprägt werden (Pseudogleye). Je nach Lage der Obergrenze von Reduktionshorizonten Gr oder Oxidationshorizonten Go wird zwischen schwach grundnassen bis sumpfigen Gleyen unterschieden. Von Stauwasser beeinflusste Böden werden nach der Lage der Obergrenze des stauwasserführenden Sw- oder wasserstauenden Sd-Horizontes beurteilt.

Vernässungsgrad

Die Vernässung wird als stark bezeichnet, wenn Vernässungsmerkmale im gesamten Wurzelraum vorhanden sind und als schwach, wenn nur vereinzelt oder schwach ausgeprägte Vernässungsmerkmale auftreten. Die Befahrungsempfindlichkeit des Bodens erhöht sich mit zunehmendem Vernässungsgrad (Anhang A6).

3.3.6 Humusgehalt

Der Humusgehalt ist der Gehalt an organischer Substanz in einem Boden. Er kann in weiten Grenzen schwanken und variiert je nach biologischer Bodenaktivität, Bodenaufbau, Bodenfeuchtigkeit, Pflanzendecke, Klima und Waldnutzung. Als Faustregel gilt: je dunkler die Farbe desto grösser ist der Gehalt an organischer Substanz. Im Anhang A3 befindet sich eine Tabelle zur Abschätzung des Humusgehaltes.

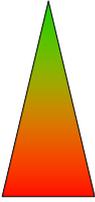
Die typischen Humusformen (Mull, Moder, Rohhumus, Kap. 3.2.2) haben Einfluss auf die Befahrungsempfindlichkeit der Böden. Es können jedoch keine eindeutigen Folgerungen gemacht werden. So sind z. B. die mächtigen organischen Auflagehorizonte, durch die sich ein Rohhumus auszeichnet, einerseits ein idealer Untergrund für die Befahrung, da damit ein grosser Teil der einwirkenden Kräfte aufgefangen werden kann. Andererseits können die geringe biologische Aktivität und damit auch die geringe Durchmischung zu einer eingeschränkten Regenerationsfähigkeit nach einer Befahrung führen. Von grösserer Relevanz aus Sicht des Bodenschutzes sind der Humusgehalt

und die Mächtigkeit humoser Ah-Horizonte. Organisches Material beeinflusst die Plastizität (Verformbarkeit) der Böden.

Bei der regionalen Verteilung fällt auf, dass hohe Humusgehalte vor allem auf der Alpensüdseite, im Jura sowie in den westlichen Voralpen vorkommen (Zimmermann et al. 2006). Während auf der Alpensüdseite und in den Alpen hauptsächlich Podsole betroffen sind, handelt es sich in den Voralpen und im Jura meist um Gleye sowie auch um Rohböden.

Im Handbuch der Waldbodenkartierung wird folgende Einteilung des Humusgehaltes verwendet (Ruef und Peyer 1996):

Tab. 4 > Einteilung des Humusgehaltes nach Ruef und Peyer (1996)

Humusgehalt	Gewichtsprozent (%g)	Empfindlichkeit
humusarm	<2 %g	
schwach humos	2–5 %g	
humos	5–10 %g	
humusreich	10–20 %g	
sehr humusreich	20–30 %g	
organisch	>30 %g	

Das mechanische Verhalten von Humus ist mit demjenigen von Ton vergleichbar. Je höher der Humusgehalt ist, desto plastischer wird sich der Boden bei entsprechend höheren Wassergehalten unter mechanischer Belastung verhalten und desto geringer ist das Verdichtungsrisiko durch das Befahren. Ähnlich wie Tone legen stark humose Böden erst bei sehr hohen Wassergehalten ein visko-plastisches Verhalten an den Tag.

Aufgrund von Bodeneigenschaften wie Körnung, Skelettgehalt, Humusgehalt, Gefüge und Hangneigung (>50 % gilt als nicht befahrbar mit Radfahrzeugen) kann man eine erste Schätzung der Bodenempfindlichkeit gegen mechanische Belastung erhalten. Diese ist aber statisch, weil der aktuelle Wassergehalt zur Zeit der Befahrung nicht berücksichtigt wird. Eine Verfeinerung dieser Schätzung erhält man, indem die Vernässungsmerkmale (Kap. 3.3.5) betrachtet werden. Je ausgeprägter und je näher an der Bodenoberfläche die Vernässungsmerkmale sind, desto öfter und/oder länger sind die Sättigungsphasen des gesamten Porenraumes und desto grösser wird das Verdichtungsrisiko.

3.3.7 Zusammenfassende Wertung

Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen Eigenschaften, die vom Aufbau des Bodens abhängen und sich ohne Einwirkung des Menschen nur sehr langsam verändern, sowie von technischen Eigenschaften der Maschine, die stets beeinflusst werden können. Zentral ist immer die Bodenfeuchte (Bodenwassergehalt).

Die Tragfähigkeit oder Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber einer physikalischen Belastung hängt hauptsächlich von folgenden Eigenschaften ab:

Skelettgehalt

Skelett, Kiesel und Steine im Boden wirken stabilisierend. Ein kiesiger Boden ist somit tragfähiger als z. B. ein praktisch steinfreier Löss-Boden. Es gilt: je höher der Skelettgehalt, umso geringer die Verdichtungsempfindlichkeit und damit das Risiko.

Körnung

Neben vielen anderen Eigenschaften des Bodens hängt auch die Tragfähigkeit stark von der Feinerdezusammensetzung (Anteil Ton, Schluff und Sand) ab. Dabei gilt, je höher der Schluff- und Tonanteil, umso höher die Verdichtungsempfindlichkeit.

Bodenfeuchte

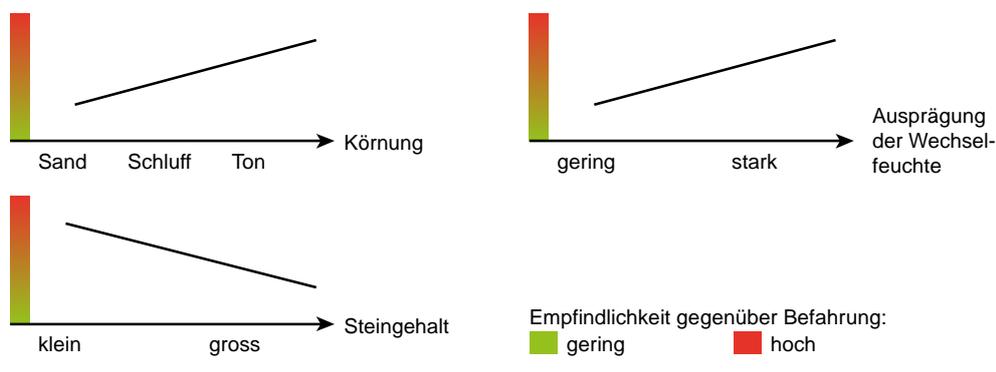
Die Tragfähigkeit des Bodens kommt durch Haft- und Reibungskräfte zwischen den Bodenpartikeln zustande. Je höher die Feuchtigkeit des Bodens, umso kleiner werden diese beiden Kräfte und umso höher wird dadurch die Verdichtungsempfindlichkeit.

Humusgehalt

Humus hat einen Einfluss auf die Bindigkeit des Bodens. Ein tonreicher Boden wird durch Humus weniger bindig, ein sandiger Boden wird durch einen höheren Humusgehalt bindiger (Ruef und Peyer 1996). Beides bewirkt eine Verringerung des Verdichtungsrisikos. Versuchsberechnungen mit dem Informationssystem ProFor (Ziesak 2004) zeigen ebenfalls eine positive Wirkung eines zunehmenden Humusgehaltes.

In Abbildung 30 wird der Einfluss ausgewählter Bodeneigenschaften auf die Befahrungsempfindlichkeit zusammenfassend dargestellt.

Abb. 30 > Einfluss von ausgewählten Bodeneigenschaften auf das Verdichtungsrisiko



Hangneigung

Mit steigender Hangneigung wächst das Risiko für Bodenschäden. Ungünstige Belastung und zunehmender Schlupf führen zum Ausbrechen des Bodenmaterials und in der Folge zu Erosion.

3.4 Wasserhaushalt

3.4.1 Wasserhaushalt und Bodenaufbau

Der Bodenaufbau lässt Aussagen über den Wasserhaushalt eines Bodens zu, beispielsweise durch Benennung des Bodentyps. Böden mit einem dichter gelagerten Horizont sind oft durch Stauwasser beeinflusst (Pseudogley, pseudovergleyte Böden). Durch Hang- und/oder Grundwasser beeinflusste Böden (Gley, vergleyte Böden) weisen wechselfeuchte Horizonte auf und haben in unterschiedlicher Tiefe einen ständig wassergesättigten Horizont. Dabei ist die Tiefe, in der wassergesättigte Zustände auftreten, sowohl im Winter als auch Sommer, in Abhängigkeit vom Vernässungsgrad, deutlich unterschiedlich (Anhang A6). Dies zeigt, dass Vernässungsmerkmale bei der Beurteilung des Wasserhaushaltes eines Bodens bezüglich Befahrungsempfindlichkeit eine zentrale Grösse darstellen. So weisen Gleye generell eine hohe bis extrem hohe Befahrungsempfindlichkeit auf. Wenn ausnahmsweise, am ehesten im Sommer, ein Vernässungsgrad «schwach grundnass» vorliegt (mit einer gesättigten Zone unterhalb von einem Meter), kann von einer lediglich «mittleren» Befahrungsempfindlichkeit ausgegangen werden.

Bei pseudovergleyten Böden (stauwasserbeeinflusst) mit Vernässungsgraden von sehr schwach bis mässig pseudovergleyt liegt vorwiegend im Sommer eine mittlere bis hohe Befahrungsempfindlichkeit vor. Der wechselfeuchte Bereich mit periodischer Wassersättigung sinkt dabei unter einen Meter Tiefe.

Normal durchlässige Böden ohne Vernässungsmerkmale (z. B. Braunerden) haben in Abhängigkeit von Körnung und Skelettgehalt einen ausgeglichenen Wasserhaushalt, der eine Befahrung innert 3 bis 5 Tagen nach einem Regenereignis zulässt.

Diese Betrachtungen helfen zur Einschätzung der Befahrungsempfindlichkeit (Kap. 6.2.2) bei der Planung der Feinerschliessung. Zum Zeitpunkt einer Befahrung ist aber immer noch die aktuelle Bodenfeuchte in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf zu berücksichtigen (Kap. 6.4.2).

3.4.2 Bodenfeuchte

Während der Wassergehalt (in Volumenprozenten) den Wasseranteil im Porenraum eines bestimmten Bodenvolumens darstellt, beschreibt die Saugspannung die Kraft, die benötigt wird, um dem Boden Wasser zu entziehen. Als Einheit dient das Pascal (N/m^2). Um die mit älteren Einheiten gebräuchlichen Zahlenwerte nicht verändern zu müssen, wird in der Literatur häufig hPa (1 Hektopascal ≈ 1 cm Wassersäule ≈ 1 mbar) verwendet. Handelübliche Tensiometer messen in Centibar (cbar). Eingebürgert hat sich auch der pF-Wert (\log_{10} (Saugspannung in hPa), pF 1 ≈ 10 cm Wassersäule).

Saugspannung und Wassergehalt korrelieren und können als Sorptions- und Desorptionskurven dargestellt werden. Der Verlauf dieser Kurven ist körnungsabhängig und daher charakteristisch für jeden Boden. Mit der Desorptionskurve (Kap. 3.4.4), die für diesen Zweck besser geeignet ist als die Sorptionskurve, kann aufgrund der Saugspannung der Wassergehalt eruiert werden und umgekehrt.

Der Wassergehalt kann einfach mit einem TDR-Gerät (Time Domain Reflectometry), die Saugspannung mit einem Tensiometer bestimmt werden.

3.4.3 Messnetze

Die Bodenfeuchte wird in der Schweiz in einzelnen Kantonen auf Messnetzen erhoben. Die Kantone Zürich, Bern, Solothurn, Aargau, Baselland, Luzern und Uri haben solche automatischen Messstationen in Betrieb. Die Messdaten (im Moment die Saugspannung für Ober- und Unterboden auf landwirtschaftlich genutzten Böden, vereinzelt Stationen auch im Wald) können direkt im Internet abgerufen werden. Diese Informationen dienen als wichtige Hinweise zum witterungsbedingten Verlauf der Bodenfeuchte. Sie sind wesentliche Entscheidungshilfen für einen bodenschonenden Arbeitseinsatz.

Messnetze mit laufend aktualisierten Werten zur Bodenfeuchte

Folgende Adressen (Auswahl) sind zurzeit aktiv und berücksichtigen z. T. auch Waldstandorte:

- > Kantone AG, BL, SO (Nordwestschweiz): 26 Stationen, davon 4 im Wald (Breitenbach SO, Dulliken SO, Etziken SO und Mühledorf SO). www.bodenmessnetz.ch (Abfrage 28.08.2014).
- > Kantone AI, AR, GL, GR, SG, SH, TG, ZH und Fürstentum Liechtenstein (Ostschweiz): 25 Stationen im Freiland. www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch (Abfrage 28.08.2014).
- > Kanton. BE: 6 Stationen im Freiland. www.vol.be.ch/vol/de/index/landwirtschaft/landwirtschaft/bodenschutz/bodenzustand/messwerte_bodenfeuchte.html (Abfrage 28.08.2014).
- > Kanton LU: 4 Stationen im Freiland, 2 weitere sind geplant. www.umwelt-luzern.ch/index/themen/bodenschutz/messnetz_bodenfeuchte.htm (abgerufen am 28.08.2014).
- > Kanton UR: 1 Station im Freiland. www.boden-uri.ch (abgerufen am 28.08.2014).
- > WSL, Langfristige Waldforschung LWF: Wassergehaltsmessungen an 10 Standorten im Wald (Beatenberg BE, Bettlachstock SO, Celerina GR, Davos GR, Lausanne VD, Lens VS, Novaggio TI, Othmarsingen AG, Schänis SG, Vordemwald AG). www.wsl.ch/info/organisation/fpo/lwf/results/data/swc_DE (abgerufen am 28.08.2014).

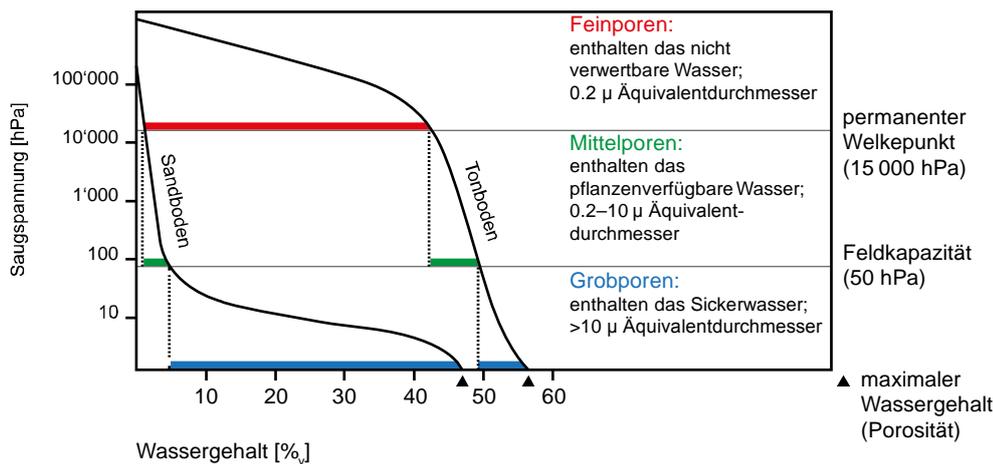
Bodenfeuchtedaten von kantonalen Messstationen erlauben eine Abschätzung der Befahrungsempfindlichkeit für vergleichbare Böden

3.4.4 Desorptionskurven

Eine Desorptionskurve zeigt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines Bodens und der Saugspannung auf (Abb. 31). Die Saugspannung kann auch als negativer Druckwert bezeichnet werden. Je höher die Saugspannung liegt, desto geringer ist der Wassergehalt eines Bodens. Wird eine Bodenprobe zuerst mit Wasser gesättigt, dann mit ständig steigendem Unterdruck entwässert und die Menge des ausgeflossenen Wassers gegen den Unterdruck aufgezeichnet, ergibt sich eine sogenannte Desorptionskurve. Je mehr feine Poren ein Boden enthält (toniger Boden), desto grösser ist die benötigte Saugspannung zur Entwässerung des Bodens. Bei einem hohen Anteil grober Poren (sandiger Boden) ist die benötigte Saugspannung entsprechend kleiner. Die Desorptionskurve lässt also einen Rückschluss auf die Porengrössenverteilung zu.

Eine Desorptionskurve zeigt den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Saugspannung auf

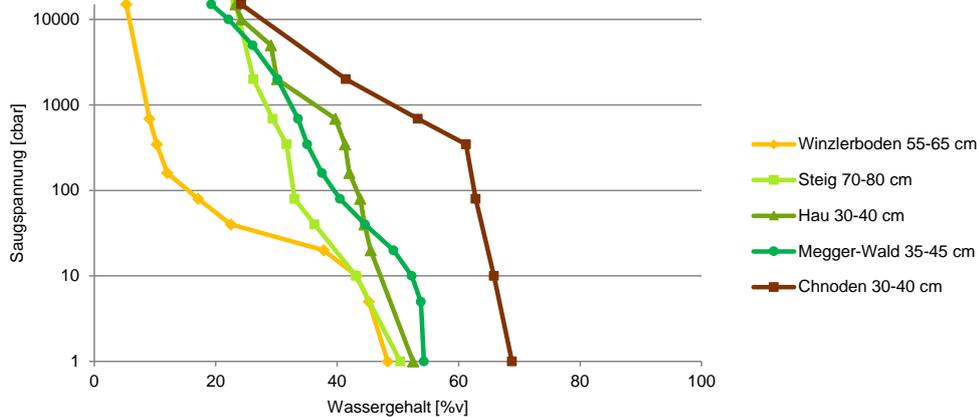
Abb. 31 > Typische Desorptionskurve für Sand- und Tonböden



Walther et al. 2004

Mit im Labor bestimmten Desorptionskurven (Abb. 32) kann bei bekanntem Wassergehalt – z. B. nach einer Messung im Gelände – die Saugspannung bestimmt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Körnung im betrachteten Boden mit derjenigen des Bodens der Desorptionskurve übereinstimmt. Wird im Gelände anstelle des Wassergehaltes die Saugspannung gemessen, kann direkt auf die Befahrbarkeit des Bodens geschlossen werden (Kap. 6.4.2).

So hat die Lokalform Winzlerboden (Richard und Lüscher 1983/87) in der Tiefe 55–65 cm einen Sandanteil von über 90 %_g, der Kurvenverlauf charakterisiert also einen Sandboden. Die Lokalform Chnoden hat in 30–40 cm Tiefe einen Tonanteil von über 50 %_g und charakterisiert damit einen Tonboden. Dazwischen liegen die Kurven der Lokalformen Steig, Hau und Megger-Wald mit Schluffanteilen von 30–50 %_g.

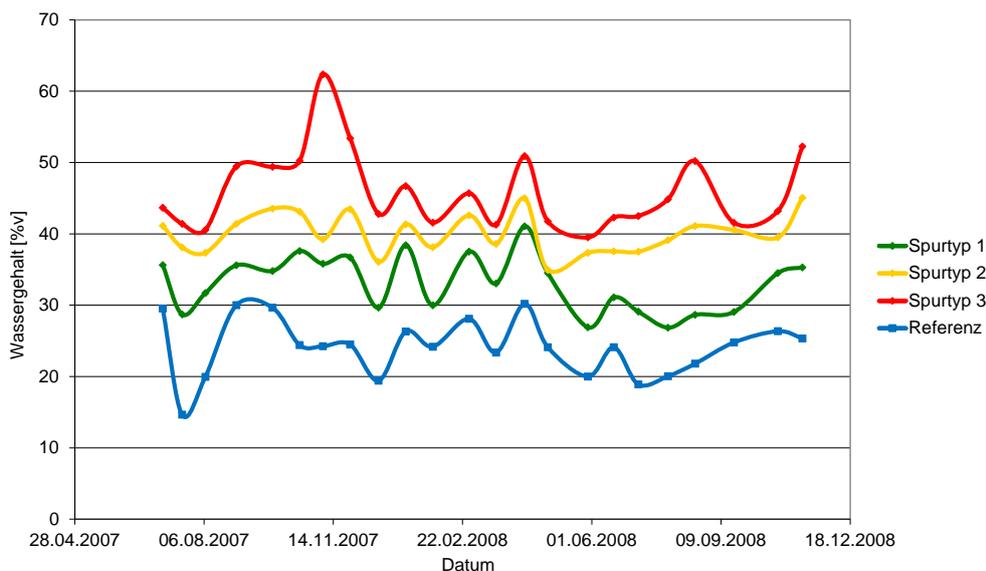
Abb. 32 > Desorptionskurve für typische Waldböden der Schweiz

Richard und Lüscher 1983/87

3.4.5 Bodenfeuchte im Jahresverlauf

Auf der Testfläche in Ermatingen (Kap. 5.2.3) wurde in einem Zeitraum von 20 Monaten der Wassergehalt in Fahrspuren mittels TDR-Sonde gemessen. Die Messungen wurden in allen drei Spurtypen sowie jeweils im unbefahrenen, direkt benachbarten Referenzboden vorgenommen.

Der Wassergehalt in Fahrspuren ist immer höher als im benachbarten unbefahrenen Boden

Abb. 33 > Jahresverlauf des Wassergehaltes [%v] bei verschiedenen Spurtypen, gemessen mit einer TDR-Sonde (Testfläche Ermatingen)

Betrachtet man den Jahresgang der Bodenwassergehalte für den Referenzboden so erkennt man ein Maximum im Frühjahr nach der Schneeschmelze, ein schwach ausgeprägtes Sommermaximum im Juli, niedrigste Werte im Hochsommer und dann einen leichten Anstieg bis zum Winter.

Der gemessene Wassergehalt in den Fahrspuren folgt grundsätzlich diesem Muster, zeigt jedoch einen eindeutigen Zusammenhang mit den Spurtypen auf. Beim Spurtyp 2 ist das spätsommerliche Minimum nicht mehr zu erkennen. Je stärker die Bodenverdichtung ist, desto feuchter ist es über das gesamte Jahr in der Fahrspur. Zunehmende Bodenverdichtung hat eine stärkere Beeinträchtigung des Porenraumes und somit der Wassersickerung zur Folge. Auch die Bodendurchlüftung ist durch die erhöhten Wassergehalte zeitweise mangelhaft. Beim Spurtyp 3 ist die Bodenstruktur und damit das Porensystem so stark gestört, dass das Regenwasser nicht mehr uneingeschränkt infiltrieren kann und deshalb länger auf der Bodenoberfläche stehen bleibt.

4 > Spurtypen als Indikatoren für eine schonende Befahrung

In einem fruchtbaren und produktiven Boden können die Wurzeln ungehemmt wachsen, es stehen genug Wasser, Luft und Nährstoffe zur Verfügung und der Luftaustausch sowie die biologische Aktivität sind gewährleistet. Die Bodenqualität wird heute u. a. auch von mechanischen Belastungen beeinträchtigt, welche zu Verdichtung führen können. Nahezu jedes Befahren eines Bodens verändert die Bodenstruktur und gefährdet die Bodenfruchtbarkeit, wie sie in der VBBo definiert ist (Kap. 1.1) zumindest vorübergehend. Eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, welche die nachhaltige Nutzung gefährdet, ist zu verhindern (Art. 33 Abs. 2 USG, Art. 6 Abs. 1 VBBo).

Das Befahren von natürlich gelagerten Waldböden mit Forstmaschinen kann auf einem Grossteil der Schweizer Waldböden im Bereich der Fahrspuren tiefgreifende und zum Teil lang anhaltende Bodenveränderungen verursachen, welche wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen. Eingeschränkte Porenvolumina und Porenvernetzung verringern die Transportleistung für Wasser und Luft im Boden. Die Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Luft ist aber eine grundlegende Voraussetzung der Bodenfruchtbarkeit. Durch starke Bodenverdichtungen und/oder Grundbruch werden nicht nur im Keimbeet die Voraussetzungen für die Naturverjüngung drastisch verschlechtert, sondern auch das Wurzelwachstum kann bis in beträchtliche Bodentiefen nachhaltig gestört sein.

Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht ist es daher wichtig, für das Schutzgut Boden den Begriff der «langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit nach mechanischer Belastung» zu umschreiben und zu quantifizieren.

Befahrungsbedingte Veränderungen des Bodens können mit der Ausprägung von sichtbaren Fahrspuren in Zusammenhang gebracht werden. Für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes wurde mit ausgewählten Merkmalen eine Typisierung der Fahrspuren entwickelt, die auf ökologisch wirksame Veränderungen im Boden schliessen lässt (Tab. 5). Zur quantitativen Hinterlegung dieser morphologisch erkennbaren Spurtypen wurden Veränderungen der effektiven Lagerungsdichte des Bodens, des Grobporenvolumens, der gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie des Eindringwiderstandes herangezogen (Buchter et al. 2004). In naher Zukunft werden auch mikrobiologische Parameter in die Kriterienpalette aufgenommen (Frey et al. 2009 und Frey 2010).

4.1 **Kategorisierung der sichtbaren Fahrspuren**

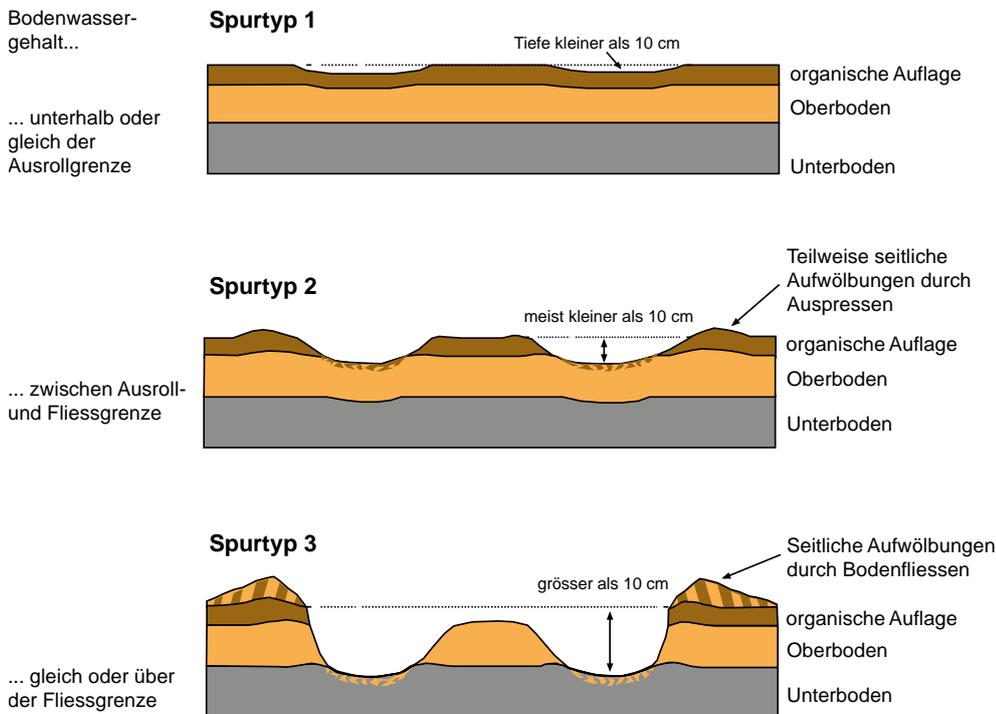
Die definierten drei Spurtypen sollen – analog dem Konzept der Abstufung der chemischen Bodenbelastung mit Richt- und Prüfwerten gemäss Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.2) – im Rahmen der Waldbewirtschaftung als Indikatoren für den Bodenschutz dienen.

4.1.1 **Spurtypen als Indikatoren für die Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit**

Für die Kommunikation über den physikalischen Bodenschutz im Wald wurde eine einfach nachvollziehbare Typisierung vorhandener Fahrspuren anhand von optisch gut erkennbaren morphologischen Merkmalen erarbeitet. Sie unterscheidet Verformungstypen, sogenannte Spurtypen, die bodenmechanisch bedingt sind. Die Beschreibung der Spurtypen basiert auf den visuellen Merkmalen: Bodenaufbau, Vorhandensein bzw. Grösse von seitlichen Aufwölbungen und Spurtiefe. Die Spurtypen wurden im Einklang mit den VBBo-Richt- und Massnahmenwerten (VBBo, 1998; Kap. 1.2) definiert. Richtwerte sagen etwas darüber aus, ab wann die Bodenfruchtbarkeit gefährdet ist. Massnahmenwerte sagen etwas darüber aus, ab wann Nutzungseinschränkungen und weitere Massnahmen gerechtfertigt sind. Die Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit ist nun mit den Spurtypen einfacher geworden.

Fahrspuren lassen sich aufgrund bestimmter Merkmale unterscheiden

Abb. 34 > Spurtypen als Indikatoren zur Beurteilung der ökologischen Wirkung von Bodenveränderungen



Als Hintergrund zur einfachen morphologischen Typisierung von Fahrspuren stehen auch bodenphysikalische, -mechanische und -mikrobiologische Befunde zur Verfügung (Kap. 4.2).

Tab. 5 > Merkmale der Fahrspuren, Begründung der Massnahmen und Bezug zur Definition der Bodenfruchtbarkeit

Merkmale zur Ausscheidung von Spurtypen	Begründung der Massnahmen	Bezug zur Definition der Bodenfruchtbarkeit in Art.2 Abs.1 VBBo
Spurtiefe	Regenerationspotenzial im Unterboden eingeschränkt, künftige Befahrbarkeit beeinträchtigt	Bst. a und b: Bodenleben, Abbaufähigkeit eingeschränkt, Keimung und Anwuchs erschwert
Aufbau Oberboden	Erhaltung einer natürlich gelagerten Humusform (SOLL-Angabe nach NaiS ¹)	Bst. a: Standortsbezug über Abbaufähigkeit und Bodenstruktur
Farbe, mit Hinweis auf Vernässungsmerkmale	Porenraum eingeschränkt, Lagerungsdichte erhöht, Durchlässigkeit verringert	Bst. b: Wurzelraum, Lebensraumfunktion
Verformung	Diskontinuität im Porenraum	Bst. b: Bodenstruktur

¹ Frehner et al. 2005

Der Spurtyp 1 ist eine leichte Bodenbeeinträchtigung, die mechanisch gesehen eine elastische Deformation mit Pressung der organischen Auflagehorizonte repräsentiert. Dies bedeutet, dass die Veränderungen der Bodenstruktur nach der mechanischen Belastung durch das Befahren unter guten Bedingungen reversibel sind. Die organischen Auflagehorizonte sind in der Radspur vorhanden und weitestgehend intakt. Eine natürliche Horizontabfolge bleibt immer erhalten. Meist sind nur Stollenabdrücke erkennbar oder die organische Auflage ist verpresst. Die Beeinträchtigungen reichen selten über die Stollentiefe hinaus. Die theoretische Spurtiefe beträgt daher zwischen 5 bis maximal 10 cm und bleibt in den Oberbodenhorizonten.

Spurtyp 1:
Leichte Beeinträchtigung der Bodenfunktionen

Der Spurtyp 2 stellt eine mittlere Bodenbeeinträchtigung dar, die einer plastischen Deformation entspricht. Strukturveränderungen im Boden sind zwar zum Teil nicht reversibel, die Beeinträchtigung durch das Befahren unter feuchteren Verhältnissen hat die Struktur des Bodens aber nicht total zerstört. Die organischen Auflagehorizonte fehlen meist vollständig oder wurden mit Ah- oder A-Material vermischt. Der Aufbau des Oberbodens ist teilweise gestört. Oft sind neben der Sackung seitliche Aufwölbungen aus organischem Material sichtbar, welche durch Auspressen entstanden sind. Die Spurtiefe beträgt meist weniger als 10 cm.

Spurtyp 2:
Mittlere Beeinträchtigung der Bodenfunktionen

Der Spurtyp 3 stellt eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit dar. Eine Befahrung unter nassen Verhältnissen hat eine visko-plastische Deformation zur Folge. Aufgrund des hohen Wassergehaltes fließt der Boden seitlich weg und die einzelnen Bodenhorizonte werden vermischt. Der natürliche Bodenaufbau wird zerstört und durch das Bodenfließen entstehen ausgeprägte seitliche Aufwölbungen. Die Spureintiefung beträgt immer mehr als 10 cm und reicht bis in den Unterboden. Beim Spurtyp 3 wird der Massnahmenwert (Abb. 2) überschritten.

Spurtyp 3:
Schwere Beeinträchtigung der Bodenfunktionen = Ökologischer Schaden im Boden

Tab. 6 > Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen

Kriterium	Spurtyp 1	Spurtyp 2	Spurtyp 3
Spurtiefe	5 bis max. 10 cm, in Oberbodenhorizonten	meist <10 cm	>10 cm, bis in Unterbodenhorizonte reichend
Aufbau Oberboden	nicht gestört	+/- gestört	gestört
Verformung	keine	+/-	ausgeprägt
Farbe (Vernässungsmerkmale)	Vernässungsmerkmale je nach den standörtlichen Verhältnissen vorhanden		

Fahrspurtypen als Indikator für Bodenbeeinträchtigungen

In Tabelle 6 ist die Abstufung der Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen zusammengestellt. Ausgeprägte Verformungen entstehen, wenn zum Zeitpunkt des Befahrens der Feuchtezustand des Bodens über der Fliessgrenze liegt. Dadurch wird der Porenraum derart verändert, dass ein ökologischer Schaden im Boden entsteht. Der Bodenaufbau wird gestört und die Spurtiefe erreicht den Unterboden, so dass eine rasche natürliche Regeneration kaum mehr möglich ist.

Vernässungsmerkmale können in unterschiedlicher Intensität bei allen Spurtypen auftreten (bei Spurtyp 1 allerdings nur in Ausnahmefällen). Sie sind Ausdruck des durchschnittlichen Durchlüftungszustandes. Ihre Intensität steht in direktem Zusammenhang mit der Dauer der Wassersättigung und der mangelhaften Durchlüftung. Diese Merkmale treten meistens nur oberflächennah, direkt unter der Fahrspur auf und zeigen wechselfeuchte und teilweise anaerobe Bedingungen an.

Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität ist es möglich, einen Spurtyp zu definieren, dessen Auftreten ein eindeutiges Signal für einen ökologischen Schaden im Boden anzeigt und nach entsprechenden Massnahmen ruft (Spurtyp 3). Damit ist für die praktische Arbeit im Wald ein einfacher Indikator gegeben, an dem sich die Akteure orientieren können: Beispielsweise sind beim Auftreten vom Spurtyp 3 die Holzerntearbeiten zu unterbrechen.

Die Ansprache der Spurtypen auf den Feinerschliessungslinien erlaubt es, die Arbeitsqualität zu beurteilen und gegebenenfalls Massnahmen zu ergreifen (Kap. 5.2).

4.1.2 Definition Bodenschaden

Bodenveränderungen durch das Befahren mit schweren Maschinen werden eingeteilt in eine Kategorie ohne langfristige Auswirkungen (Spurtyp 1) und in eine zweite Kategorie mit negativen Folgen für die Bodenfruchtbarkeit (Spurtypen 2 und 3).

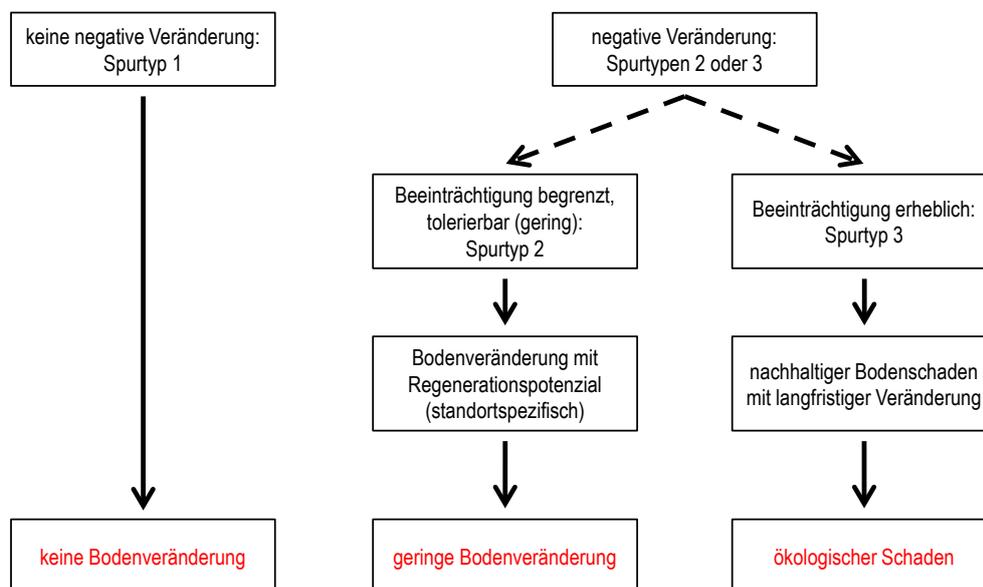
Erfasst die Fahrspur nur den Oberboden und sind die Verformungen wenig ausgeprägt (Spurtyp 1), so wird der Bodenaufbau kaum gestört. Beim Spurtyp 2 gehen wir davon aus, dass sich der Boden mittelfristig aufgrund des natürlichen, standortsspezifischen Regenerationspotentials erholen wird. Eine solche Beeinträchtigung ist somit zeitlich begrenzt und wird deshalb als unerheblich bzw. tolerierbar betrachtet. Beim Spurtyp 3 hingegen kann davon ausgegangen werden, dass die Beeinträchtigung erheblich und von langfristiger Natur ist. Die Bodenfruchtbarkeit wird dadurch nachhaltig geschädigt (Abb. 35).

Die Definition eines Bodenschadens, muss sich an den gesetzlichen Vorgaben orientieren. Wie in Kapitel 1.1.1 ausgeführt, liegt ein Schaden dann vor, wenn die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit gefährdet ist. Für den Wald muss die Bodenfruchtbarkeit so interpretiert werden, dass die Selbsterhaltung der standortstypischen Lebensgemeinschaft Wald durch Naturverjüngung nachhaltig gewährleistet sein muss. Das ist die wichtigste Voraussetzung, damit der Waldboden eine standortsspezifische, artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft, eine typische Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweisen kann (Art. 2 Abs. 1 VBBo 1998).

Ein Bodenschaden ist eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit

Zur quantitativen Hinterlegung der morphologisch erkennbaren Spurtypen gehören bodenphysikalische, -mechanische und -mikrobiologische Befunde. Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität ist es möglich, einen Spurtyp zu definieren, dessen Auftreten ein eindeutiges Signal für einen ökologischen Schaden im Boden anzeigt. Dieser ökologische Schaden liegt beim Auftreten des Spurtyps 3 vor. Hier ist der Boden erheblich und nachhaltig beeinträchtigt; er verfügt in diesem Fall über kein oder nur noch ein sehr geringes Regenerationspotenzial.

Abb. 35 > Bewertung einer ökologischen Bodenveränderung durch das Befahren von Waldböden



Mit den drei Spurtypen steht für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes ein Instrument zur Verfügung, mit welchem Beeinträchtigungen des Waldbodens durch mechanische Belastung beurteilt und bewertet werden können. Für eine umfassendere Betrachtung ist zusätzlich der Flächenanteil der Spurtypen unter Einbezug der standörtlichen Verhältnisse zu berücksichtigen.

4.2 Physikalische und mikrobiologische Veränderungen im Boden

In den folgenden Kapiteln werden zu den einzelnen Spurtypen bodenphysikalische, -mechanische und -mikrobiologische Daten aus verschiedenen Untersuchungen im Feld und im Labor aufgezeigt.

4.2.1 Bodenphysik

Aus physikalischer Sicht wichtige Veränderungen der Bodenstruktur und deren Auswirkungen auf die Funktionalität der Böden können anhand einer einfachen, Ursachen – Wirkungskette aufgezeigt werden. Diese lässt sich für die einzelnen Spurtypen (Kap. 4.1.1) erläutern.

Spurtyp 1 (elastische Verformung): Nach einer kurzfristigen, aber weitestgehend reversiblen Verformung unter Lasteinwirkung nimmt der Boden wieder die ursprüngliche Ausgangslage ein. Dabei treten allenfalls minimale Erhöhungen der Lagerungsdichte auf. Somit bleiben der Porenraum, speziell der Grobporenraum und seine Funktionen (Belüftung und Drainage), grösstenteils erhalten.

→ Geringe Einschränkungen der Leitfähigkeiten werden nach kurzer Zeit durch aktives Bodenleben und Regeneration kompensiert.

Spurtyp 2 (plastische Verformung): Unter Auflast kommt es zu einer bleibenden Sackung in der Fahrspur. Eine deutliche Erhöhung der Lagerungsdichte geht einher mit einem drastischen Verlust an Porenraum. Durch Verdichtung wird vor allem der gas- und wasserführende Grobporenraum beeinträchtigt. Die Leitfähigkeiten werden stark herabgesetzt. Eingeschränkter Gasaustausch kann zu Sauerstoffdefizit bzw. Kohlendioxid-Anreicherung in den betroffenen Bereichen führen. Diese Porenraumveränderung hat immer geminderte Drainageleistungen zur Folge.

→ Verdichtung führt stets zu einem Grobporenverlust und damit zu eingeschränkten Leitfähigkeiten – im Extremfall bis hin zu Versiegelung, Vernässung und zu erhöhtem Oberflächenabfluss.

Spurtyp 3 (viskoplastische Verformung): Unter Belastung beginnt der Boden zu fließen, es tritt eine dauerhafte Beeinträchtigung, der «Grundbruch», ein. Dabei kommt es kaum zu Verdichtung, weil das Wasser in den Poren nicht verdrängt werden kann. Die Poren unterliegen einer deutlichen Umorientierung und verlieren ihre Vernetzung nahezu vollständig. Eine gravierende Folge der Strukturveränderung ist die massive Oberflächenversiegelung. Die Neuorientierung des Porenraums bewirkt den vollständigen Verlust der Wasserleitfähigkeit. Wasserstau und Luftabschluss in den Fahrspuren führen zu anaeroben Verhältnissen im Boden.

→ Selbst Jahrzehnte nach der letzten Befahrung werden sich weder Grobporenraum noch Porenvernetzung regeneriert haben. Der Boden bleibt versiegelt. In der Spur herrschen noch immer Sauerstoffdefizit und CO₂-Überkonzentration.

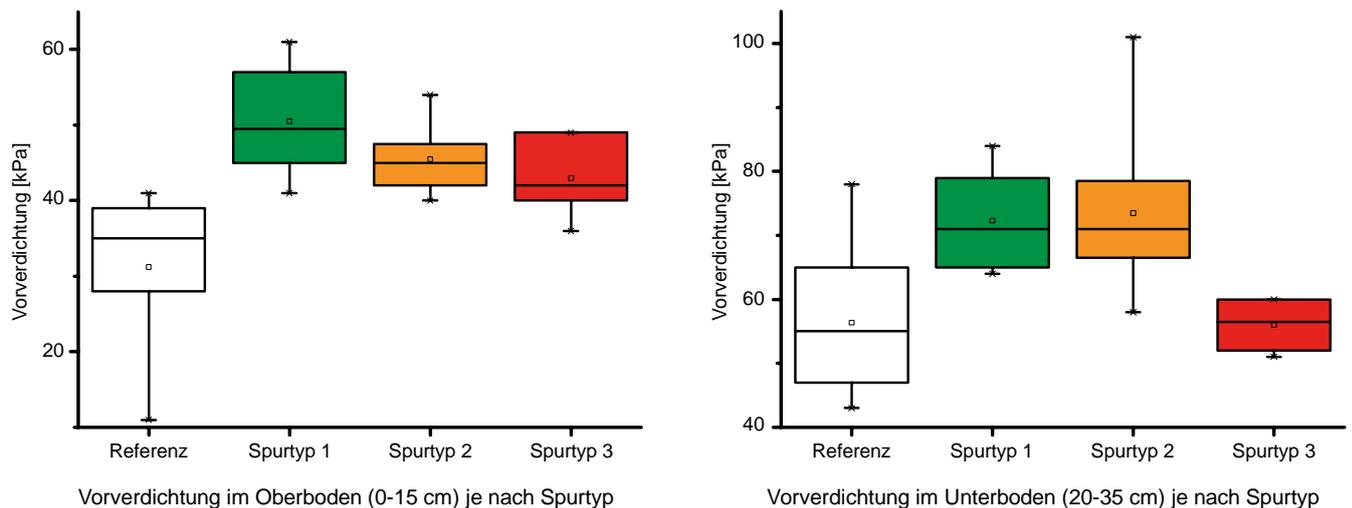
4.2.2 Bodenmechanische Aspekte

Massgeblich für das Auftreten eines Spurtyps ist neben der Bodenart vor allem die aktuelle Bodenfeuchte. Sie beeinflusst die Bindungskräfte zwischen den Bodenteilchen und damit auch die Verformung unter Belastung. Eine Zuordnung der Verformungsarten zu bodenmechanischen Zustandsformen ist möglich. Übergänge zwischen den Zustandsformen werden Zustandsgrenzen genannt. Sie stellen definierte Wassergehalte dar. Wichtig sind dabei die Ausrollgrenze und die Fließgrenze.

Entscheidend für den Grad der Verformung eines Bodens ist die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Befahrens

Das Ausmass und die Ausprägung der Verformungen hängen weitgehend von der mechanischen Stabilität des Bodens ab. Diese Stabilität wird durch die Vorverdichtung charakterisiert. Der Wert der Vorverdichtung ist der Druck, den ein Boden ohne bleibende Verformungen tragen kann. Sind die Belastungen geringer als die Vorverdichtung, deformiert sich der Boden elastisch, das heisst der Boden entspannt sich nach Entlastung in seine ursprüngliche Form. Ist die einwirkende Last höher als die Vorverdichtung, verformt sich der Boden plastisch und es sind Bodenverdichtungen zu erwarten. Nach jeder zusätzlichen Belastung nimmt die Vorverdichtung des Bodens zu, was seine mechanische Stabilität theoretisch verbessert. Die Vorverdichtung wurde im Labor der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich mittels Oedometer gemessen. Die mittleren Werte für die Vorverdichtung bei den verschiedenen Spurtypen sind in Abbildung 36 dargestellt.

Abb. 36 > Mittlere Werte für die Vorverdichtung bei den verschiedenen Spurtypen im Oberboden (0–15 cm) und im Unterboden (20–35 cm)



Spurtyp 1 (**elastische** Verformung): Der Boden liegt im Zustand fest-halbfest vor; die Bodenfeuchte befindet sich unterhalb der Ausrollgrenze. Er ist hart und nicht formbar. Bei der Ausrollgrenze besitzt der Boden eine sehr hohe natürliche Tragfähigkeit. Das heisst, er ist in der Lage, relativ hohe Lasten ohne signifikante Veränderungen seiner Struktur zu tragen.

→ Die technische Befahrbarkeit ist gewährleistet.

Spurtyp 2 (**plastische** Verformung): Der Boden liegt im Zustand plastisch-formbar vor; die Bodenfeuchte befindet sich zwischen Ausrollgrenze und Fliessgrenze. Er lässt sich wie Knetmasse bearbeiten, bleibt aber dann formstabil.

→ Die Stabilität des Bodens ist geringer als beim Spurtyp 1, die technische Befahrbarkeit ist aber immer noch gewährleistet.

Spurtyp 3 (**viskoplastische** Verformung): Der Boden liegt im Zustand breiig-fließbar vor; die Bodenfeuchte befindet sich bei der Fliessgrenze oder darüber. Er behält seine Form beim Bearbeiten nicht mehr. Unter Belastung beginnt das Fließen der Bodenteilchen. Bei der Fliessgrenze zeichnet sich der Boden durch eine äusserst geringe Tragfähigkeit aus. Generell sollte jegliche Befahrung bei der Fliessgrenze oder darüber unbedingt vermieden werden. Belastungen im Bereich der Fliessgrenze führen zum vollständigen Verlust der Bodenstruktur und der Bodenfunktionen (z. B. Leitfähigkeit für Wasser und Luft). Mit einem dauerhaften und tief greifenden Bodenschaden ist in jedem Fall zu rechnen.

→ Die Stabilität des Bodens ist deutlich geringer als bei den Spurtypen 1 und 2. Die Grenzen der technischen Befahrbarkeit werden bei zusätzlicher Belastung rasch erreicht.

Bodenverformungen können elastisch (reversibel), plastisch (bleibende Sackung) oder viskoplastisch (Bodenfließen) sein

4.2.3 Bodenmikrobiologie

Bodenveränderung und Bodenmikroorganismen

Die Frage, ab welchem Grad der strukturellen Veränderung von einem Bodenschaden gesprochen werden kann bzw. muss, ist bisher vornehmlich unter dem Aspekt ihrer Wirkungen auf den Luft- und Wasserhaushalt untersucht worden (Kozłowski 1999; Schack-Kirchner et al. 2007). Wirkungen auf Bodenmikroorganismen und deren Stoffumwandlungseigenschaften in Waldböden fanden bisher kaum Beachtung, obwohl sie als Frühwarnsysteme bei schädlichen Bodenveränderungen gelten (Wardle et al. 1999). Eine aktive Bodenmikroflora beeinflusst ganz wesentlich die Stoffkreisläufe und trägt damit zur Vitalität von Waldbeständen bei. Ein Gramm Waldboden enthält bis zu 8000 verschiedene Mikroorganismen, damit zwanzigmal so viele wie ein Ackerboden. Der Verlust dieser Vielfalt zieht folgenreiche Konsequenzen für die Bodenfruchtbarkeit wie den Streuabbau und die Humusbildung nach sich:

- > Bodenmikroorganismen können Verformungen des Bodens anzeigen, denn sie erfassen die tatsächlichen Wirkungen vor Ort.
- > Eine aktive Bodenmikroflora beeinflusst ganz wesentlich die Stoffkreisläufe und trägt damit zur Vitalität von Waldbeständen bei.

Mikroorganismen im Boden als Frühwarnsystem für Bodenveränderungen

- > Das Ziel der mikrobiologischen Studien von Frey et al. (2011) und Hartmann et al. (2014) ist, die funktionellen Beziehungen zwischen den physikalischen Bodeneigenschaften und den von ihnen unmittelbar und mittelbar beeinflussten Lebensbedingungen sowie Menge, Aktivität und Zusammensetzung von Bodenmikroorganismen zu untersuchen.

Gashaushalt

Die Auswirkungen von mechanischen Belastungen auf die Bodenmikroorganismen und deren Aktivität sind komplex und von vielen Faktoren abhängig. Intensive Wechselwirkungen zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen finden nach Strukturveränderungen im Boden unter anderem über den Gashaushalt statt. Intakter Boden besteht je zur Hälfte aus fester Substanz und aus luft- oder wasserführenden Poren. Durch Verdichtung wird in den meisten Fällen das Grobporenvolumen verringert. Ein beschädigtes und eingeschränktes Porensystem verringert die Transportleistung für Wasser und Luft. Die Poren sind deshalb öfter wassergesättigt. Weil Sauerstoff in Wasser 10000 mal langsamer als in Luft diffundiert, wird er viel langsamer in den Porenraum nachgeliefert. Der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre ist in einem verdichteten Boden, beispielsweise in Fahrspuren, gestört. Dadurch wird bei gegebenen Klima- und Feuchtigkeitsbedingungen der Luft- und Wasserhaushalt im Boden und damit die Lebensbedingungen der Mikroorganismen in Bezug auf O₂- bzw. CO₂-Gehalt der Bodenluft und das Redoxpotenzial negativ beeinflusst. Bei sauerstofflimitierenden Bedingungen kommt es zu veränderten mikrobiellen Prozessen im Boden, indem die Energiegewinnung der Mikroorganismen nicht mehr durch Verbrennungs-, sondern vor allem durch Reduktionsprozesse erfolgt. Dies spiegelt sich in den vom Boden an die Atmosphäre abgegebenen Gasen (Teepe et al. 2004) und der Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Boden (Schnürr-Putz et al. 2006; Frey und Lüscher 2008; Frey et al. 2009) wider. Letztere kann direkt über die Bestimmung der Bodenbakteriengemeinschaft nachgewiesen werden (Frey et al. 2009). Im Gegensatz zur Sauerstoffkonzentration in der Bodenluft, die hoch variabel auf eine Vielzahl verschiedenster Einflüsse (z. B. Schneebedeckung) anspricht, reagieren Bakteriengemeinschaften deutlich träger (nach zwei bis vier Wochen) und reflektieren somit das «mittlere» Bodengasmilieu ohne Beeinflussung durch kurzfristige Ereignisse.

Methode des genetischen «Fingerprints»

Häufig werden globale mikrobielle Parameter bestimmt, um die Wirkungen von physikalischen Bodenbeeinträchtigungen auf die Bodenmikroorganismen zu untersuchen. Eindeutige Beziehungen zwischen Schadwirkungen (globalen mikrobiellen Aktivitätsparametern) und physikalischen Parametern (Lagerungsdichte) liessen sich aber nicht ableiten (Li et al. 2004; Shestak und Busse 2005). Ein möglicher Grund könnte sein, dass globale mikrobielle Parameter zu ungenau oder zu wenig empfindlich sind, um die Wirkung von Veränderungen der Bodenstruktur auf Bodenmikroorganismen nachzuweisen.

Strukturveränderungen im Boden lassen sich auch über den Gashaushalt nachweisen

Mittels genetischen «Fingerprints» der eubakteriellen 16S rDNA-Fragmente können wir heute aber die Wirkungen von physikalischen Bodenbeeinträchtigungen auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Boden eindeutig nachweisen (Frey und Lüscher 2008; Frey et al. 2009). Genetische «Fingerprints» sind oft empfindlicher als globale mikrobielle Aktivitätsparameter. Im Fokus stehen dabei die Identifikation der dominierenden Bakterienpopulationen nach DNA-Extraktion mit anschliessendem genetischen «Profiling» mittels T-RFLP (Terminale Restriktionsfragmentlängenpolymorphismen) und DGGE (Denaturierende Gradienten-Gelelektrophorese) in den Bodenproben.

Bakterienvorkommen in Fahrspuren

Wissenschaftler der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL haben im Wald Fahrversuche durchgeführt, die Veränderungen in den Böden minutiös mit Daten erfasst und mögliche Folgen skizziert (Frey und Lüscher 2008; Kremer et al. 2009; Kap. 5.4). Durch das gezielte Anlegen von Fahrspuren entlang eines kontinuierlich ansteigenden Bodenfeuchte-Gradienten konnte eine stetig zunehmende Deformation der Bodenstruktur erzeugt werden. Mit Hilfe einer kombinierten bodenphysikalisch-bodenmikrobiologischen Beprobung im engen Probenraster kann der lokale Übergang von einer «einfachen» bodenstrukturellen Veränderung hin zu einem «Bodenschaden» festgelegt werden. Vor allem der Übergang von der Kategorie «kritisch» zu «schädlich» bedarf einer zuverlässigen Absicherung. Von einem «Bodenschaden» kann dann zweifelsfrei gesprochen werden, wenn sich das Bodenmilieu aufgrund erheblicher Strukturveränderungen dauerhaft von aerob nach anaerob verschoben hat. So kann das Absinken der O₂-Gehalte im Boden bis hin zur Anaerobie führen, was Veränderungen im Artenspektrum von mikrobiellen Lebensgemeinschaften zur Folge hat (Frey et al. 2009 und Frey 2010).

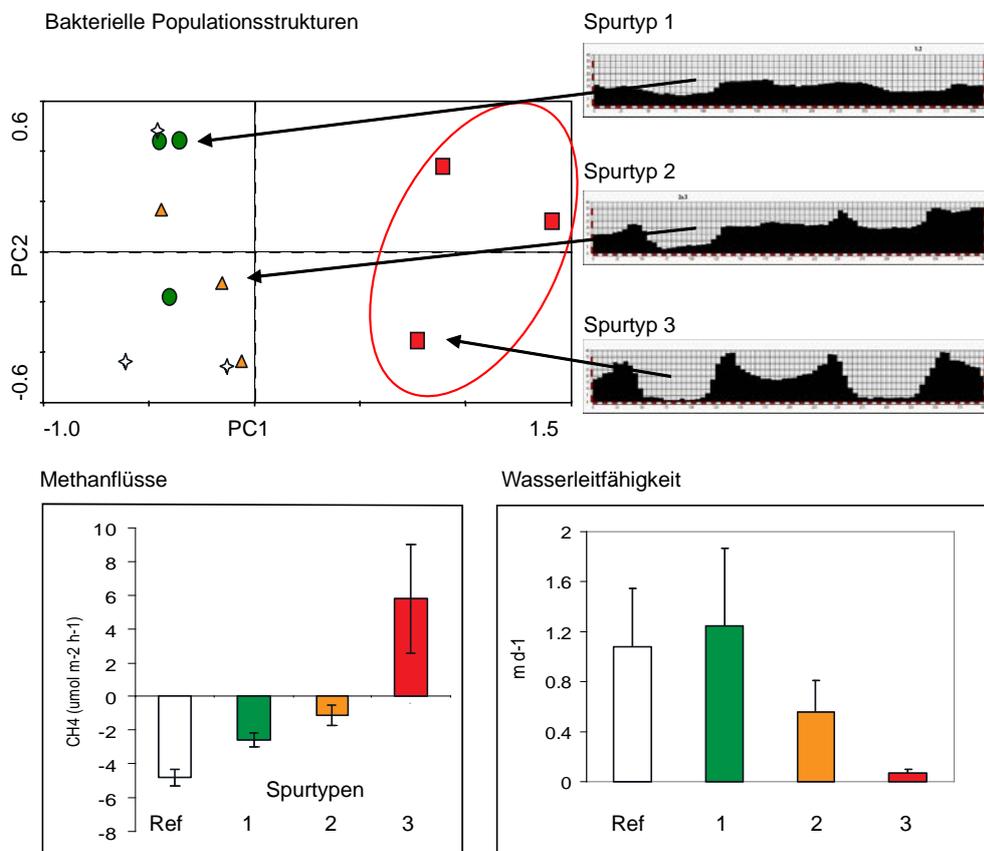
Während in einer noch intakten Bodenstruktur aerobe Bakterien mit CO₂ als Atmungsprodukt vorherrschen, kommt es bei mittlerer und starker struktureller Bodenveränderung mit eingeschränkten Bodenfunktionen zu einer Verschiebung hin zu mehr anaeroben Populationen. Dabei gehören denitrifizierende und methanogene Bakterien zu den anaeroben Mikroorganismen, die keinen Sauerstoff für die Energiegewinnung verwenden. Spezifische Gensonden zeigten eine erhöhte Häufigkeit von Denitrifizierern in verdichteten Fahrspuren (Spurtyp 2) an, die Emissionen von treibhausrelevantem Lachgas verursachen können (Zimmermann et al. 2009). Die für die Methanfreisetzung notwendigen Bedingungen können nur in einer durch viskoses Fliessen verformten, völlig sauerstofffreien Fahrspur (Spurtyp 3) erreicht werden, solange keine Austrocknung stattfindet. Unter diesen sehr starken strukturellen Deformationen verschwinden letztlich alle aeroben Stämme und werden von methanogenen Archaea ersetzt (Hartmann et al. 2014). Diese sind also der zweifelsfreie Anzeiger für einen «Bodenschaden» (Spurtyp 3). Aus diesem Grund eignen sich bodenbakterielle Untersuchungen hervorragend zur Ermittlung von sauerstofflimitierenden Bodenbedingungen. An ihnen können alle bodenphysikalischen und -strukturellen Methoden und Parameter sowie die typische Spurausprägung «kalibriert» werden.

Die Spurtypen unterscheiden sich nicht nur morphologisch sondern auch mikrobiologisch

Im Spurtyp 3 herrschen anaerobe Verhältnisse, was auf ein wachstumsfeindliches Milieu hinweist

Abb. 37 > Zusammenhang zwischen Strukturschaden durch Befahrung, Bodenfunktionen und Zusammensetzung der bakteriellen Populationsstrukturen

Visuelle Typisierung der Fahrspuren nach der Art von Veränderungen im Boden anhand der drei Spurtypen (Abb. oben rechts). Eine schwere Bodenbeeinträchtigung (Spurtyp 3) zeichnet sich durch eine stark reduzierte Wasserleitfähigkeit (Abb. unten rechts), erhöhte Methanemissionen (Abb. unten links) und veränderte bakterielle Populationsstrukturen (Abb. oben links) in den Fahrspuren aus. Die Zusammensetzung der bakteriellen Populationsstrukturen zeigt in Abhängigkeit des Spurtyps stark unterschiedliche Cluster in der Hauptkomponentenanalyse (PC1; PC2). Die Spurtypen 1 (grüne Kreise) und 2 (orange Dreiecke) liegen eng bei den Punkten aus dem ungestörten Referenzbereich (Sterne). Die Populationen im Spurtyp 3 (rote Quadrate) unterscheiden sich deutlich davon (Frey 2010).



5 > Untersuchungen in der Praxis

5.1 Ziele und Auswahl der Untersuchungsorte

Im Rahmen des Projektes «Physikalischer Bodenschutz im Wald» wurden in der Schweiz mehrere Waldflächen ausgewählt, auf denen einerseits verschiedene wissenschaftliche und praktische Fragestellungen untersucht werden und die andererseits als gut dokumentierte Basis für Ausbildungskurse dienen.

Die Auswahl wurde so getroffen, dass die im Schweizerischen Mittelland vorherrschenden Standortverhältnisse möglichst breit abgedeckt werden. Im Weiteren wurde besonders darauf geachtet, dass für die einzelnen Versuchsflächen unterschiedliche bodenkundliche und pflanzensoziologische Datengrundlagen vorlagen. Während für die Versuchsfläche Messen-Junkholz, Kanton Solothurn, sogar eine Bodenkarte im Massstab 1:5000 vorhanden ist, existieren für die Fläche Ermatingen-Hohrain, Kanton Thurgau, eine Bodenübersichtskarte 1:50 000 und eine Standortkarte 1:5000 und für die Fläche Heitere-Bruucheren, Kanton Bern, lediglich eine pflanzensoziologische Karte 1:25 000. Die Auswirkungen der unterschiedlichen informatorischen Ausgangslage auf die Qualität der betrieblichen Entscheide im Zusammenhang mit dem physikalischen Bodenschutz und die Möglichkeiten, diese Datengrundlagen zu verbessern oder besser zu nutzen, sollten untersucht werden.

Ergänzend wurde zu einem späteren Zeitpunkt eine Versuchsfläche in Unteriberg, Kanton Schwyz, im nicht befahrbaren Gelände ausgewählt. Hier ging es darum, zu untersuchen, welche bodenphysikalischen Auswirkungen die Vollbaumbringung mit Seilkrananlagen hat. Die Charakteristika der einzelnen Versuchsflächen werden in Kapitel 5.2 detailliert dargestellt.

Auf den Versuchsflächen wurden umfangreiche bodenphysikalische und bodenbiologische Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es, eine praxistaugliche Typisierung der Fahrspuren zu entwickeln, die Veränderungen im Boden nach einer Belastung durch Befahren zu untersuchen sowie die längerfristigen Auswirkungen der Bodenveränderungen aufzuzeigen. Auf den Flächen in Ermatingen-Hohrain und Heitere-Bruucheren fand ein Befahrungsexperiment mit einer Forstmaschine unter genau bekannten Rahmenbedingungen wie Bodenaufbau, Bodenfeuchte, Maschinengewicht, Reifenfülldruck etc. statt (Kap. 5.4). Hier wurde in Fahrspuren vom Typ 3 auch eine Versuchspflanzung mit Schwarzerlen angelegt um zu untersuchen, wie die biologische Regeneration von stark verdichteten Böden beschleunigt werden könnte (Kap. 5.5).

Da auf den Versuchsflächen mittlerweile gute Grundlagen vorhanden sind, eignen sich diese für die Durchführung von Aus- und Weiterbildungskursen zum Thema Bodenschutz. Die Versuchsflächen Ermatingen-Hohrain, Heitere-Bruucheren und Messen-Junkholz haben sich, nebst Kursobjekten in anderen Regionen der Schweiz, zu eigentlichen Stützpunkten in der Ausbildungstätigkeit entwickelt.

Versuchsflächen mit unterschiedlichen bodenkundlichen und pflanzensoziologischen Grundlagen

5.2 Versuchsflächen

5.2.1 Überblick und Vorgehen

Tabelle 7 vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Gegebenheiten auf den Versuchsflächen im Mittelland und in den Voralpen.

Tab. 7 > Überblick über die Versuchsflächen im schweizerischen Mittelland und in den Voralpen

Merkmal	Messen-Junkholz	Ermatingen-Hohrain	Heitere-Bruucheren	Unteriberg-Schlegwald
Kanton	Solothurn	Thurgau	Bern	Schwyz
Fläche (ha)	40	82	95	20
Geländeform	flach	flach bis teilweise geneigt	flach bis teilweise geneigt	geneigt (30–40 %)
Bodenart	Schluff	Lehmiger Sand	Schluffiger Sand	Toniger Lehm
Bodentypen	2/3 senkrecht durchwaschen 1/3 stau-, grund- oder hangwassergeprägte Bodentypen	Braunerde, Parabraunerde	Braunerde, Parabraunerde	Hanggleye, z. T. bis zur Oberfläche Hangwassereinfluss, z. T. örtlich verbraunt
Humusgehalt	≤5 %	≤5 %	≤5 %	>5 %
Skelettgehalt	skelettarm	skeletthaltig bis skelettreich	skelettarm bis skeletthaltig	skelettarm bis skeletthaltig
Beeinträchtigte Fläche* [%]	8	1,7	3,7	-
• Spurtyp 1	1,6	1	1,6	-
• Spurtyp 2	1	0,2	0,7	-
• Spurtyp 3	2,4	0,2	1,2	-
• Spurtypen 4, 5 und 6	3	0,3	0,2	-
Vorhandene Grundlagen	Bodenkarte 1:5000	Standortskarte 1:5000 Bodenübersichtskarte 1:50000	Pflanzensoziologische Karte 1:25000	-

*Für die Berechnung der beeinträchtigten Fläche wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

Spurtyp 1: Länge mal Radspurbreite

Spurtyp 2: Länge mal Radspurbreite plus 10 cm beidseitig der Radspur

Spurtyp 3: Länge mal Radspurbreite plus 50 cm beidseitig der Radspur

Spurtypen 4–6: effektiv feststellbare beeinträchtigte Fläche

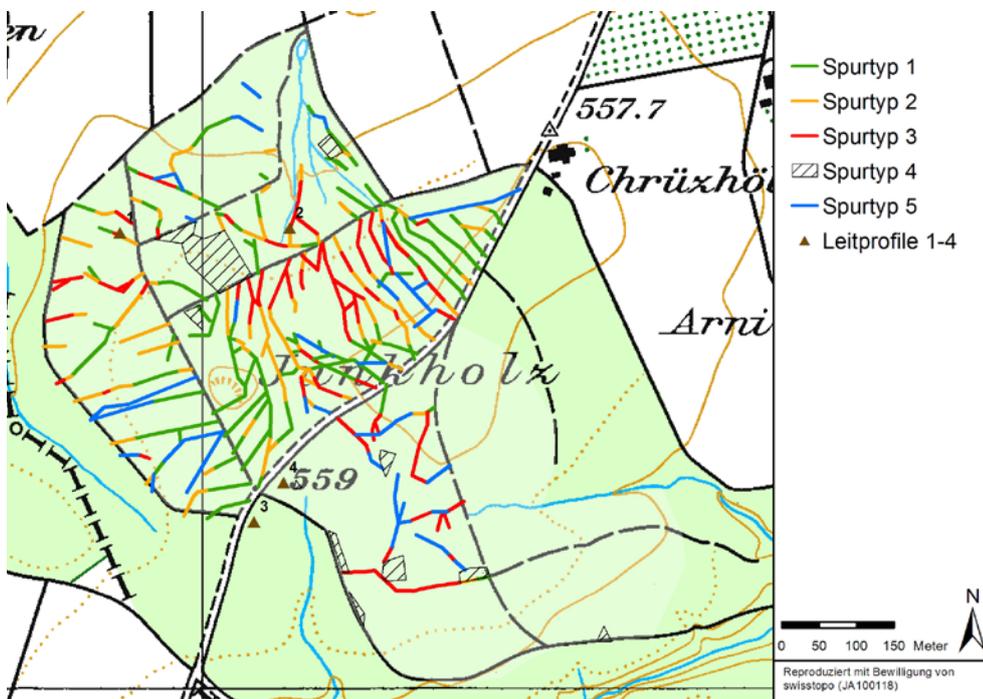
Die voralpine Versuchsfläche Unteriberg-Schlegwald wird im Kapitel 5.2.5 beschrieben.

Auf den Versuchsflächen wurden alle noch feststellbaren Fahr- und Schleifspuren mit einem GPS-Gerät Leica GS 50 mit Swipos-Navigationsdienst aufgenommen. Die Fahrspuren wurden bei der Erhebung nach Spurtypen klassiert. Dabei wurden zusätzlich die Spurtypen 4–6 eingeführt. Die Versuchsflächen werden in den folgenden Kapiteln und auch im Anhang A8 im Detail beschrieben.

5.2.2 Messen-Junkholz

Auf einer Fläche von 40 ha wurden im Frühjahr 2006 nebst den Fahrspurtypen 1, 2 und 3 (Kap. 4.1.1) weitere Kategorien ausgeschieden: Der Spurtyp 4 bezeichnet eine flächige Befahrung, d.h. die einzelnen Fahrspuren liegen sehr nahe beieinander und verlaufen kreuz und quer auf der Fläche. Der Spurtyp 5 umfasst nicht typisierbare Spuren, d.h. Spuren, welche so alt sind, dass zum Zeitpunkt der Erhebung nicht mehr eindeutig festgestellt werden konnte, um welchen Spurtyp es sich ursprünglich handelte. Für die Erhebung in Messen-Junkholz wurden auch die vermuteten Spuren dem Spurtyp 5 zugeordnet. Vermutete Fahrspuren sind bereits so stark mit Feinerde überdeckt und eingewachsen, dass sie nicht mehr direkt als Spur erkennbar sind. Vielfach weisen jedoch Nässe- bzw. Verdichtungszeiger wie Binsen und Seggen auf eine frühere Befahrung hin oder durch einen Bodenaufschluss mit dem Bohrstock sind Vernäsungsmerkmale erkennbar. Die vermuteten Spuren wurden bei späteren Erhebungen von Fahrspuren (Ermatingen-Hohrain, Heitere-Bruucherer) separat als eigener Spurtyp 6 klassiert.

Abb. 38 > Fahrspuren auf der Versuchsfläche Messen-Junkholz klassiert nach Spurtypen



Stand 2006

Die Situation wie sie auf der Versuchsfläche Messen-Junkholz zu finden ist, darf als repräsentativ für grosse Teile der befahrbaren Gebiete im Mittelland bezeichnet werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Feinerschliessung für einzelne Holzschläge angelegt wurde und so im Laufe mehrerer Jahrzehnte sich überschneidende Gassensysteme entstanden sind. Sehr gut zu erkennen sind auch die Teilflächen, wo der Orkan Lothar Ende 1999 den Wald flächig geworfen hat. Durch die Ernte grosser Holzmen gen innerhalb eines kurzen Zeitraumes wurden die Fahrlinien auf diesen Flächen sehr

stark beansprucht, was zu einem hohen Anteil des Spurtyps 3 (auf dem Plan rot eingezeichnet) geführt hat. Insbesondere wenn die Bäume mitsamt den Wurzelstöcken geworfen werden, ist es oft nicht möglich, durchgehende Rückegassen von Waldstrasse zu Waldstrasse anzulegen. Ebenso lassen sich bereits früher angelegte Rückegassen oft nur noch teilweise benutzen.

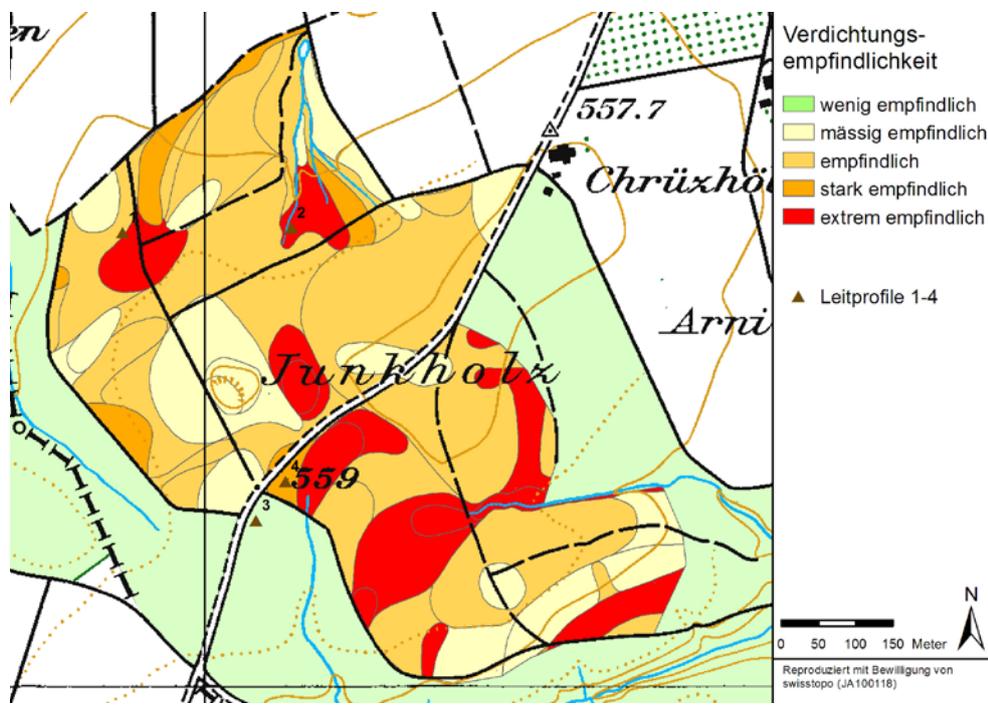
Das Bild der Fahrlinienverteilung zeigt deutlich zwei Notwendigkeiten auf:

- > Rückegassen sind systematisch zu planen und zwar nicht mehr nur für einzelne Holzschläge, sondern für gesamte Feinerschliessungseinheiten
- > Rückegassen sind auf einem Plan festzuhalten und wo nötig im Gelände so zu versichern, dass sie anhand des Planes zuverlässig wieder aufgefunden werden können.

Als Grundlage für eine systematische Planung der Feinerschliessung kann direkt die Bodenkarte im Massstab 1:5000 verwendet werden, eine einfacher zu handhabende Grundlage bietet jedoch die daraus abgeleitete Karte der Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens (Abb. 39).

Abb. 39 > Karte der Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens für die Versuchsfläche Messen-Junkholz

Dargestellt wird die natürliche Empfindlichkeit der Böden gegenüber mechanischer Belastung.



Die Kartenwerke werden vom Amt für Umwelt des Kantons Solothurn (Fachstelle Bodenschutz) im Internet zur Verfügung gestellt (von Rohr et al. 2013). Für die Waldgebiete mit bestehender Bodenkartierung wird die Verdichtungsempfindlichkeit direkt über einen Entscheidungsbaum aus den bekannten Bodeneigenschaften (Wasserhaushalt, Skeletgehalt, Bodenart) abgeleitet (Anhang A10).

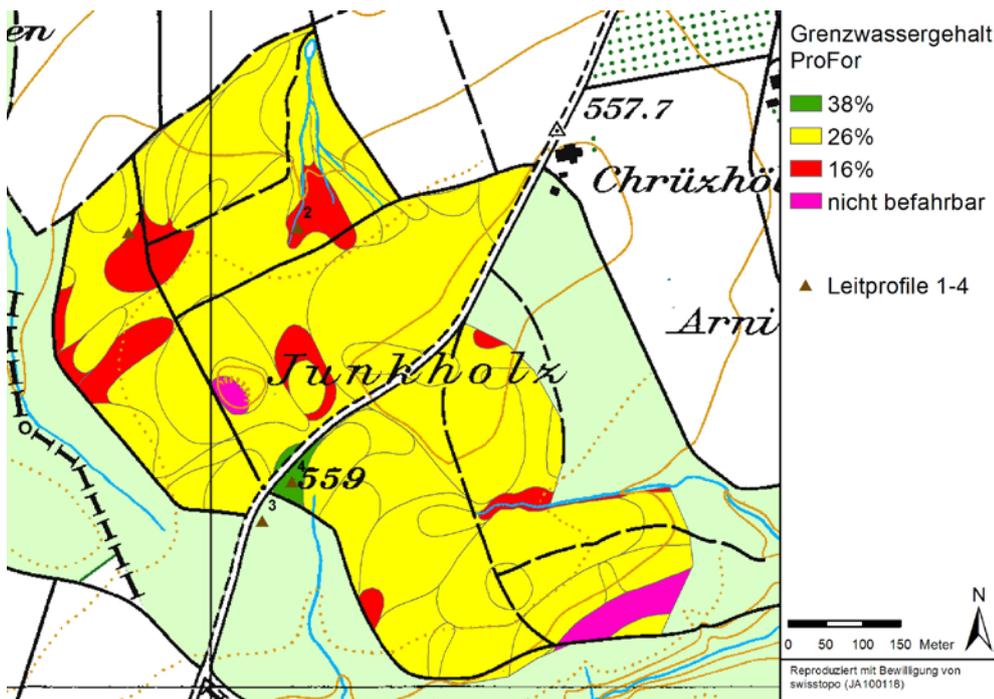
Für Waldgebiete ohne Bodenkartierung existiert ebenfalls eine Hilfe, die sogenannte Hinweiskarte Bodenverdichtung (von Rohr et al. 2013). Im Kanton Aargau wurden in Zusammenarbeit mit der WSL anhand der Standortskarte, der Geologischen Karte 1:25 000, der Bodenkarten 1:25 000 und einzelnen Leitprofilen Verdichtungsrisikoklassen gebildet. Diese wurden auf vergleichbare Situationen im Kanton Solothurn übertragen. Aufgrund der indirekten und kleinermassstäblichen Datengrundlagen sind die Aussagen weniger genau als bei der auf der Bodenkarte beruhenden Verdichtungsempfindlichkeitskarte. Sie liefern für die Feinerschliessungsplanung dennoch eine Übersicht und eine gute Grundlage für die Verifizierung des Verdichtungsrisikos im Gelände.

Bereits einige Zeit bevor die Karte der Verdichtungsempfindlichkeit für die Versuchsfläche Messen vorlag, wurde auf andere Weise versucht, die Bodenkarte für die Anwendung in der Feinerschliessungsplanung einfacher lesbar zu machen. Mit dem Informationssystem ProFor der Technischen Universität München (Ziesak 2004) kann eine Grenzwassergehaltskarte erstellt werden. Anhand von Boden- und Maschinenparametern wird der sogenannte Grenzwassergehalt des Bodens berechnet. Liegt der effektive Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der vorgesehenen Befahrung unterhalb dieses berechneten Grenzwassergehaltes, kann der Boden gemäss dem Modell schadensarm befahren werden. Die Messung des Bodenwassergehaltes erfolgt mit einer einfach handhabbaren Sonde.

Verdichtungsempfindlichkeitskarte als Grundlage für die Feinerschliessungsplanung

Abb. 40 > Grenzwassergehalte für die Versuchsfläche Messen-Junkholz, berechnet mit dem Informationssystem ProFor für einen Forwarder der Nutzlastklasse 10 Tonnen

Ein Grenzwassergehalt von 26 % (gelb) bedeutet, dass der Boden erst befahren werden sollte, wenn der aktuelle Wassergehalt unter diesen Wert gesunken ist.

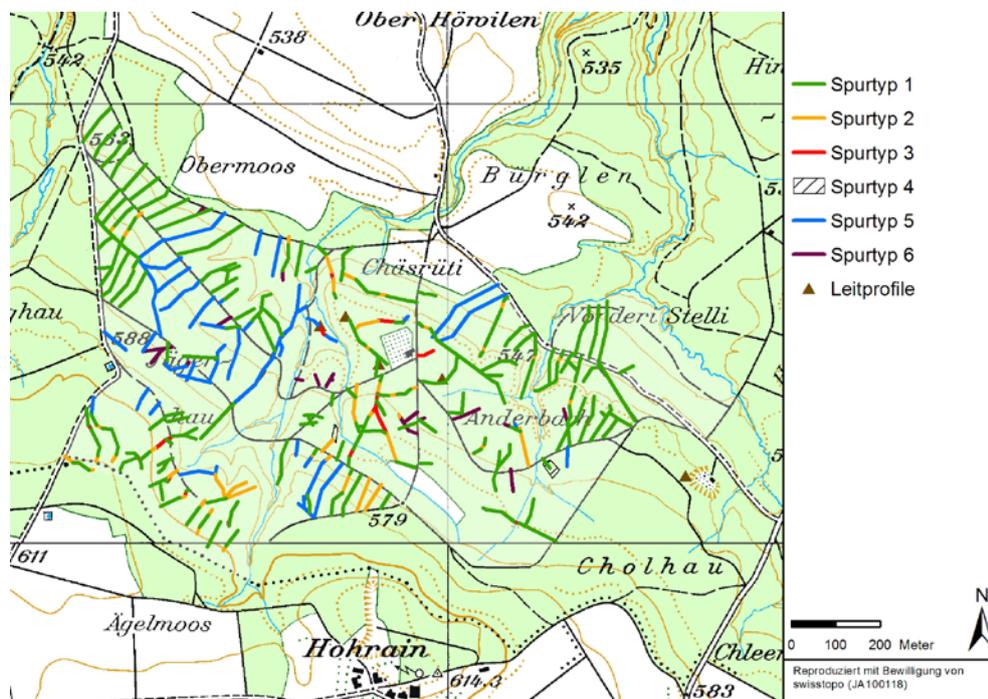


Es ist zu beachten, dass die Grenzwassergehaltskarte jeweils nur für einen bestimmten Maschinentyp erstellt werden kann und gilt. Soll dann z. B. eine Maschine mit höheren Rad- bzw. Achslasten eingesetzt werden, muss die Karte für diesen Maschinentyp neu berechnet werden.

5.2.3 Ermatingen-Hohrain

Auf einer Fläche von 82 ha wurden analog zur Versuchsfläche Messen-Junkholz alle noch feststellbaren Feinerschliessungslinien aufgenommen und nach Spurtypen klassiert.

Abb. 41 > Fahrspuren auf der Versuchsfläche Ermatingen-Hohrain klassiert nach Spurtypen



Stand 2007

Aus Abbildung 41 ist ersichtlich, dass die Fläche seit längerer Zeit systematisch auf immer denselben Rückegassen befahren wurde. Der geringe Anteil an Fahrspuren vom Typ 3 zeigt, dass die Rückegassen nur selten bei ungünstigen Witterungsbedingungen, d. h. zu hoher Bodenfeuchte, befahren wurden. Dabei ist aber auch festzuhalten, dass die Böden skelettartig bis skelettreich sind und somit wesentlich besser befahrbar als vergleichsweise die Böden auf der Versuchsfläche in Messen-Junkholz.

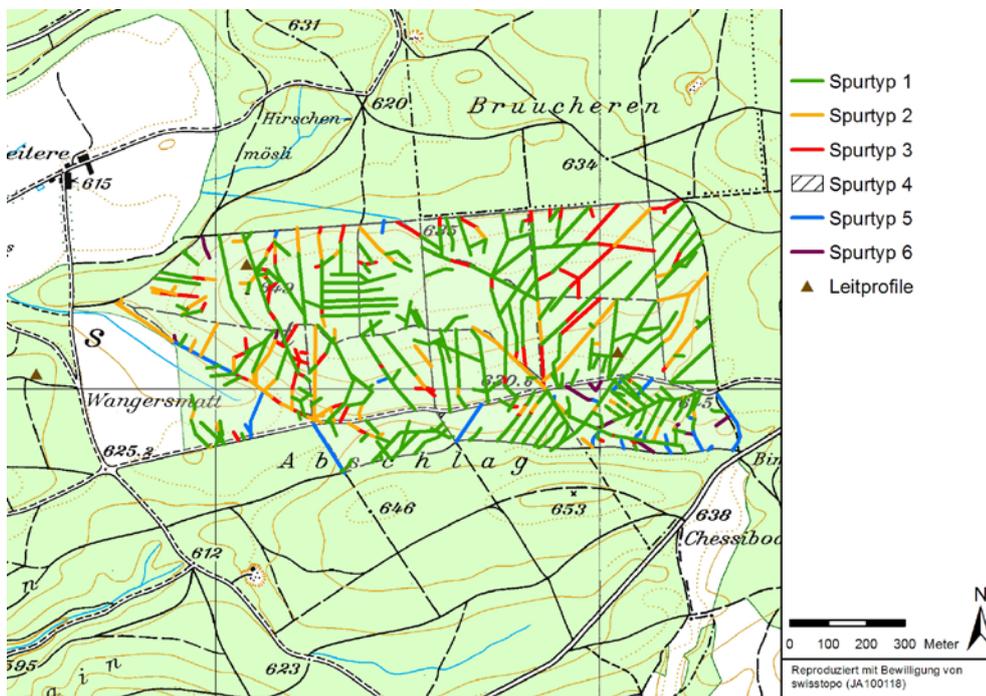
Für den Kanton Thurgau wurden die Waldgesellschaften einer Verdichtungsempfindlichkeit zugeteilt (Schmider et al. 2003). Diese umfasst fünf Stufen von gut bis nicht befahrbar. Da eine bestimmte Waldgesellschaft nicht immer auf den gleichen Bodentypen stockt, wurden an verschiedenen Stellen Leitprofile geöffnet um genauere Angaben zum Boden zu erhalten.

Als Grundlage für die Planung der Feinerschliessung kann auch hier mittels des Informationssystems ProFor eine Grenzwassergehaltskarte erstellt werden, so wie sie für die Versuchsfläche Messen-Junkholz vorliegt. Allerdings liefern die Standortskarte 1:5000 und die Bodenkarte 1:50000 weniger detaillierte Informationen zu den in ProFor verwendeten Bodendaten als eine Bodenkarte im Massstab 1:5000. Damit ist auch die Genauigkeit der Grenzwassergehaltskarte geringer. Eine solche kann jedoch gleichwohl nützliche Dienste für die Übersicht bei der Feinerschliessungsplanung und für die Wahl der Holzerntemaschinen leisten.

5.2.4 Heitere-Bruucheren

Im Waldgebiet «Forst» der Burgergemeinde Bern wurden auf einer Fläche von 95 ha die vorhandenen Fahrspuren analog zu den Versuchsflächen Messen-Junkholz und Ermatingen-Hohrain kartiert. Das Gelände ist flach bis leicht geneigt, die Böden skelettarm bis skeletthaltig (Kuppenlagen).

Abb. 42 > Fahrspuren auf der Versuchsfläche Heitere-Bruucheren klassiert nach Spurtypen



Das Bild der Fahrspuren zeigt, dass im betreffenden Gebiet der Waldboden seit längerer Zeit recht systematisch auf geplanten Rückegassen befahren wird. Der mehrheitlich vorherrschende Spurtyp 1 lässt darauf schliessen, dass die Rückegassen bei günstiger Bodenfeuchte befahren wurden. Die an einzelnen Stellen ersichtliche Häufung von Fahrspuren vom Typ 3 ist auf die Nutzung von geworfenem Holz des Orkans Lothar zurückzuführen, wo in kurzer Zeit grosse Holzmassen über die gleiche Rückegasse gerückt wurden und der hohe Aufarbeitungsdruck zu einer Befahrung der Gassen bei ungünstigen Witterungsverhältnissen führte.

Für die Region, in welcher die Versuchsfläche liegt, sind wenig Grundlagen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden verfügbar. Es existiert lediglich eine pflanzensoziologische Karte, aus welcher die Verdichtungsempfindlichkeit nur bedingt abgeleitet werden kann. Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, wie die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens direkt im Gelände bestimmt werden kann. Dieses Verfahren wurde auf verschiedenen Rückegassen getestet und wird in Kapitel 6.2.2 näher beschrieben.

5.2.5 Unteriberg-Schlegwald

Im nicht befahrbaren Gelände wird das Holz mehrheitlich mit Seilkrananlagen gerückt. Seit den Aufräumarbeiten des Orkans Lothar kommt dabei zunehmend das Arbeitsverfahren der Vollbaumbringung zum Einsatz. Dabei werden die gefällten Bäume mit einer Seilkrananlage mit oder ohne Krone an die Waldstrasse gerückt. Bei abgezopfter Krone oder anderen Trennschnitten am Stamm kann durch das Schleifen der scharfkantigen Stammenden über den Boden die Bodenoberfläche in der Seiltrasse aufgeschürft werden. Das Entstehen einer solchen «Schleifspur» hängt von verschiedenen Faktoren bzw. dem Zusammenwirken dieser Faktoren ab: Bodentyp, Bodenfeuchte, Geländeform, Baumdimension, Höhe des Trageils über Boden und Rücken von Bäumen mit/ ohne Krone.

Generell ist festzuhalten, dass das Ausmass allfälliger Bodenbeeinträchtigungen bei den Holzernteverfahren mit Seilkranbringung sehr gering ist und auch die Konsequenzen weniger gravierend sind als bei den Fahrspuren. Die beeinträchtigte Bodenfläche ist im Vergleich zur Gesamtfläche eines Holzschlages sehr klein. Je nach Hangneigung und Arbeitsverfahren werden die Seillinien im Abstand von 50–80 m angelegt. Potenziell gefährdet ist lediglich die Mitte der Seiltrasse, wo das kopfhoch gerückte Holz über den Boden schleift. Falls ungezopfte Vollbäume gerückt werden, kann aufgrund der federnden Wirkung der Äste das Risiko der Schleifspurbildung vermindert werden. Das grösste Risiko besteht dann, wenn für die Seilkrananlage zu schwere Bäume eingeschnitten werden müssen und der unterste, schwerste Stammteil über den Boden geschleift wird. In diesem Fall ist es besonders wichtig, dass das Trageil nur so hoch über dem Boden verläuft, dass die Baumteile in einem möglichst flachen Winkel zum Boden gerückt werden können.

Schleifspuren entstehen vor allem dadurch, dass die Bodenoberfläche durch das Darüberschleifen der Bäume aufgerissen und Bodenmaterial zur Seite gedrückt wird. Die Bodenpressung reicht aufgrund der erheblich geringeren Auflast weniger tief in den Boden als bei den Fahrspuren. Die Spurtiefe erreicht eher selten den Unterboden (Schleifspurtyp 3, Abb. 44), so dass für die Regeneration allfälliger Beeinträchtigungen weitaus günstigere Bedingungen herrschen als bei den Fahrspuren.

Bei den Schleifspurtypen 1 und 2 besteht kein Risiko für nachfolgende Erosion. Beim Schleifspurtyp 3 dagegen kann in steilem Gelände und in Gebieten mit empfindlichen Böden wie z. B. im Flysch, ein gewisses Erosionsrisiko bestehen. Hier sollte gegebenenfalls nach dem Rücken mit geeigneten Massnahmen (einebnen der Schleifspur, Einlegen von Querhölzern) dafür gesorgt werden, dass abfliessendes Wasser so gebremst wird, dass keine Bodenteilchen mitgerissen werden und es nicht zu einer erodierenden Wirkung kommen kann. Praxiserfahrungen zeigen zudem, dass der hohe

Lichteinfall in der Seilschneise einen raschen Wiederbewuchs begünstigt. Im Untersuchungsgebiet Unteriberg-Schlegwald konnten keine Erosionsschäden aufgrund von Schleifspuren festgestellt werden.

Für die Klassierung von Schleifspuren wurden analog zu den Fahrspurtypen folgende Schleifspurtypen definiert:

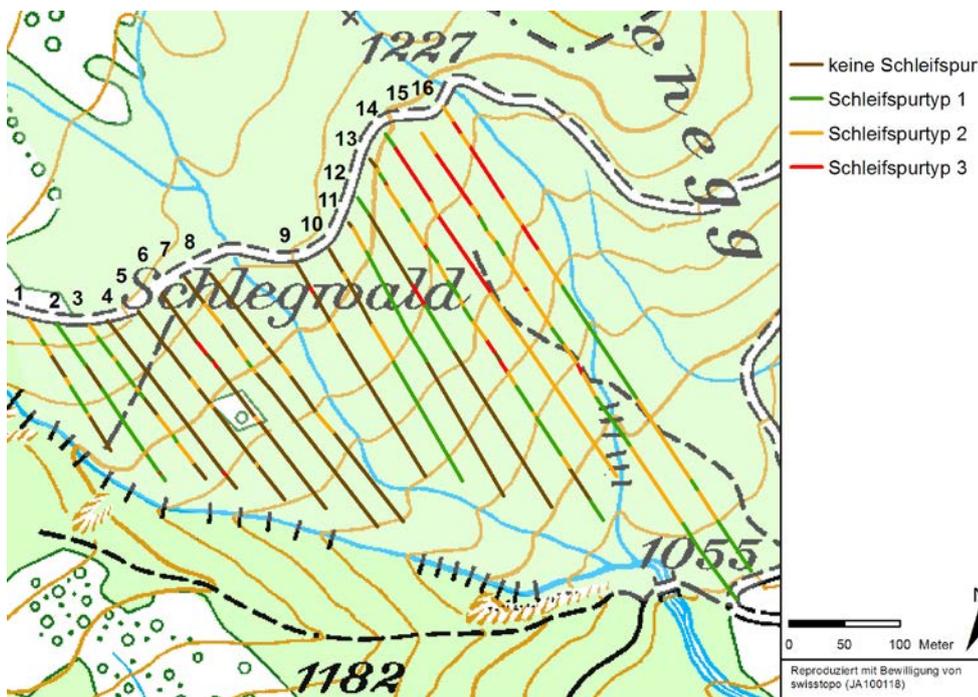
Schleifspurtyp 1: Die Schleifspur ist nur in der organischen Auflage sichtbar, die Tiefe beträgt in der Regel weniger als 10 cm.

Schleifspurtyp 2: Die Tiefe der Schleifspur reicht bis in den Oberboden, sie beträgt meist weniger als 10 cm.

Schleifspurtyp 3: Die Tiefe der Schleifspur erreicht den Unterboden und beträgt in der Regel mehr als 10 cm. Im Gegensatz zum Fahrspurtyp 3 sind hier die seitlichen Aufwölbungen kaum ausgeprägt, was auf die geringere Krafteinwirkung sowie die unterschiedliche Richtung der einwirkenden Kräfte zurück zu führen ist.

Abb. 43 > Ausschnitt aus der Versuchfläche Unteriberg-Schlegwald

Die stellenweise vorhandenen Schleifspuren in den Seiltrassen wurden basierend auf dem System der Fahrspurtypen beurteilt. Auf den Seillinien 1–8 wurde im Sortimentsverfahren gearbeitet, d. h. das Holz wurde im Bestand mit einem Vollernter auf Schreitbaggerfahrgerüst aufgerüstet und mehrheitlich freihängend am Tragseil gerückt. Folglich sind in diesem Teil nur vereinzelt Schleifspuren zu finden.



Auf der Versuchsfläche Unteriberg-Schlegwald wurde versucht, die für das befahrbare Gelände verwendete Klassierung der Fahrspuren nach Spurtypen (Kap. 4.1.1) auf die Schleifspuren in den Seiltrassen anzuwenden. Die Versuchsfläche liegt im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Flächen in nicht befahrbarem Gelände und weist verdichtungsempfindliche Böden auf (Tab. 7). Von 2001–2007 wurden auf dem in Abbildung 43 gezeigten Geländeausschnitt 16 Seillinien angelegt, auf 8 Seillinien wurden Vollbäume gerückt.

Im nicht befahrbaren Gelände wurden die Schleifspuren der Seilkränbringung nach dem System der Fahrspurtypen erhoben

Abb. 44 > Schleifspurtyp 3 an einer Geländekante

Die Spurtiefe reicht wie beim Fahrspurtyp 3 bis in den Unterboden. Solche Schleifspuren können je nach Ausdehnung und Lage im Gelände ein gewisses Risiko für nachfolgende Erosion bedeuten.



Der Ausschnitt aus der Versuchsfläche in Abb. 43 zeigt, dass der Anteil des Schleifspurtyps 3 an der gesamten Trassenlänge gering ist. Der bei den Seillinien 14–16 (Vollbaumverfahren) festgestellte Schleifspurtyp 3 könnte auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden: Abflachung des Geländes gegen die Strasse (konvexe Geländeform), besonders empfindlicher Boden und/oder Rücken von Vollbaumteilen in relativ steilem Winkel zum Boden. Ein zusätzlicher Faktor könnte auch die grosse Holzmenge sein, da praktisch alles an der Seillinie anfallende Holz an dieser Stelle vorbeigerückt wird.

Der Flächenanteil der Schleifspuren ist sehr gering

Aufgrund der künftig steigenden Holznachfrage ist von einer zunehmenden Mobilisierung von Holz in Hanglagen auszugehen und damit von vermehrter Vollbaumbringung mit Seilkran. Damit wird die Thematik der Schleifspuren an Aktualität gewinnen. In einem allfälligen Folgeprojekt könnten mittels breiterer Untersuchungen Erkenntnisse über die potenzielle Schleifspurbildung in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren wie Aufarbeitungsgrad des gerückten Holzes, Hangneigung, Bodentyp, Bodenfeuchte, Geländeform und Kleintopographie, Trageilhöhe und Baumdimensionen gewonnen werden.

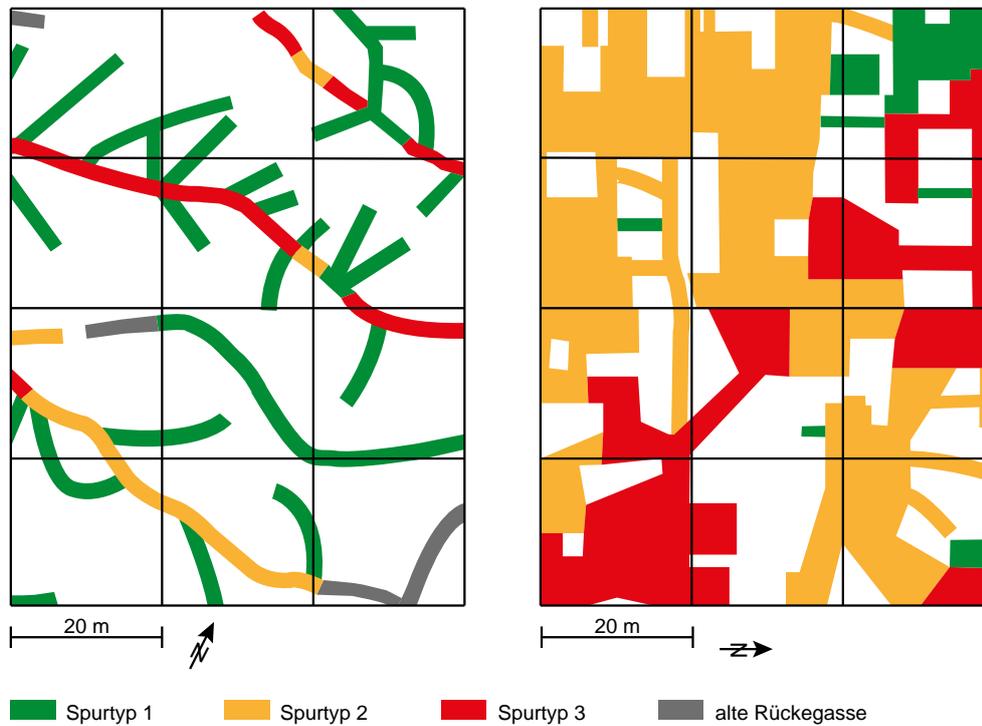
5.3 **Lotharreservatsflächen**

Seit dem Jahr 2000 erforscht die WSL die Folgen von Bodenschäden durch mechanische Belastung und deren Regeneration auf mehreren, durch den Sturm Lothar im Jahr 1999 betroffenen Reservatsflächen im Schweizer Mittelland (Tab. 8). Die Befahrung dieser Flächen bei den Räumungsarbeiten erfolgte sowohl mit systematischer Planung und dem vorhandenen Feinerschliessungssystem – wie in Habsburg AG – als auch ohne eine solche Planung mit flächiger Befahrung wie in Brüttelen BE. Es resultierten dementsprechend unterschiedlich stark ausgeprägte Fahrspuren, Beeinträchtigungen und Bodenschäden (Abb. 45).

Tab. 8 > Überblick über die Lotharreservatsflächen

Standorte	Habsburg AG	Brüttelen BE	Messen-Brunenthal SO
Geologie	Hochterassenschotter (Riss)	Meeresmolasse (Sandstein und Mergel)	Süswassermolasse, mit geringer Moränenbedeckung (Würm)
Bodeneigenschaften Bodentypen	Saure, skelettreiche Parabraunerde, ab 30 cm schwach vernässt, ab 60 cm verdichtet	Braunerde, Parabraunerde, pseudovergleyt	Braunerde, manchmal pseudovergleyt, bis Gley
Humusform	Moderartiger Mull bis typischer Moder	Moderartiger Mull	Moderartiger Mull bis typischer Mull
T/N Jahresmittelwert	9,5 °C / 1032,5 mm	9,4 °C / 1187 mm	9,4 °C / 1187 mm
T/N Januarmittel	0,4 °C / 80,4 mm	0,2 °C / 104 mm	0,2 °C / 104 mm
T/N Julimittel	18,8 °C / 98,1 mm	19 °C / 96 mm	19 °C / 96 mm
Relief/Höhe	Exposition E, Hangneigung 0–5 %, 445–455 m. ü. M.	Exposition N, Hangneigung 0–10 %, 545–550 m. ü. M.	Exposition NE, Hangneigung 0–5 %, 510–530 m. ü. M.
Waldstandortstyp	Waldmeister-Buchenwald	Übergang zw. Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse und Waldmeister-Buchenwald	Waldmeister-Buchenwald mit einem Teil Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse
Zeitraum der Aufräumarbeiten	August – Oktober 2000	Februar 2000, März/April 2001	Sommer 2000
eingesetzte Forstmaschinen	Harvester COBRA HS10, Seilschlepper TIMBERJACK 360C, Rückezug TIMBERJACK 1110	Forstschlepper WOODY 110	Forstschlepper Landini, Vollernter Timberjack 1270 B, Forwarder Valmet 820
Kontaktflächendruck	90–100 kPa	nicht erhoben	nicht erhoben
Befahrung bei Nässe	eventuell	wahrscheinlich	wahrscheinlich
Bodenschutzmassnahmen	Astteppiche	keine	nicht erhoben

Abb. 45 > Fahrspurtypisierung und Flächenanteil der Befahrung der Versuchflächen in Habsburg (links) und Brüttelen (rechts)



Auch in aussergewöhnlichen Situationen ist die Befahrung des Bodens auf genau festgelegte Fahrlinien zu beschränken

In Habsburg lag der Anteil der befahrenen Fläche bei 26,9%, davon waren 23% dem Spurtyp 3 zuzuordnen. Die flächige Befahrung in Brüttelen führte zu einem beanspruchten Flächenanteil von 67,3% (36% Spurtyp 3). Dieses Beispiel illustriert, dass insbesondere nach Sturmschäden ein grosser Handlungsspielraum zur Minimierung der Folgeschäden durch die Räumung besteht und im Hinblick auf den Bodenschutz durch vorbeugende planerische Massnahmen grössere Schäden vermieden werden können. Hinweise dazu sind u. a. im Sturmschaden-Handbuch (BAFU 2008) zusammengestellt.

5.4 Fahrversuche zur Spurbildung

Bei den in der Praxis zu findenden Fahrspuren lässt sich wohl der Spurtyp einigermaßen genau bestimmen, es ist jedoch selten bekannt, unter welchen Bedingungen dieser Spurtyp entstanden ist. Um die einzelnen Spurtypen nicht nur morphologisch, sondern auch bodenphysikalisch und bodenbiologisch zu untersuchen und zu beschreiben, wurden Spurtypen in einem Experiment gezielt angelegt. Dabei waren die Rahmenbedingungen bekannt: Bodenaufbau, Bodenart, Wassergehalt, Maschinengewicht bzw. Radlasten, Reifenfülldruck und Anzahl Überfahrten.

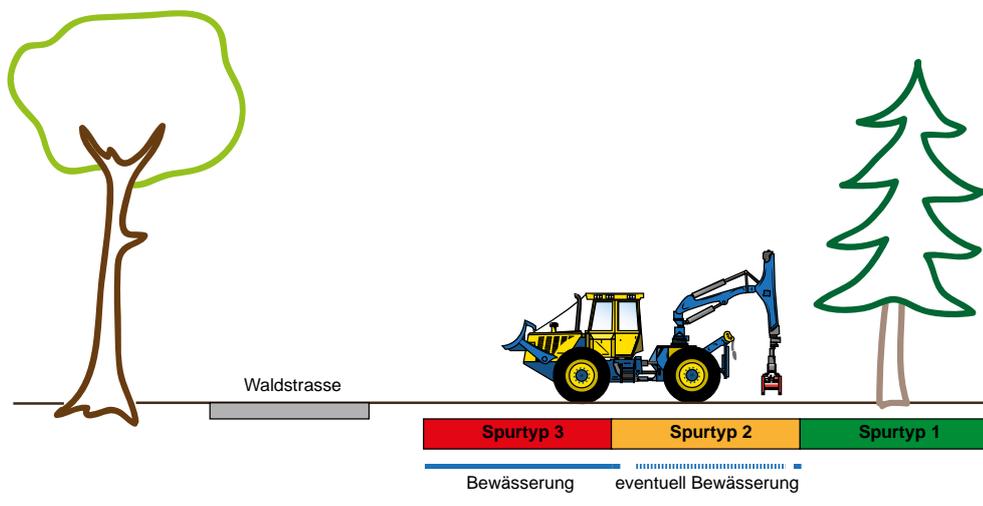
5.4.1 Versuchsanlage und Vorgehen

Im Sommer 2007 wurde auf der Fahrversuchsfläche Ermatingen-Gerstlishau ein Befahrungsexperiment mit einem beladenen Tragschlepper durchgeführt, im Mai 2008 wurde das Experiment auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget mit einem Forstschlepper ohne Last wiederholt. Unter bekannten Rahmenbedingungen wurden mit einer Forstmaschine auf mehreren parallelen Fahrlinien die drei Spurtypen 1, 2 und 3 erzeugt und diese anschliessend morphologisch, bodenphysikalisch und bodenbiologisch untersucht.

Mit dem Informationssystem ProFor der Technischen Universität München (Ziesak 2004) wurde entlang mehrerer paralleler Fahrlinien für verschiedene Sektoren der Grenzwassergehalt berechnet, der mit einer gezielten Bewässerung eingestellt werden musste um voraussichtlich beim Befahren mit der Maschine die gewünschten Spurtypen 3, 2 und 1 erzeugen zu können. Aus praktischen Gründen wurde der Spurtyp 3 am nächsten zur Waldstrasse gelegt, da hier der Boden am stärksten bewässert werden musste.

Zu Versuchszwecken wurden unter vergleichbaren Bodenverhältnissen aber unterschiedlicher Bodenfeuchte die Spurtypen 1, 2 und 3 erzeugt

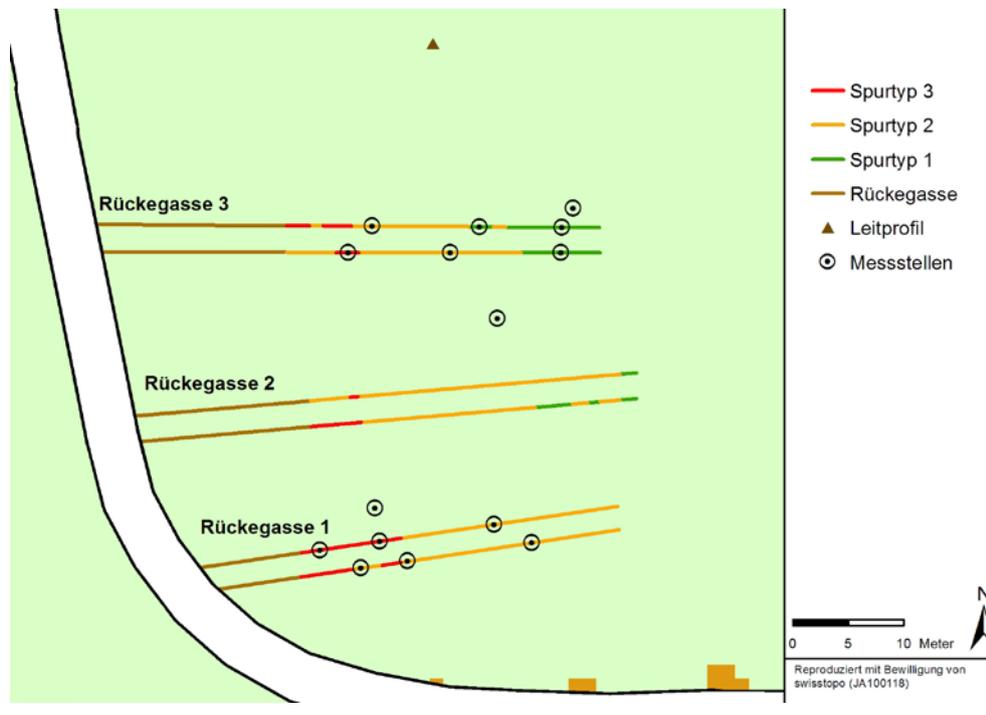
Abb. 46 > Prinzipskizze des Befahrungsexperimentes mit einer Forstmaschine



In Ermatingen-Gerstlishau wurden 3 parallele Fahrlinien von rund 30 m Länge angelegt, in Heitere-Säget waren es aufgrund des vorgesehenen Beprobungsumfangs fünf solche Fahrlinien.

Einzelne Fahrspuren aus dem Befahrungsexperiment wurden für die längerfristige Untersuchung der biologischen Regeneration mit Schwarzerlen bepflanzt. Ziele und bisherige Ergebnisse dieser Regenerationsversuche werden in Kapitel 5.5 eingehender dargestellt.

Abb. 47 > Ausschnitt aus der Versuchsanordnung in Heitere-Säget, Kanton Bern, mit den Fahrspurtypen, die sich nach der gezielten Bewässerung und der anschliessenden Befahrung eingestellt haben



Folgende Messgrößen wurden erhoben:

- > Detaillierte Beschreibung der Spurtypen 1–3 (Kap. 4.1)
- > Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)
- > Intrinsische Luftleitfähigkeit (ki)
- > Porenquotient
- > Lagerungsdichte
- > Korngrößenverteilung
- > Plastische Kennwerte (Ausroll- und Fließgrenze, Plastizitätsindex)
- > Computertomografie
- > Vorverdichtung
- > Zusammensetzung und Veränderungen der mikrobiellen Lebensgemeinschaften wurden mittels molekularer Methoden untersucht. Dabei erfolgte eine Beprobung in den Fahrspuren vor und nach dem Befahren sowie ausserhalb in einem ungestörten Referenzboden.
- > Gashaushaltsmessungen

Die Forstbetriebe der Burgergemeinde Bern und der Bürgergemeinde Ermatingen stellten die Fahrversuchsflächen sowie die Forstfahrzeuge mit Maschinenführer zur Verfügung.

5.4.2 Ergebnisse

Die drei verschiedenen Spurtypen liessen sich auf beiden Fahrversuchsflächen recht gut erzeugen. In beiden Fällen musste jedoch der ursprünglich festgelegte Reifenfülldruck erhöht werden um die gewünschten Spurtypen zu erhalten. Mögliche Ursachen können sein: ein ungenaues Erfassen der in ProFor eingegebenen Bodenparameter, Unterschiede zwischen dem effektiven Wassergehalt des Bodens zum Zeitpunkt des Befahrens und dem berechneten Grenzwassergehalt sowie eventuelle Ungenauigkeiten von ProFor. Durch Erhöhung des Reifenfülldruckes in der Grössenordnung von einigen Zehntelbar liess sich dies kompensieren.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen und bodenmechanischen Untersuchungen zeigen deutliche Unterschiede für die drei Spurtypen.

Die Untersuchung der Aktivität der Mikroorganismen im Boden und die Gashaushaltsmessungen in den Fahrspuren haben statistisch signifikant aufgezeigt, dass sich der Spurtyp 3 bodenbiologisch von den Typen 1 und 2 unterscheidet, indem die Zahl der anaeroben Mikroorganismen stark erhöht ist, der Boden also biologisch deutlich weniger aktiv ist. Diese Untersuchungen werden in Kapitel 4.2.3 detailliert beschrieben.

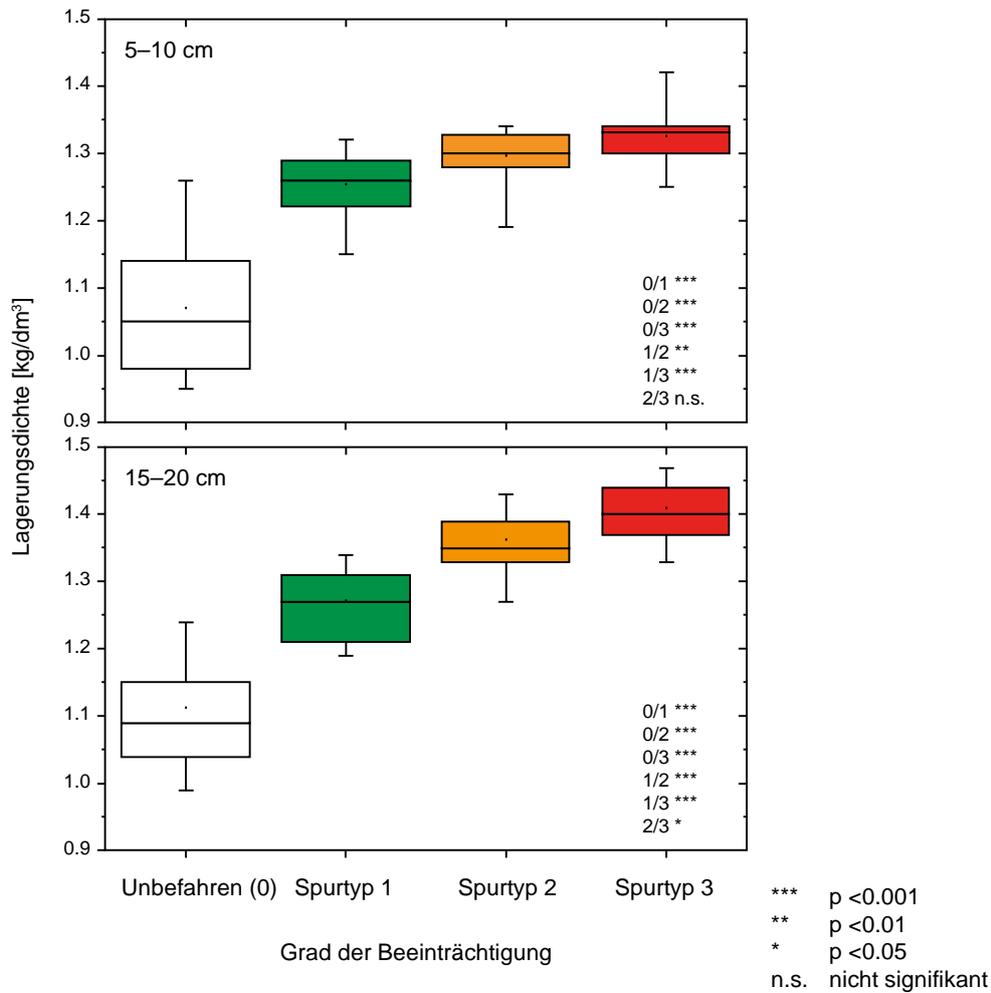
Damit lassen sich die drei Spurtypen nicht nur aufgrund ihrer morphologischen Ausprägung unterscheiden. Mit den Ergebnissen der gemachten Untersuchungen lassen sich diese Unterschiede auch mit Daten hinterlegen.

Alle gemessenen Grössen zeigen deutliche Unterschiede zwischen der unbefahren Referenzfläche und den drei Spurtypen. Sie werden im Folgenden beispielhaft für die Befahrung in Heitere-Säget aufgezeigt.

Die Lagerungsdichte steigt nach dem Befahren mit zunehmender Beeinträchtigung deutlich an (Abb. 48), in beiden Messtiefen über den Wert von $1,2 \text{ kg/dm}^3$. Dichtewerte von vergleichbaren Moräneoberböden unter Waldmeister-Buchenwäldern liegen im Durchschnitt zwischen 20–25 % tiefer (Zimmermann et al. 2006). Die gemessenen Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrspurtypen sind signifikant verschieden. Einzig die Spurtypen 2 und 3 in 5–10 cm Tiefe lassen sich nicht trennen, da die Heterogenität der Dichte oberflächennah relativ gross ist. Mit der Lagerungsdichte können die morphologisch ausgeschiedenen Beeinträchtigungen im Fahrversuch Heitere-Säget nachgewiesen werden. Zudem ist ersichtlich, dass der Wert von $1,4 \text{ kg/dm}^3$ bei dem eine Durchwurzelung erschwert ist (Gisi et al. 1997) beim Spurtyp 3 in 15–20 cm Tiefe erreicht wurde.

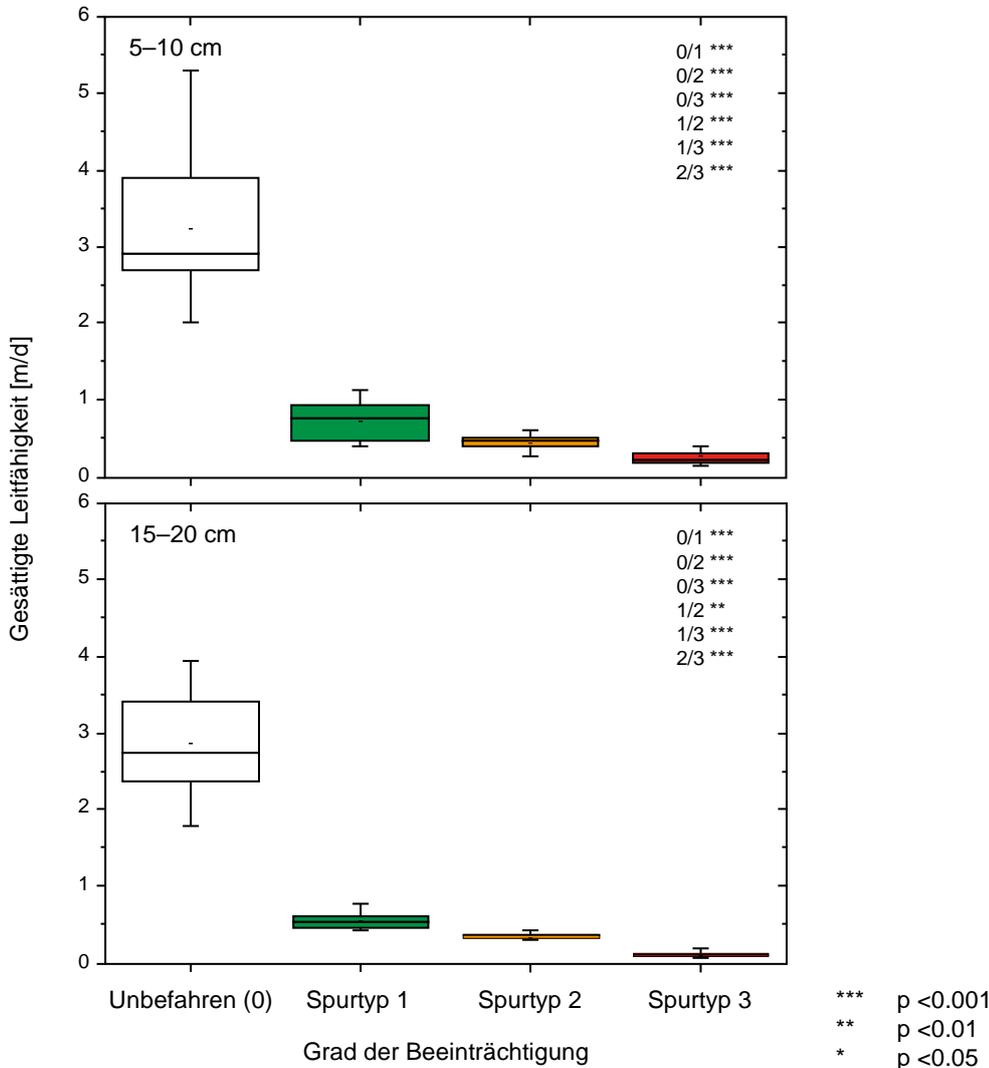
Die bodenphysikalischen und bodenmechanischen Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem unbefahrenen Referenzboden und den einzelnen Spurtypen

Abb. 48 > Lagerungsdichte für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget



In beiden erfassten Messtiefen nimmt die gesättigte Wasserleitfähigkeit infolge Befahrung deutlich ab (Abb. 49). Vom Bereich «äusserst hoch» (>3 m pro Tag) in 5–10 cm Tiefe und «sehr hoch» (1–3 m pro Tag) in 15–20 cm auf der unbefahrenen Referenzfläche nach der Befahrung in den Wertebereich «mittel» bis «gering» (<0,4 m pro Tag). Der Spurtyp 3 liegt in 15–20 cm Tiefe gar bei einer Durchlässigkeit von 0,1 m pro Tag. Die gemessenen Unterschiede zwischen der unbeeinträchtigten Fläche und den einzelnen Fahrspurtypen sind alle statistisch signifikant.

Abb. 49 > Gesättigte Wasserleitfähigkeit für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget



Anhand der gesättigten Wasserleitfähigkeit in verschiedenen Bodentiefen sind Rückschlüsse auf die Veränderungen der ökologischen Funktionalität des Porenraumes in Abhängigkeit vom Beeinträchtigungsgrad möglich. Durch die veränderten Wassersickerungsverhältnisse ergeben sich höhere Wassersättigungsgrade. Diese lassen die über Vernässungsmerkmale festgestellten gestörten Durchlüftungsverhältnisse plausibel erscheinen. Zudem sind die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahresablauf (2007–2009) in Ermatingen-Gerstlishau gemessenen Wassergehalte in den Fahrspuren durchschnittlich um 5–15% höher als in vergleichbaren unbeeinträchtigten Oberböden (Abb. 33). Die längeren Phasen mit Durchlüftungsschwierigkeiten sind die Ursache für die hauptsächlich bei den Spurtypen 2 und 3 zunehmend sichtbare Hydromorphie.

Die Abnahme des Gesamtporenvolumens ist in beiden Bodentiefen vergleichbar (Abb. 50), wobei die Werte in der Tiefe 15–20 cm in allen Behandlungen um etwa 1,5 % geringer sind als in 5–10 cm Tiefe. Das Gesamtporenvolumen reduziert sich durch die Befahrung im extremsten Fall um über einen Fünftel: so sinkt es in 15–20 cm Tiefe von 54,8 % in der unbefahrenen Referenz auf 42,2 % im Spurtyp 3. Zudem zeigt Abb. 51, dass im Spurtyp 3 keine Vernetzung der Grobporen mehr vorliegt.

Abb. 50 > Gesamtporenvolumen für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget

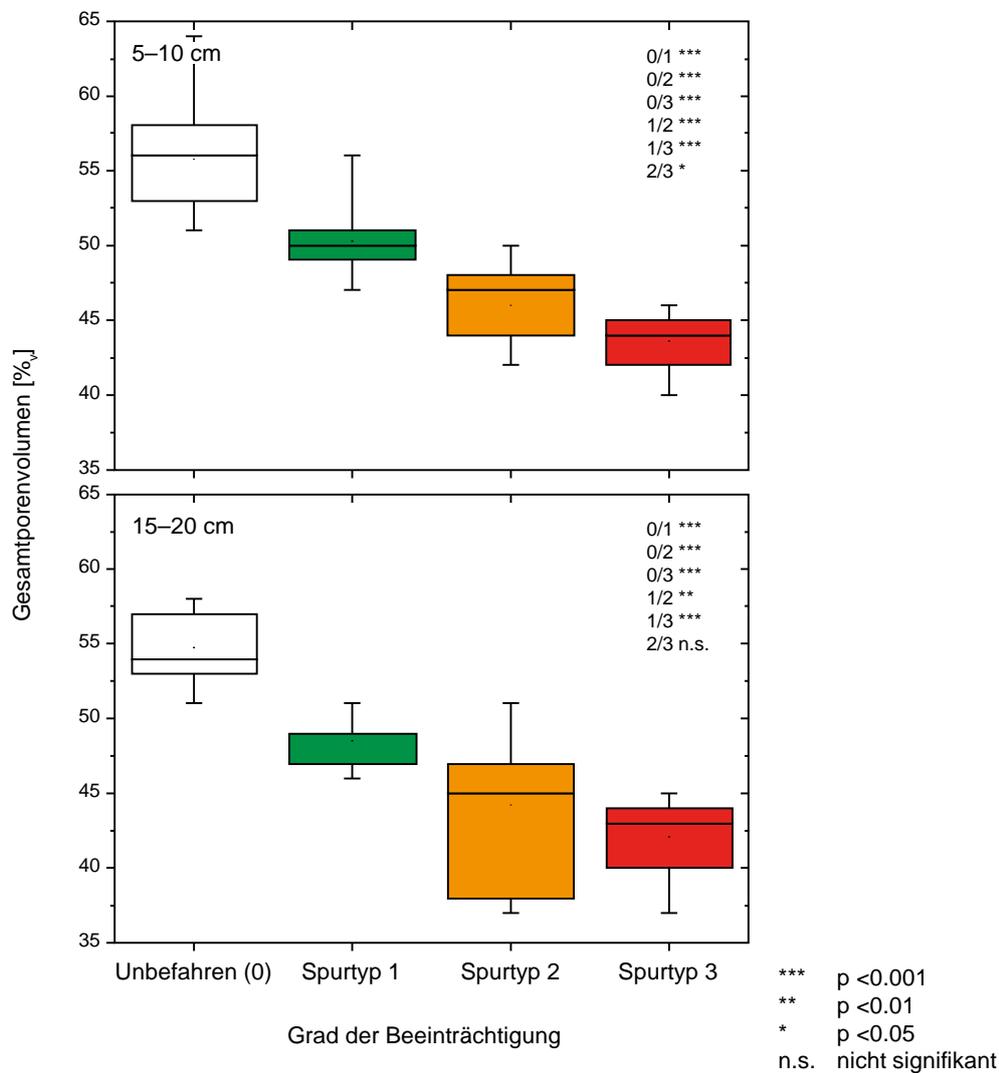
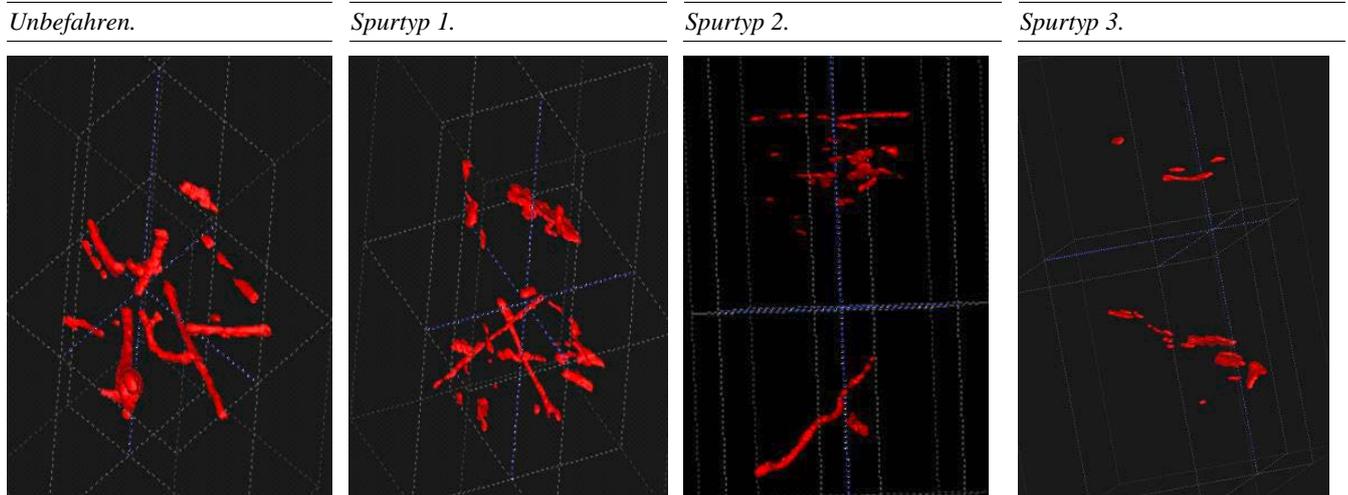


Abb. 51 > Grobporenausbildung in der Bodenmatrix unter den Fahrspurtypen 1–3 im Vergleich zur unbefahrenen Referenz

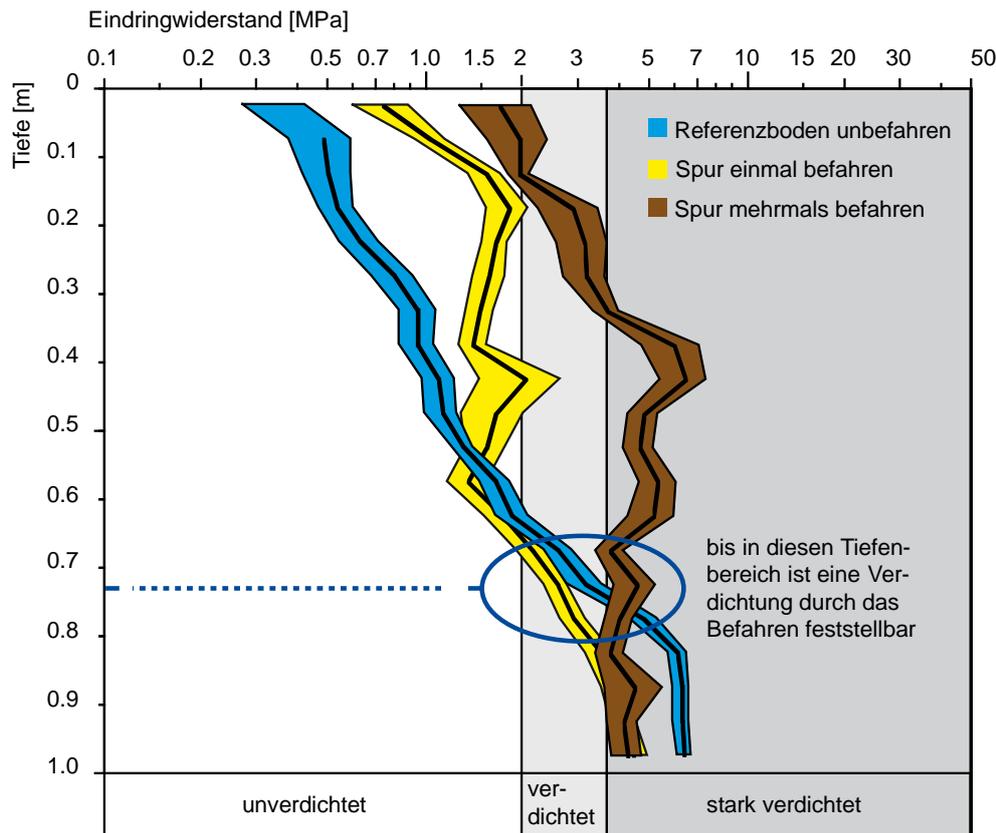
Stand 2007

Die Auswirkungen der Bodenbelastung sind auch in grösseren Bodentiefen nach unterschiedlicher Befahrungsintensität nachweisbar (Abb. 52). Mit einer Messsonde, welche den Eindringwiderstand des Bodens misst, kann eine Verdichtung bis in grössere Tiefen im Unterboden nachgewiesen werden (Lüscher et al. 2009b). In einem vergleichbar zur Fahrversuchsfläche aufgebauten Moräneboden bei Heitere-Säget konnte in einem Bereich der als «stark verdichtet» bezeichnet werden muss, gezeigt werden, dass das Messsignal für den Spurtyp 3 die Referenzwerte der unbefahrenen Fläche erst in 75 cm Tiefe erreicht. Diese Veränderung beeinträchtigt das Wurzelwachstum in Bereichen des Unterbodens langfristig.

Abb. 52 > Eine mechanische Belastung des Bodens wirkt sich bis in grössere Tiefen aus

Verdichtungen können mit einer Messsonde, welche den Eindringwiderstand des Bodens misst, erhoben werden. Verglichen werden ein unbefahrener Boden, eine einmal befahrene Spur und eine mehrmals befahrene Spur, bei gleichmässiger Wassergehaltsverteilung über die gesamte Messtiefe.

Mit der Messung des Eindringwiderstandes lässt sich die Tiefenwirkung einer Verdichtung aufzeigen



5.5

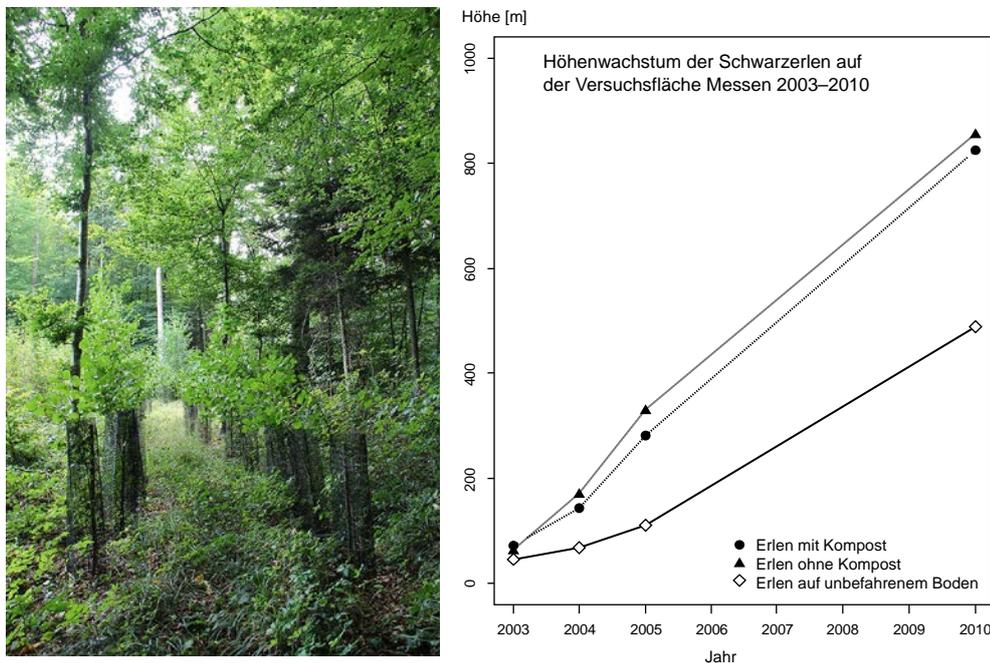
Regenerationsversuch

Trotz der heutigen Bestrebungen Bodenschäden zu vermeiden bzw. zu minimieren gibt es noch viele «alte Schäden», z.B. in Rückegassen die nicht mehr in das aktuelle Feinerschliessungssystem eingebunden sind. Da die Regeneration von Bodenschäden (Fahrspurtyp 3) v. a. im Unterboden nur sehr langsam abläuft – die natürlichen Regenerationsprozesse (Quellung und Schrumpfung, Frostwirkung) sind eher im Oberboden wirksam – stellt sich die Frage, wie die natürlichen Prozesse beschleunigt werden könnten. Im Gegensatz zur Landwirtschaft ist im Wald ein maschineller Eingriff zur Lockerung des Bodens kaum möglich, also müssen andere Ansätze verfolgt werden.

Die WSL führt daher seit dem Jahr 2002 Versuche auf drei der geräumten «Lothar-Reservatsflächen» in Brüttelen BE, Habsburg AG und Messen-Brunnenthal SO durch, um die mögliche Wirkung «pflanzlicher Helfer» zu untersuchen. Alle Untersuchungsflächen sind dem Waldstandortstyp der Waldmeister-Buchenwälder zugeordnet und befinden sich im Schweizer Mittelland. In der Annahme, dass eine Durchwurzelung die verdichteten Bodenbereiche wieder auflockern könnte, wurden 2003 in Fahrspuren des Typs 3 zweijährige Schwarzerlensetzlinge gepflanzt. Ein Teil der Fahrspuren wurde vor der Bepflanzung zusätzlich mit Kompost aufgefüllt. Im Jahr 2009 begannen umfassende Untersuchungen zur Baum- bzw. Wurzelentwicklung der Schwarzerlen und der Regeneration der Bodenstruktur.

In den Jahren nach der Anpflanzung konnten sich Schwarzerlen in den Fahrspuren gut etablieren und zeigten gute Wachstumsraten (Abb. 53). Da die Schwarzerle eine Pionierbaumart ist, die bei Vernässung und Sauerstoffmangel gut wächst, entwickelten sich die Bäume auf den Fahrspuren sogar bedeutend besser als auf den benachbarten unbefahrenen Referenzflächen.

Abb. 53 > Höhenwachstum der Schwarzerlen auf der Fläche Messen-Brunnenthal, Kanton Solothurn (2003–2010)



Für eine genaue Analyse der Durchwurzelungsintensität und der Bodeneigenschaften wurden in verschiedenen Abständen zu den Bäumen quer zu den Fahrspuren verlaufende Profile gegraben. Anhand von Wurzelzählungen und -sammlungen an diesen Profilen wurde die Durchwurzelungsleistung beurteilt. Die Bäume auf den Fahrspuren waren in der Lage, die verdichteten Bodenbereiche bis in über 80 cm Tiefe zu durchwurzeln. Die Hauptwurzelmasse wurde im Oberboden bis etwa 20 cm Tiefe gebildet (Abb. 54 und Abb. 55). In der Tiefe zwischen 20 und 40 cm und darunter befand sich weniger als ein Drittel der Wurzelmasse.

Mit Schwarzerlen kann die Regeneration der Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung eines Bodens unterstützt werden

Abb. 54 > Beispiel der Wurzelverteilung in der Fahrspur mit Erle und Kompost, Profil direkt an der Stammbasis auf der Fläche Messen-Brunnenthal, Kanton Solothurn

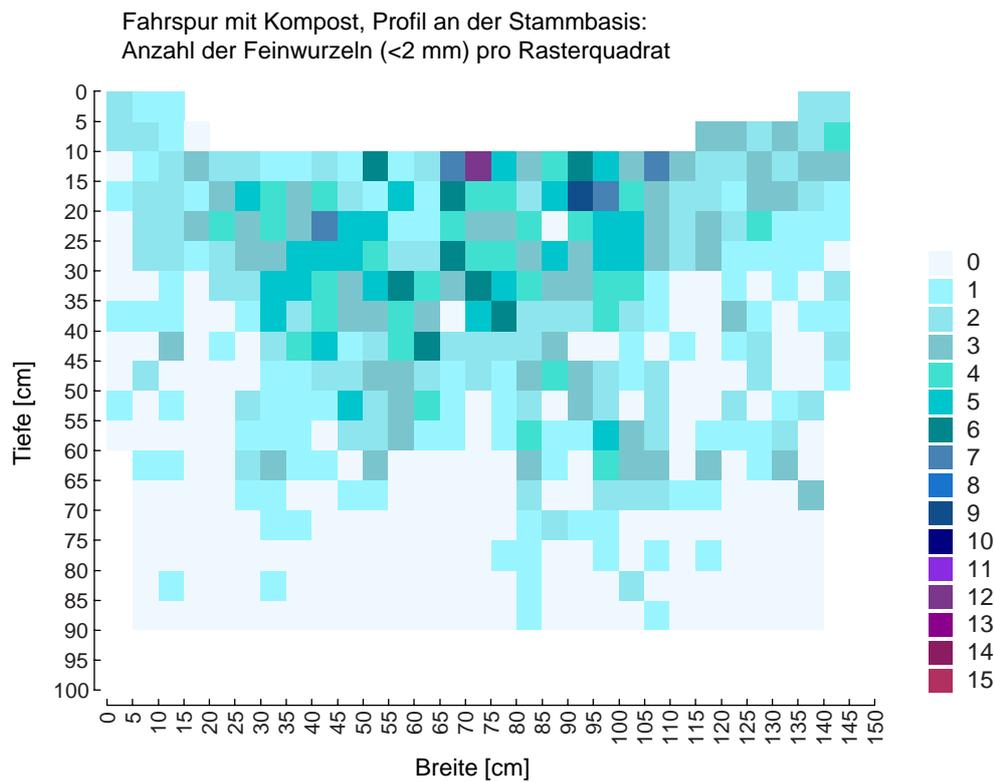
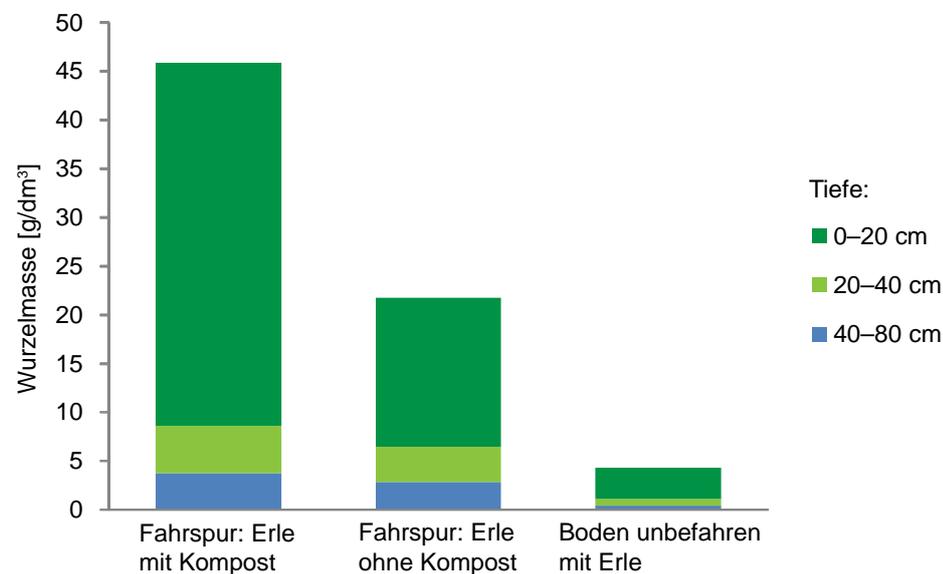


Abb. 55 > Wurzelmasse der Erlenwurzeln in verschiedenen Tiefen (Trockengewicht pro dm^3 Boden) auf der Fläche Messen-Brunnenthal, Kanton Solothurn

Erfasst wurde ein Bereich von 60 cm rund um den Stammfuss.



Ein grosser Unterschied im Wurzelwachstum wurde zwischen Erlen mit und ohne Kompost festgestellt. In der Fahrspur mit Kompost war die im Oberboden gebildete Wurzelmasse rund doppelt so gross (Abb. 55).

Um die Frage zu beantworten, ob das gute Baum- bzw. Wurzelwachstum auch eine positive Wirkung auf die Regeneration der Bodenstruktur hat, wurden in verschiedenen Tiefen Bodenproben für die Untersuchung bodenphysikalischer Kenngrössen entnommen. In der Tiefe von 20–30 cm nahm das Porenvolumen des Bodens zu, so dass sich die Werte der Lagerungsdichte im Vergleich zu 2003 ($1,72 \text{ g/cm}^3$) deutlich verringerten. Während in den Fahrspuren ohne Massnahmen die Dichte $1,63 \text{ g/cm}^3$ betrug (Verringerung 3,6%), konnte durch die Bepflanzung mit Erlen ohne Kompost eine Verbesserung um mindestens 5% ($1,57 \text{ g/cm}^3$) und mit Kompost von 15% ($1,45 \text{ g/cm}^3$) erreicht werden. In der Tiefe zwischen 30 und 40 cm war eine ähnliche Tendenz festzustellen, jedoch waren hier die Unterschiede zwischen den verschiedenen Behandlungen weniger deutlich.

Die Durchwurzelung beeinflusste auch das Grobporenvolumen in 20–30 cm Tiefe positiv (Abb. 56). Zwar wurde in den Fahrspuren mit Massnahmen noch nicht das Niveau der unbefahrenen Referenzfläche erreicht, doch die ermittelten Werte unterschieden sich deutlich von denjenigen der Fahrspur ohne Massnahmen. Im Vergleich zu 2003 vervielfachte sich der Grobporenanteil in bepflanzten Fahrspuren wie auch in der unbehandelten Fahrspur.

Abb. 56 > Grobporenvolumen in einer Tiefe von 20–30 cm sowie 40–50 cm in den verschiedenen Behandlungen auf der Fläche Messen-Brunenthal, Kanton Solothurn

Die grüne Säule ganz rechts zeigt das Grobporenvolumen in 20–30 cm Tiefe kurz nach den Räumungsarbeiten 2003.

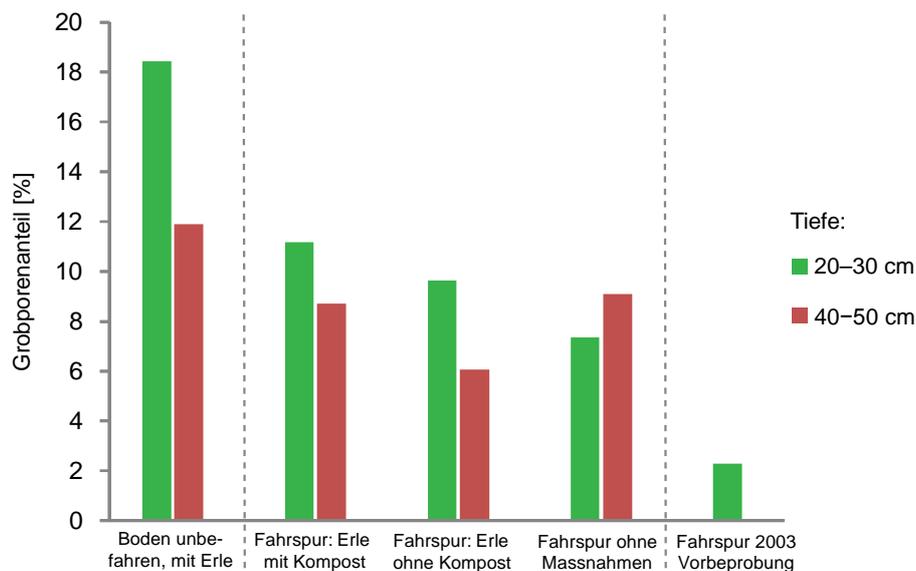
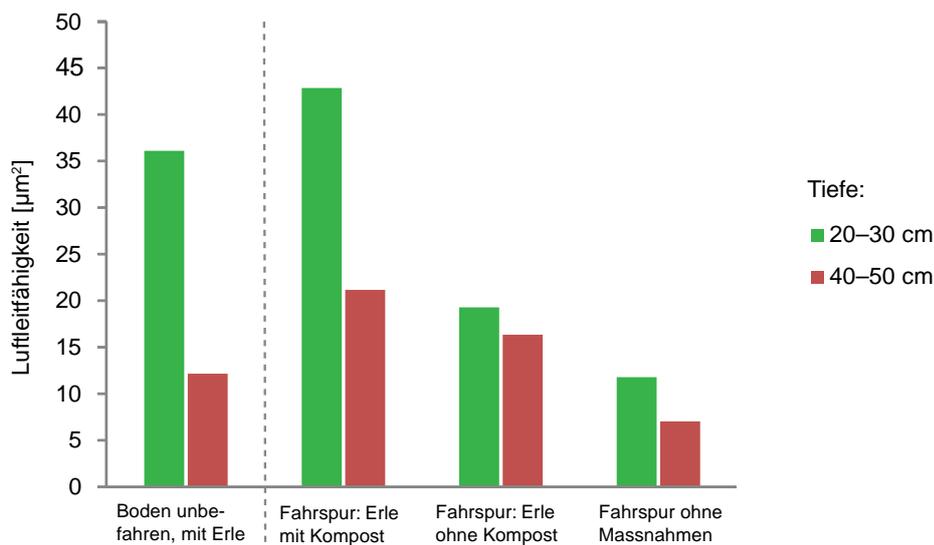


Abb. 57 > Luftleitfähigkeit in einer Tiefe von 20–30 cm sowie 40–50 cm in den verschiedenen Behandlungen auf der Fläche Messen-Brunnenthal, Kanton Solothurn



Mit der Regeneration des Porenraums erholte sich auch die Durchlüftung des Bodens (Abb. 57), die vor allem von der Anzahl und Kontinuität der Poren abhängig ist. In den untersuchten Tiefen wiesen die bepflanzten Fahrspuren höhere Luftleitfähigkeiten auf als die unbehandelten Fahrspuren. Vor allem in den Fahrspuren mit Kompost nahm die Luftleitfähigkeit stark zu und erreichte sogar das Niveau des unbefahrenen Bodens. Die Erholung des Porenraums beeinflusst aber nicht nur die Luftleitfähigkeit, sondern parallel dazu auch die Leitfähigkeit für Wasser. Beregnungsexperimente zeigten, dass sich durch die Bepflanzung auch die Wasserleitfähigkeit (nicht abgebildet) in den Fahrspuren normalisiert hat. Dies bedeutet für den Boden weniger Vernässung und eine bessere Sauerstoffversorgung und somit bessere Bedingungen für eine gesunde Bodenflora und -fauna.

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Bepflanzung verdichteter Fahrspuren mit Schwarzerlen die Regeneration der Bodenstruktur stark fördern kann. Nach sieben Jahren Baumwachstum waren die physikalischen Bodeneigenschaften bis in 30 cm Tiefe weitgehend regeneriert. Im Boden darunter braucht die Regeneration mehr Zeit. Die Wirkung des Kompostes war standortsabhängig. Auf dem Standort Messen-Brunnenthal (hier dargestellt), der relativ feucht ist und eine sehr aktive Humusform mit hohem Umsatz aufweist, hatte der Kompost eine fördernde Wirkung. Auf dem Standort Habsburg, der trockener ist und eine weniger aktive Humusform hat, förderte der Kompost die Regeneration kaum. Aufgrund ihrer Eigenheiten als Pionierbaum und Feuchtgebietspflanze ist die Schwarzerle eine gut geeignete Baumart für Regenerationsmassnahmen in verdichtetem Boden (Meyer et al. 2014). In geschlossenen Wäldern müssten jedoch aufgrund des hohen Lichtbedarfs der Erle andere Baumarten, wie z. B. der Faulbaum, zum Einsatz kommen.

Durch die Bepflanzung der Fahrspuren mit Schwarzerlen konnten Luft- und Wasserleitfähigkeit bis in eine Tiefe von 30 cm innert 7 Jahren weitgehend wieder hergestellt werden

6 > Praktische Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes

Um den physikalischen Bodenschutz umzusetzen, muss er in den Managementprozess der Waldbewirtschaftung integriert werden. Hierzu sind die für den physikalischen Bodenschutz bedeutenden Prozesse zu definieren, diese in die betrieblichen und hoheitlichen Abläufe der Holznutzung einzubauen sowie in den praktischen Entscheiden zu berücksichtigen. Für eine wirksame und effiziente Umsetzung des Bodenschutzes sind Fragen zu beantworten wie:

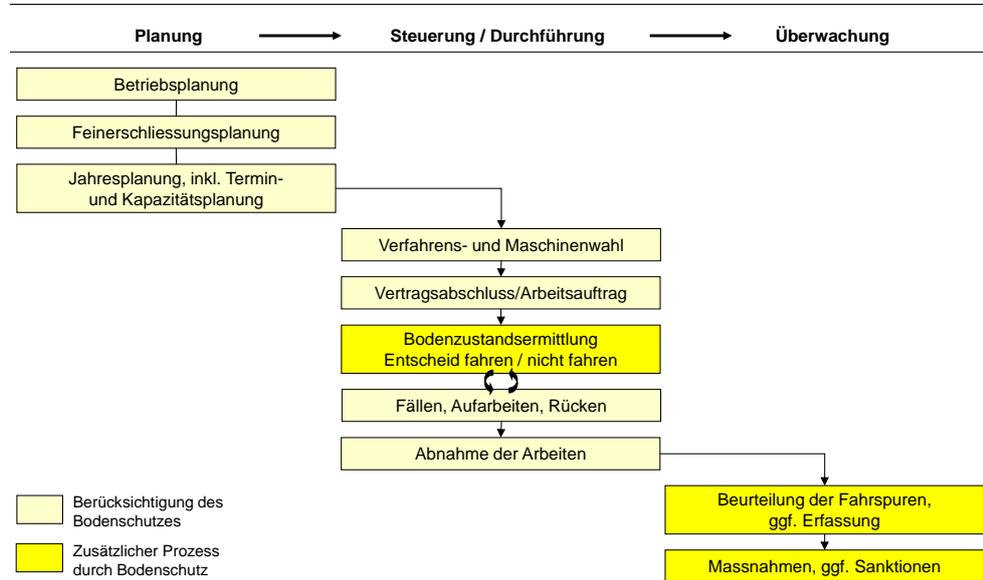
Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz sind in die Prozesse der Waldbewirtschaftung zu integrieren

- > Welche Aufgaben fallen für den Bodenschutz an? Wie sind die Zuständigkeiten verteilt?
- > Wie können diese Aufgaben organisatorisch und technisch ausgeführt werden?
- > Mit welchen Kosten sind diese Massnahmen verbunden?
- > Wie kann ein Qualitätsmerkmal für den Bodenschutz formuliert und umgesetzt werden?

Ein gutes Management dieser Aufgaben ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Wettbewerbsfähigkeit der Waldbewirtschaftung unter Wahrung des Bodenschutzes gewährleistet ist.

6.1 Planung und Steuerung

Die Umsetzung der Bodenschutz-Vorschriften im Forstbetrieb setzt zum einen voraus, dass die entsprechenden Aufgaben und die Verantwortlichkeiten klar definiert und abgegrenzt sind. Zum anderen sind diese Aufgaben in die betrieblichen Prozesse der Holzernte und in den Prozess der kantonalen Überwachung der Waldbewirtschaftung zu integrieren (Abb. 58). Aspekte des Bodenschutzes sind praktisch im gesamten Ablauf wichtig und zu berücksichtigen. Die Integration des physikalischen Bodenschutzes in die gesamte Planung, Steuerung und Kontrolle der Holznutzung (d. h. in die Arbeitsvorbereitung – AVOR) zeichnet den nachhaltigen und professionellen Forstbetrieb aus.

Abb. 58 > Integration des Bodenschutzes in die betrieblichen und hoheitlichen Prozesse der Holznutzung

Spjevak und Thees 2009a

Betriebsplanung

Alle Investitionen und strukturellen Massnahmen zum physikalischen Bodenschutz sind einzubeziehen. Mögliche Investitionen sind das Erstellen einer Karte der Befahrungsempfindlichkeit oder die Beschaffung von Instrumenten zur Messung der Bodenfeuchte oder von spezifischen Maschinenausrüstungen wie Bogiebänder oder Traktionshilfswinden. Mögliche Massnahmen sind die Etablierung neuer Prozesse wie die Beurteilung des Bodenzustandes für den Entscheid fahren/nicht fahren und der Unterbruch der Arbeiten.

Feinerschliessungsplanung

Aus Sicht des Bodenschutzes ist eine gut geplante Feinerschliessung wichtig, um den Anteil der befahrenen Waldfläche möglichst gering zu halten und das Risiko von Bodenbeeinträchtigungen auf festgelegte Fahrlinien zu beschränken (Kap. 6.2.3).

Jahresplanung inkl. Termin- und Kapazitätsplanung

Hier werden die Holzschläge der kommenden Periode sowie weitere konkrete Ziele und die Massnahmen zur Zielerreichung geplant: Beispielsweise sind die in der Holzernte tätigen Mitarbeiter des Betriebs im Hinblick auf den physikalischen Bodenschutz geschult.

Die Termin- und Kapazitätsplanung der Holzschläge ist abhängig von der Befahrungsempfindlichkeit der Böden durchzuführen: Grundsätzlich sind Holzschläge auf Böden mit hoher Befahrungsempfindlichkeit dann auszuführen, wenn die Bedingungen günstig sind, beispielsweise in Frostperioden und bei trockener Witterung. Gegebenenfalls kann dann auch in zwei Schichten gearbeitet werden. Bei Holzschlägen auf weniger befahrungsempfindlichen Böden besteht eine grössere zeitliche Flexibilität. Im Rahmen der Terminplanung sind soweit möglich auch Ausweichflächen zu planen. Bei der Kapazitätsplanung sind Spezialausrüstungen für den Bodenschutz zu berücksichtigen.

Verfahrens- und Maschinenwahl

Auch die Wahl der Maschinen und Arbeitsverfahren ist abhängig von der Befahrungsempfindlichkeit zu treffen und ggfs. bei Ausschreibungen sowie in Verträgen und Vereinbarungen festzuschreiben (Kap. 6.2.6)

Vertragsabschluss/Arbeitsauftrag

In den Verträgen mit Forstunternehmern und in den Arbeitsaufträgen für das eigene Personal sind verbindliche Regelungen für den Bodenschutz zu treffen. Dabei sollten vor allem die erwartete Qualität des Arbeitsergebnisses auf der Grundlage von Standards festgelegt und eine Abnahme der Arbeiten vereinbart werden. Als Mindestanforderung sollte das Fahren ausschliesslich auf den Rückegassen gestattet werden. Darüber hinaus kann auch ein maximal tolerierbares Ausmass der Fahrspuren vom Typ 3 festgelegt und/oder der Einsatz bestimmter Maschinen und Verfahren vorgeschrieben werden. (Kap. 6.2.6 und 6.4.1).

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die kantonale Bewilligung für den Holzschlag Voraussetzung für den Vertragsabschluss bzw. den Arbeitsauftrag ist. Der Kanton kann die Holzschlagbewilligung mit Auflagen für den physikalischen Bodenschutz verbinden.

Bodenzustandsermittlung, Entscheid fahren/nicht fahren

Der aktuelle Bodenzustand ist vor und während der Arbeit zu ermitteln, um festzustellen, ob ein schonendes Befahren möglich ist (Kap. 6.4.2).

Fällen, Aufarbeiten, Rücken

Bei der Ausführung der Arbeiten sind die im Vertrag festgehaltenen Standards einzuhalten. Um die Rückegassen insbesondere bei einsetzendem Niederschlag in gut befahrbarem Zustand zu erhalten, sollte der aktuelle Bodenzustand auch während der Arbeitsausführung ermittelt und beurteilt werden. Gegebenenfalls ist die Arbeit zu unterbrechen.

Abnahme der Arbeiten

Bei der Abnahme der Arbeiten, die in der Schweiz in der Regel durch den Betriebsleiter durchgeführt wird, ist zusätzlich zu den bisherigen Kriterien (z. B. Bestandsschäden) zu überprüfen, ob die Ausführung der Arbeiten gemäss den Qualitätsstandards für den Bodenschutz erfolgt ist. Bei mangelhafter Arbeit kann der Betriebsleiter Massnahmen ergreifen, insbesondere wenn diese durch Verträge und Vereinbarungen abgestützt sind (Kap. 6.4.5).

Beurteilung der Fahrspuren

Neben der betrieblichen Überwachung sollten auch hoheitliche Kontrollen durchgeführt werden. Dabei kann der Kanton die Kontrollen zum Beispiel stichprobenartig, nach ausgewählten Kriterien oder vollumfänglich durchführen. Die Kontrollen sollten entsprechend den Kriterien in den Auflagen erfolgen, die zusammen mit der Holzschlagbewilligung möglicherweise erteilt wurden.

Nachdem ermittelt wurde, welche Aufgaben infolge des Bodenschutzes im Ablauf der Holzernte entstehen und an welchen Stellen sie zu berücksichtigen bzw. auszuführen sind, gilt es festzustellen, welche Akteure dafür zuständig sind. Tabelle 9 zeigt auf, dass einerseits zahlreiche Akteure für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes verantwortlich sind und andererseits dem Betriebsleiter eine Schlüsselrolle zukommt.

Waldeigentümer

Er trägt von Gesetzes wegen die Verantwortung für den Schutz des Waldbodens. Ausserdem liegt es in seinem eigenen wirtschaftlichen Interesse, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten bleibt.

Betriebsleiter

Im öffentlichen Wald übernimmt in der Regel ein Forstbetrieb die Waldbewirtschaftung. Im Hinblick auf den Bodenschutz trägt der Betriebsleiter die nahezu alleinige Verantwortung in der Phase der Planung der Holznutzung. Bei der Durchführung ist er auf die Zusammenarbeit mit den am jeweiligen Prozess beteiligten Akteuren angewiesen. Er ist auch für die Abnahme der Arbeiten im Hinblick auf den Bodenschutz zuständig.

Forstunternehmer

In den Fällen, in denen ein Forstunternehmer die Holzernte im Auftrag durchführt, ist er dafür verantwortlich, dass die Arbeiten entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen und den vertraglichen Vorgaben zum Bodenschutz ausgeführt werden. Als hauptsächliche Träger der Mechanisierung in der Holzernte kommt den Forstunternehmern im Hinblick auf die Verfahrens- und Maschinenwahl eine besondere Verantwortung für den Bodenschutz zu.

Maschinenführer

Der Maschinenführer, der für den Forstbetrieb oder Forstunternehmer arbeitet, ist unmittelbar für die Qualität der Arbeit verantwortlich. Dabei ist es wichtig, dass er während der Arbeit die Spurbildung beobachtet und bei Auftreten des Spurtyps 3 die Arbeit unterbricht und die vorgängig bezeichnete Person kontaktiert.

Forstdienst

Der kantonale Forstdienst nimmt im Rahmen seiner hoheitlichen Funktion und seiner Beratungs- und Weiterbildungstätigkeit gegenüber den Waldeigentümern und den Forstbetrieben Einfluss auf die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zum Bodenschutz.

Bodenschutzfachstelle

Die Bodenschutzfachstelle ist als zuständiges hoheitliches Vollzugsorgan für die Einhaltung der gesetzlich verankerten Vorgaben verantwortlich und ist Ansprechpartner für diesbezügliche Fragen. Diese Aufgaben können auch dem Forstdienst übertragen werden.

Damit alle Akteure ihre Verantwortlichkeiten wahrnehmen können, ist es unerlässlich, dass die Aufgaben wie erwähnt klar definiert und abgrenzt sind. Darüber hinaus sind

Für eine erfolgreiche Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes müssen alle an der Waldbewirtschaftung Beteiligten ihre Verantwortlichkeiten kennen und wahrnehmen

die Akteure für den Bodenschutz zu sensibilisieren und entsprechend ihrer Aufgabe auszubilden.

Tab. 9 > Akteure und grundsätzliche Verteilung der Verantwortlichkeiten im Hinblick auf den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte in der Schweiz

Phasen	Akteure Aufgaben	Akteure					Bodenschutz -fachstelle
		Wald- eigentümer ¹	Betriebsleiter ²	Forstunter- nehmer	Maschinen- führer	Forstdienst ³	
Planung	Betriebsplanung	X	X			X	
	Feinerschliessungsplanung		X				
	Jahresplanung	X	X			X	
	Termin- und Kapazitätsplanung		X				
Steuerung und Durchführung	Verfahrens- und Maschinenwahl		X	X			
	Vertragsabschluss/Arbeitsauftrag		X	X			
	Bodenzustandsermittlung ³		X		X		
	Abnahme der Arbeiten		X	X	X		
betriebliche Überwachung	Beurteilung der Fahrspuren		X				
	Massnahmenentscheid		X				
hoheitliche Überwachung ⁴	Kontrolle					(X) ⁵	X
	Massnahmenentscheid					(X) ⁵	X

¹ Im Privatwald kann der Waldeigentümer fallweise die Aufgaben des Betriebsleiters übernehmen. Deshalb ist die Linie zwischen den Kolonnen Waldeigentümer und Betriebsleiter gestrichelt dargestellt.

² Häufig nimmt der Betriebsleiter auch hoheitliche Aufgaben wahr (Revierförster) und übernimmt dann auch die Aufgaben in der Kolonne Forstdienst.

³ Im Zusammenhang mit der Ermittlung des aktuellen Bodenzustandes findet vor jeder Befahrung der Entscheid fahren / nicht fahren statt.

⁴ Bei der hoheitlichen Überwachung muss überprüft werden, ob die gesetzlichen Vorgaben zum Bodenschutz eingehalten wurden.

⁵ Die hoheitliche Überwachung der gesetzeskonformen Bodennutzung kann auch dem kantonalen Forstdienst delegiert werden.

Quelle: Spjevak und Thees 2009a, verändert

6.2 Grundlagen und Voraussetzungen auf betrieblicher Ebene

6.2.1 Ausbildung und Sensibilisierung der Akteure

Die Ausbildung und Sensibilisierung der an der Waldbewirtschaftung beteiligten Akteure, wie sie im Rahmen des Projektes «Physikalischer Bodenschutz» durchgeführt wurde, ist eine wesentliche Grundlage für die Umsetzung des Bodenschutzes im Wald. Das gewählte Ausbildungskonzept umfasste folgende Hauptziele:

- > Sensibilisierung für den Bodenschutz
- > Kenntnis des Bodenaufbaus, der Bodeneigenschaften und der Vorgänge im Boden bei Befahrung
- > Kenntnis von technischen und organisatorischen Massnahmen zum Bodenschutz.

Im Zuge dieser Ausbildung sollten die Teilnehmenden für den physikalischen Bodenschutz sensibilisiert werden. Parallel zur Erarbeitung von spezifischen Grundlagen wurden jedes Jahr bis zu zehn Weiterbildungskurse durchgeführt. Die Zielgruppen umfassten alle relevanten Akteure im physikalischen Bodenschutz im Wald wie Betriebsleiter, Forstunternehmer, Maschinenführer, Vertreter von Forstbehörden und -verwal-

tung, Vertreter von Bodenschutzfachstellen und Umweltverbänden, Zertifizierungsverantwortliche und politisch Verantwortliche für den Wald. Dazu wurde das Thema auch in die Ausbildung der Forstleute an den Bildungszentren Wald in Lyss und Maienfeld sowie an der Fachhochschule HAFL in Zollikofen integriert.

In einzelnen Jahren wurden schwerpunktmässig besondere Zielgruppen angesprochen, so die Vertreter der kantonalen Bodenschutzfachstellen (2006), die Ausbildungsverantwortlichen der Kantone (2007) und die in der Forstwartausbildung tätigen Berufsschullehrer (2008). Daneben wurden aber auch Kurse für spezifische Teilnehmergruppen durchgeführt, wie beispielsweise für die Maschinenführer von grossen Forstunternehmungen (2009).

Besonders bewährt hat sich, wenn Vertreter verschiedener Zielgruppen am gleichen Kurs teilnehmen, weil dadurch das gegenseitige Verständnis für die Probleme der anderen gefördert wird und mögliches Konfliktpotenzial entschärft werden kann. Die Vertreter der verschiedenen Akteure in der Waldbewirtschaftung werden jeweils eingeladen, ihre Anliegen mit Nachdruck zu vertreten, was dann oftmals zu lebhaften und fruchtbaren Diskussionen führt.

Von 2001–2014 wurden an 75 Kurstagen rund 1900 Teilnehmerinnen und Teilnehmern die Probleme des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte sowie entsprechende Lösungsmöglichkeiten und Lösungsansätze aufgezeigt (Anhang A9).

Das Thema «Physikalischer Bodenschutz im Wald» konnte zusätzlich bei verschiedenen anderen Gelegenheiten interessierten Kreisen näher gebracht werden. Einige Beispiele solcher Veranstaltungen sind:

- > Info-Stand an den KWF-Thementagen 2010 in Dierdorf (Rheinland-Pfalz)
- > Begehung zum Thema Amphibien und Fahrspuren mit Vertretern der KARCH und des BAFU auf der Versuchsfläche in Messen-Junkholz (2010)
- > Info-Stand im Rahmen der Sonderschau an der Forstmesse in Luzern (2011).

Inhalt und Form der Bodenschutzkurse

In den in der Regel eintägigen Kursen zum physikalischen Bodenschutz im Wald werden in zwei thematischen Schwerpunkten a) bodenkundliche sowie b) technische und ökonomische Fragen und Aspekte behandelt:

a) Grundlagen zum Waldboden

- > Wie sieht der natürliche Bodenaufbau aus?
- > Welches sind die wichtigen Bodenfunktionen?
- > Welche Bodeneigenschaften sind im Zusammenhang mit der Verdichtung von Bedeutung?
- > Wie wirken sich Verdichtungen auf die wichtigen Bodenfunktionen aus?
- > Welches sind Verdichtungsmerkmale?

Die gemeinsame Schulung aller Beteiligten fördert das gegenseitige Verständnis und entschärft Konflikte

b) Mögliche Massnahmen zum Schutz des Bodens

- > bei der Planung (Feinerschliessung, Organisation der Holzschläge)
- > bei der Ausführung der Arbeiten (Maschineneinsatz)
- > bei der Maschinenteknik (Konfiguration und Ausrüstung der Maschinen)
- > Kosten der Massnahmen zum physikalischen Bodenschutz
- > Überlegungen zur Qualitätssicherung.

Zu Beginn des Kurses erfolgt eine kurze Einführung in die Problematik des Bodenschutzes im Wald. Anschliessend werden den Teilnehmern anhand einer als «Ausstellung» aufgebauten Arena anhand von Anschauungsmaterial, Modellen und Bildern die einzelnen wichtigen Merkmale des Waldbodens und seine Funktionen vermittelt, wie Humusformen, Boden als Lebensraum, Poren als Wasserspeicher und Sickerraum sowie Vernässungsmerkmale (Abb. 59). Diese einzelnen Elemente werden dann an einem Bodenprofil in einem unbefahrenen Referenzboden betrachtet.

An Bodenprofilen in Fahrspuren werden die Merkmale der drei Spurtypen 1, 2 und 3 theoretisch und praktisch erläutert.

Abb. 59 > Ausbildungssequenz aus einem Kurs im Kanton Aargau



Foto: Abteilung Wald, Kanton Aargau

Ein zweiter Hauptblock befasst sich mit den Massnahmen zum Bodenschutz. Während dieser Teil zu Beginn mehrheitlich noch in einem Saal abgehandelt wurde, sind wir im Laufe der Zeit dazu übergegangen, den Stoff an verschiedenen Posten im Wald anhand von Plakaten zu vermitteln. Der Wald bietet eine realistische, praxisbezogene Kursumgebung und durch den Wechsel der Standorte wird jeweils die Aufmerksamkeit der Teilnehmer wieder auf das neue Thema fokussiert. Bei mehr als zwanzig Teilnehmern werden diese auf zwei Gruppen aufgeteilt und die beiden Hauptblöcke werden parallel zweimal abgehandelt.

Als praktische Übung beurteilen die Teilnehmer in Gruppen verschiedene Böden bezüglich ihrer Befahrungsempfindlichkeit. Die zusammengetragenen Ergebnisse werden gemeinsam diskutiert. Zum Schluss erfolgt eine Synthese aus dem Stoff des ganzen Tages, bei der die Möglichkeiten und Grenzen für die Umsetzung des Gesehenen und Gehörten in die tägliche Arbeit diskutiert werden. Dabei bringen nun die Vertreter der verschiedenen Akteure ihre Argumente ein, was zu lehrreichen Diskussionen führen kann.

Eine besondere Kursform wurde 2010 für die Weiterbildung des gesamten Forstpersonals des Kantons Aargau (gegen 400 Teilnehmer) im Staatswald Habsburg entwickelt. Hier wurde der Kursinhalt auf vier verschiedene Posten aufgeteilt, die jeweils von einem oder zwei Postenverantwortlichen betreut wurden:

- > Boden und Spurtypen
- > Maschinenteknik und organisatorische Massnahmen
- > Feinerschliessung
- > Überlegungen zu Kosten und Nutzen des Bodenschutzes und Verantwortlichkeiten.

Dieses Konzept erlaubt die Schulung von bis zu 80 Teilnehmern pro Kurstag. Die Teilnehmer werden in Gruppen von maximal 20 Personen aufgeteilt und besuchen im Wechsel die vier Posten. Bei jedem Wechsel wird an einem zentralen Ort eine Pause eingebaut. Die Kursvorbereitungen sind wohl sehr aufwendig, erlauben aber dann die Schulung einer grossen Zahl von Teilnehmern in kurzer Zeit. Das Konzept hat sich bewährt, so dass im Jahr 2011 ein Kurs nach dem gleichen Konzept für den Forstdienst des Kantons Luzern durchgeführt werden konnte, ebenso im Jahr 2013 für den Kanton Solothurn. Ein weiterer Kurs nach diesem Konzept ist für 2015 im Kanton Baselland geplant.

Basis der Kursunterlagen bildet seit 2009 das WSL-Merkblatt Nr. 45 Physikalischer Bodenschutz im Wald (Lüscher et al. 2009a), welches im Rahmen dieses Projektes erarbeitet wurde. Es liegt in Deutsch und Französisch vor und wurde im Rahmen einer Artikelserie von der Zeitschrift Sherwood auch ins Italienische übersetzt. Das Merkblatt wird fallspezifisch durch zusätzliche Kursunterlagen zu den Themen Boden und Massnahmen zum Bodenschutz ergänzt.

Nach Möglichkeit werden die Bodenschutzkurse auf einer der drei Versuchsflächen im Mittelland oder auf den zwölf eingerichteten Ausbildungsflächen in verschiedenen Kantonen durchgeführt (Anhang A8). An all diesen Kursorten steht eine zweckmässige Infrastruktur zur Verfügung und es liegen auch alle wichtigen Daten zum Boden und zum Standort sowie Informationen zur bisherigen Bewirtschaftung und Feinerschliessung vor.

Naturgemäss hat der grösste Teil der Ausbildungskurse in denjenigen Kantonen stattgefunden, welche mehrheitlich zu den Forstregionen Mittelland und Jura gehören. Gemäss Landesforstinventar (Brändli 2010) sind, beurteilt nach Hangneigung, im Mittelland 90 % und im Jura 74 % der Waldfläche befahrbar, während es in den Voralpen noch 49 %, in den Alpen 31 % und auf der Alpensüdseite noch 24 % sind. Obwohl rein nach Hangneigung in den Voralpen fast die Hälfte der Waldfläche befahrbar wäre, ist in der Praxis der Anteil bedeutend kleiner, da ein grosser Teil der Forstregion

Voralpen häufig auf nur beschränkt tragfähigen Böden des Flysches liegt. So erstaunt es auch nicht, dass nur einige wenige Kurse im Voralpengebiet durchgeführt wurden, nicht wegen Desinteresses der dortigen Waldbewirtschafter, sondern weil dort aufgrund der eingeschränkten Tragfähigkeit weniger Waldböden befahren werden. Die Böden in den befahrbaren Gebieten der Forstregionen Alpen und Alpensüdseite weisen in der Regel einen höheren Skelettgehalt auf, so dass die Befahrungsproblematik dort geringer ist.

Aufgrund der Reaktionen der bisherigen grossen Zahl von Kursteilnehmern lässt sich feststellen, dass die Sensibilisierung für das Thema Bodenschutz im Wald gut gelungen ist. Die Kurse werden gut besucht und die Nachfrage hält auch ohne Werbung unsererseits weiter an. Die Diskussionen an den Ausbildungsveranstaltungen zeigen deutlich, dass die Teilnehmer die Bedeutung des physikalischen Bodenschutzes erkennen und gewillt sind, den «Boden» möglichst unversehrt an die kommende Generation weiter zu geben. Es zeigt sich aber auch, dass in Zukunft noch eine Reihe von Fragen zu beantworten sind, insbesondere die Frage der aus Bodenschutzmassnahmen resultierenden Kostenfolgen.

Forstbranche zeigt grosses Interesse für das Thema Bodenschutz

6.2.2 Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit des Bodens

Die Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit bzw. des Verdichtungsrisikos des Bodens ist eine wichtige Planungsgrundlage für den vorsorglichen Bodenschutz im Wald. Die Herleitung oder Abschätzung der Befahrungsempfindlichkeit beruht auf den Bodeneigenschaften Skelettgehalt, Bodenart (Korngrössenzusammensetzung), Vernäsungsgrad und Humusgehalt (Kap. 3.3). Diese Daten können aus unterschiedlichen Grundlagen beschafft werden. Als Beispiele sind zu erwähnen:

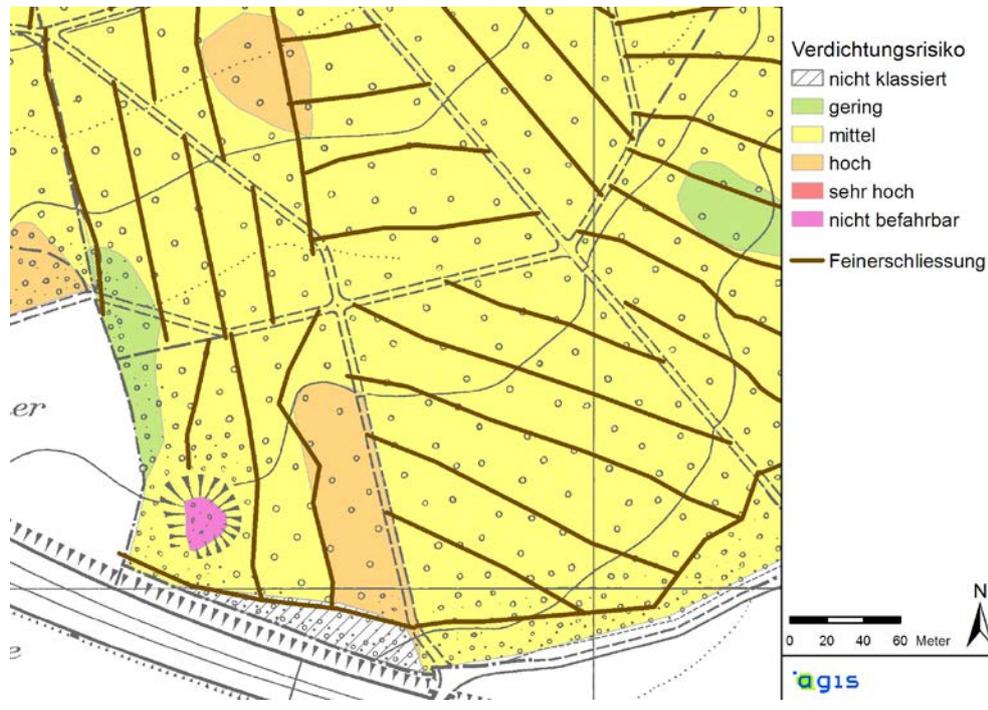
- > Bodenkarte im Massstab 1:5000 (z. B. Kanton SO)
- > Waldstandortskarte im Massstab 1:5000 unterstützt mit Bodendaten aus Leitprofilen sowie Informationen aus der Bodenkarte 1:25 000 (z. B. Kanton AG)

Die Befahrungsempfindlichkeit bzw. das Verdichtungsrisiko gibt Auskunft über die potentielle Tragfähigkeit eines Bodens, unabhängig vom aktuellen Wassergehalt und von der eingesetzten Maschine – dies im Gegensatz zum aktuellen Bodenzustand (Kap. 6.4.2). Eine entsprechende Karte zeigt beispielsweise, wo ein Boden aufgrund seiner Eigenschaften – z. B. des Steingehaltes – grundsätzlich für eine Befahrung geeignet ist oder welcher Boden aufgrund seiner Korngrössenzusammensetzung und Durchlässigkeit bereits nach wenig Niederschlag nicht mehr befahrbar ist. Eine solche Karte dient der Feinerschliessungsplanung (Kap. 6.2.3 und 6.2.4) sowie der Ausscheidung von Ausweichflächen bei der Planung der Holzernte. Einzelne Kantone verfügen bereits über eine Verdichtungsrisikokarte (Abb. 60).

Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit anhand von Bodenkarten und Waldstandortskarten

Der aktuelle Bodenzustand (Kap. 6.4.2) hingegen ist entscheidend für die Durchführung der Holzernte. Er liefert in Verbindung mit Messwerten zur Bodenfeuchte (Saugspannung/Wassergehalt) die Basis für die Beurteilung des aktuellen Bodenfeuchtezustandes und damit für den Entscheid Fahren / nicht Fahren.

Abb. 60 > Ausschnitt aus der Verdichtungsrisikokarte des Kantons Aargau mit angepasster Feinerschliessung. Kartendaten: AGIS



Das Erstellen solcher Karten ist aufwändig und die Qualität abhängig von den vorhandenen Datengrundlagen. Wo keine Grundlageninformationen und Karten zur Verfügung stehen, kann der Waldbewirtschafter die Befahrungsempfindlichkeit selber erarbeiten. Da sich die dafür entscheidenden Eigenschaften nicht verändern, muss eine solche Erhebung – gleich wie die Feinerschliessungsplanung – «nur einmal» gemacht werden. Dies relativiert den Aufwand.

Eine mögliche einfache Aufnahmemethode ist die punktuelle Erhebung der Befahrungsempfindlichkeit entlang der Rückegassen. Dazu wird mit einem Spaten ein kleines Profil – so breit und so tief wie der Spaten ist ausreichend – ausgehoben. Anhand dieses Spatenstichs wird der Stein-/Kiesgehalt (Kap. 3.3.1) geschätzt, die Korngrössenzusammensetzung (Kap. 3.3.2) mit der Fühlprobe bestimmt (Anhang A5), auf Vernäsungsmerkmale (Kap. 3.3.5) geachtet und der Humusgehalt (Kap. 3.3.6) geschätzt (Anhang A3). Diese vier Bodeneigenschaften werden bezüglich ihres Einflusses auf die Befahrungsempfindlichkeit beurteilt. Zusätzlich wird noch die Neigung des Geländes bestimmt. Diese Beurteilungen zeigen, ob an einem Ort für die Befahrungsempfindlichkeit positive, neutrale oder negative Eigenschaften vorherrschen.

Der Boden, so wie er sich im Spatenstich präsentiert, ist das Ergebnis der örtlich vorherrschenden Bodenbildungsfaktoren Relief, Ausgangsgestein, Organismen, Bewirtschaftungsform, Klima und Zeit. Ändert sich ein Bodenbildungsfaktor, können auch Änderungen der Bodeneigenschaften und damit der Bodenempfindlichkeit auftreten. Um einen Überblick über die Bodenempfindlichkeit im Holzschlag zu erhalten, wird immer dann ein Spatenstich gemacht, wenn sich im Verlauf der Gasse ein Bodenbildungsfaktor ändert. Klima, Zeit und Ausgangsmaterial ändern sich im Normalfall nicht

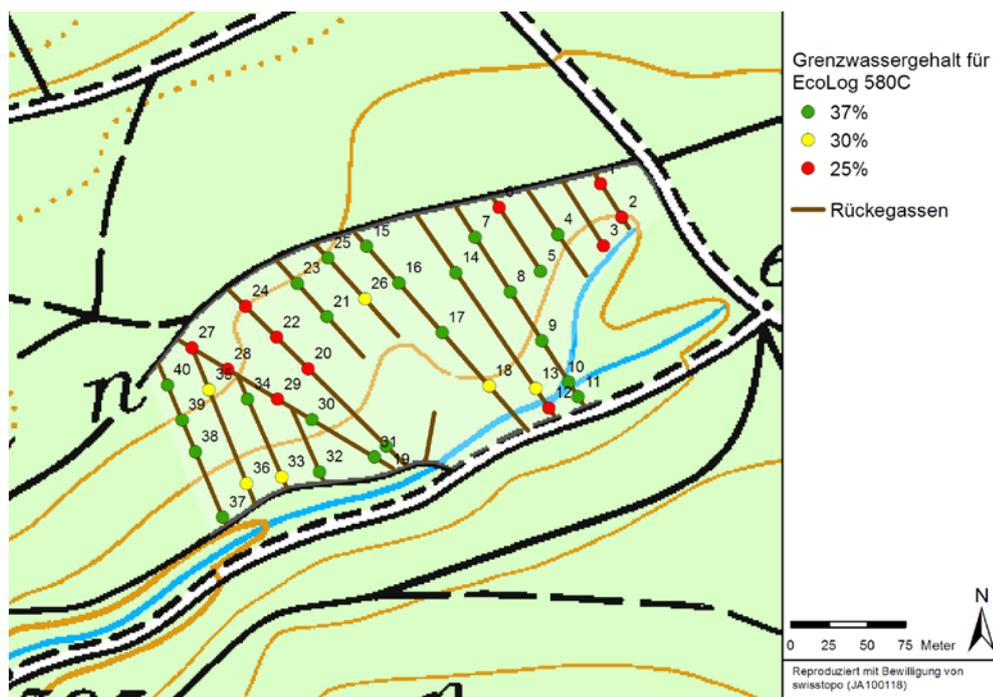
Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit im Gelände

innerhalb einer Rückegasse, daher reicht es, sich auf Änderungen des Reliefs (Gefälle, Geländestufe, Mulde etc.) sowie der Vegetation zu konzentrieren. Mit wenigen Spatenstichen entlang der Rückegassen erhält man so eine gute Übersicht über die Befahrungsempfindlichkeit in einem Holzschlag, anhand derer sich die Abläufe der Holzernete im Blick auf den Bodenschutz optimieren lassen.

Als aufwändigere Variante kann für die zum Einsatz kommenden Maschinen an jedem Spatenstich der Grenzwassergehalt mit ProFor ermittelt werden (Kap. 6.2.7). Der Grenzwassergehalt bezeichnet den Wassergehalt bis zu dem noch schadensarm gefahren werden kann. Ein Beispiel einer solchen Erhebung zeigt Abbildung 61.

Abb. 61 > Grenzwassergehalt auf Rückegassen, berechnet mit ProFor für den Vollernter EcoLog 580C

Die Zahlen bezeichnen die Aufnahmepunkte. Die roten Punkte sind sowohl aufgrund des Bodens, als auch aufgrund der Feinerschliessungsanlage als kritisch zu betrachten.



Diese Methode ist einfach anzuwenden, setzt aber eine Investition in Form des Zeitaufwandes für die Aufnahme voraus. Dieser Aufwand variiert je nach Feinerschliessungsdichte und Heterogenität des Waldbodens zwischen 45 Minuten und einer Stunde pro Hektare.

6.2.3 Feinerschliessung – Zweck und Planung

Definition und Bedeutung der Feinerschliessung

Die Feinerschliessung umfasst die Aufschliessung der Waldbestände mit Rückegassen (bestockungsfreie Fahrlinien), Maschinenwegen (mit Baumaschinen terrassierte Wege) sowie Seilkranlinien. Die Feinerschliessung ermöglicht den Zugang der Arbeitsmaschinen in die Waldbestände und den Abtransport des geernteten Holzes. Sie ist die Grundlage und die Voraussetzung für eine wirtschaftliche sowie boden- und bestandesschonende Holzernte. Mit dem Anlegen von Rückegassen und ihrer konsequenten Benutzung über lange Zeit können die Befahrung des Waldbodens und das Risiko einer Beeinträchtigung des Bodens auf eine kleine, genau festgelegte Fläche beschränkt werden. Der Feinerschliessung kommt damit eine zentrale Bedeutung in der Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes zu. Nachfolgend wird nur die Feinerschliessung mit Rückegassen im befahrbaren Gelände betrachtet, weil in erster Linie hier Konflikte mit dem physikalischen Bodenschutz entstehen. Im Seilkrangelände besteht allenfalls beim Rücken von Vollbäumen die Gefahr, dass unter dem Tragseil Schleifspuren entstehen, die sich je nach Bodenfeuchte und Geländeform zu Erosionsrinnen entwickeln können.

Die Planung der Feinerschliessung liegt in der Verantwortung der Waldeigentümer. Im öffentlichen Wald wird sie in der Regel durch den Betriebsleiter ausgeführt, im Privatwald ist der zuständige Förster beratend tätig. Im Privatwald mit vorwiegend relativ kleinflächigen Waldparzellen ist oft aufwendige Überzeugungsarbeit und Koordination zu leisten, um eine übergeordnete Feinerschliessung realisieren zu können.

Grundsätze zur Feinerschliessungsplanung

Wesentliche Grundsätze für die Feinerschliessungsplanung sind:

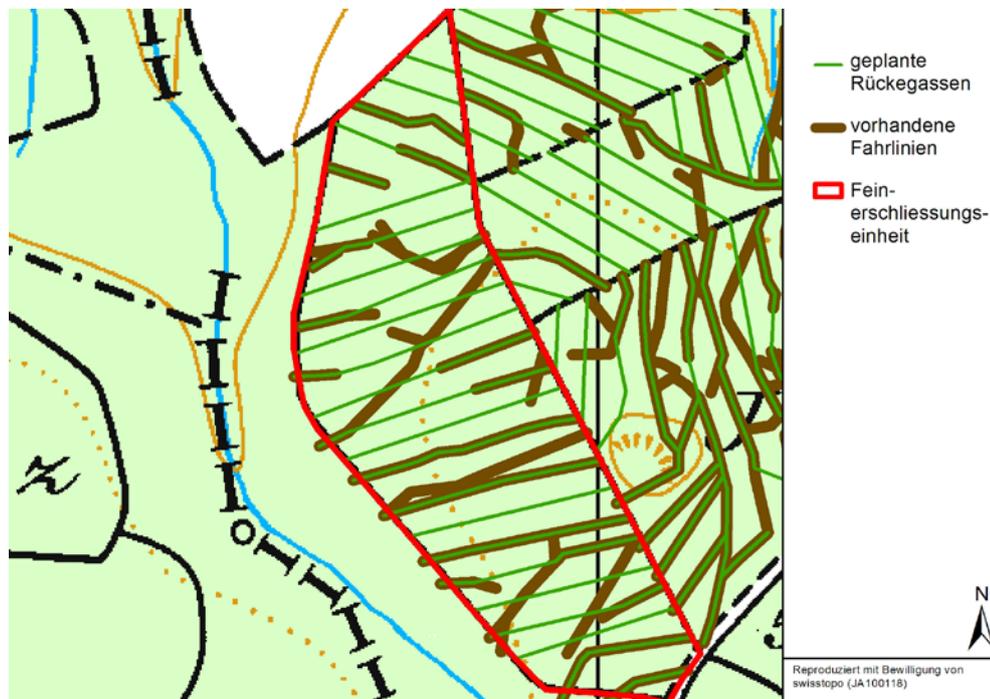
- > für Feinerschliessungseinheiten planen
- > Befahrungsempfindlichkeit berücksichtigen
- > vorhandene Rückegassen integrieren
- > das vorgesehene Gassennetz auf einem Plan festhalten und im Gelände markieren
- > beteiligte Akteure gegebenenfalls in die Planung miteinbeziehen
- > Rückegassenabstände in Abhängigkeit der Befahrungsempfindlichkeit festlegen
- > Wirtschaftlichkeit der Holzernte beachten.

Seit einigen Jahrzehnten wird im öffentlichen Wald recht konsequent eine Feinerschliessung für die einzelnen Holzschläge angelegt. Wird die Feinerschliessung jedoch separat für jeden Holzschlag erstellt, besteht die Gefahr, dass einerseits benachbarte Feinerschliessungen künftig schlecht zusammenpassen und andererseits oft mehr Rückegassen als nötig vorhanden sind. Es empfiehlt sich deshalb, vor einem Holzschlag die Feinerschliessung für die gesamte Feinerschliessungseinheit, in welcher dieser Holzschlag liegt, zu planen. Die Grenzen einer Feinerschliessungseinheit sind meist Waldstrassen, es können aber auch natürliche Grenzen wie Gewässer, Felsbänder, Kreten etc. sein.

Mit einer gut geplanten Feinerschliessung kann das Risiko für Bodenschäden vermindert und auf klar definierte Fahrlinien beschränkt werden

Die Feinerschliessung ist für eine Feinerschliessungseinheit und nicht nur für einen einzelnen Holzschlag zu planen

Abb. 62 > Bestehende Fahrlinien sollen bestmöglich in die neue Planung integriert werden, damit der Anteil der befahrenen Bodenfläche möglichst gering bleibt



Die geplanten Feinerschliessungslinien sind auf einem Plan zu erfassen und im Gelände zu versichern, d. h. die Schlüsselstellen sind so zu markieren, dass die Linien zuverlässig im Gelände wieder aufgefunden werden können. Freigeschnitten werden jeweils nur diejenigen Linien, welche anschliessend für die Holzernte gebraucht werden.

Die Dokumentation von Rückegassennetzen auf Karten stellt sicher, dass die Erschliessungsinformationen auch bei personellen und organisatorischen Veränderungen dauerhaft greifbar sind, womit die Kontinuität der schonenden Waldbewirtschaftung gewahrt werden kann.

Mit der fortschreitenden Mechanisierung der Holzernte hat eine Verlagerung der Holzerntearbeiten vom Betrieb zum Forstunternehmer stattgefunden. Deshalb kann es hilfreich sein, in bestimmten Fällen bei der Feinerschliessungsplanung einen «Stammunternehmer» als beratenden Gesprächspartner beizuziehen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Kantone den Revierleitern bei Bedarf eine fachliche Beratung anbieten, welche beispielsweise durch einen in der Feinerschliessung erfahrenen Förster wahrgenommen werden könnte. Bereits in vorbildlicher Weise realisiert hat diese Beratungsdienstleistung der Kanton Aargau, indem er an der Kantonalen Abteilung für Wald eigens eine Stelle für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes und der damit verknüpften Feinerschliessungsplanung geschaffen hat.

Der Rückegassenabstand und damit die Dichte des Feinerschliessungsnetzes hängt von zahlreichen Faktoren wie Geländeform, Hangneigung, Bodentragfähigkeit, Holzernte-

Die geplanten Feinerschliessungslinien sind auf Karten einzutragen und allenfalls im Gelände zu versichern

verfahren, Waldbauverfahren usw. ab. Im befahrbaren Gelände ist die Bodentragfähigkeit und damit die Befahrbarkeit ein zentrales Element.

Tab. 10 > Vorschlag für Rückegassenabstände in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit

Der Vorschlag basiert auf der Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (ForstBW 2003) und wurde an die schweizerischen Verhältnisse angepasst.

Bodeneigenschaften und Bodentypen	Befahrungsempfindlichkeit	Abstand der Rückegassen
übermässig durchlässige, skelettreiche Böden wie Ranker, Rendzina, Regosol	gering	20 m oder mehr
normal durchlässige Böden wie Braunerden, Parabraunerden	mittel empfindliche und unempfindliche Zonen über die Fläche verteilt	20 bis 40 m oder mehr
Nassböden wie Gley, Pseudogley	hoch	40 m oder mehr
oberflächennah vernässte Böden	nicht befahrbar	keine Rückegassen

Die Wirtschaftlichkeit der Holzernteprozesse hängt in hohem Masse von den gewählten Arbeitsverfahren und damit auch vom Rückegassenabstand ab:

- > Die vollmechanisierte Aufarbeitung bringt, insbesondere im Nadelholz, in den Entwicklungsstufen vom Stangenholz bis ins mittlere Baumholz den grössten Kostenvorteil gegenüber den teilmechanisierten oder motormanuellen Arbeitsverfahren. Wird ein Rückegassenabstand von mehr als 20 m gewählt, verringert sich dieser Kostenvorteil mit zunehmendem Abstand.
- > Im starken Baumholz ist der Kostenvorteil der vollmechanisierten Holzernte geringer. Ein kleinerer Rückegassenabstand bringt hier keine bedeutenden Kostenvorteile, so dass oft nur jede zweite Rückegasse genutzt werden kann. Aufgrund der Baumlängen entfällt in der Regel das Vorliefern an die Rückegasse.
- > Aus Kostengründen werden vollmechanisierte Holzerntesysteme zunehmend auch in Hanglagen eingesetzt. Ab etwa 10 % Hangneigung sind die Rückegassen bestmöglich in der Falllinie anzulegen. Bei steileren Gassen besteht ein gewisses Risiko zu Bodenerosion.

Beim Einbezug der verschiedenen, teils gegensätzlichen Überlegungen in die Feinerschliessungsplanung ist zu bedenken, dass die Feinerschliessung eine langfristige Anlage ist, welche nicht nur für den gegenwärtigen Bestand, sondern über alle Entwicklungsstadien eines Bestandes und allenfalls sogar des Folgebestandes benutzt wird.

6.2.4 Feinerschliessung – Anlage und Benützung

Der Erhaltung der Befahrbarkeit der Rückegassen kommt eine sehr grosse Bedeutung zu, da die Gassen je nach waldbaulichen Massnahmen in Zeiträumen von 5–15 Jahren wieder befahren werden. Der Begriff der technischen Befahrbarkeit muss heute relativiert werden. Die Geländegängigkeit der heutigen Holzerntemaschinen ist so gut, dass eine Rückegasse noch als technisch befahrbar gelten kann, wenn eine wirtschaftliche, maschinenschonende und ökologisch verträgliche Befahrung längst nicht mehr gegeben ist. Vor dem Hintergrund der heutigen Anforderungen an eine bodenschonende

Rückegassen sind bodenschonend zu befahren

Befahrung der Waldböden ist die Erhaltung der technischen Befahrbarkeit keine ausreichende Vorgabe. Nicht nur weil es das Gesetz verlangt, sondern primär im eigenen Interesse des Bewirtschafters sind die Rückegassen so zu benutzen, dass nur die Spurtypen 1 und 2 und allenfalls sehr lokal und in kleinem Ausmass der Spurtyp 3 entstehen. Die dabei zu beachtenden Faktoren sind der Skelettgehalt, die Bodenart, der Bodenaufbau, die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Befahrens sowie die technische Konfiguration der eingesetzten Maschinen (Masse, Radlasten, Bereifung/Raupen, Reifenfülldruck, Zusatzausrüstungen). Falls auch bei Ausnutzung der technischen Möglichkeiten (Kap. 6.3) der Spurtyp 3 auftritt, sind die Arbeiten zu unterbrechen.

Rückegassen mit tiefen Fahrspuren werden oft mit einem kleinen Bagger «wieder hergestellt». Diese kosmetische Massnahme lässt zwar die Kritik von Waldbesuchern verstummen, trägt aber wenig zu einer Verbesserung der Tragfähigkeit der Gasse bei. Es kann mehrere Jahrzehnte dauern, bis sich wieder eine natürliche Bodenstruktur entwickelt hat. Die Regeneration eines Bodens, d. h. die Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit, kann mit gezielten Bepflanzungsmassnahmen beschleunigt werden (Kap. 5.5). Darüber, wie sich solche Regenerationsmassnahmen auf die Wiederherstellung der Bodentragfähigkeit für das Befahren mit Holzerntemaschinen auswirken, liegen noch keine Erfahrungen vor, die Erwartungen sind hier allerdings nicht hoch anzusetzen.

Die eingebüsste Tragfähigkeit auf einer Rückegasse lässt sich ohne bauliche Massnahmen nicht wieder herstellen

Zusammengefasst tragen folgende Massnahmen zu einer bodenschonenden Benutzung von Rückegassen bei:

> **Planerische Massnahmen**

Möglichst gerade verlaufende Rückegassen und Kurven mit grossen Radien vermindern die Gefahr der Spurbildung durch seitliche Scherkräfte auf den Boden.

> **Organisatorische Massnahmen**

Rückegassen sind nicht zu befahren, wenn die Bodenfeuchte so hoch ist, dass der Spurtyp 3 entstehen würde. Für diesen Fall sind im Rahmen der betrieblichen und allenfalls überbetrieblichen Möglichkeiten Ausweichflächen vorzusehen. Die zeitliche Planung der Holzernte nach der Befahrungsempfindlichkeit der Standorte ermöglicht es, Holzschläge auf bekannterweise befahrungsempfindlichen Böden so zu planen, dass sie in eine voraussichtlich trockene Periode fallen. Gefrorene Böden sind im Schweizerischen Mittelland aufgrund der grossen Unsicherheit des Eintreffens schwierig in eine Planung einzubeziehen.

> **Technische Massnahmen**

Auf befahrungsempfindlichen Standorten sind möglichst leichte Maschinen einsetzen. Zusätzlich kann eine Verringerung des Kontaktflächendruckes erreicht werden mit einer grossen Anzahl Räder, breiten Reifen, niedrigem Reifenfülldruck und gegebenenfalls mit Boogiebändern (Moorbänder). Falls möglich ist eine Reisigmatte anzulegen.

> **Bauliche Massnahmen**

Rückegassen sind grundsätzlich bestockungsfreie Fahrlinien im Gelände ohne bauliche Massnahmen. Dennoch können lokale Verbesserungen mit einfachen baulichen Massnahmen sinnvoll sein: Bachüberquerungen (Rohre einlegen), Befestigung mit Holz auf kurzen Strecken mit vernässtem Boden, abtragen von Böschungskanten etc.

6.2.5 Qualitätsstandards für den Bodenschutz

Unter dem Begriff Standard versteht man im allgemeinen ein öffentliches, technisches Dokument, das zum Beispiel von Interessenverbänden oder von Unternehmen entwickelt wird, Zustimmung in der betreffenden Branche findet und schliesslich allgemein anerkannt und angewendet wird. Die Standards sind Definitionen einheitlicher Regeln, Leitlinien, Tätigkeiten oder Ergebnisse, die für allgemeine und wiederkehrende Anwendungen festgelegt werden (Hartlieb et al. 2009). Inhaltlich wird der Begriff Standard u. a. für Sicherheitsstandards, Umweltstandards, Qualitätsstandards sowie für Produktstandards verwendet.

Standards sind auch eine wichtige Voraussetzung für eine konsequente Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes. Sie sind Verpflichtungen und definieren die optimale Qualität des Arbeitsergebnisses bzw. des Bodenzustands nach der Befahrung. Sie ermöglichen es, die Ausführenden darüber zu informieren, was bei den forstlichen Arbeiten zu vermeiden oder zu erreichen ist. Sie stellen auch eine Grundlage für die Kontrolle der Arbeiten dar. Mit den Standards und den im Umweltschutzgesetz verankerten Vorsorge-, Verursacher- und Kooperationsprinzipien lassen sich die Qualitätsziele des Bodenschutzes verfolgen.

Lehrbuchmässig sind Qualitätsstandards für den Bodenschutz im Wald ein Teil der umfassenden Qualitätsstandards der Holzernte, welche ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten Rechnung tragen. Qualitätsstandards für den Bodenschutz bei der Holzernte existieren in der Schweiz bisher nur in Ansätzen. Die einschlägigen Bestimmungen der forstlichen Zertifizierungssysteme stellen hierfür ein Beispiel dar.

Mögliche Vorteile von Qualitätsstandards für den Bodenschutz sind folgende:

- > Operationalisierung der allgemein formulierten gesetzlichen Nachhaltigkeitsvorschriften
- > einheitlichere Einhaltung derselben, insbesondere wenn diese wie im Fall der Befahrung von Waldböden schwierig zu kontrollieren sind
- > Stärkung des gesellschaftlichen Images einer Branche, die in und mit der Natur wirtschaftet und dabei Technik einsetzt
- > verbesserte Transparenz und Fairness im Wettbewerb der forstlichen Dienstleister.

Mögliche Nachteile von Qualitätsstandards bestehen in der Verteuerung der Holzernte und in zusätzlichen finanziellen Belastungen der Waldeigentümer und der Forstunternehmen sowie in den damit einhergehenden Wettbewerbsnachteilen der Holzproduktion. Es besteht auch die Gefahr, dass im Zuge des politischen Normfindungsprozesses über das Ziel hinausgeschossen und einseitig sehr bzw. zu hohe Anforderungen aufgestellt werden, die dem umfassenden Nachhaltigkeitsgedanken und ggfs. auch Eigentumsrechten zuwider laufen können.

Neben der Notwendigkeit und Zweckmässigkeit stellt sich die Frage, ob ein umfassender, alle oder mehrere Nachhaltigkeitsaspekte umfassender Standard, also eine allgemeine Holzernteempfehlung nach «guter forstlicher Praxis» erstellt werden soll oder nur eine allein auf den Aspekt Bodenschutz beschränkte. Hinzu kommt die Frage, ob man die gesetzlich definierte Anforderung oder darüber hinaus noch weitergehende

Qualitätsstandards können eine Hilfe bei der Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes sein

Ansprüche erfüllen will. Bei der Beantwortung dieser Fragen ist ein koordiniertes Vorgehen auf der Ebene der Verbände und in Zusammenarbeit mit der Wissenschaft zu prüfen.

Der in der vorliegenden Publikation vorgeschlagene Spurtyp 3 bildet eine gute Basis, um einen Standard im Bereich des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte abzuleiten. Er sagt aus, dass ein ökologischer Schaden im Boden eingetreten bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Um aus dem Spurtyp 3 zu einem späteren Zeitpunkt einen Standard bzw. eine Norm zu machen, ist es notwendig, ihn weiter zu operationalisieren. Das heisst es gilt, ihn mittels weiterer Beschreibung so zu konkretisieren, dass er in eine Regel eingebaut werden kann, deren Einhaltung breite Akzeptanz bei den Beteiligten findet sowie objektiv und effizient kontrolliert werden kann. Dazu ist es zunächst notwendig festzulegen, welches Ausmass vom Spurtyp 3 vorliegen muss, damit der Standard oder die Regel als verletzt bzw. als nicht erreicht gilt. Denn der Spurtyp 3 ist in der Praxis auch bei fachgerechter forstlicher Arbeit nicht vollständig zu vermeiden. Die notwendige Quantifizierung des tolerierbaren Schadenausmasses kann man zum Beispiel so vornehmen, dass ein bestimmter Anteil der Länge einer Rückegasse den Spurtyp 3 aufweisen darf und dass dieser Anteil sich mit zunehmender Befahrungsempfindlichkeit erhöht. Die Festlegung dieser quantitativen Ausprägungen um einen allgemeinverbindlichen Standard ist im Rahmen eines politischen Prozesses zwischen den beteiligten Verbänden und Interessengruppen auszuhandeln.

Die Spurtypen könnten eine wertvolle Grundlage für einen Qualitätsstandard sein

Bisher gibt es, wie erwähnt, noch keine Standards für den Bodenschutz. Ihre Entwicklung und Umsetzung wird durch eine theoretisch fundierte Vorgehensweise erleichtert. Dabei schlagen Bergen et al. (2002) für die Formulierung von Standards die drei Ebenen Ökologie, Ökonomie und Politik vor. Auf der ökologischen Ebene sind Mindest-Qualitätsstandards zu formulieren. Auf der ökonomischen Ebene müssen die Kosten für die Bewahrung der Umwelt berücksichtigt werden. Das sind die Kosten der Schadensvermeidung, die im Hinblick auf Angemessenheit überprüft werden müssen. Auf der politischen Ebene geht es um die gesellschaftliche Beurteilung der vorgeschlagenen Zielstandards. Dies geschieht unter Verwendung von zusätzlichen Beurteilungskriterien. Im Hinblick auf den physikalischen Bodenschutz lässt sich zu diesen drei Ebenen folgendes formulieren:

Auf der ökologischen Ebene ist die gesetzlich geforderte langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit in der Wissenschaft zu definieren und diese praxisgerecht zu formulieren. Hierfür erarbeitete die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL ein Klassifizierungssystem für Fahrspuren im Wald (Kap. 4.1).

Auf der ökonomischen Ebene ist zu gewährleisten, dass das Holz wirtschaftlich und wettbewerbsfähig geerntet werden kann. Das ist nicht mehr möglich, wenn die Fahrspuren vom Typ 3 gänzlich vermieden werden sollen. Abgesehen davon lässt sich aufgrund der heterogenen Verhältnisse im Boden nicht mit Sicherheit beurteilen, ob ein Spurtyp 3 entsteht oder nicht. Daher empfiehlt es sich, ein gewisses Ausmass dieses

Das tolerierbare Ausmass des Spurtyps 3 ist noch zwischen allen Beteiligten auszuhandeln

Spurtyps 3 zu akzeptieren. Dieses Ausmass sollte in Abhängigkeit der Befahrungsempfindlichkeit definiert werden und regionale und lokale Gegebenheiten berücksichtigen.

Auf der politischen Ebene müssen die definierten Standards danach beurteilt werden, ob sie Akzeptanz bei der Bevölkerung finden. Der politische Aspekt wird durch die zunehmenden gesellschaftlichen Ansprüche an einen guten Bodenzustand im Wald immer wichtiger, wie das zum Beispiel Pressemeldungen über grosse Bodenschäden infolge Holzernte belegen.

6.2.6 Verträge und betriebliche Vereinbarungen

Sowohl im Rahmen von Verträgen mit forstlichen Dienstleistern als auch von Vereinbarungen mit dem eigenen betrieblichen Personal lassen sich Anforderungen an die Qualität von Holzerntearbeiten festlegen, welche den physikalischen Bodenschutz betreffen und den Zweck haben, Schäden am Waldboden zu vermeiden. Auch hierfür bietet der Spurtyp 3 eine wertvolle Grundlage.

Bei der Ausgestaltung kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen a) einer am zu erreichenden Ergebnis orientierten Vertragsgestaltung und b) einer auf spezifischen Vorschriften über die Art und Weise der Bewirtschaftung, also auf Geboten und Verboten fussenden Vertragsgestaltung. a) Ersteres bedeutet, dass z. B. der Spurtyp 3 nur in einem bestimmten Ausmass auftreten darf. Wie dieses Ergebnis erreicht wird, also z. B. mit welcher Art von Feinerschliessung und mit welchen Arbeitsverfahren und Maschinen, bleibt dem Bewirtschafter überlassen. Eine solche Regelung hat den Vorteil, dass sie keine technischen Lösungen diskriminiert und alle Möglichkeiten offen hält, das angestrebte Ziel effizient zu erreichen. b) Letzteres bedeutet, dass z. B. in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit des Waldbodens der Abstand der Rückegassen und die technische Konfiguration der eingesetzten Maschinen – z. B. durch Definition einer maximalen Radlast – vorgeschrieben sind. Eine solche Regelung hat den Vorteil für den Auftraggeber, dass sie das Risiko des Auftretens von Bodenschäden einschränkt (im Beispiel bezüglich Ausmass und Ort).

Beide Möglichkeiten schliessen sich grundsätzlich nicht aus. Zum Beispiel könnte man festschreiben, dass der Spurtyp 3 grundsätzlich nur in einem bestimmten Ausmass auftreten darf und für bestimmte, empfindliche Standorte ein Mindestabstand der Rückegassen von x Metern sowie eine maximale Achslast von x Tonnen vorgeschrieben sind. Beide Möglichkeiten bedingen eine Kontrolle, welche ebenfalls im Vertrag zu regeln und mit entsprechendem Aufwand verbunden ist. Gleiches gilt für die drohende Sanktion im Falle der Nichterfüllung.

Gegenstand der Vertragsgestaltung im Hinblick auf den physikalischen Bodenschutz können sein: das Ergebnis, die Planung, die Durchführung, die Kosten, die Kontrolle und die Sanktion.

Festlegen eines
Arbeitsergebnisses

Festlegen der eingesetzten
Maschinen und ihrer
Ausrüstungen

Tab. 11 > Mögliche vertragliche Regelungen zum physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer

Gegenstand	Beispiele
Ergebnis	Das Befahren des Waldbodens abseits der Rückegassen und anderer Erschliessungslinien ist nicht zulässig. Der Spurtyp 3 kommt auf maximal x% der Länge einer Rückegasse vor, entsprechend der Bodenempfindlichkeit.
Planung	Eine holzschlagübergreifende Planung der Feinerschliessung ist vor Arbeitsbeginn durch den Auftragnehmer zu erstellen. Ausweichflächen bzw. Ausweicarbeiten sind für den Fall von witterungs- bzw. bodenschutzbedingten Arbeitsunterbrüchen vom Auftraggeber (revierübergreifend) geplant.
Durchführung	Wenn auf mehr als einer doppelten Maschinenlänge Spurtyp 3 auftritt, sind die Arbeiten einzustellen und der Auftraggeber entscheidet über die Weiterführung oder Unterbrechung der Arbeiten. Auf befahrungsempfindlichen Böden sind für das Schleifrücken 6- oder 8-Rad-Skidder mit Bändern vorgeschrieben.
Kosten	Durch den Bodenschutz bedingte Mehrkosten der Holzernte werden aus einem zu diesem Zweck geäufteten Fond abgegolten.
Kontrolle	Der Auftraggeber kontrolliert die Arbeiten auf der Basis eines Protokolls, welches erlaubt, die Verteilung des Spurtyps 3 auf dem Gassennetz vor der Massnahme quantitativ nachzuvollziehen. Dieses Protokoll ist vom Auftragnehmer vor Beginn der Arbeiten zur Kenntnis zu nehmen und zu bestätigen.
Sanktion	Die geschädigten Flächen werden auf Kosten des Verursachers mit biologischen Massnahmen (z. B. Erlenpflanzung bei geeigneten Lichtverhältnissen) regeneriert.

Beim Aufstellen vertraglicher Anforderungen muss man kritisch im Auge behalten, dass

- > die Regeln eindeutig sind und Massnahmen operational sind, also auch wirklich umgesetzt werden können und z. B. nicht am Aufwand und an mangelnder Akzeptanz der Akteure scheitern
- > die Massnahmen Geld kosten und jemand dafür zahlen muss
- > die Nutzung des Holzes wettbewerbsfähig sein muss.

6.2.7 Terra-mechanische Modelle

Mit Modellen wird versucht, die komplexen Wechselbeziehungen zwischen Maschine und Boden abzubilden. Solche Modelle können den Entscheid, ob man schadensarm fahren kann, unterstützen. Im Folgenden werden das Modell ProFor der TU München (Ziesak 2004) und die wesentlichsten Ergebnisse aus dem PrAllCon-Projekt (Jacke und Ebel 2006) kurz beschrieben.

ProFor – Modell zur Berechnung eines Grenzwassergehaltes

Das Informationssystem ProFor errechnet aus Nutzerangaben zum Boden und Daten der vorgesehenen Maschine für einen bestimmten Einsatz einen «maximal tolerierbaren Bodenwassergehalt» (sogenannter Grenzwassergehalt). Solange dieser Bodenfeuchtwert während der Durchführung der Arbeiten nicht überschritten wird, kann davon ausgegangen werden, dass keine bodenökologisch nachteilige Schädigung erfolgt bzw. dass der Spurtyp 3 nicht auftritt.

Im ersten Informationsbereich müssen Daten zum Boden (Bodenart, Humusgehalt, Wechselfeuchte und Skelettgehalt) und zur Hangneigung eingegeben werden. Dabei sind die Böden anhand der plastischen Eigenschaften (Ausroll- und Fließgrenze) unterschiedlichen Gefährdungseinheiten zugeordnet. Im zweiten Informationsbereich werden Daten zur Maschine und bei Radmaschinen auch zu deren Bereifung (inkl. Bogiebänder) eingegeben. Aus den technischen Kennwerten von Maschine und Reifen bzw. aus der Radlast und der Aufstandsfläche wird dann ein spezifischer Kontaktflächendruck berechnet. Schlussendlich wird ein maximal tolerierbarer Wassergehalt für eine typische Belastungssituation ausgegeben. Der Endnutzer wird durch Eingabefenster mit einfachen Abfragen durch die Anwendung geführt (Abb. 63).

Aus Boden- und Maschinendaten wird ein Grenzwassergehalt ermittelt, bei dem gerade noch bodenschonend gefahren werden kann

Abb. 63 > Eingabemasken ProFor für den Boden (links) und die verwendete Maschine (rechts)

The image shows two side-by-side software windows. The left window, titled 'Boden', contains a soil classification ternary diagram (triangle) with axes for Sand, Ton (Clay), and Schluff (Silt). The diagram is divided into various soil types like Ts, Lts, Lt, Tu, St, Ls, Lu, Su, Uls, Us, and U. Below the diagram, there are input fields for Humusgehalt (normal (<5%)), Wechselfeuchte (nicht oder mäßig wechselfeucht), Skelettgehalt (< 30%), and Hangneigung (15%). The right window, titled 'Maschinendaten', has tabs for 'Maschinengruppe', 'Maschinentyp', and 'Eigentümer'. It shows 'Timberjack 1110' as the machine type. Below, there are sections for 'Bereifung der Vorderachse' and 'Bereifung der 2. Achse', both set to 'Nokia 600/55-26.5 PR 12'. Each section has a 'Luftdruck (bar)' field set to 2.5 and a 'Zusatzgewicht [kg]' field. There are also checkboxes for 'Bogieketten'.

Nach abgeschlossener Eingabe wird ein Protokoll mit den Daten zu Boden, Maschine, Kontaktflächendruck und maximal tolerierbarem Wassergehalt erstellt.

Dem Waldbesitzer kann das Informationssystem Sicherheit für die forsttechnische Einsatzplanung liefern, damit das Schadrisko bei der Befahrung minimiert wird. Der Maschineneigentümer kann mit dem Instrument die bodenschonende Tauglichkeit seiner Maschinen einsatzspezifisch belegen. Für Ersatz- oder Neuinvestitionen steht ihm eine Aussage zur Verfügung, wie die geänderte/umgebaute bzw. neue Maschine hinsichtlich der Bodenschonung zu beurteilen ist.

Das Informationssystem ProFor stellt ein wertvolles Instrument dar, dessen Weiterentwicklung und Verbesserung sich lohnen würde. Beispielsweise ist eine direkte Integration der Software in die Fahrzeugkabine und damit eine direkte Interaktion der Software mit einer elektronischen Reifendruckregelanlage möglich. Auch eine Anbindung

einer elektronischen Kranwaage auf Forwardern ist denkbar. Beide Möglichkeiten sind experimentell sowie software-technisch bereits realisiert (Huber et al. 2010). Damit kann beispielsweise ein Forwarder in seiner Konfiguration hinsichtlich Reifenfülldruck bzw. Beladungsmenge optimal an die aktuelle Bodensituation angepasst werden. Aus dem jahreszeitlichen Verlauf der Niederschläge und den Kenntnissen der vorhandenen Böden kann ein den Bodenschutz mit berücksichtigender Jahreseinsatzplan abgeleitet werden. Hierin würden z.B. kritische Flächen bevorzugt in der trockenen Jahreszeit zur Bearbeitung vorgesehen und ganzjährig ohne Probleme befahrbare Flächen würden als Reserveflächen bereitgehalten. Durch geschickte Kombination von Bodenwasserhaushaltsmodellen mit aktuellen, regionalen Niederschlagsdaten sollte die gewünschte Genauigkeit in der Ableitung des Bodenwassergehaltes erzielt werden. Bezieht man zudem die Wetterprognosen in die kurzfristige Planung mit ein, so liessen sich für den derzeit verfügbaren Prognosezeitraum von 3 bis 5 Tagen (Eintrittswahrscheinlichkeit >80 %, bzw. >50 %) Einsatzempfehlungen auf Basis der dann zu erwartenden Bodenfeuchte ableiten.

Umfangreiche Berechnungen mit ProFor an der WSL haben berechtigterweise Zweifel an der Richtigkeit einzelner Teile des Modells genährt (Spjevak et al. 2009b). Zu überprüfen sind insbesondere die Klassifizierung der Bodenarten und die Herleitung des Kontaktflächendruckes. Im Hinblick auf die Bodenarten ist festgestellt worden, dass sich zwei Böden, die sich in ihrem Schluffanteil um 40 % unterscheiden, zur gleichen Bodenklasse gehören. Da dies unplausibel erscheint, ist zu überprüfen, ob die Klassifizierung der Bodenarten verfeinert werden muss. In Bezug auf die Herleitung des Kontaktflächendruckes sind neuere einschlägige Untersuchungen (z. B. Jacke und Ebel 2006) zu berücksichtigen. Insbesondere die Berechnung des Kontaktflächendruckes unter Bogiebändern muss überprüft werden, da die Herleitung stark vereinfacht ist und da nicht zwischen den Bogieband-Arten unterschieden wird (tragende Bänder oder Traktionsbänder). Hier können die Ergebnisse aus dem Projekt PrAllCon wesentliche Verbesserungen bringen.

PrAllCon – Modell zur Beurteilung des Kontaktflächendruckes

Der Name PrAllCon steht für Pressure Allocation on Contact Areas under Forest Tires (Jacke und Ebel 2006). Im Projekt der Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Universität Göttingen wurde die Druckverteilung unter verschiedenen Forstreifen mittels Sensormatten ermittelt. Dabei wurden zahlreiche Parameter wie Auflast, Nennbreite, Fülldruck u. a. m. variiert. Die Messungen wurden auf hartem und weichem Untergrund durchgeführt. Bei hartem Untergrund wurden die Reifen direkt auf die Sensoren gepresst. Bei weichem Untergrund wurde eine 20 cm dicke Sandschicht zwischen Reifen und Drucksensoren gelegt um den Stolleneffekt auszuschalten.

Während die Ergebnisse der Messungen auf hartem Untergrund insbesondere für den Strassen- und Wegebau von Interesse sind, liefern diejenigen für weichen Untergrund wichtige Hinweise für die Befahrung von Rückegassen. Auf weichem Untergrund lässt sich die Druckverteilung sehr zuverlässig über die drei Parameter Auflast, Fülldruck und Nennbreite beschreiben.

Im Anschluss folgten weitere PrAllCon-Projekte. Im Projekt PrAllCon-Track (Jacke et al. 2008a) wurde die Wirkung von Bändern auf Einzelrädern auf den Kontaktflächen- druck untersucht. Im Projekt PrAllCon-Slash (Jacke et al. 2008b) wurde die Druckverteilung von Forstreifen unter Reisig-matten ermittelt, deren interessante Ergebnisse im Kapitel 6.4.3 dargestellt sind. Seit 2013 verfügt die Universität Göttingen nun über einen Prüfstand, auf welchem die Druckverteilung und die Druckspitzen unter Bogie- bändern und Gliederketten gemessen werden können (Jacke und Hittenbeck 2013). Damit lässt sich die Wirkung verschiedener Bandtypen auf den Boden untersuchen.

Die Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität Göttingen stellt einen Druck-Kalkulator in Excel zur Verfügung (Jacke 2012). Nach Eingabe der Parameter Auflast, Nennbreite Reifen, Höhen-/Breitenverhältnis, Felgendurchmesser, Reifenfülldruck und Profilart (Soft- oder Traktionsprofil) wird der Kontaktflächen- druck auf weichem und hartem Untergrund berechnet. In die Gesamtbeurteilung fließt nebst dem Kontaktflächendruck auch die Radlast selber ein. Damit wird berücksichtigt, dass sowohl die Masse (Eigengewicht + maximale Nutzlast) wie auch die Bereifung einer Maschine massgebende Faktoren für die Bodenpfleglichkeit sind. In einem In- formationsblatt von Forst BW (Forstverwaltung Baden-Württemberg) wird das Vorge- hen bei der Beurteilung der Bodenpfleglichkeit einer Maschine mit Hilfe des PrAll- Con-Wertes detailliert dargestellt (http://forstbw.de/fileadmin/forstbw_pdf/waldarbeit/prallcon-infoblatt.pdf). Das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik verwendet die Methode mit dem PrAllCon-Wert im Maschinenprüfwesen zur Beurteilung der Boden- pfleglichkeit.

Untersuchungen an der Universität Göttingen zeigen den wichtigen Einfluss des Reifenfülldruckes auf den Kontaktflächendruck

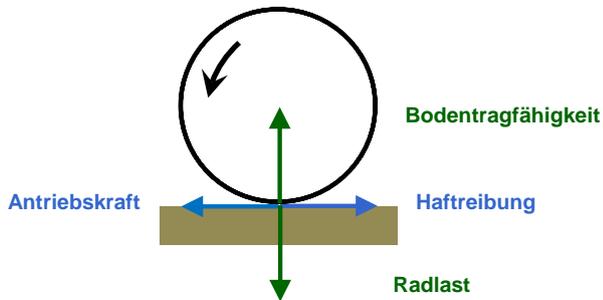
Berechnungsmodell für den Kontaktflächendruck

6.3 Maschinentechnik und Arbeitsverfahren

6.3.1 Auf den Boden wirkende Kräfte

Beim Befahren eines Bodens mit einer Maschine wirken Kräfte sowohl in vertikaler wie auch in horizontaler Richtung auf den Boden, welche die Bodenstruktur beeinflus- sen.

Abb. 64 > Beim Befahren wirken Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung auf den Boden

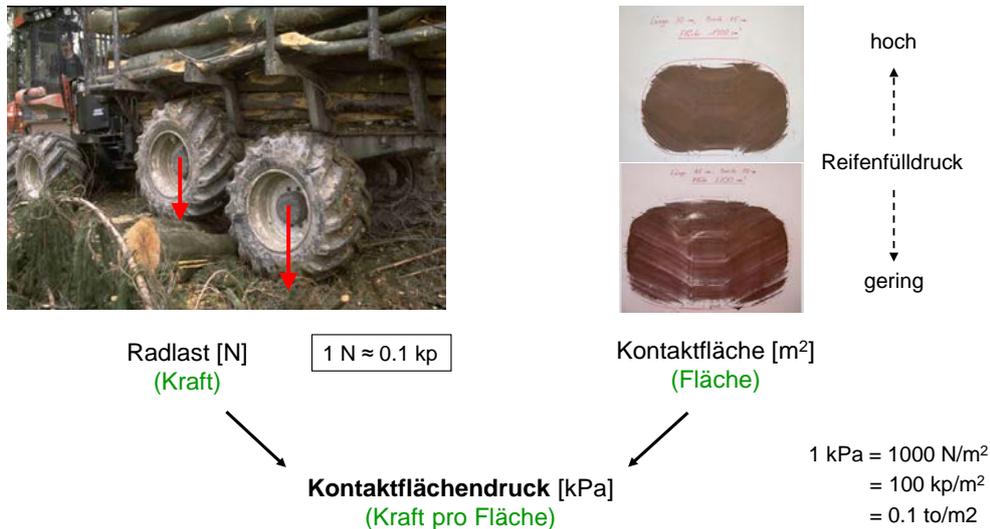


Wenn die von der Maschine über die Räder bzw. Raupen auf den Boden ausgeübte vertikale Kraft (Radlast) höher ist als die Bodentragfähigkeit, sinken die Räder soweit in den Boden ein bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Das belastete Rad drückt eine Spur in den Boden, was zur Verdichtung des darunter liegenden Bodens führt. Der Porenraum für Wasser und Luft wird verringert.

Die Antriebskraft eines Rades muss die Haftreibungskraft zwischen Boden und Rad überwinden, damit eine Bewegung stattfindet. Dabei entsteht ein geringer Schlupf, d. h. das angetriebene Rad legt pro Umdrehung einen leicht kleineren Weg zurück als ein nicht angetriebenes Rad gleichen Umfangs. Beträgt dieser Schlupf mehr als ca. 20 % «fräst» das angetriebene Rad eine Spur in den Boden und zwar unabhängig von der Radlast. Durch die in horizontaler Richtung wirkenden Kräfte werden einerseits die Poren zusammengedrückt und andererseits Bodenteilchen entgegen der Fahrtrichtung horizontal verschoben, was die Porenkontinuität beeinträchtigt.

Eine geeignete Grösse zur quantitativen Darstellung der Wirkung einer Maschine auf den Boden ist der Kontaktflächendruck (Abb. 65). Er wird aus der einwirkenden vertikalen Kraft (Radlast) und der Kontaktfläche zwischen Reifen bzw. Raupen und Boden hergeleitet.

Abb. 65 > Bei Forstmaschinen liegt der Kontaktflächendruck mehrheitlich im Bereich von 200–500 kPa (20–50 Tonnen/m²)



Nach Jacke und Ebel (2006) wurde bei früheren Berechnungsmodellen, bei denen die Kontaktfläche vereinfacht aus der Reifenbreite und dem Raddurchmesser hergeleitet wurde, der Reifenfülldruck nicht berücksichtigt. Im Projekt PrAllCon wurde mit einer umfangreichen Messreihe auf hartem und weichem Untergrund aufgezeigt, dass der Reifenfülldruck einen wesentlichen Einfluss auf den Kontaktflächendruck eines Reifens hat.

In den folgenden Kapiteln werden Massnahmen dargestellt, die an den Maschinen getroffen werden können, damit sie nicht oder nur wenig in den Boden einsinken sowie die Antriebskräfte möglichst schonend auf den Boden übertragen.

6.3.2 Technische Massnahmen zur Verringerung des Kontaktflächendrucks

Die beiden wirksamsten Massnahmen zur Verringerung des Kontaktflächendrucks sind die Verringerung der Radlast und die Vergrößerung der Kontaktfläche.

a) Reduktion der Radlast

Als technische Massnahme können bei beschränkt tragfähigen Böden Maschinen mit einem möglichst geringen Leergewicht eingesetzt werden. Möglichst gering heisst, dass die Maschine gerade noch so schwer ist, dass sie ihre Aufgabe erfüllen kann. Beispielsweise kann im starken Baumholz kein leichter Vollernter eingesetzt werden. Als betriebliche Massnahme kann bei Rückefahrzeugen im Bedarfsfall zusätzlich das Ladungsgewicht reduziert werden, d. h. die mögliche oder noch erlaubte Nutzlast der Maschine wird nicht vollständig ausgenutzt («Rücken mit halber Last»). Der Spitzendruck wird dabei reduziert, d. h. der Boden wird weniger tief verdichtet. Ein im Jahr 2013 von der WSL durchgeführter Befahrungsversuch mit einem 8-Rad-Forwarder hat diese Erwartung bestätigt.

Eine Vergrößerung der Kontaktfläche und eine Reduktion der Radlast verringern den Kontaktflächendruck und damit die Bodenverdichtung sowie die Verdichtungstiefe

Möglichst geringe Maschinenmasse

Ideal wäre eine ausgeglichene Massenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse(n). Bei Rückefahrzeugen ist dies jedoch kaum zu erreichen. In unbeladenem Zustand wirken rund 60 % der Fahrzeugmasse auf die Vorderachse(n). Im beladenen Zustand ist es umgekehrt, hier wirken 60–70 % der Gesamtmasse (Fahrzeug inkl. Ladung) auf die Hinterachse(n). Diese Gewichtskraft ist massgebend für den Spitzendruck und damit für die Tiefe der Verdichtungswirkung. Tabelle 12 zeigt eine Bewertung der Radlasten, wie sie im Maschinenprüfwesen des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik verwendet wird.

Möglichst ausgeglichene Massenverteilung

Tab. 12 > Bewertung der Radlast von Forstmaschinen, Prüfgrundlage zur KWF-Gebrauchswertprüfung Harvester (Stand 2011)

Radlast L (kN)	Bewertung
L <25	Sehr gering ++
25<= L <35	Gering +
35<= L <45	Mittel 0
45<= L 55	Hoch -
55<= L	Sehr hoch --

Vollernter und Forwarder sind heute in der Regel mit 6 oder 8 Rädern ausgerüstet. Die Erhöhung der Achszahl stösst an konstruktive Grenzen (Gesamtlänge der Maschine) und kann sich beim Lenken nachteilig auswirken, indem bei Richtungsänderungen der Boden durch die seitlich wirkenden Scherkräfte aufgerissen wird.

Grosse Anzahl Räder

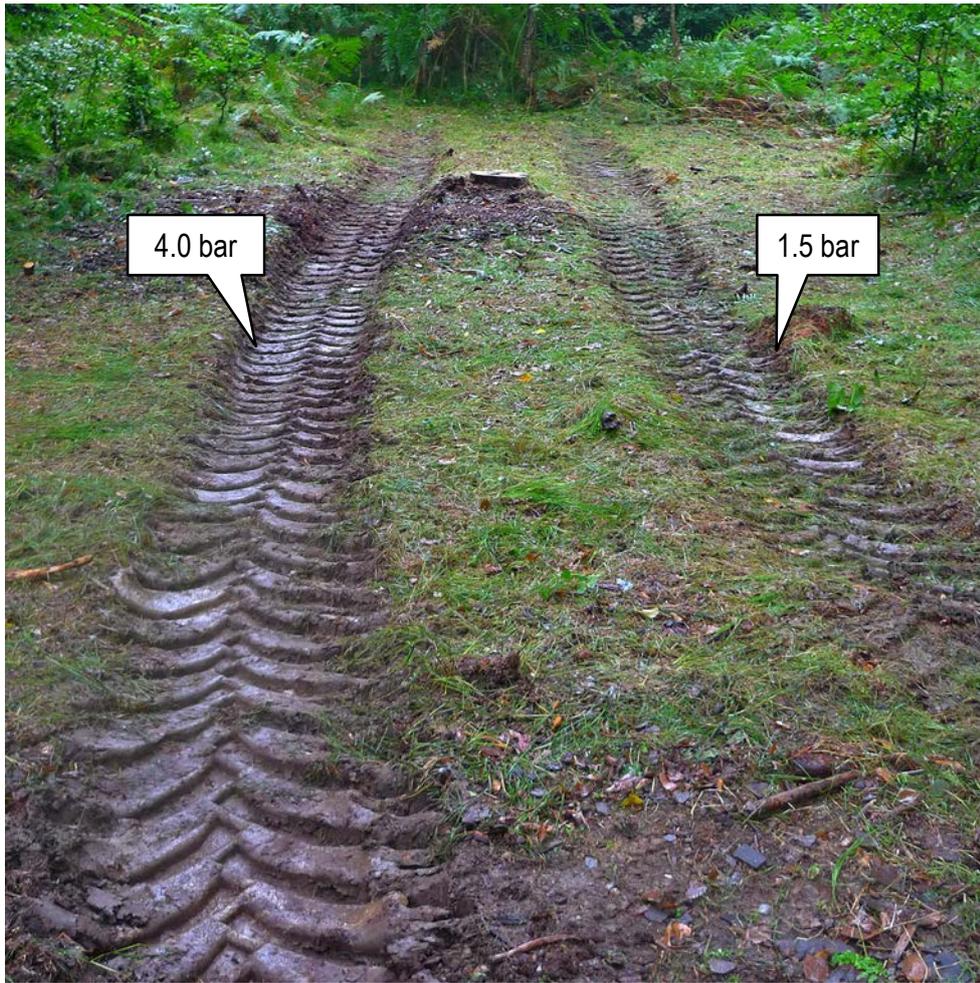
b) Vergrösserung der Kontaktfläche

Dies ist die wichtigste Massnahme zur Vergrösserung der Kontaktfläche. Für das Fahren auf Rückegassen (weiche Böden) kann der Reifenfülldruck im Bedarfsfall auf 1,5–2 bar abgesenkt werden. Die Reifenhandbücher der Hersteller geben meist höhere Mindestfülldrucke an, weil die Angaben sich auf das Fahren auf harter Unterlage beziehen. Hier würden beim Fahren mit zu tiefem Fülldruck die Reifen einem hohen Verschleiss unterliegen oder gar zerstört. Auch bei Fahrten im Gelände ist Vorsicht geboten. Zu tiefe Reifenfülldrucke können z. B. zu Ventilabrissen oder Beschädigungen der Reifenflanken führen. Insbesondere bei Vollerntern und Forwardern führt ein zu tiefer Reifenfülldruck zu Instabilität bei der Arbeit mit dem Kran.

Geringer Reifenfülldruck (Abb. 66)

Abb. 66 > Fahrspuren nach Befahren mit unterschiedlichem Reifenfülldruck links und rechts an der gleichen Maschine. Fahrversuch im Staatswald Habsburg, Kanton Aargau, September 2010

Fahrzeug HSM 704, Gewicht ca. 9,5 Tonnen, Reifenbreite 600 mm. Bodenfeuchte ca. 35 %, 10 Hin- und Rückfahrten ohne Last.



Breitere Reifen vergrössern die Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden, allerdings deutlich weniger stark als ein verringerter Fülldruck. Bei Harvestern und Forwardern sind Reifenbreiten von 700–750 mm heute Stand der Technik (Weise 2008). Mit Reifenbreiten von 800 mm oder mehr beträgt die Gesamtbreite der Maschine je nach Maschinentyp in der Regel über 3 m, was für das Umsetzen der Maschinen auf öffentlichen Strassen erschwerend ist (Sonderbewilligung).

Breite Reifen

Die Messungen von Jacke und Ebel (2006) ergaben nur einen geringen Einfluss des Raddurchmessers auf den Kontaktflächendruck. Eine Vergrösserung des Raddurchmessers stösst bei Forstmaschinen oft auch an konstruktive Grenzen, wie beispielsweise ein genügender Lenkeinschlag bei Traktoren oder ein möglichst tiefer Schwerpunkt bei Forwardern.

Grössere Raddurchmesser

Es kann zwischen drei Arten von Bogiebändern unterschieden werden: Moor-, Traktions- und Kombibänder (ForstBW 2013).

Bogiebänder

Moorbänder oder tragende Bänder (Abb. 67, rechte Fahrzeugseite) haben breite Platten und geringe Zwischenräume zwischen den Platten. Die hohe Aufstandsfläche führt zu einem geringeren Kontaktflächendruck, weshalb sich Moorbänder für befahrungsempfindliche Böden in flachem oder leicht geneigtem Gelände eignen. Nur bedingt einsetzbar sind sie bei Schnee.

Kunststoffbänder oder mit Kunststoff oder Gummi belegte Stahlbänder sind besonders boden- und wurzelschonend. Mit ihnen kann auch auf Waldstrassen ohne Beschädigung der Deckschicht gefahren werden.

Traktionsbänder (Abb. 67, linke Fahrzeugseite) garantieren mit ihren schmalen Platten mit aggressivem Profil und weitem Abstand eine hohe Traktion und geringen Schlupf. Sie eignen sich besonders für den Einsatz in Hanglagen bis 30 % Neigung und auf Schnee.

Kombibänder bieten einen Kompromiss zwischen Traktionsunterstützung und Druckverteilung. Der Einsatzbereich umfasst Hangneigungen von 0–30 %. Auf befahrungsempfindlichen Böden sind Kombibänder dann geeignet, wenn eine Traktionsunterstützung erforderlich ist.

Abb. 67 > Forwarder mit unterschiedlichen Bogiebändern

Die Maschine wurde zu Demonstrationszwecken mit zwei grundsätzlich verschiedenen Arten von Bogiebändern ausgerüstet: links Traktionsbänder zur Verbesserung der Steigfähigkeit und der Standsicherheit am Hang, rechts Moorbänder zur bodenschonenden Befahrung.



Messungen des Kontaktflächendruckes unter Bogiebändern sind schwierig zu realisieren, würden aber Aufschluss über die tatsächliche Verteilung des Kontaktflächendruckes und die Druckspitzen unter dem Band geben. Jacke et al. (2008a) kommen zum Schluss, dass Bogiebänder bezüglich ihrer druckmindernden Wirkung keinesfalls mit Raupen zu vergleichen sind und dass insbesondere bezüglich der lastaufnehmenden Wirkung des Bereiches zwischen den beiden Rädern und der entsprechenden Einsinktiefe noch Forschungsbedarf besteht. Die Abteilung für Arbeitswissenschaften und Verfahrenstechnologie der Universität Göttingen hat einen entsprechenden Prüfstand konstruiert, so dass ab 2013 im Projekt PrAllCon-Track Messungen mit verschiedenen Konstellationen von Bandtypen, Bandspannungen, Raddurchmessern und Radlasten vorgenommen werden können (Jacke und Hittenbeck 2013).

Messungen auf der Versuchsanlage des Projektes PrAllCon mit einem mit «traktiven» Bandplatten ummantelten Einzelrad über einer Reisigmatte haben ergeben, dass das Band praktisch keinen Einfluss auf den Spitzendruck hatte, dieser wurde weitgehend durch die Radlast bestimmt. Die Reisigmatte hatte eine ähnliche druckverteilende Wirkung wie bei den Messungen ohne Band (Jacke et al. 2008b). Vergleichbare Messungen für Bogiebänder wurden bisher noch nicht durchgeführt.

Bezüglich des Kontaktflächendruckes unter Bogiebändern besteht noch Forschungsbedarf

Nicht zu vergessen ist die zusätzliche Masse der Bogiebänder, welche bei vier Stahlbändern auf einem Forwarder die Eigenmasse durchaus um ein Drittel vergrössern kann. Hinzu kommen erhöhter Treibstoffverbrauch und Reifenverschleiss.

Mit Raupenfahrwerken lässt sich die Kontaktfläche beträchtlich erhöhen. Auf hindernisfreien Böden (Wiesen, Äcker), wo die Raupen nahezu vollständig auf dem Boden aufliegen, führt dies zu einer Reduktion der Kontaktflächendrücke. Rückegassen weisen jedoch selten eine hindernisfreie Fahrbahn auf (Mikrorelief, Wurzelstöcke, ...), so dass die Raupen häufig nur mit einem Teil ihrer Fläche auf dem Boden aufliegen. Damit kann einerseits der Kontaktflächendruck auf der Teilfläche mit Bodenberührung beträchtlich ansteigen und andererseits werden die Traktionskräfte nur auf dieser Teilfläche auf den Boden übertragen, was zum Aufreissen des Bodens (Schlupf) und zur Spurbildung führen kann. Für Raupen gilt, ähnlich wie für Bogiebänder, dass nur ebenes bis wenig geneigtes Gelände befahren werden kann, ausser die Raupen seien mit besonderen Stegen ausgerüstet, welche die Steigfähigkeit verbessern und das Abrutschen bei Querneigung verhindern. Das ohnehin bei Raupenfahrwerken erhöhte Risiko für Wurzelverletzungen ist in diesem Fall besonders ausgeprägt. Mit anderen technischen Lösungen wird versucht, die erwähnten Nachteile des klassischen Raupenbaggerfahrwerkes zu mindern: Raupenfahrwerke mit grossen, federnd gelagerten Laufrollen («Panzerfahrwerk») oder kurze, pendelnd aufgehängte Raupenfahrwerke. Das «Panzerfahrwerk» (z. B. Vollernter Impex Königstiger) passt sich auch bei hindernisreicher Fahrbahn gut der Geländeoberfläche an. Beim Valmet X3 wurde ein herkömmlicher Radvollernter anstelle der Räder mit vier pendelnd aufgehängten Raupenlaufwerken ausgerüstet. Zusammen mit der Knicklenkung führt diese Konstruktion dazu, dass auch bei schwierigen Geländebedingungen die vier Raupen nahezu vollständig auf dem Boden aufliegen (Abb. 68). Ein wichtiger Grund, dass bis heute Raupenfahrwerke in der Schweiz keine grosse Verbreitung gefunden haben, dürfte darin liegen, dass es keine Forwarder mit entsprechenden Fahrwerken gibt, welche das aufgearbeitete Holz rücken können. Sofern das Holz dann ohnehin im Sortimentsverfahren mit einem Mobilseilkran gerückt werden müsste, ist heute die Vollbaumbringung mit Mobilseilkran und Aufarbeitung an der Waldstrasse eine eher vorteilhaftere Alternative. Weitere Erschwernisse für den Einsatz von Maschinen mit Raupenfahrwerken sind das Risiko von Schäden an den Waldstrassen sowie das im Vergleich zu Radmaschinen oft aufwändigere Umsetzen zwischen den Einsatzorten. Ein weiterer Grund für die bisher geringe Verbreitung der mit Raupen ausgerüsteten Radfahrzeuge sind die Zusatzkosten für die Anschaffung dieser Spezialausrüstung und die Kosten für den relativ intensiven Unterhalt. Diese zusätzlichen Kosten werden vom Auftraggeber häufig nicht angemessen entschädigt.

Raupen

Abb. 68 > Harvester Valmet X3 «Snake» und Ecolog 570D Soft Track mit unabhängigen, pendelnd aufgehängten Raupenlaufwerken

Diese Konstruktion führt zusammen mit der Knicklenkung zu einer sehr guten Anpassung an Bodenunebenheiten. Der Harvester Ecolog (rechts) ist zusätzlich mit einem Pendelarmfahrwerk sowie sogenannten Soft Tracks ausgerüstet, besonders bodenschonenden Gummilaufbändern.



Zur Verminderung der Wurzelschäden wurden verschiedene Alternativen zu Stahlraupen entwickelt, wie Gummiraupen oder Belegung der Stahlraupen mit Kunststoff. Diese Raupensysteme eignen sich jedoch, wie bei den Bogiebändern schon erwähnt, nur für ebenes bis leicht geneigtes Gelände.

6.3.3 Technische Massnahmen zur Verringerung des Schlupfes

Zur Verringerung des Schlupfes gibt es verschiedene Antriebsarten des Fahrzeuges und traktionsverbessernde Massnahmen am Fahrwerk.

Moderne Forstmaschinen sind standardmässig mit sogenannten Lastschaltgetrieben oder mit hydrostatischen Fahrantrieben ausgerüstet. Bei einem Lastschaltgetriebe kann die Übersetzung unter Last, also während der Fahrt, ohne Unterbrechung des Drehmomentes geändert werden. Damit kann das Durchdrehen der Räder, wie es beim Wiedereinkuppeln bei mechanischen Getrieben entsteht, vermieden werden. Beim hydrostatischen Fahrtrieb wird die mechanische Leistung des Motors durch eine Pumpe in hydraulische Leistung umgewandelt und mittels Hydromotoren in eine Drehbewegung umgesetzt. Damit kann die Fahrgeschwindigkeit stufenlos und ohne Zugkraftunterbrechung reguliert werden.

Lastschaltgetriebe und
hydrostatische Fahrantriebe

Die Anforderungen an Forstreifen sind ausserordentlich hoch (Weise 2008). Sie müssen hohe Gewichte tragen können und den Anforderungen beim Fahren im Gelände (Quetschungen, Stöcke, Äste etc.) standhalten. Insbesondere bei Schleppern, welche Langholz rücken, müssen zudem von den Reifen hohe Zugkräfte übertragen werden. Dazu kommt zunehmend die Forderung, dass diese Funktionen in bodenschonender Weise zu erfüllen sind.

Bodenschonende Forstreifen
(Abb. 69)

Abb. 69 > Reifen mit Traktionsprofil (links) für ziehende Schlepper und mit Soft-Profil (rechts) für Harvester und Forwarder



Bilder: Nokian Heavy Tyres

Reifen, mit welchen hohe Zugkräfte übertragen werden müssen, weisen pfeilförmig angeordnete, hohe Stollen mit grossen Zwischenräumen (weniger als 50 % positives Profil) und einer relativ scharfkantigen Reifenschulter auf. Diese Reifen dringen mit den Stollen gut in den Boden ein und weisen auch eine gute Selbstreinigung auf. Reifen mit Soft-Profil besitzen im Gegensatz dazu deutlich flachere Stollen mit geringeren Zwischenräumen (über 50 % positives Profil) und eine abgerundete Reifenschulter. Sie greifen weniger tief und weniger aggressiv in den Boden ein. Reifen mit Soft-Profil eignen sich besonders für selbstfahrende Maschinen wie Harvester und Forwarder, welche geringere Zugkräfte auf den Boden übertragen müssen. Bei höherem Zugkraftbedarf können Bogiebänder oder Gleitschutzketten gute Dienste leisten.

Gleitschutzketten auf pneubereiften Rädern verbessern die Traktion bei schwierigen Bodenverhältnissen (tonhaltige Böden, Schnee) sowie beim Fahren hangaufwärts und erhöhen die Standsicherheit am Hang. Nachteilig wirken sie in Bezug auf die Verletzung von Wurzeln und Stammanläufen der Gassenrandbäume. Zudem besteht, je nach Ausgestaltung der Kettenglieder, ein mehr oder weniger grosses Risiko, dass die oberste Bodenschicht aufgerissen wird und es zu Spurbildung kommt.

Gleitschutzketten

Insbesondere Reifen mit Soft-Profil, wie sie häufig auf Harvestern und Forwardern zum Einsatz kommen, stossen bei schwierigeren Gelände- und Bodenverhältnissen aufgrund ihrer Bauart und Profilgestaltung an Grenzen bei der Übertragung der Traktionskräfte. Bänder, welche auf zwei durch den Bogieträger verbundene Räder aufgezogen werden, vermindern den Schlupf und verbessern damit die Traktion und die Standsicherheit am Hang. Wie auch bei den Geländeketten besteht hier ein grösseres Risiko für Verletzungen an Wurzeln und Stammanläufen.

Bogiebänder

Mit dem vermehrten Einsatz der vollmechanisierten Holzernte in Hanglagen haben sich die Probleme der ungenügenden Traktion bei Bergauffahrt und der Standsicherheit der Maschinen am Hang verschärft. Mit zunehmender Hangneigung nimmt der Schlupf an den Rädern bzw. Bogiebändern zu, übersteigt der Schlupf etwa 20 %, ist mit gravierenden Bodenschäden zu rechnen.

Traktionshilfswinde (Abb. 70)

Seit einigen Jahren bieten deshalb verschiedene Hersteller sogenannte Traktionshilfswinden an. Auf der Maschine, in der Regel ein Harvester oder ein Forwarder, wird eine Seilwinde mit etwa 300 m Seilfassungsvermögen aufgebaut, deren Seilgeschwindigkeit mit dem Fahrtrieb der Maschine synchronisiert ist und damit die gesamten Zug- und Bremskräfte der Maschine unterstützt (ThüringenForst 2008). Genügende Bodentragfähigkeit vorausgesetzt, ist damit ein sehr bodenschonendes Arbeiten möglich.

Abb. 70 > Forwarder mit Traktionshilfswinde

Traktionshilfswinden ermöglichen bodenschonendes Arbeiten am Hang. Die Investitionskosten für die Winde sowie die Kosten für die Montage des Seils beim Einsatz führen jedoch zu höheren Holzerntekosten, welche vom Auftraggeber entsprechend entschädigt werden sollten.



6.3.4 Grundsätze für die Wahl und den Einsatz von Arbeitsverfahren und Maschinen

Bei der Holzernte wird bekanntlich bereits mit der Wahl der Arbeitsverfahren die Höhe der Erntekosten weitgehend bestimmt; die Ausführung der Arbeiten vermag dagegen das so vorbestimmte Ergebnis i.d.R. nur noch in geringerem Mass zu beeinflussen. Was das Risiko und das Ausmass der Beeinträchtigungen des Waldbodens angeht, so bestimmt die Wahl der Arbeitsverfahren bzw. der eingesetzten Maschinen das Ergebnis ebenfalls erheblich. Hier kann jedoch auch der Ausführung eine sehr grosse Bedeutung zukommen: Der Entscheid, ob bei kritischem, weil feuchtem Zustand des Waldbodens gefahren wird oder nicht, ist letztlich der wichtigste.

Daher lassen sich sowohl a) für die Wahl der Arbeitsverfahren und Maschinen als auch b) für den Einsatz derselben Handlungsgrundsätze für das Management formulieren.

a) Die Wahl der Arbeitsverfahren und der Maschinen (inklusive der Entscheide bzgl. der Feinerschliessung) sind in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit der Böden zu treffen:

- > angepassten Rückegassenabstand wählen
- > angepasste bodenschonende Maschinenteknik wählen
- > dabei auf leichte Maschinen, geringe Radlasten und Reifenfülldrücke achten
- > ggfs. bodenschonende Zusatzausrüstungen verwenden (Traktionshilfswinde, Bogiebänder etc.).

b) Beim Einsatz der Erntesysteme selbst ist vor allem der aktuelle Bodenzustand vor und während der Befahrung zu beurteilen sowie die Qualität der Arbeiten hinsichtlich des Bodenschutzes zu kontrollieren. Hieraus sind dann technische und organisatorische Massnahmen abzuleiten und umzusetzen, vor allem:

- > mit den Maschinen die Rückegassen nicht verlassen
- > Reisigmatten anlegen, sofern möglich auch bei motormanueller Holzernte
- > Rückearbeiten allenfalls zeitlich von der Bearbeitung abkoppeln
- > Lastfahrten bergauf vermeiden
- > Befahrung in kritischer Situation (Auftreten von Spurtyp 3) nicht starten bzw. abbrechen.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die empfohlenen technischen und organisatorischen Massnahmen in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit. Die oben genannten Grundsätze werden dabei konkretisiert und drei unterschiedlichen Bodensituationen zugeordnet. Das Ergebnis stellt eine grobe Leitlinie dar. Erläuterungen und Details zu den geforderten Massnahmen finden sich im gesamten Kapitel 6.

Zum Vergleich: In anderen Ländern gibt es ähnliche Grundsätze. ForstBW (Baden-Württemberg) beabsichtigt zum Beispiel, im Staatswald auf befahrungsempfindlichen Standorten grundsätzlich den Bändereinsatz beim Rücken mit 6/8-Rad-Maschinen zu fordern, mit Ausnahme von stabilen Frost- und Trockenperioden (ForstBW 2012). Der Staatsbetrieb Sachsenforst beschreibt in seiner Richtlinie zur Anwendung der Holzernetechnologien alle gängigen Arbeitsverfahren ausführlich unter dem Aspekt des Bodenschutzes (Staatsbetrieb Sachsenforst 2006).

Interessant ist auch die Integration von terra-mechanischen Modellen: Für die 4-Rad-Rückemaschinen werden unter den genannten Bedingungen Mindeststandards bezüglich Kontaktflächendruck und Radlast gefordert, die mittels dem PrAllCon-Kalkulator (Jacke, 2012) ermittelt werden. Ausserdem ist ein Mitführen eines Reifendruckmessgerätes verpflichtend.

Bei der Wahl des Arbeitsverfahrens soll die Befahrungsempfindlichkeit des Bodens berücksichtigt werden

Empfehlungen zum Maschineneinsatz in deutschen Bundesländern

Tab. 13 > Grundsätze für die Wahl und den Einsatz von Arbeitsverfahren und Maschinen

Befahrungsempfindlichkeit (=Verdichtungs- und Spurbildungsrisiko)	Maschinenwahl	Anlage der Feinerschliessung, v. a. Rückegassenabstand	Maschineneinsatz
gering			
übermässig durch-lässige, skelettreiche, rohe Böden wie Gesteinsrohböden, Ranker, Rendzina, Regosol	Rad- und Raupenvollerter Forwarder Seil- oder Zangenschlepper ohne technische Zusatzausrüstungen Kurz- und Langholzverfahren	systematische Anlage 20 m für vollmechanisierte Aufarbeitung (gesamte Fläche in der Kranzone) 30–40 m für vollmechanisierte Aufarbeitung mit Zufällen oder Vorrücken aus der Zwischenzone sowie bei motormanueller Aufarbeitung	keine besonderen Massnahmen: bei nasser Witterung aktuelle Bodenfeuchte beachten und bei Einsatz von Raupenvollertern möglichst nur mit Reisigmatte (schützt zusätzlich vor Wurzelverletzungen)
mittel			
normal durchlässige Böden wie Braunerden, Parabraunerden, Podsole	gleiche Maschinen wie oben, aber Kurzholzverfahren bevorzugen und auf geringen Kontaktflächendruck achten: • leichte Maschinen • mittlere Radlast (<45kN) • 8-Rad-Maschinen • geringer Reifenfülldruck (<2 bar) • Bogiebänder (Kunststoff/ Stahl) • (Stahl)-Raupenfahrwerke • bei Hangneigung 30 bis 50 %: Traktionshilfswinde	30–40 m im Normalfall 20 m im Sturmschadensfall – aus Gründen der Machbarkeit und der Arbeitssicherheit und der Ergonomie	Zeitpunkt der Befahrung bedeutsam: • Bodenfeuchte messen • Boden ggfs. abtrocknen lassen • Reisigmatte anlegen • Füllen/Aufarbeiten und Rücken zeitlich trennen • ggfs. mit reduzierter Last rücken (Verringerung Radlasten)
hoch			
staunasse Böden wie Pseudogley und Stagnogley sowie Nassböden wie Gley	minimale Befahrung: • Vorrücken mit selbstfahrenden Kleinseilwinden, Pferd oder leichtem Schlepper • Endrücken wie vorstehend, aber nur falls Gelände eben (Zusatzausrüstungen und -Massnahmen zwingend, geringe Radlast [<35 kN]) keine Befahrung: • Mobilseilkran, insb. Vollbaumbringung mit Baggerseilkran und Prozessoraufarbeitung an der Waldstrasse	40–60 m, um möglichst wenig Fläche zu befahren Risiko von Bodenbeeinträchtigungen (Spurtyp 3) – Ausdehnung muss minimal sein und die Stellen müssen befahrbar bleiben ggfs. Hauptrückegassen, sog. Sammeltassen als Maschinenweg ausbauen (Baubewilligung notwendig)	Zeitpunkt der Befahrung besonders bedeutsam: • nach längeren trockenen Perioden oder bei gut gefrorenem Boden möglichst keine Befahrung oder Beschränkung auf wenige Fahrlinien, Zufällen oder Vorliefern mit Seilwinde • Reisigmatte anlegen – auch bei motormanueller Arbeit Gassen an schlecht tragfähigen Stellen mit Holz armieren

6.4 Maschineneinsatz

6.4.1 Arbeitsauftrag

Neben dem Vertrag bzw. der betrieblichen Vereinbarung bildet der Arbeitsauftrag eine wesentliche Grundlage, um die Anliegen des Bodenschutzes bei der Holzernte an der Basis durchzusetzen. Der Arbeitsauftrag bezieht sich auf den einzelnen Holzschlag und die durchzuführende Holzernteoperation. Er wird schriftlich erstellt und kommuniziert, beinhaltet eine Beschreibung der örtlichen Situation und gibt Auskunft, was von wem womit und wann und unter Beachtung von welchen Besonderheiten zu tun ist. Hier lassen sich Angaben zur Priorität des Bodenschutzes, zu den Verantwortlichkeiten, zu bodenschonenden Arbeitsverfahren und Maschinenkonfigurationen/-ausrüstungen, Hinweise auf Risikobereiche aus Sicht des Bodenschutzes sowie vorgesehene Auswecharbeiten erfassen.

Zum Arbeitsauftrag gehört zwingend auch eine Organisations- und Schlagskizze, auf welcher der Zustand der Rückegassen vor der Massnahme erfasst werden kann. Dabei ist im Idealfall die räumliche Verteilung und Ausdehnung der Spuren vom Typ 3 zu verorten. Diese Dokumentation des Ausgangszustandes bildet die Grundlage für die Abnahme der Arbeiten (Kap. 6.4.5).

Zu Erstellung des Arbeitsauftrages bietet es sich an, das von der SUVA herausgegebene Formular «Arbeitsauftrag und Notfallorganisation im Forst» (Bestell-Nr. 88216.d – 3.05) zu nutzen. Gegebenenfalls ist das Formular im Hinblick auf die Anforderungen des Bodenschutzes anzupassen bzw. zu überarbeiten. Der Bezug ist online möglich.

Vor dem Maschineneinsatz ist der Zustand der Rückegassen zu dokumentieren

6.4.2 Befahrbarkeit des Waldbodens

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Beurteilung der Befahrbarkeit einer Rückegasse unmittelbar vor dem Befahren mit einer Maschine. Die aufgeführten Methoden sind alle noch nicht optimal dem Einsatz in der Holzernte angepasst; es gibt jedoch vielversprechende Ansätze, die weiter untersucht und entwickelt werden sollten.

Saugspannung

Die Saugspannung bezeichnet die Kraft, die benötigt wird, um dem Boden Wasser zu entziehen. In den feinen Poren muss eine höhere Kraft aufgewendet werden um diese zu entwässern als in den Grobporen. Deshalb ist die Saugspannung umso höher, je trockener ein Boden ist. Die Saugspannung wird mit Tensiometern gemessen; eine poröse Keramikkerze wird in der gewünschten Messtiefe im Boden eingebaut. Das fachgerechte Einsetzen von Tensiometern bedeutet einen gewissen Aufwand und erfordert etwas Übung. Die Methode eignet sich deshalb nur bedingt für die Anwendung vor dem Fahren auf einer bestimmten Rückegasse. Hingegen könnten in einem Forstrevier in verschiedenen Bodentypen feste Tensiometerstationen eingerichtet werden. Aus den hier abgelesenen Saugspannungswerten liesse sich auf die Befahrbarkeit von vergleichbaren Böden schliessen. Mehrere Kantone betreiben an ausgewählten Standorten, vereinzelt auch auf Waldstandorten, ein Messnetz mit Tensiometerstationen, deren Messwerte online über Internet abrufbar sind (Kap. 3.4.3).

Die Saugspannungswerte als Mass für die Bodenfeuchte erlauben die Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodens unmittelbar vor dem Befahren

Die Saugspannung wird in der Regel in einer Tiefe von 35 cm bestimmt, d. h. an der theoretischen Grenze zum Unterboden. Im Wald kann es zweckmässig sein, sich auf eine zusätzliche Messung im Oberboden abzustützen, vor allem, wenn der Oberboden nicht bis in 35 cm Tiefe reicht.

Folgende Saugspannungsbereiche können für das Befahren von Landwirtschafts- und Waldböden eine Orientierungshilfe sein:

>25 cbar	trocken
10–25 cbar	feucht
6–10 cbar	sehr feucht (kein Befahren)
0–6 cbar	nass (kein Befahren und keine Bodenbearbeitung).

Aufgrund des natürlichen Bodenaufbaus, der starken Durchwurzelung, der Transpiration der Bäume sowie der Interzeption ist der Wasserhaushalt in Waldböden nur bedingt mit demjenigen in Freilandböden vergleichbar. Dennoch liefern die oben aufgeführten Messbereiche einen guten Anhaltspunkt, ob das Befahren eines Waldbodens kritisch ist oder nicht.

Bodenwassergehalt

Der Wassergehalt eines Bodens ist der Anteil des Porenraumes, der mit Wasser gefüllt ist. Er kann mit Einstichsonden wie beispielsweise dem TDR-Gerät (Time Domain Reflectometry) oder der FDR-Sonde (Frequency Domain Reflectometry) gemessen werden und wird in Volumenprozenten angegeben. Nur aufgrund des Wassergehaltes kann jedoch noch nicht auf die Befahrbarkeit eines Bodens geschlossen werden. Der Wassergehalt muss in Bezug zum gesamten Porenraum gesetzt werden, der durch Bodenaufbau und Bodeneigenschaften charakterisiert ist (Anhang A10). Dort wo detaillierte Bodenkarten vorhanden sind (wie beispielsweise in Teilen des Kantons Solothurn) sind diese Bodeninformationen abrufbar und somit recht einfach Befahrungsempfindlichkeitskarten abzuleiten.

Zur Beurteilung der Befahrbarkeit eines Waldbodens unmittelbar vor dem Befahren kann das Informationssystem ProFor (Kap. 6.2.7) verwendet werden. Aus den Bodendaten und den Maschinendaten wird ein sogenannter Grenzwassergehalt errechnet. Dieser darf für eine bodenschonende Befahrung nicht überschritten werden. Mit den oben erwähnten Messgeräten kann nun der Bodenwassergehalt auf einfache Weise gemessen und mit dem Grenzwassergehalt verglichen werden. In Kapitel 6.2.7 wurde bereits darauf hingewiesen, dass einige Grundlagen im System ProFor noch verbessert werden sollten, um praxisgerechtere Resultate zu erhalten. Der gewählte Ansatz zur Umsetzung der Kombination Bodendaten-Maschinendaten in einen Grenzwassergehalt ist jedoch sehr vielversprechend. Eine Weiterentwicklung würde sich lohnen, weil damit ein für die Praxis sehr einfach anwendbares und recht kostengünstiges System zur Beurteilung der Bodentragfähigkeit direkt vor dem Befahren zur Verfügung stehen würde.

Eine weitere Möglichkeit, aufgrund des Wassergehaltes auf die Befahrbarkeit eines Bodens zu schliessen, bieten die sogenannten Desorptionskurven (Kap. 3.4.4). Für eine bestimmte Korngrössenzusammensetzung (Anteile Sand, Schluff, Ton) entspricht

Das Informationssystem ProFor berechnet aus Boden- und Maschinendaten den Grenzwassergehalt, bei dem ein Boden noch schonend befahren werden kann

jedem Wassergehalt eine Saugspannung. Damit kann die Befahrbarkeit über die Saugspannung beurteilt werden, wie dies im vorangehenden Abschnitt dargestellt ist.

Eindringwiderstand

Ein Stab mit einer Kegelspitze (Penetrometer) wird in den Boden getrieben und dabei der Eindringwiderstand gemessen. Dieser wird als Druckwert auf einem Manometer angezeigt. Je nach Form und Mantelfläche der gewählten Kegelspitze ergibt sich ein bestimmter Druck bzw. Eindringwiderstand, welcher ein Mass für die Dichte des Bodens und damit für die Tragfähigkeit bedeutet. Diese Methode wird im Wald allerdings eher selten angewendet, weil der Skelettgehalt der Böden und die teilweise starke Durchwurzelung mit verholzten Wurzeln die Messergebnisse so verfälschen können, dass eine differenzierte Beurteilung der Befahrbarkeit nicht mehr möglich ist.

Scherwiderstand

Nach Untersuchungen von Jacke et al. (2011) könnte die Scherfestigkeit des Oberbodens eine rasch und einfach zu bestimmende Grösse sein, um die Befahrbarkeit von Waldböden beurteilen zu können. Die Scherfestigkeit lässt sich mit einem einfachen Instrument, der sogenannten Flügelsonde, messen. Diese wird in den Boden gedrückt und anschliessend um ihre vertikale Achse gedreht, bis es zum Bruch des Bodens kommt, der Boden also «abgeschert» wird. Das dabei ermittelte maximale Drehmoment ermöglicht zusammen mit den Abmessungen der Flügel die Berechnung des Scherwiderstandes. Dieser entspricht gleichsam dem Druck, der in horizontaler Richtung aufgewendet werden muss, um den Boden abzuscheren. Anhand von bodenmechanischen Untersuchungen konnte ein Zusammenhang zwischen dem Druck in horizontaler und in vertikaler Richtung auf den Boden ermittelt werden. Der Druck eines Reifens, welcher in vertikaler Richtung auf den Boden ausgeübt wird, der sogenannte Kontaktflächendruck, lässt sich mit der PrAllCon-Formel abschätzen (Kap. 6.2.7). Durch den Vergleich des Kontaktflächendrucks mit dem Wert für die Scherfestigkeit (ebenfalls als Druck angegeben) könnte auf die Tragfähigkeit des Bodens geschlossen werden. Damit liesse sich für eine bestimmte Maschine die Befahrbarkeit einer Rückegasse unmittelbar vor dem Befahren rasch und kostengünstig beurteilen.

Faustregel für die Dauer der Abtrocknung

Für durchlässige, nicht gestörte Böden ist nach einem mittleren Niederschlag mindestens folgende Zeitspanne abzuwarten, bis ein bodenschonendes Befahren wieder möglich ist:

Sandige Böden:	3 Tage
Lehmige Böden:	5–7 Tage
Tonige Böden:	7–10 Tage

Die angegebenen Zeitspannen können je nach Bodenaufbau etwas variieren. In der Regel sind nach dieser Zeit die Grobporen entwässert (Feldkapazität).

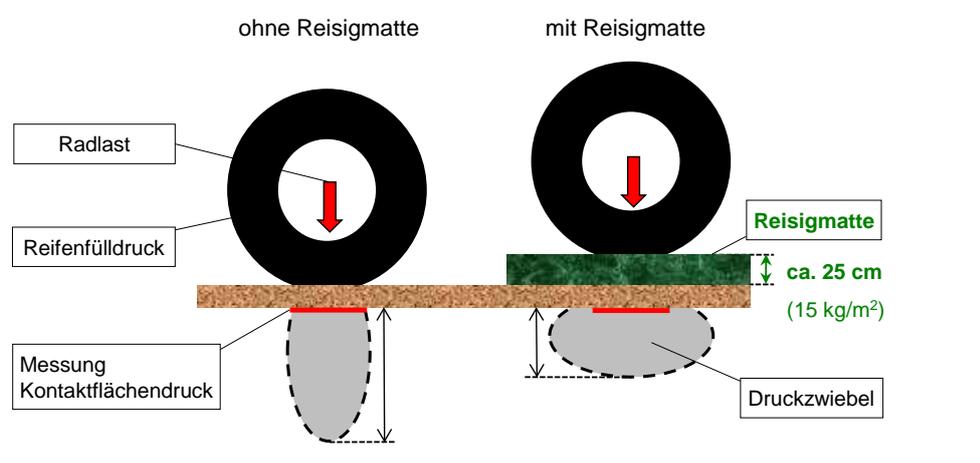
Probehalber Fahren

Falls keine andersartige Beurteilung der Befahrbarkeit möglich ist, wird mit der Maschine in die Rückegasse gefahren. Falls auf etwa zwei Maschinenlängen der Spurtyp 3 auftritt, bedeutet dies, dass der Wassergehalt nahe der Fließgrenze liegt und ein bodenschonendes Befahren nicht mehr möglich ist. Die Arbeit ist in diesem Falle einzustellen.

6.4.3 Reisigmatten

Die systematische Armierung der Rückegassen mit Reisig hat mit der vollmechanisierten Holzernte begonnen. Mit dem Ausleger des Vollernters werden die gefällten Bäume an die Rückegasse vorgeliefert und dort so entastet, dass die Äste in Fahrtrichtung vor der Maschine auf den Boden fallen und dort einen sogenannten Astteppich bilden, auf dem der Vollernter und später der Forwarder fahren. Auch bei motormanuellen Holzernteverfahren wird nach Möglichkeit versucht, auf den Rückegassen einen Astteppich anzulegen, wobei systembedingt nicht die gleiche Qualität erreicht wird. Die qualitativ besten Reisigmatten können mit Fichte und Tanne erstellt werden, weil hier die Dicke der Äste homogener und der Reisiganteil höher ist als vergleichsweise bei Föhre, Lärche und Laubholz.

Abb. 71 > Schematische Darstellung der druckmindernden Wirkung einer Reisigmatte



Die Reisigmatte hat zwei positive Wirkungen:

- > Schonende Übertragung der Traktionskräfte auf den Boden
Die Vortriebskraft eines Rades wird nicht direkt auf die Bodenoberfläche übertragen, sondern auf die Reisigmatte. Damit wird ein «Aufreißen» des Bodens verhindert, was wiederum die Spurbildung vermindert.
- > Minderung der Druckspitzen auf den Boden
Die Radlasten werden durch die Reisigmatte auf eine grössere Fläche verteilt, womit der Kontaktflächendruck vermindert wird. Jacke et al. (2008b) haben in ihren Versuchen zudem nachgewiesen, dass durch die Reibung und Verformung des Astmaterials ein kleiner Teil der aus der Radlast resultierenden Energie «entschärft» wird.

Aus diesen beiden Effekten resultieren ein geringerer Spitzendruck und damit eine geringere Tiefenwirkung der Verdichtung (Abb. 71). Weniger tief reichende Bodenverdichtungen regenerieren sich rascher, mit zunehmender Tiefe nimmt die Regenerationsfähigkeit der Böden ab.

Nebst den positiven Effekten einer Reisigmatte auf die Befahrung können unter Umständen auch nachteilige Wirkungen auftreten:

> Verzögerte Abtrocknung des Bodens

Eine Reisigmatte schützt den darunterliegenden Boden gegen das Abtrocknen, so dass auch noch einige Tage nach einem Niederschlag die Bodenfeuchte auf den Rückegassen höher ist als auf dem Boden ausserhalb der Gassen.

> Biomasse auf den Rückegassen

Dicke Reisigmatten führen zu viel Biomasse (Äste und Reisig) auf den Rückegassen, was die Tragfähigkeit für das Befahren stark vermindert. Solche Erfahrungen wurden insbesondere auf Windwurfflächen nach dem Orkan Lothar gemacht, wo zum selben Zeitpunkt sehr grosse Holzmenge anfielen und auf den Rückegassen dementsprechend mächtige Reisigmatten angelegt wurden. Zehn Jahre später, als der erste Eingriff zur Jungwaldpflege erfolgte, waren die Rückegassen aufgrund der grossen Menge verrotteten Astmaterials kaum mehr befahrbar.

> Rutschgefahr beim Fahren am Hang

Bei Rückegassen in steileren Hängen (40–50 % Hangneigung) kann nach Aussagen von Maschinenführern mit entsprechenden Erfahrungen der vom Vollernter angelegte Astteppich für den nachfolgenden Forwarder zu Problemen mit der Standsicherheit führen. Dies gilt insbesondere für Astteppiche mit einem hohen Anteil an Ästen aus Laubholz sowie feuchten Astteppichen. Eine vorteilhafte Lösung bietet hier die sogenannte Traktionshilfswinde, eine auf dem Forwarder aufgebaute und mit dem Fahrtrieb synchronisierte Seilwinde.

In diesem Zusammenhang ist auf die Problematik des Nährstoffentzuges, bedingt durch das Anlegen der Reisigmatten, hinzuweisen. Die Biomasse wird bei diesem Vorgehen zwar nicht aus dem Bestand entfernt aber örtlich angehäuft.

Das Prinzip «je dicker eine Reisigmatte, desto besser ihre Wirkung» gilt nach wie vor. Untersuchungen von Jacke et al. (2008b) für Reisigmatten aus Fichte/Tanne zeigen jedoch, dass die positive Wirkung mit der Reisigschichtdicke degressiv zunimmt. Umfangreiche Messungen auf einer Versuchsanlage mit vier unterschiedlichen Schichtdicken Fichtenreisig, drei verschiedenen Reifendimensionen, 5 Reifenfülldruckstufen und fünf verschiedenen Auflasten zeigten auf, dass die druckmindernde Wirkung ab einer Masse von rund 15 kg Reisig pro m² bei zunehmender Dicke der Reisigmatte nur noch wenig zunimmt. Eine Reisigmasse von 15 kg/m² entspricht rund 25 cm Reisighöhe locker gelagert. Da bei Durchforstungen eher selten genügend Reisig für eine Reisigmatte guter Qualität anfällt, sind die Ergebnisse von Jacke et al. (2008b) für die Praxis sehr interessant. «Überschüssiges» Reisig kann auf der Rückegasse an Stellen abgelegt werden, wo wegen Fehlens entsprechender Aushiebsbäume wenig oder kein Reisig anfällt. Damit kann ein möglichst grosser Teil der Rückegasse mit einer Reisigmatte versehen werden. Auch Reisigmatten mit einer Mächtigkeit von weniger als 25 cm haben bereits eine bodenschonende Wirkung, sowohl auf die Minderung der Druckspitzen, wie auch auf die schonende Übertragung der Traktionskräfte.

Interessante Forschungsergebnisse: Der grösste Teil der bodenschonenden Wirkung von Reisigmatten aus Fichte/Tanne wird bereits bei einer Schichtdicke von rund 25 cm erreicht

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen von Jacke et al. (2008b) sind auch in Bezug auf die vorangehend erwähnten nachteiligen Wirkungen von Reisigmatten interessant. Unter einer dünneren Reisigmatte trocknet der Boden nach einem Niederschlag schneller ab als unter einer dickeren und es liegt weniger Biomasse auf der Rückegasse. Damit werden die erwähnten nachteiligen Wirkungen gemindert.

6.4.4 Abbruch der Arbeiten

Das witterungsbedingte Abbrechen bzw. Einstellen der Holzerntearbeiten ist ein wichtiges Instrument des physikalischen Bodenschutzes. Hierfür sind Regeln für den Abbruch notwendig, die in Verträgen oder innerbetrieblichen Vereinbarungen niedergelegt werden sollten. Beispielsweise wurde der Abbruch der Arbeiten im Staatsbetrieb Sachsenforst in einer innerbetrieblichen Vereinbarung über Lohnarbeiten in der Holzernte so geregelt, dass der Maschinenführer selbst die Spurbildung zu überwachen, die Arbeiten sofort einzustellen und den weisungsbefugten Auftraggeber zu informieren hat, wenn das Fahrzeug auf mehr als einer Fahrzeuglänge über 15 cm einsinkt. Später wurde diese Tiefe aus praktischen Gründen abgeändert in «bis zur Felgenkante».

Solche Regeln sollten also eindeutig festlegen,

- > in welcher Situation der Abbruch erfolgt;
- > wer befugt ist, über den Abbruch zu entscheiden;
- > ob und wie ein Umsetzen auf Ausweichflächen vorzusehen ist;
- > und ob es ggfs. Entschädigungen gibt.

Es ist nicht einfach, diese Massnahme zu beschliessen und durchzusetzen. Direkte und indirekte Folgekosten in nicht zu vernachlässigender Höhe können mit ihr verbunden sein und zu Auseinandersetzungen mit dem Auftragnehmer und seinem Personal führen. Das Arbeitssystem droht still zu stehen. In der Folge sinkt die Auslastung und es gibt Verdienstaufschläge, wenn es keine Ausweichmöglichkeiten gibt. Auch im Fall der Ausweicarbeit fallen zusätzliche Kosten für das Umsetzen der Maschinen an, insbesondere, wenn selbiges nicht auf eigener Achse, sondern mittels eines Tiefladers erfolgt.

Folglich ist es wichtig, einen Arbeitsabbruch bereits durch entsprechende Planung und Organisation weitgehend zu vermeiden, so dass auf befahrungsempfindlichen Standorten insbesondere das Rücken nur bei passender Witterung ausgeführt wird. Ist der Abbruch gleichwohl nicht zu vermeiden, sollten bereits Ausweichflächen bzw. Ausweicarbeiten – im Falle von Eigenregie ggfs. auch ausserhalb der Holzernte – in ausreichendem Mass zur Verfügung stehen. Entscheidend hierfür ist die Qualität der Einsatzplanung und –organisation bzw. der Arbeitsvorbereitung. Man benötigt eine umfassende Übersicht über die anstehenden Holzschläge und eine Einteilung derselben nach Befahrungsempfindlichkeit der betroffenen Standorte und der Dringlichkeit ihrer Ausführung. Für die Disposition ist es ausserdem wichtig, dass die Schläge angezeichnet sind und Schätzungen des Sortimentsanfalls vorliegen. Bei kleinteiligen Bewirtschaftungsverhältnissen, wie in der Schweiz üblich, ist ausserdem die revierübergreifende, koordinierte Einsatzplanung eine wichtige Voraussetzung für einen ausreichenden Pool von Ausweichflächen und damit für eine erfolgreiche Regelung.

Das Unterbrechen der Arbeiten im Interesse der Bodenschonung hat beträchtliche organisatorische und finanzielle Aufwendungen zur Folge

Planerische und organisatorische Massnahmen können helfen, die finanziellen Folgen von Arbeitsunterbrüchen zu mildern

6.4.5 Abnahme der Arbeiten

Die Qualitätskontrolle bei der Holzernte umfasst in der Regel verschiedene Aspekte. Einer davon ist der Bodenschutz. Überprüft werden zum Beispiel Anforderungen bezüglich

- > der aufgearbeiteten Holzsortimente (v. a. Menge und Qualität),
- > des verbleibenden Bestandes (v. a. Rindenverletzungen, Schäden an der Verjüngung),
- > des Zustandes der Waldstrassen (v. a. Verunreinigungen, Beschädigungen) und
- > des Zustandes des Waldbodens (v. a. Fahrspuren).

Es bietet sich an, die Überprüfung der Aspekte des physikalischen Bodenschutzes in die gesamte Qualitätskontrolle zu integrieren. Sie erfolgt sowohl kontinuierlich, um steuernd in den Holzernteprozess eingreifen zu können, als auch nach Abschluss der Arbeiten, der eigentlichen Abnahme. Die Abnahme basiert letztlich auf einem Vergleich des Zustandes der Rückegasse vor und nach der Befahrung sowie auf dem Vergleich des Zustandes nach der Befahrung mit den vertraglichen oder betrieblichen Vereinbarungen. Es bietet sich an, die Zustandserfassung vor und nach der Massnahme im schriftlichen Arbeitsauftrag zu dokumentieren. Die Klassierung der Fahrspuren nach Spurtypen bietet hierzu ein wertvolles Hilfsmittel (Kap. 6.4.1). Dieser Vergleich der Zustände kann mehr oder weniger detailliert bzw. genau erfolgen, sollte aber von befugten Vertretern des Auftraggebers und des Auftragnehmers vor Beginn und nach Abschluss der Erntearbeiten gemeinsam durchgeführt und protokolliert werden.

Für die Beurteilung der Arbeitsqualität bezüglich Bodenschonung muss der Ausgangszustand der Rückegassen dokumentiert sein

6.5 Hoheitliche Lenkungsmassnahmen

In der Umweltpolitik werden verschiedene Instrumente eingesetzt, um die umweltökologischen Vorschriften besser durchsetzen zu können. Die wichtigsten dieser Instrumente sind staatliche Massnahmen, die sich an die Verursacher von Umweltbelastungen richten. Folgende Instrumente sind nach Bergen et al. (2013) von besonderer Bedeutung:

- > Auflagen: Dem Verursacher wird eine absolute Höchstgrenze seiner Belastungen vorgeschrieben.
- > Subventionen: Der Verursacher erhält für die von ihm vermiedene Belastung eine Zahlung.
- > Abgaben: Der Verursacher hat eine Zahlung für die von ihm verursachte Belastung zu leisten.
- > Zertifikate: Der Verursacher hat das Recht auf eine Belastung in einem bestimmten Ausmass, abhängig von der entsprechenden Menge von Erlaubnisscheinen (Zertifikaten).

Bergen et al. (2013) führen eine allgemeine Beurteilung dieser Instrumente durch, welche die Kriterien der ökologischen Effektivität, der ökonomischen Effizienz und der gesellschaftlichen Akzeptanz umfasst. Aus dieser Beurteilung resultiert, dass Zertifikate die besten Eigenschaften aufgrund ihrer ökologischen Effektivität und ökonomischen Effizienz zeigen. An zweiter Stelle kommen die Auflagen, an dritter Stelle die

Abgaben und zuletzt die Subventionen. Es stellt sich die Frage, welche Instrumente für den physikalischen Bodenschutz im Wald relevant und wichtig sind.

Zertifizierungen und Abgaben sind ungeeignet, da Rechte auf Bodenbelastungen für den Schutz den Bodens nicht sinnvoll sind. Subventionen sind möglich, wenn sie darin bestehen, dass besondere Leistungen für den Bodenschutz abgegolten werden. Dies können Entgelte für besondere Investitionen sein, beispielsweise für bodenschonende Zusatzausrüstungen von Forstmaschinen oder für besondere Massnahmen, wie das rein bodenschutzbedingte Rücken mit Seilkran.

Auch Auflagen für den physikalischen Bodenschutz können durch den kantonalen Forstdienst zusammen mit einer Bewilligung für den Holzschlag erteilt werden (Iten 2009). Dabei lassen sich die in Kapitel 6.2.5 erläuterten Qualitätsstandards in Form von Auflagen umsetzen. Bei Nichterfüllung der Auflagen sind Sanktionen erforderlich, die zum Beispiel in Form einer Geldbusse, als Schadenersatz (z. B. Bezahlung notwendiger Regenerationsmassnahmen), als Kündigung oder als Ausschluss von der zukünftigen Auftragsvergabe ausgesprochen werden können. Beispielsweise ist das Befahren des Waldbodens abseits der Rückegassen im Staatsbetrieb Sachsenforst gemäss einer innerbetrieblichen Vereinbarung nicht zulässig und bei Nichteinhaltung der Regel kann gemäss den Vertragsbedingungen über Lohnarbeiten in der Holzernte ein Abschlag bis 10 % des vereinbarten Rückegeldes erfolgen.

Voraussetzung, um die Vorgaben des Bodenschutzes mittels dieser Instrumente durchzusetzen, sind hoheitliche Kontrollen. Hierzu werden Kontrollverfahren benötigt. In diesen wird festgelegt, wer wie wo und wie häufig den Bodenzustand kontrolliert. Auch für die Kontrollverfahren bilden die Standards als Kriterien der Arbeitsqualität eine wesentliche Grundlage. Die Kontrollen können beispielsweise stichprobenartig durchgeführt werden, sich nur auf die empfindlichen Standorte beziehen oder an die Holzschläge mit Bodenschutzauflagen anknüpfen. Voraussetzung ist aber für alle Verfahren, dass der Bodenzustand vor und nach dem Eingriff objektiv erhoben wird.

Auflagen für den Bodenschutz können an die Holzschlagbewilligung gekoppelt sein

6.6

Kosten des physikalischen Bodenschutzes

Dem Nutzen des physikalischen Bodenschutzes für Waldwirtschaft und Gesellschaft – der langfristigen Erhaltung der Produktionsgrundlage Boden im Wald – stehen Kosten gegenüber. Die Kenntnis der Kosten ist eine wesentliche quantitative Grundlage für die betrieblichen Massnahmenentscheide. Für erste Analysen in der Schweiz wurden die möglichen kostenrelevanten Massnahmen identifiziert und in eine systematische Ordnung gebracht (Spjevak und Thees 2009a). Die Struktur der Massnahmen (Tab. 14) erleichtert es, den Ressourcenverbrauch zu schätzen. Im Vordergrund stehen die betrieblichen Massnahmen. Investive Massnahmen werden unterschieden von solchen, welche beim einzelnen Holzschlag anfallen. Grundlegende Massnahmen auf der Ebene des Betriebes sind die Weiterbildung sowie die Bodenzustandsermittlung und die Abnahme der Arbeiten nach Beendigung eines Holzschlages. Darüber hinaus werden hier alle anderen Massnahmen als optional angesehen; das heisst, sie sind im Einzelfall je nach standörtlichen und betrieblichen Verhältnissen zu wählen. Erste Modellkalkulationen der WSL ergaben für die oben aufgeführten grundlegenden Massnahmen minimale Kosten von rund 5 Fr./ha und Jahr bzw. 0,5 Fr. pro m³. Sie haben damit einen An-

teil von knapp 1 Prozent am mittleren Holzernteaufwand. Diese vergleichsweise geringen Grundkosten können bei schwierigen Verhältnissen und hohen Ansprüchen stark ansteigen.

Tab. 14 > Überblick über kostenrelevante Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz

Die minimalen Kosten ergeben sich aus den grundlegenden Massnahmen, welche in der Tabelle hervorgehoben sind.

	Zusätzliche Investitionen	Zusätzliche Massnahmen beim einzelnen Holzschlag verursachen	
		fixe Kosten	variable Kosten
Planung (Betrieb)	Weiterbildung Betriebsleiter	Festlegen von Ausweichflächen	
	Standortskartierung im Hinblick auf Befahrbarkeit	Umweltleistungsbewertung bezüglich Bodenschutz ¹	
	Markierung und Dokumentation der Feinerschliessung		
Steuerung und Durchführung (Betrieb)	Weiterbildung Maschinenführer	Beurteilung des Bodenzustandes → Entscheidung fahren / nicht fahren	Partieller Verzicht auf Befahrung → grössere Beiseilentfernungen beim Rücken
	Software zur Beurteilung der Befahrbarkeit und zur Bodenpfleglichkeit der Maschine ²	Unterbruch der Arbeiten und Umsetzen auf Ausweichflächen	Rücken mit reduzierter Last bzw. kleinerer Maschine
	Instrumente zur Messung der Bodenfeuchte	Regenerationsmassnahmen	Wechsel von boden- auf seilgestützte Erntesysteme
	Spezifische Maschinen-ausrüstungen: Reifen mit vergrösserter Nennbreite, Reifendruckregelanlage, Bogiebänder, Traktionshilfswinde	Abnahme der Arbeiten	
Überwachung (Kanton)		Kontrollen	

¹ Die Umweltleistungsbewertung ist ein freiwilliger Managementprozess, um die für den Forstbetrieb festgelegten Umweltkriterien zu überprüfen und kontinuierlich zu verbessern. Ein wichtiges Kriterium ist das Ausmass des Spurtyps 3 in Abhängigkeit der standörtlichen Verhältnisse.

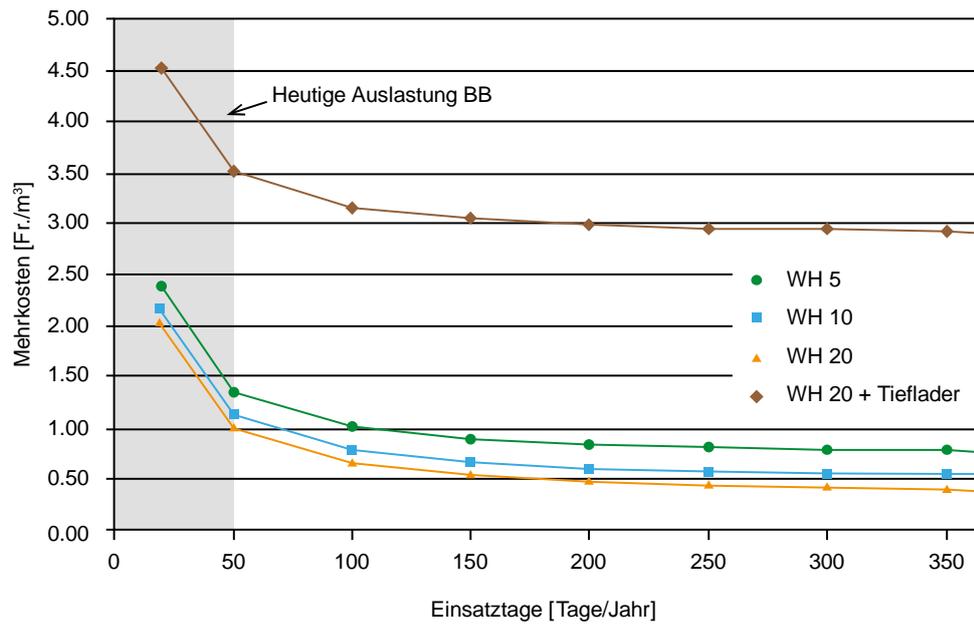
² Es gibt Prototypen für solche Software, wie z. B. PrAllCon und ProFor (Kap. 6.2.7).

Der Einsatz von Bogiebändern, die ursprünglich zur Verbesserung der Traktion entwickelt wurden, gewinnt im Zusammenhang mit dem Bodenschutz immer mehr an Bedeutung. So schreibt beispielsweise das Konzept zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Rückegassen für den Landesbetrieb ForstBW (ForstBW 2012) vor, dass 6/8-Rad-Rückemaschinen auf befahrungsempfindlichen Standorten grundsätzlich mit Bändern fahren. Eine Schätzung der Kosten ihres Einsatzes zeigt Abb. 72. Im Gegensatz zu den breiteren Reifen und zur Reifendruckregelanlage sind die Bogiebänder nicht permanent mit dem Fahrzeug gekoppelt. Ihre durchschnittliche Einsatzdauer ist sehr variabel und schwierig abzuschätzen, beträgt jedoch in der Schweiz gemäss Praxisangaben zurzeit bis zu rund 50 Tage im Jahr. Bezogen auf diese Auslastung betragen die Mehrkosten der Bänder 1,00–1,40 Fr./m³, je nachdem, wie häufig diese montiert und demontiert werden. Werden die Bänder alle 5 Tage montiert und demontiert, entstehen entsprechend höhere Kosten, als bei geringeren Wechselhäufigkeiten. Für den Fall, dass die Bänder nur alle 20 Tage montiert und demontiert werden, wurde zusätzlich berechnet, wie viel das Umsetzen auf einem Tieflader zusätzlich kostet, im Vergleich zum Umsetzen auf eigener Achse. Hierbei wurde angenommen,

dass der Forwarder innerhalb eines Montagezyklus mit den aufgezogenen Bändern nicht auf eigener Achse, sondern auf einem Tieflader umgesetzt wird.

Abb. 72 > Mehrkosten des mit Bogiebändern (BB) genutzten Holzes

WH: Wechselhäufigkeiten der Bänder von 1 Mal in 5, 10 bzw. 20 Tagen. Grau: Heutige durchschnittliche Einsatzdauer in der Schweiz.



7 > Heutige Situation und künftiger Handlungsbedarf

In den letzten zehn Jahren sind in der Schweiz grosse Anstrengungen unternommen worden, um alle Beteiligten an der Waldbewirtschaftung für die Problematik des Bodenschutzes bei der Holzernte zu sensibilisieren, nicht zuletzt als Folge der zunehmenden Mechanisierung in der Holzernte sowie den befahrungsbedingten Bodenbeeinträchtigungen bei der Ernte des vom Orkan Lothar Ende 1999 geworfenen Holzes. Zu gleicher Zeit trat auf gesetzgeberischer Ebene mit der revidierten Bodenschutzverordnung (VBBo 1998) ein Vollzugsinstrument in Kraft, das auch den physikalischen Bodenschutz umfasst. Mittels Aus- und Weiterbildungskursen, Merkblättern, Fachartikeln u. a. m. wurden den Akteuren der Waldbewirtschaftung (1) der Aufbau und die Funktionsweise der Böden, (2) die Grundlagen der Fahrspurtypisierung und (3) die technischen und organisatorischen Massnahmen zur Verbesserung des Bodenschutzes aufgezeigt. Einbezogen wurden alle Akteure – von den Auszubildenden über die Forstware und die Maschinenführer bis hin zu den Betriebsleitern, den Waldeigentümern und ihren Vertretern. Die praktische Umsetzung des Bodenschutzes ist in verschiedenen Kantonen bereits weit fortgeschritten.

Auf der Grundlage umfangreicher bodenphysikalischer und bodenbiologischer Untersuchungen wurde eine praxisgerechte Typisierung der Fahrspuren entsprechend ihrer ökologischen Auswirkungen entwickelt. Dabei konnte der Spurtyp 3 definiert werden, der eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit erwarten lässt und auf einen ökologischen Schaden im Boden hinweist. Der Spurtyp 3 konkretisiert den gesetzlich nicht tolerierbaren Zustand. Die Ergebnisse der Fahrspurerhebungen im Rahmen des dritten Landesforstinventars (Brändli 2010) zeigen für die gesamte befahrbare Waldfläche der Schweiz ein günstiges Bild, wenn auch vereinzelt schwere Bodenbeeinträchtigungen vorhanden sind.

Der Klimawandel kann künftig zu durchnässten und nur noch selten gefrierenden Böden in der Haupteinschlagperiode im Herbst und Winter führen. Dies erschwert oder verunmöglicht die Holzernte über längere Zeiträume. Hinzu kommt, dass Gesellschaft und Politik zunehmend sensibel auf Bodenschäden bei der Waldarbeit reagieren. Gleichzeitig wird eine steigende Nachfrage nach der erneuerbaren Ressource Holz erwartet. Hieraus ergeben sich erhöhte ökologische, ökonomische und politische Risiken, aber auch Chancen für die Waldbewirtschaftung. Ziel muss dabei der nachhaltige Schutz der Produktionsgrundlage Boden sein, ohne dabei die Waldnutzung aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen zu gefährden. Die Anforderungen, den Bodenschutz im Wald zu gewährleisten, werden steigen. Die Massnahmen zum Bodenschutz werden voraussichtlich in Zukunft schwieriger und teurer werden.

Der nachhaltige Schutz der Produktionsgrundlage Boden ist erkannt

Fahrspurtypen als Indikator für die Beeinträchtigung des Bodens

Der Klimawandel kann vermehrte Aufwendungen für den Bodenschutz zur Folge haben

Aus der aufgezeigten Situation und der langjährigen Bearbeitung des Projektes Physikalischer Bodenschutz im Wald sowie aus dem Austausch mit der Schweizer Forstpraxis kann folgender Handlungsbedarf abgeleitet werden:

(1) Fortsetzung der Aus- und Weiterbildung sowie der Kommunikation gegenüber der Öffentlichkeit, damit der heutige Zustand mindestens erhalten und nach Möglichkeit verbessert werden kann.

(2) Weiterentwicklung von Grundlagen und Instrumenten für die Planung und Steuerung:

In der Praxis besteht das Bedürfnis nach besseren Kartengrundlagen für die Planung von Bodenschutzmassnahmen. Dabei handelt es sich vor allem um Bodenkarten, Standortskarten und daraus abgeleitete Befahrungsempfindlichkeitskarten. Diese Grundlagen sind in den einzelnen Kantonen in unterschiedlichem Umfang, zum Teil sogar nur rudimentär vorhanden.

Es fehlen auch bodenphysikalische und bodenbiologische Erkenntnisse, zum Beispiel über die Folgen der erhöhten Befahrungsfrequenz von Rückegassen bei grösseren Rückegassenabständen und des Einsatzes verschiedener Arten von Bogiebändern.

Ausserdem sind Konzepte zu entwickeln, um mit den Folgen des Klimawandels für die bodenschonende Holzernte besser umgehen zu können, zum Beispiel um eine besonders flexible und grossräumige Einsatzplanung zu ermöglichen.

Besserer Planungsgrundlagen bedarf es unseres Erachtens auch, um die ökonomischen Konsequenzen von Bodenschutzmassnahmen abschätzen zu können. Dabei sollten nicht nur die Kosten, sondern auch der langfristige Nutzen ins Kalkül gezogen werden.

Nach wie vor besteht in der Praxis das Bedürfnis nach einem einfach zu handhabenden Instrument, um die Befahrbarkeit einer bestimmten Rückegasse vor dem täglichen Einsatz einer Forstmaschine zu beurteilen. Die im Rahmen des Projektes Physikalischer Bodenschutz im Wald aufgezeigten Ansätze liessen sich weiter entwickeln.

(3) Verbesserung der Rahmenbedingungen durch institutionelle und politische Massnahmen:

Grundsätzlich ist der Waldbesitz für den Bodenschutz verantwortlich. Die Beantwortung der Frage, wer die Kosten des Bodenschutzes trägt, wird heute in der Regel dem Markt überlassen. Man sollte aber zur Vermeidung und Korrektur unerwünschter Ergebnisse auch Arrangements institutioneller Art prüfen, wie die Förderung besonders bodenschonender Erntetechnik oder die Schaffung eines Ausgleichspools zur Finanzierung der entsprechenden Mehraufwände.

Forschungsbedarf besteht bezüglich einer Methode zur einfachen Bestimmung der aktuellen Befahrbarkeit

Die Schaffung eines Qualitätsstandards verspricht angesichts zunehmender Risiken und Ansprüche an den Bodenschutz Vorteile. Die Ausarbeitung eines Standards bezüglich der zu vermeidenden Schädigung könnte einen Konsens zwischen allen Beteiligten – Waldbesitz, Bevölkerung und Forstunternehmen – bewirken. Einen Konsens, welcher einen Anreiz zum Schutz des Bodens bildet, die Balance zwischen den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie, Soziales) nicht aus den Augen verliert und gleiche Wettbewerbsbedingungen für die forstlichen Dienstleister gewährleistet. Es ist nach Ansicht der Autoren nicht zielführend, detaillierte Grenzwerte wie maximale Radlasten oder fixe Rückegassenabstände vorzuschreiben. Mit Standards sollte definiert werden, wie der Bodenzustand nach der Befahrung sein sollte. Der Spurtyp 3 bildet hierfür eine zweckmässige Basis. Der Bewirtschafter kann dann selbst entscheiden, mit welchen Massnahmen das Ziel zu erreichen ist. Im Rahmen der Standardisierung ist gemeinsam mit allen Beteiligten aus Praxis und Wissenschaft das zulässige Ausmass des Spurtyps 3 zu klären, und ob dieses Ausmass standortsabhängig definiert sein soll. Schliesslich ist der Standard in die betrieblichen Prozesse von Steuerung und Kontrolle der Holzernte praxisgerecht einzubinden.

Das tolerierbare Ausmass des Spurtyps 3 ist noch zu diskutieren

In letzter Zeit ist im Zusammenhang mit der Vollbaumnutzung und der energetischen Nutzung von Ästen und Reisig die Frage des Nährstoffentzuges im Bestand vermehrt diskutiert und als Folge davon der Verbleib der Äste und des Reisigs am Standort der geernteten Bäume gefordert geworden. Durch pauschale Nutzungsverbote dieser Baumteile wird unter anderem das Anlegen von Reisigmatten auf der Rückegasse zum Schutz des Bodens beim Befahren in Frage gestellt. Hier lassen sich nach Ansicht der Autoren die Interessenkonflikte mit Hilfe modellbasierter Ansätze, welche das Risiko des Nährstoffentzuges und die Handlungsmöglichkeiten standortsspezifisch abschätzen, differenziert lösen und so die Nachteile pauschaler Verbote für die nachhaltige Waldbewirtschaftung vermeiden.

Die Lösungen zu den angesprochenen Problemkreisen sind mehrheitlich komplex und lassen sich nur in enger Zusammenarbeit aller Beteiligten ausarbeiten.

> Anhang

A1 Am Projekt Beteiligte

A1-1 Mitarbeitende im Projekt

WSL, Forschungsgruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz

Andreas Freuler
Beat Frey
Peter Lüscher
Christine Meyer
Stéphane Sciacca (bis 2009)
Stephan Zimmermann

WSL, Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme

Fritz Frutig
Sandra Thöny (Spjevak) (bis 2010)
Oliver Thees

Techn. Universität München
Lehrstuhl für forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik

Johann Kremer
Dietmar Matthies (bis 2011)

A1-2 Begleitgruppe zum Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald

Peter Ammann
Kanton Aargau, Abteilung Wald
Sektion Waldbewirtschaftung
Aarau
(2012 abgelöst durch Andreas Freuler)

Franz Borer
Kanton Solothurn, Amt für Umwelt
Fachstelle Bodenschutz
Solothurn
(2012 abgelöst durch Gaby von Rohr)

Joseph Brügger
Ingenieurbüro Philipona & Brügger (ab 2013 pbplan)
Plaffeien

Jean-Pierre Clément
Bundesamt für Umwelt BAFU
Sektion Boden
Bern
(2014 abgelöst durch Corsin Lang)

Andreas Freuler
Kanton Aargau, Abteilung Wald
Sektion Waldbewirtschaftung
Aarau
(ab 2012 für Peter Ammann)

Felix Lüscher
Oberallmeindkorporation Schwyz
Bereichsleiter Wald
Schwyz

Rolf Lüscher
KAWA Amt für Wald
Waldabteilung 5
Riggisberg

Hans Peter Schaffer
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Wald
Bern
(2013 abgelöst durch Silvio Schmid)

Bernard Schmidt
Bildungszentrum Wald
Lyss

Silvio Schmid
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Wald
Bern
(von 2012 bis 2015 für Hans Peter Schaffer)

Gaby von Rohr
Kanton Solothurn, Amt für Umwelt
Fachstelle Bodenschutz
Solothurn
(ab 2012 für Franz Borer)

Pius Wiss
Präsident ForstUnternehmer Schweiz
Dietwil

Martin Ziesak
Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL
Zollikofen
(ab 2012 als Vertreter HAFL)

Martin Zürrer
myx GmbH, Bodenbiologie und Umweltökologie
Uster

Auswärtige Reviewer

Heribert Jacke, Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie, Universität Göttingen, Deutschland

Siegmar Lelek, Forstlicher Maschinenbetrieb Schrofel, Baiersbronn, Deutschland

Joachim Schreiber, Geschäftsleitung Staatsforstbetrieb Sachsenforst, Königstein, Deutschland

A1-3 Ausbildungsgruppe zum Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald

Andreas Freuler
Kanton Aargau, Abteilung Wald
Sektion Waldbewirtschaftung
Aarau
(ab 2011 für Benjamin Suter)

Fritz Frutig
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Forstliche Produktionssysteme
Birmensdorf

Daniela Jost
Bundesamt für Umwelt BAFU
Sektion Grundlagen und Waldberufe
Bern

Peter Lüscher
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Forschungseinheit Waldböden und Biogeochemie
Birmensdorf

Rolf Lüscher
KAWA Amt für Wald
Waldabteilung 5
Riggisberg

Bernard Schmidt
Bildungszentrum Wald
Lyss

Benjamin Suter
Kanton Aargau, Abteilung Wald
Sektion Walderhaltung
Aarau
(bis 2011 Vertreter der kantonalen Ausbildungsverantwortlichen)

A2 Publikationen im Rahmen des Projektes Physikalischer Bodenschutz im Wald

2005

Lüscher P. 2005: Bodenverdichtung. In: Indermühle M., Raetz P., Volz R. 2005: LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramm 6. Umwelt-Materialien Nr. 184. BUWAL, Bern. 145 S.

Lüscher P. 2005: Regenerationsfähigkeit von Bodenschäden im Wald. In: Indermühle M., Raetz P., Volz R. 2005: LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramm 6. Umwelt-Materialien Nr. 184. BUWAL, Bern. 145 S.

Lüscher P., Thees O., Frutig F., Sciacca S. 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität. BGS Bull. 28: 11–14.

Lüscher P., Thees O., Frutig F. 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald ist kein Luxus. Zürcher Wald 6: 10–13.

2007

Kaufmann G., Lüscher P. 2007: Mechanische Belastung von Waldböden. Rückblick auf eine Tagung. Wald und Holz, 2: 32–33.

Lüscher P., Kaufmann G. 2007: Mechanische Belastung von Waldböden: Ursachen und Schadensminimierung. SZF, 158, 12: 444–445.

Sciacca S., Frey B., Kremer J., Lüscher P. 2007: Physikalischer Bodenschutz im Wald: Zwischen Beeinträchtigung und Schaden. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 110, 2: 711–712.

Neue Zürcher Zeitung, Nr. 83, 11.04.2007: Der Bodenschutz im Wald: Schadstoffanreicherung, Bodenversauerung und Bodenverdichtung als zentrale Gefährdungsfaktoren.

2008

Lüscher P., Kaufmann G. 2008: Mechanische Belastung von Waldböden: Ursachen und Schadensminimierung. *Wald und Holz* 1: 44–45.

Lüscher P., Kaufmann G. 2008: Waldböden reagieren hoch sensibel. *Land und Forst*, 20: 52.

Frey B., Lüscher P. 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. *LWF aktuell* 67: 5–7.

Lüscher P., Sciacca S., Halter M. 2008: Regeneration von Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung. *LWF aktuell* 67: 11–12.

Lüscher P., Sciacca S., Thees O. 2008: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. *LWF aktuell* 67: 19–21.

Lüscher P., Sciacca S., Frutig F. 2008: Bodenschutz-Ausbildung in der Schweiz. *LWF aktuell* 67: 33–34.

Jahresbericht WSL 2008: Mehr Bodenwissen für mehr Bodenschutz. S. 19.

2009

Frey B., Kremer J., Rüdts A., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2009: Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*. 45: 312–320.

Kremer J., Frey B., Lüscher P. 2009: Bodenstrukturveränderung oder Bodenschaden – wo liegt die Grenze? *Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 79: 39–45.

Lüscher P., Sciacca S. 2009: Bodenbeeinträchtigung im Wald: Probleme und Lösungsansätze in der Schweiz. *Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 79: 11–18.

Lüscher P., Borer F., Blaser P. 2009: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009: Physikalischer Bodenschutz im Wald. *Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen*. *Merkbl. Prax.* 45. 12 S.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009: Protection physique des sols en forêt. *Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers*. *Not. prat.* 45. 12 S.

Lüscher P., Frey B., Sciacca S., Frutig F. 2009: Physikalischer Bodenschutz im Wald – Datengrundlagen und Umsetzungsstrategie. In: Böden – eine endliche Ressource. Jahrestagung der DBG, Bonn, September 2009.

Nötzli K., Frutig F., Lüscher P. 2009: Feinerschliessung – der Schlüssel zur bodenschonenden Holzernte. Zürcher Wald 1: 22–25.

Spjevak S., Thees O., Lüscher P. 2009: Modellgestützte Bestimmung des Nutzens von Forstmaschinenausrüstungen für den physikalischen Bodenschutz. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.

2010

Frey B. 2010: Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 498–503.

Frey B., Kremer J., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2010: Soil bacterial community structure reacts to compaction of soils with heavy logging machinery. Bulletin BGS 30: 109–112.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Protezione del suolo durante le utilizzazioni forestali. Prima parte: suoli, danni e indicatori. Sherwood 16, 1: 35–40.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Protezione del suolo durante le utilizzazioni forestali. Seconda parte: responsabilità e misure. Sherwood 16, 2: 21–27.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. 2. Aufl. Merkbl. Prax. 45. 12 S.

Lüscher P. 2010: Bodenschutz im Wald: Die Beeinträchtigung des Waldbodens beim Einsatz von Forstmaschinen aus ökologischer Sicht. In Mosimann T., Kuhnt G. (Hrsg.): Waldböden und Kulturlandschaft im Baselbieter Jura. Exkursionsführer zur Jahresexkursion der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz am 27. und 28. Aug. 2010. Geosynthesis, Sonderband 7; Hannover, Inst. für Physische Geographie und Landschaftsökologie.

Lüscher P. 2010: Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach physikalischer Belastung. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 504–509.

Sciacca S., Halter M., Frey B., Brunner I., Lüscher P. 2010: Regeneration von Fahrspuren nach mechanischer Belastung. Bulletin BGS 30: 37–38.

von Wilpert K., Schäffer J., Schack-Kirchner H., Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2010: Regeneration von Befahrungsschäden, biologische Sanierung von Rückegassen. *AFZ-Der Wald*, 18: 42–43.

2011

Freuler A., Lüscher P., Ammann P. 2011: Verwendung von Bodenkarten 1:25 000 beim Vollzug des physikalischen Bodenschutzes im Wald im Kanton Aargau. *Bulletin BGS*, 31: 22–24.

Frey B., Niklaus P.A., Kremer J., Lüscher P., Zimmermann S. 2011: Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. *Applied and Environmental Microbiology* 77: 6060–6068.

Lüscher P., Freuler A. 2011: Waldboden unter Druck. *Kommunalmagazin* 1: 28–30.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Regeneration von mechanisch verdichtetem Boden unter Fahrspuren durch Sanierungsmassnahmen. *Bulletin BGS* 31: 12–16.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Bodenverdichtung unter Fahrspuren – Strukturregeneration durch Bepflanzung mit *Alnus glutinosa*. In: *Böden verstehen, Böden nutzen, Böden fit machen*. Jahrestagung der DBG, Berlin, September 2011.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Verdichteten Boden mit Schwarzerlen regenerieren? *Wald und Holz* 10: 40–43.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Bodenverdichtung unter Fahrspuren – Strukturregeneration durch Bepflanzung mit *Alnus glutinosa*. *Bulletin BGS* 32: 15–19.

Ofner M., Meyer C., Krebs R., Lüscher P. 2011: Die physiologische Aktivität von *Alnus glutinosa* auf verdichteten Waldböden. *Bulletin BGS* 32: 13–14.

2012

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2012: Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden. *Hochschule Osnabrück, Heft 2012*: 27–38.

2013

Augustin S., Schmid S. 2013: Bodenschutz im Wald – Beitrag der Waldpolitik 2020 des Bundes. In: *Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung*. WSL Ber. 6. 116 S.

Blum W.E.H. 2013: Bodenschutz in Europa. In: *Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung*. WSL Ber. 6. 116 S.

Clément J.-P. 2013: Protection du sol dans les forêts suisses. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Freuler A. 2013: Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Frey B., Hartmann M. 2013: Biodiversität von Waldböden – Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Lüscher P. 2013: Nur wer den Boden kennt, kann ihn schützen und nachhaltig nutzen. Gedanken zur «Mechanischen Belastung von Waldböden». In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Morier A. 2013: Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Schulin R., Meyer C., Lüscher P. 2013: Bodenverdichtung und Bodenstruktur. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

Thees O., Olschewski R. 2013: Ökonomische Überlegungen zum physikalischen Bodenschutz im Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

von Rohr G., Margreth S., Hauert C. 2013: Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.

2014

Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. 2014: Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The ISME Journal* 8: 226–244.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2014: Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. *European Journal of forest research*, 133: 453–465.

A3 Schlüssel zur Bestimmung der Humusformen

Tab. 15 > Bestimmung der terrestrischen Humusformen nach Arbeitskreis Standortkartierung (1996) und Frehner et al. (2005)

Humusform	Typischer Mull (L-Mull)	Moderartiger Mull (F-Mull)	Mullartiger Moder	Typischer Moder	Rohhumus-artiger Moder	Rohhumus
Code	1	2	3	4	5	6
Horizonte	L-Ah-	L-F-Ah-	L-F-(H)-Ah-	L-F-H-Ah-	L-F-H-Ah-	L-F-H-Ah-
Mächtigkeit des Ah	>8 cm, häufig 10–15 cm	<10 cm, häufig 5–7 cm	2–8 cm, häufig 3–4 cm	meist <5 cm	meist <3 cm	meist <3 cm
Horizontgrenze des Ah (nach unten)	undeutlich bis fließend	deutlich bis sehr deutlich	sehr deutlich bis scharf			
Mächtigkeit des F		bis 1 cm	bis 3 cm, häufig 1–2 cm	bis 5 cm, häufig 1–3 cm	bis 6 cm, häufig 2–4 cm	bis 8 cm, häufig 2–4 cm
Mächtigkeit des H			0,2–0,5 cm	0,5–3 cm	2–4 cm	>4 cm, häufig 5–8 cm
Trennbarkeit L/F/H vom Ah				schecht trennbar	gut trennbar	sehr gut trennbar, z. T. schollig ablösend

A4 **Verwendete Bezeichnungen für Bodenhorizonte**

Tab. 16 > Verwendete Bezeichnungen für Bodenhorizonte

L	Streuhorizont	weitgehend unzersetzte Vegetationsrückstände mit weniger als 10 % organischer Feinsubstanz
F	Fermentationshorizont	teilweise zersetzte Vegetationsrückstände, Gewebestrukturen erkennbar, daneben tritt organische Feinsubstanz deutlich hervor (10–70 %v)
H	Humusstoffhorizont	weitgehend zersetzte Vegetationsrückstände, Gewebestrukturen kaum erkennbar, organische Feinsubstanz überwiegt (>70 %v)
A	Oberbodenhorizont, humushaltig	humushaltiger Oberbodenhorizont, durch organisches Material dunkel gefärbte mineralische Feinerde
Ai	A-Horizont	mit nur geringer Akkumulation von organischem Material, bei initialer Bodenbildung und erst lückiger Entwicklung
Ah	A-Horizont	stark humushaltig, häufig mit ausgeprägter Krümelstruktur, bei gehemmter Umsetzung starke Humusanreicherung nahe der Bodenoberfläche
Aa	A-Horizont	vernässt, unter Wassereinfluss an der Oberfläche entstanden, meist ohne erkennbares Gefüge, zum Teil mit Vernässungsmerkmalen
B	Mineralerdeverwitterungshorizont	Veränderung der Farbe und des Stoffgehaltes im Vergleich zum Ausgangsgestein durch Verwitterung und/oder Tonneubildung
Bv	Verwitterungshorizont	Horizont mit deutlicher Braunfärbung
Bt	Einwaschungshorizont	Tonanreicherungshorizont durch Lessivierung, deutliche Tonanreicherung nach Verlagerung (Tonhäute erkennbar)
Bh	Einwaschungshorizont	Horizont durch Einwaschung mit Humusstoffen angereichert (Podsolierung), gekennzeichnet durch deutlich dunklere Farbe
Bs	Einwaschungshorizont	Horizont durch Einwaschung mit Sequioxiden angereichert (Podsolierung), gekennzeichnet durch rötlichen Farbton.
C	Ausgangsgestein	Ausgangsgestein, aus dem der Boden entstanden ist, Untergrund von der Bodenbildung kaum beeinflusst
Cv	Ausgangsgestein	Horizont mit beginnender Verwitterung (meist schwache Braunfärbung)
R	Ausgangsgestein	Ausgangsgestein (Festgestein, Fels) aus dem der Boden entstanden ist
E	Auswaschungshorizont	Horizont durch Verlagerung von Eisen und organischer Substanz (Podsolierung) gebleicht
El	Tonauswaschungshorizont	Horizont durch Tonverlagerung (Lessivierung) entstanden, tonverarmt
ES	Auswaschungshorizont	Horizont durch Nassbleichung entstanden, verarmt an Sequioxiden
S	Stauwasserhorizont	Horizont durch Stauwasser geprägt, mit Fahl-Rotfärbungen, Rostflecken und Mangankonkretionen
Sw	leitender Horizont	zeitweise Stauwasser führend, marmoriert, wechselfeucht (zeitweise anaerob), grössere Wasserdurchlässigkeit als der darunterliegende Sd-Horizont
Sd	stauender Horizont	marmoriert, grössere Dichte und kleinere Wasserdurchlässigkeit als der darüberliegende Sw-Horizont, daher häufiger anaerob als der Sw-Horizont
G	Gleyhorizont	Horizont durch Grundwasser geprägt
Go	Oxidationshorizont	Horizont mit Merkmalen entstanden unter oxidierenden Verhältnissen. Rostflecken, im Schwankungsbereich eines Grund- oder Hangwasserspiegels, wechselfeucht
Gr	Reduktionshorizont	Horizont mit Merkmalen entstanden unter reduzierenden Verhältnissen, Reduktionsfarben, nahezu ständig mit Wasser gesättigt
AB	Übergangshorizont	Horizont mit Merkmalen von zwei Horizonten
A-B-C		Darstellung der Horizontfolge in einem Profil
II	Schichtwechsel	Zusatzzeichen bei geologisch bedingtem Schichtwechsel
(..)	schwache Ausprägung	Horizonte mit nur undeutlich ausgeprägten Horizontmerkmalen in Klammern gesetzt

Grundlage: Walther et al. 2004 und Frehner et al. 2005

A5 Schlüssel zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (Feldansprache)

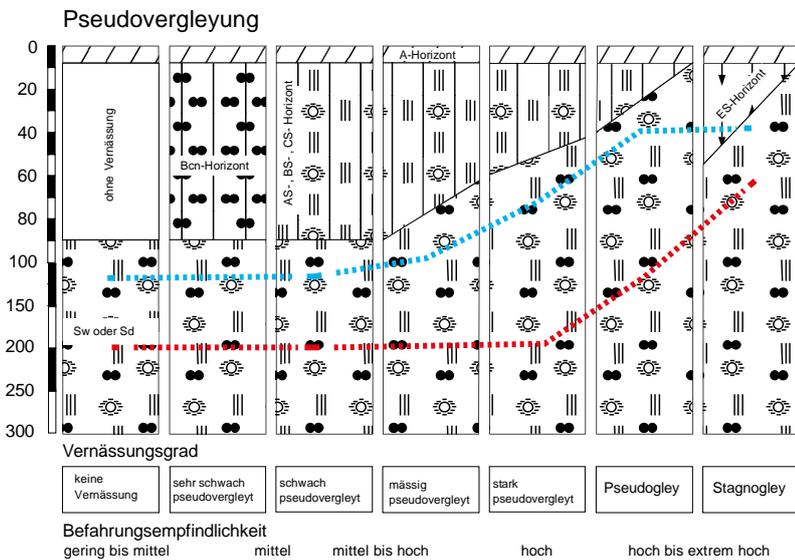
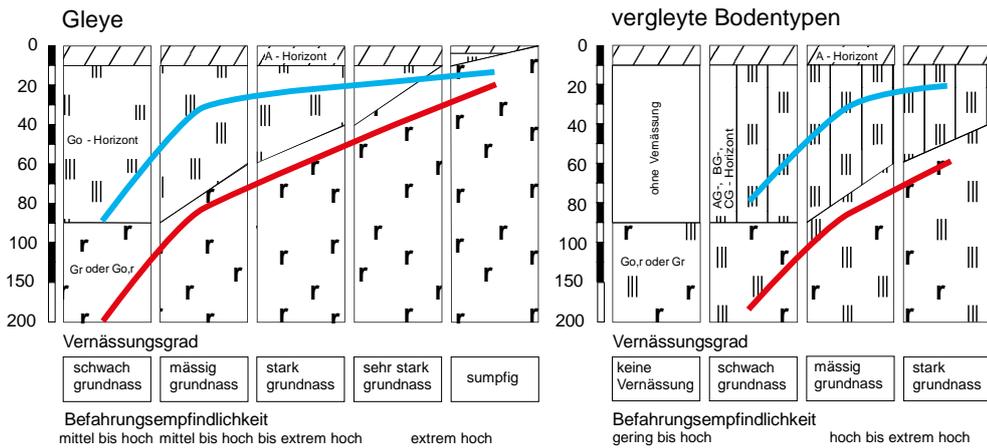
Tab. 17 > Schlüssel zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (Feldansprache)

Nr.	Abkürzung	Bodenart	Anteil der Fraktionen [%]		Kömigkeit (Feinsubstanz)	Bindigkeit	Formbarkeit (Reibflächen)
			TON	SCHLUFF			
1	S	SAND	<5	<50	Einzelkörner gut sicht- und fühlbar; rauh (je feiner desto geringer)	nicht bindig; haftet nicht am Finger	nicht formbar
2	IS	lehmiger SAND	5–10	<50	Einzelkörner gut sicht- und fühlbar; daneben etwas Feinsubstanz	nicht bindig; mehlig-stumpf; etwas Feinsubstanz in Fingerrillen	nicht formbar
3	sL	sandiger LEHM	10–20	<50	Einzelkörner gut sicht- und fühlbar; Feinsubstanz deutlich	etwas bindig; schwach schmierig; Feinsubstanz haftet am Finger	schlecht formbar; reisst und bricht bei Verformung
4	L	LEHM	20–30	<50	Sandkörner gut sicht- und fühlbar; viel Feinsubstanz	schwach bis mittelbindig; klebrig	formbar; etwa bleistift dick ausrollbar, wird dann rissig
5	U	SCHLUFF	<10	>50	samtartig-mehlig; Einzelkörner der Sandfraktion sicht- und fühlbar	nicht bindig; haftet deutlich in Fingerrillen	nicht oder schlecht formbar
6	IU	SCHLUFF-LEHM	10–30	>50	Einzelkörner der Sandfraktion nicht od. nur schwach sicht- und fühlbar; viel Feinsubstanz	schwach bis mittelbindig; + stumpfe Gleitflächen; schwach klebrig; haftet deutlich in Fingerrillen	schlecht bis mittel formbar
7	tU	toniger SCHLUFF-LEHM	>30	>50	meist nur wenige oder keine Sandkörner sicht- und fühlbar; sehr viel Feinsubstanz	bindig; zähplastisch; klebrig	gut formbar u. ausrollbar; schwach glänzende Reibflächen
8	tL	toniger LEHM	30–40	<50	wenige Sandkörner sicht- und fühlbar; sehr viel Feinsubstanz	bindig; zähplastisch; klebrig	gut formbar u. ausrollbar; schwach glänzende Reibflächen
9	IT	lehmiger TON	40–50	<50	Sandkörner nicht oder kaum sicht- und fühlbar; sehr viel Feinsubstanz	wie 7, aber etwas stumpfer (mehr schmierig-mehlig)	wie 7
10	T	TON	>50	<50	keine Sandkörner fühlbar	bindig; stark plastisch; klebrig	gut form- u. ausrollbar; glänzende Reibflächen

A6 Schlüssel zur Bestimmung des Vernässungsgrades

Abb. 73 > Schlüssel zur Bestimmung des Vernässungsgrades

Den unterschiedlichen Vernässungsgraden in grund- und stauwasserbeeinflussten Böden wurden entsprechende Befahrungsempfindlichkeiten zugeordnet.



- Mittlere Tiefe der wassergesättigten Zone im Winter
- Mittlere Tiefe der wassergesättigten Zone im Sommer
- - - Mittlere Tiefe der wechselfeuchten Zone im Winter mit wassergesättigten Phasen
- - - Mittlere Tiefe der wechselfeuchten Zone im Sommer mit wassergesättigten Phasen

Legende: Signaturen

- Mangankonkretionen
- ☉ Fahl-Rot-Färbung
- ||| Rostflecken
- ┆ Reduktionsfarben

Horizontbezeichnungen

- S Stauwasserhorizont
- Sw Stauwasserleitender Horizont
- Sd Wasser stauender Horizont
- SE Auswaschungshorizont (Nassbleichung)
- G Grundwasserhorizont
- Go Oxidationshorizont
- Gr Reduktionshorizont

A7 Schätzung des Humusgehaltes im Mineralboden nach Bodenfarbe und Textur

Tab. 18 > Value nach Munsell-Farbtafel (Standard Soil Color Charts 1994) für feuchte Bodenproben

Farbe	Value	Humusgehalt in Masse-%	
		Sande	Lehme
hellgrau	>6,5	<1	<1
grau	5-6	<1	1-2
dunkelgrau	4-4,5	1-2	2-4
schwarzgrau	3-3,5	2-4	4-8
schwarz	2-2,5	4-8	8-15

A8 Versuchs- und Ausbildungsflächen im Projekt Physikalischer Bodenschutz im Wald

Tab. 19 > Versuchsflächen

		Vorhandene Grundlagen
Mittelland		
Messen SO	Forstkreis Bucheggberg/Lebern	Bodenkarte 1:5000
Ermatingen TG	Forstbetrieb Gemeinde Ermatingen	Bodenübersichtskarte 1:50 000 Waldstandortskarte 1:5000
Heiteren BE	Burgergemeinde Bern	(alte) pflanzensoziologische Karte 1:5000
Voralpen		
Unteriberg SZ	Oberallmeindkorporation Schwyz	

Tab. 20 > Ausbildungsflächen

Ort	Kanton	Waldeigentümer/Forstdienst
Heiteren	BE	Burgergemeinde Bern
Gantrisch	BE	Waldabteilung 5
Tavannes	BE	Waldabteilung 8
Habsburg	AG	Forstbetrieb Birretholz
Uitikon	ZH	Grün Stadt Zürich
Birmensdorf/WSL	ZH	Holzcorporation Birmensdorf
Ermatingen	TG	Gemeinde Ermatingen
Oberriet	SG	Gemeinde Oberriet
Jona	SG	Waldregion 4
Beringen	SH	Gemeinde Hallau, Stadt Schaffhausen
Cheseaux-Noréaz	VD	Arrondissement 8
Le Mont-sur-Lausanne	VD	CFPF Le Mont-sur-Lausanne, Staatswald in Froideville VD

Tab. 21 > Befahrungsversuche

Ort	Kanton	Waldeigentümer/Forstdienst
Ermatingen	TG	Gemeinde Ermatingen
Heiteren	BE	Burgergemeinde Bern
Bremgarten	AG	Forstbetrieb Wagenrain

Tab. 22 > Lothar-Reservatsflächen (Regenerationsprojekt)

Ort	Kanton	Waldeigentümer/Forstdienst
Habsburg	AG	Forstbetrieb Birretholz
Messen*	SO	Forstkreis Bucheggberg/Lebern
Brüttelen	BE	Waldabteilung 7

* Messen-Brunnenthal, die Fläche ist nicht identisch mit der Versuchsfläche Messen-Junkholz

A9 Durchgeführte Aus- und Weiterbildungskurse zum Physikalischen Bodenschutz

Hinweis:

Die Bezeichnungen «Forstdienst», «Waldabteilung» etc. umfassen alle Akteure der Waldbewirtschaftung wie Forstingenieure, Revierförster, Forstwarte/Maschinenführer, Forstunternehmer sowie fallweise auch Waldeigentümer, Vertreter von Umweltorganisationen, Bodenschutzfachstellen, Zertifizierungsauditoren u. a. m.

Die Angabe «Forstdienst» hinter dem Kanton bedeutet, dass die Teilnehmer aus dem ganzen Kantonsgebiet stammten.

Tab. 23 > Durchgeführte Aus- und Weiterbildungskurse zum Physikalischen Bodenschutz

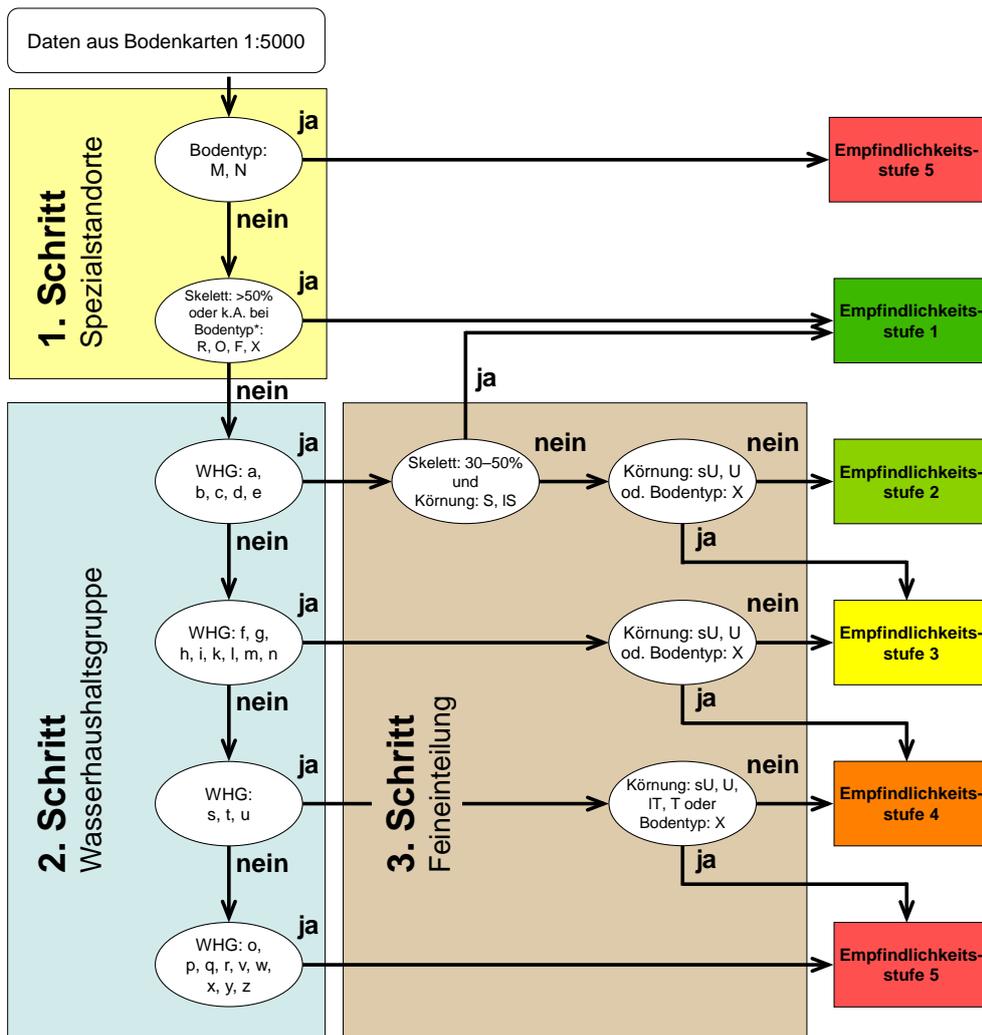
Jahr	Teilnehmer	Kursort	Anzahl
2001	Burgergemeinden Bern, Biel und Burgdorf	Heiteren	16
2002	Kanton BE, Waldabteilung 5	Gantrisch	21
	Kanton BE, Waldabteilung 5	Heiteren	17
2003	Kanton SG, Kreisforstamt IV	Jona	24
	Kanton ZH, Forstdienst	Uitikon/Lehrwald ETH	20
2004	Kanton ZH, Forstdienst	Uitikon/Lehrwald ETH	12
	SFV, AG Vegetation & Boden	Uitikon/Lehrwald ETH	20
	Kanton FR, Forstdienst	Heiteren	27
	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Heiteren	27
	SHL Zollikofen, Forststudenten	Heiteren	10
2005	Kanton FR, Revierförster	Heiteren	18
	Forstunternehmung Wiss Dietwil AG	Uitikon/Lehrwald ETH	10
	Kanton SG, Forstdienst	Oberriet	22
2006	SHL Zollikofen, Forststudenten	Heiteren	15
	Kanton SG, Kreisforstamt V	Oberriet	18
	SFV, AG Vegetation & Boden	Uitikon/Lehrwald ETH	22
2007	Kanton VD, Forstdienst	Cheseaux-Noréaz	32
	Gebirgswaldpflegegruppe GWG	Plaffeien/Plasselb FR	41
	SFV, AG Vegetation & Boden und Ausbildungsverantw. der Kantone	Birmensdorf/WSL	22
	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Heiteren	24
2008	Kanton TG, Forstdienst (3 x 0,5 Tage)	Ermatingen	63
	Kanton VD, Forstmaschinenführer (2 x 1 Tag)	Le Mont-sur-Lausanne	36
	SFV, AG Vegetation & Boden und kantonale Berufsschullehrer	Birmensdorf/WSL	20
	Kanton FR, Forstdienst	Le Mont-sur-Lausanne	19
2009	WVS, Lehrgang Forstmaschinenführer	Birmensdorf/WSL	8
	Kanton ZH, Forstkreis 7	Birmensdorf/WSL	21
	Kanton ZH, Forstkreis 6	Opfikon/Bassersdorf	20
2010	Kanton ZG, Forstdienst (3 x 1 Tag)	Birmensdorf/WSL	70
	Kanton SH, Forstdienst	Beringen SH	15
	Kanton AG, Forstdienst (3 x 1 Tag)	Habsburg	200

Jahr	Teilnehmer	Kursort	Anzahl
	Kanton NE, Revierförster (2 x 1 Tag)	Le Mont-sur-Lausanne	35
	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Heiteren	28
	BZW Lyss, Försterstudenten	Heiteren	17
	AfW Arbeitsgemeinschaft für den Wald	Birmensdorf/WSL	20
	Entreprise forestière Daniel Ruch Corcelles-le-Jorat, Maschinenführer	Le Mont-sur-Lausanne	15
2011	WVS, Lehrgang Forstmaschinenführer	Birmensdorf/WSL	14
	BZW Maienfeld, Försterstudenten	Bettwil AG	27
	Kanton BE, Waldabteilung 8 (2 x 1 Tag)	Tavannes	37
	Kantone GE/VD, Forstdienst	Le Mont-sur-Lausanne	20
	Kanton AG, Forstdienst (3 x 1 Tag)	Habsburg	200
	Kanton SH, Forstdienst	Beringen SH	40
	Kanton LU, Forstdienst	Neudorf LU	65
	SFB Staatsforstbetrieb Bern	Heiteren	22
	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Heiteren	29
	Kanton BE, Waldabt. 3, Försterrapport	Allmendingen b. Thun	15
2012	WVS, Lehrgang Forstmaschinenführer	Birmensdorf/WSL	13
	BZW Lyss, Försterstudenten (d)	Heiteren	20
	BZW Lyss, Försterstudenten (f)	Tavannes	18
	Kanton JU, Forstdienst (2 x 1 Tag)	Tavannes	48
	Kanton ZH, Forstkreise 2&3	Birmensdorf/WSL	32
	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Heiteren	34
2013	WVS, Lehrgang Forstmaschinenführer	Birmensdorf/WSL	12
	BZW Maienfeld, Försterstudenten	Bettwil AG	27
	Kanton ZH, Forstkreis 1	Birmensdorf/WSL	30
	Kanton BE, Forstdienst	Heiteren	20
	Kanton SO, Forstdienst (2 x 1 Tag)	Messen	45
	ETH Zürich, DUWIS	Birmensdorf/WSL	25
2014	SANU Biel, Bodenkundliche Baubegleiter	Muttenz	35
	BZW Lyss, Försterstudenten (d)	Heiteren	21
	BZW Lyss, Försterstudenten (f)	Heiteren	18
	BZW Maienfeld, Försterstudenten	Bettwil AG	28
Totale Anzahl Teilnehmer			1900

A10 Entscheidungsbaum Bodenempfindlichkeit Kanton Solothurn

Abb. 74 > Entscheidungsbaum zur Beurteilung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit der Böden im Kanton Solothurn

Wichtig: Die Beurteilung gilt nur für abgetrocknete Böden, welche mindestens Feldkapazität aufweisen (Saugspannung ≥ 8 cbar).



*Annahme: Direkt unter dem A-Horizont liegt Fels oder Kies

Quelle: Amt für Umwelt, Kanton Solothurn

> Literatur

- Arbeitskreis Standortkartierung 1996: Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 5. Auflage, IHW-Verlag, München. 352 S.
- BayBodSchG 1999: Bayerisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 23. Febr. 1999.
- BayWaldG 2005: Waldgesetz für Bayern (BayWaldG) vom 22. Juli 2005.
- BaySF 2010: Bodenschutz bei den Bayerischen Staatsforsten. 9 S.
- BBodSchG 1998: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). 13 S.
- Bergen V., Löwenstein W., Olschewski R. 2013: Forstökonomie. Volkswirtschaftliche Ansätze für eine vernünftige Umwelt- und Landnutzung. Verlag Franz Vahlen München. 2. Auflage. 477 S.
- BNatSchG 2002: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG). 38 S.
- Botschaft des Bundesrates vom 7. Juni 1993 zu einer Änderung des USG, Bundesblatt 1993, Band II: 1445 ff.
- Brändli U.-B. (Red.) 2010: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU. 312 S.
- Buchter B., Häusler S., Schulin R., Weisskopf P., Tobias S. 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen: Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz. BGS Dokument 13. 56 S.
- Buchter B., Häusler S. 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtensteins. 12 S.
- Bundesamt für Umwelt BAFU 2008: Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadeneignissen von nationaler Bedeutung im Wald. Umwelt-Vollzug Nr. 0801. Bundesamt für Umwelt, Bern. 3. überarbeitete Auflage. 241 S.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2013: Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern. 66 S.
- BUWAL 2001: Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo). Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL. 44 S.
- BWaldG 1975: Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 2. Mai 1975. 13 S.
- Choudhury K., Kraemer R.A., Hollerbuhl S., Nickel D. 2001: Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Anforderungen an den nachhaltigen Bodenschutz: Kriterienentwicklung zur Leistungsfähigkeit von Bodenfunktionen. Ecologic, Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik, Berlin. 153 S.
- ForstBW 2003: Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschliessung von Waldbeständen. 27 S.
- ForstBW 2012: Konzept zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Rückegassen für den Landesbetrieb ForstBW. 69 S.
- ForstBW 2013: Merkblatt für den Einsatz von Bogie-Bändern. 11 S.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R. 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 564 S.
- Frey B., Lüscher P. 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. LWF aktuell 67: 5–7.
- Frey B., Kremer J., Rüdert A., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2009: Compaction of forest soil with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. Eur. J. Soil Biol. 45: 312–320.
- Frey B. 2010: Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 498–503.
- Frey B., Niklaus P.A., Kremer J., Lüscher P., Zimmermann S. 2011: Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. Applied and Environmental Microbiology 77: 6060–6068.
- FSC (Hrsg.) 2009: Nationaler FSC-Standard für die Schweiz. Finale Version zur Genehmigung durch die Policy & Standards Unit des FSC International Center. Verabschiedet durch die Mitglieder der FSC Arbeitsgruppe Schweiz am 13. März 2009. 44 S.
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F.X., Sticher H. 1997: Bodenökologie. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart. 350 S.
- Hartlieb B., Kiehl P., Müller N. 2009: Normung und Standardisierung: Grundlagen. Beuth, Berlin. 146 S.
- Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. 2014: Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. The ISME Journal 8: 226–244.

- Huber T., Egner J.-P., Zormaier F. 2010: Interforst 2010. LWFaktuell 78: 50–53.
- Iten B. 2009: Gesetzliche Grundlagen für den Bodenschutz bei der Holzernte. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.
- Jacke H., Ebel A. 2006: PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Teile 1–6. Forst & Technik 1, 2, 3, 4, 5, 6.
- Jacke H., Sengpiel A., Brokmeier A. 2008a: PrAllCon-Track: Zur Wirkung von Bogiebändern auf den Kontaktflächendruck. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 6.
- Jacke H., Brokmeier H., Sengpiel A. 2008b: PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisingarmierung. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 5.
- Jacke H., Hittenbeck J., Stiehm C. 2011: Spuren im Wald – Befahrbarkeitsprognosen für Waldböden. Forst&Technik 8: 20–24.
- Jacke H. 2012: PrAllCon-Kalkulator. Excel-basiertes Tool zur Berechnung des Spitzendruckes unter Forstreifen. Universität Göttingen, Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie. www.uni-forst.gwdg.de/forst/iwf/prallcon.html
- Jacke H., Hittenbeck J. 2013: Ein Prüfstand für Kontaktflächendrucke unter Bändern und Gliederketten. Forsttechnische Informationen FTI, 1+2.
- KA5 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. AG Boden der staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 5. Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 438 S.
- Kommission der europäischen Gemeinschaften 2006: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG. 32 S.
- Kozłowski T.T. 1999: Soil compaction and growth of woody plants. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 596–619.
- Kremer J., Frey B., Lüscher P. 2009: Bodenstrukturveränderungen oder Bodenschaden – Wo liegt die Grenze? In: Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Walderschliessung und Bodenschutz: Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 79: 39–45.
- Li Q., Allen H.L., Wollum A.G. 2004: Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction and vegetation control, Soil Biol. Biochem. 36: 571–579.
- Lüscher P., Sciacca S., Frutig F. 2008: Bodenschutz-Ausbildung in der Schweiz. LWF aktuell 67: 33 ff.
- Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009a: Physikalischer Bodenschutz im Wald: Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Merkblatt für die Praxis 45. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf. 12 S.
- Lüscher P., Borer F., Blaser P. 2009b: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.
- Lüscher P. 2013: Nur wer den Boden kennt, kann ihn schützen und nachhaltig nutzen. Gedanken zur «Mechanischen Belastung von Waldböden». In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.
- LWaldG 1995: Waldgesetz für Baden-Württemberg. Landeswaldgesetz.
- Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2014: Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. European Journal of forest research, 133: 453–465.
- OcCC 2008: Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques. Bern. 47 S.
- PEFC (Hrsg.) 2008: PEFC Schweiz, Standards für die Waldbewirtschaftung. 35 S.
- Richard F., Lüscher P. 1983/87: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Lokalformen Bd. 3 und Bd. 4. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes. Sonderserie.
- Ruef A., Peyer K. 1996: Handbuch Waldbodenkartierung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 125 S.
- Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. 2007: Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferrasol under native forest, Soil Use Management, 23: 286–293.
- Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E. 2009: Wie lässt sich das «Verformungsexperiment» in unseren Waldböden stoppen? In: Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Walderschliessung und Bodenschutz: Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 79: 1–9.
- Schmider P., Winter D., Lüscher P. 2003: Wälder im Kanton Thurgau. Waldgesellschaften, Waldstandorte, Waldbau. Mit einer Übersichtskarte 1:50 000. Kanton Thurgau, Departement für Bau und Umwelt, Forstamt (Hrsg.). Thurgauische Naturforschende Gesellschaft, Frauenfeld. 268 S.

- Schnürr-Putz S., Baath E., Guggenberger G., Drake H.L., Küsel K. 2006: Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes, *FEMS Microbiol. Ecol.* 58: 503–516.
- Schwyzer A., Keller M. 2009: Ergebnisse des dritten Landesforstinventars LFI3: Schäden im Schweizer Wald. *Wald und Holz* 11: 32–35.
- Shestak C.J., Busse M.D. 2005: Compaction alters physical but not biological indices of soil health, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 236–246.
- Spjepak S., Thees O. 2009a: Konzeptionelle Überlegungen zum Management des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf und vdf Hochschulverlag Zürich. 816 S.
- Spjepak S., Thees O., Lüscher P. 2009b: Modellgestützte Bestimmung des Nutzens von Forstmaschinenausrüstungen für den physikalischen Bodenschutz. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.
- Staatsbetrieb Sachsenforst 2006: Holzerntetechnologien – Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen. 45 S.
- Standard Soil Color Charts 1994: Revised Standard Soil Color Charts according to the Munsell system (Munsell Color Company Inc., Baltimore). Soil color book 08.11. Eijkelcamp Agrisearch Equipment.
- Steubing B. 2013: Die Ökobilanz der energetischen Holzverwertung: Faktoren für einen hohen ökologischen Nutzen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen.* 164, 12: 408–419.
- StGB 1937: Schweizerisches Strafgesetzbuch vom 21. Dezember 1937 (SR 311.0). 170 S.
- Teepe R., Brumme R., Beese F., Ludwig B. 2004: Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 605–611.
- Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 S.
- ThüringenForst 2008: Bodenschutz und Holzernte. 25 S.
- ThüringenForst 2009: Bodenschutz und Walderschliessung – Leitfaden für den Praktiker. 32 S.
- Tschannen P. 1999: Kommentar zum Umweltschutzgesetz. Erläuterungen zum Bodenschutz (Art. 33–35). Hrsg. Vereinigung für Umweltrecht und Helen Keller, 2. Auflage, Zürich.
- USchadG 2007: Umweltschadensgesetz Deutschland.
- USG 1983: Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Schutz der Umwelt (SR 814.01).
- VBo 1998: Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (SR 814.12).
- von Rohr G., Margreth S., Hauert C. 2013: Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 S.
- WaG 1991: Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 über den Wald (Waldgesetz; WaG; SR 921.0).
- Walther L., Zimmermann S., Blaser P., Luster J., Lüscher P. 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1, Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep-Verlag. 768 S.
- Wardle D.A., Yeates G.W., Nicholson K.S., Bonner K.I., Watson R.N. 1999: Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period, *Soil Biol. Biochem.* 31: 1707–1720.
- WaV 1992: Verordnung vom 30. November 1992 über den Schutz des Waldes (WaV; SR 921.01).
- Weise G. 2008: Entwicklung und Einsatz von Forstreifen. *LWF aktuell*, 67: 24–27.
- www.agr.bfs.admin.ch, Stand 21.07.09
- www.fsc-schweiz.ch, Stand 24.07.09
- www.pefc.ch, Stand 24.07.09
- www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/boden/boschuinternet, Stand 24.07.09
- Ziesak M. 2004: Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Dissertation der TU München, www.deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv Auskünfte zu ProFor: Martin Ziesak, HAFL Zollikofen.
- Zimmermann S., Luster J., Blaser P., Walther L., Lüscher P. 2006: Waldböden der Schweiz Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 848 S.
- Zimmermann S., Frey B., Pascal N., Hartmann A. 2009: Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre in unterschiedlich stark verdichteten Fahrspuren. *BGS Jahrestagung, Abstract.* 50 S.

> Verzeichnisse

Abbildungen

Abb. 1 Rahmenbedingungen für den Bodenschutz in der Waldbewirtschaftung	10	Abb. 17 Pseudogley	38
Abb. 2 Vorschlag eines Konzepts für den physikalischen Bodenschutz	17	Abb. 18 Stagnogley	38
Abb. 3 Versuchsfläche Messen-Junkholz mit den unterschiedlichen Körnungseigenschaften (Schluffgehalt) im Unterboden	20	Abb. 19 Gley	38
Abb. 4 Schematischer Bodenaufbau	31	Abb. 20 Körnungsdreieck mit der an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft verwendeten Unterteilung	40
Abb. 5 Typische Humusformen und Entwicklungstendenzen durch die waldbauliche Tätigkeit	33	Abb. 21 Durchschnittlicher Tongehalt in Mineralbodenhorizonten der 95 untersuchten Profile aus der Publikation Waldböden der Schweiz	41
Abb. 6 Mull	34	Abb. 22 Einzelkorngefüge	42
Abb. 7 Moder	34	Abb. 23 Aggregatgefüge	42
Abb. 8 Rohhumus	34	Abb. 24 Kohärentgefüge	42
Abb. 9 Vereinfachte schematische Übersicht zur Bodenentwicklung	35	Abb. 25 Mangankonkretionen	44
Abb. 10 Gesteinsrohboden	36	Abb. 26 Rostflecken (mm bis cm)	44
Abb. 11 Ranker	36	Abb. 27 Marmorierungen	44
Abb. 12 Regosol	36	Abb. 28 Nassbleichung	45
Abb. 13 Rendzina	36	Abb. 29 Reduktionsfarben	45
Abb. 14 Braunerde	37	Abb. 30 Einfluss von ausgewählten Bodeneigenschaften auf das Verdichtungsrisiko	47
Abb. 15 Parabraunerde	37	Abb. 31 Typische Desorptionskurve für Sand- und Tonböden	50
Abb. 16 Podsol	37	Abb. 32 Desorptionskurve für typische Waldböden der Schweiz	51
		Abb. 33 Jahresverlauf des Wassergehaltes [% _v] bei verschiedenen Spurtypen, gemessen mit einer TDR-Sonde (Testfläche Ermatingen)	51

Abb. 34	Spurtypen als Indikatoren zur Beurteilung der ökologischen Wirkung von Bodenveränderungen	54	Abb. 48	Lagerungsdichte für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget	79
Abb. 35	Bewertung einer ökologischen Bodenveränderung durch das Befahren von Waldboden	57	Abb. 49	Gesättigte Wasserleitfähigkeit für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget	80
Abb. 36	Mittlere Werte für die Vorverdichtung bei den verschiedenen Spurtypen im Oberboden (0–15 cm) und im Unterboden (20–35 cm)	59	Abb. 50	Gesamtporenvolumen für die unbefahrene Referenz im Vergleich mit den Spurtypen 1–3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm auf der Fahrversuchsfläche Heitere-Säget	81
Abb. 37	Zusammenhang zwischen Strukturschaden durch Befahrung, Bodenfunktionen und Zusammensetzung der bakteriellen Populationsstrukturen	63	Abb. 51	Grobporenbildung in der Bodenmatrix unter den Fahrspurtypen 1–3 im Vergleich zur unbefahrenen Referenz	82
Abb. 38	Fahrspuren auf der Versuchsfläche Messen-Junkholz klassiert nach Spurtypen	66	Abb. 52	Eine mechanische Belastung des Bodens wirkt sich bis in grössere Tiefen aus	83
Abb. 39	Karte der Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens für die Versuchsfläche Messen-Junkholz	67	Abb. 53	Höhenwachstum der Schwarzerlen auf der Fläche Messen-Brunnenenthal, Kanton Solothurn (2003–2010)	84
Abb. 40	Grenzwassergehalte für die Versuchsfläche Messen-Junkholz, berechnet mit dem Informationssystem ProFor für einen Forwarder der Nutzlastklasse 10 Tonnen	68	Abb. 54	Beispiel der Wurzelverteilung in der Fahrspur mit Erle und Kompost, Profil direkt an der Stammbasis auf der Fläche Messen-Brunnenenthal, Kanton Solothurn	85
Abb. 41	Fahrspuren auf der Versuchsfläche Ermatingen-Hohrain klassiert nach Spurtypen	69	Abb. 55	Wurzelmasse der Erlenwurzeln in verschiedenen Tiefen (Trockengewicht pro dm ³ Boden) auf der Fläche Messen-Brunnenenthal, Kanton Solothurn	85
Abb. 42	Fahrspuren auf der Versuchsfläche Heitere-Bruucheren klassiert nach Spurtypen	70	Abb. 56	Grobporenvolumen in einer Tiefe von 20–30 cm sowie 40–50 cm in den verschiedenen Behandlungen auf der Fläche Messen-Brunnenenthal, Kanton Solothurn	86
Abb. 43	Ausschnitt aus der Versuchsfläche Unteriberg-Schlegwald	72	Abb. 57	Luftleitfähigkeit in einer Tiefe von 20–30 cm sowie 40–50 cm in den verschiedenen Behandlungen auf der Fläche Messen-Brunnenenthal, Kanton Solothurn	87
Abb. 44	Schleifspurtyp 3 an einer Geländekante	73	Abb. 58	Integration des Bodenschutzes in die betrieblichen und hoheitlichen Prozesse der Holznutzung	89
Abb. 45	Fahrspurtypisierung und Flächenanteil der Befahrung der Versuchsflächen in Habsburg (links) und Brüttelen (rechts)	75	Abb. 59	Ausbildungssequenz aus einem Kurs im Kanton Aargau	94
Abb. 46	Prinzipskizze des Befahrungsexperimentes mit einer Forstmaschine	76	Abb. 60	Ausschnitt aus der Verdichtungsrisikokarte des Kantons Aargau mit angepasster Feinerschliessung. Kartendaten: AGIS	97
Abb. 47	Ausschnitt aus der Versuchsanordnung in Heitere-Säget, Kanton Bern, mit den Fahrspurtypen, die sich nach der gezielten Bewässerung und der anschliessenden Befahrung eingestellt haben	77			

Abb. 61	Grenzwassergehalt auf Rückegassen, berechnet mit ProFor für den Vollernter EcoLog 580C	98
Abb. 62	Bestehende Fahrlinien sollen bestmöglich in die neue Planung integriert werden, damit der Anteil der befahrenen Bodenfläche möglichst gering bleibt	100
Abb. 63	Eingabemasken ProFor für den Boden (links) und die verwendete Maschine (rechts)	107
Abb. 64	Beim Befahren wirken Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung auf den Boden	110
Abb. 65	Bei Forstmaschinen liegt der Kontaktflächendruck mehrheitlich im Bereich von 200–500 kPa (20–50 Tonnen/m ²)	111
Abb. 66	Fahrspuren nach Befahren mit unterschiedlichem Reifenfülldruck links und rechts an der gleichen Maschine. Fahrversuch im Staatswald Habsburg, Kanton Aargau, September 2010	113
Abb. 67	Forwarder mit unterschiedlichen Bogiebändern	115
Abb. 68	Harvester Valmet X3 «Snake» und Ecolog 570D Soft Track mit unabhängigen, pendelnd aufgehängten Raupenlaufwerken	117
Abb. 69	Reifen mit Traktionsprofil (links) für ziehende Schlepper und mit Soft-Profil (rechts) für Harvester und Forwarder	118
Abb. 70	Forwarder mit Traktionshilfswinde	119
Abb. 71	Schematische Darstellung der druckmindernden Wirkung einer Reisigmatte	125
Abb. 72	Mehrkosten des mit Bogiebändern (BB) genutzten Holzes	131
Abb. 73	Schlüssel zur Bestimmung des Vernässungsgrades	146
Abb. 74	Entscheidungsbaum Bodenempfindlichkeit Kanton Solothurn	151

Tabellen

Tab. 1	Vorschlag der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz BGS zu Richt- und Massnahmenwerten für den physikalischen Bodenschutz im Wald	17
Tab. 2	Fahrspuren im Schweizer Wald gemäss Landesforstinventar LFI3	27
Tab. 3	Einteilung des Skelettgehaltes nach Arbeitskreis Standortskartierung (1996)	39
Tab. 4	Einteilung des Humusgehaltes nach Ruef und Peyer (1996)	46
Tab. 5	Merkmale der Fahrspuren, Begründung der Massnahmen und Bezug zur Definition der Bodenfruchtbarkeit	55
Tab. 6	Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen	56
Tab. 7	Überblick über die Versuchsflächen im schweizerischen Mittelland und in den Voralpen	65
Tab. 8	Überblick über die Lotharreservatsflächen	74
Tab. 9	Akteure und grundsätzliche Verteilung der Verantwortlichkeiten im Hinblick auf den physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte in der Schweiz	92
Tab. 10	Vorschlag für Rückegassenabstände in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit	101
Tab. 11	Mögliche vertragliche Regelungen zum physikalischen Bodenschutz bei der Holzernte zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer	106
Tab. 12	Bewertung der Radlast von Forstmaschinen, Prüfgrundlage zur KWF-Gebrauchswertprüfung Harvester (Stand 2011)	112
Tab. 13	Grundsätze für die Wahl und den Einsatz von Arbeitsverfahren und Maschinen	121
Tab. 14	Überblick über kostenrelevante Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz	130

Tab. 15 Bestimmung der terrestrischen Humusformen nach Arbeitskreis Standortkartierung (1996) und Frehner et al. (2005)	143
Tab. 16 Verwendete Bezeichnungen für Bodenhorizonte	144
Tab. 17 Schlüssel zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (Feldansprache)	145
Tab. 18 Value nach Munsell-Farbtafel (Standard Soil Color Charts 1994) für feuchte Bodenproben	147
Tab. 19 Versuchsflächen	147
Tab. 20 Ausbildungsflächen	148
Tab. 21 Befahrungsversuche	148
Tab. 22 Lothar-Reservatsflächen (Regenerationsprojekt)	148
Tab. 23 Durchgeführte Aus- und Weiterbildungskurse zum Physikalischen Bodenschutz	149

> Glossar

Die gebräuchlichsten Bezeichnungen der Bodenhorizonte sind im Anhang A4 zusammengestellt, die in der Schweiz häufig vorkommenden Bodentypen werden im Kapitel 3.2.4 erläutert. Beide werden deshalb im Glossar nicht aufgeführt.

Ausrollgrenze

Wassergehalt im Boden beim Übergang aus dem halbfesten in den formbaren Zustand

Bodenart

Feinerdekörnung, welche die Aufteilung der → Feinerde nach den Grössenklassen Ton, Schluff und Sand charakterisiert.

Bodenaggregat

Produkt entstanden durch biologische, physikalische oder chemisch-physikalische Prozesse der mineralischen Partikel im Boden. Je nach Form der Aggregate entsteht daraus z. B. ein Krümelgefüge, Polyedergefüge oder Klumpengefüge. Die grösseren Poren zwischen den Aggregaten spielen eine grosse Rolle für die Durchlüftung, die Wasserinfiltration und die Durchwurzelbarkeit.

Bodenempfindlichkeit gegenüber Befahrung

Empfindlichkeit des Bodens für befahrungsbedingte ökologisch wirksame Veränderungen. Sie hängt von der aktuellen Bodenfeuchte und damit weitgehend vom Witterungsverlauf ab. Weiter spielen folgende Gegebenheiten eine Rolle: Kornverteilung, Steingehalt, Ausprägung der Wechselfeuchte, Humusgehalt und Hangneigung.

Bodenprofil

Schnitt durch den Boden von der Oberfläche bis zum Ausgangsgestein. In der Regel lässt sich eine Abfolge von Schichten (Horizonten) erkennen.

Bodentextur

Konstante Bodeneigenschaft, welche die prozentualen Anteile der mineralischen Bestandteile Ton, Schluff und Sand beschreibt.

Bodentyp

Böden mit ähnlicher Entstehungsgeschichte und Horizontierung, ähnlichem Wasserhaushalt, sowie ähnlichen chemischen und mineralogischen Eigenschaften werden zu Bodentypen zusammengefasst.

Bodenverdichtung

Vorgang der Verringerung des Gesamtvolumens des Bodens durch Verpressung oder Setzung. Als Folge davon steigt der Anteil der Festsubstanz, das Porenvolumen verringert sich und die Porengrössenverteilung verändert sich.

Branchenvereinbarung

Ein Instrument der schweizerischen Umweltpolitik, das 1995 ins Umweltschutzgesetz aufgenommen wurde (Art. 41a USG). Mit der Branchenvereinbarung legen die Mitglieder einer Wirtschaftsbranche auf freiwilliger Basis gegenseitige Rechte und Pflichten fest.

Feinerde

Bodenfraktion mit einem Korndurchmesser kleiner als 2 mm.

Feinporen

Poren mit Durchmesser $< 0,2 \mu\text{m}$. Sie binden das Wasser so stark, dass es für die meisten Pflanzen nicht mehr verwertbar ist.

Fliessgrenze

Wassergehalt im Boden beim Übergang aus dem formbaren in den fliessbaren Zustand.

Gesamtporenvolumen

Auch Porenvolumen genannt. Es ist der volumetrische Anteil aller Hohlräume in einem Volumenelement. Es ist die Summe aus Fein-, Mittel- und Grobporen. In der Regel geht eine Zunahme des Porenvolumens mit einer Abnahme der Korngrösse einher.

Grobporen

Poren mit Durchmesser $> 50 \mu\text{m}$. Sie haben wichtige Funktionen für Drainage, Belüftung und Wurzelwachstum.

Humus

Gesamtheit der abgestorbenen Pflanzenteile sowie deren Abbau- und Umwandlungsprodukte.

Korngrössenverteilung

Auch → Bodenart oder → Bodentextur genannt. Die Korngrössenverteilung ist eine Beschreibung der prozentualen Zusammensetzung der → Feinerde (Ton, Schluff und Sand). Sie ist die Grundlage für die Einteilung in Bodenarten mittels Körnungsdreiecken.

Mittelporen

Poren mit Durchmesser zwischen $0,2\text{--}50 \mu\text{m}$. Sie haben die Fähigkeit das Kapillarwasser zu speichern, das noch pflanzenverfügbar ist. In diesen Poren sind Pilzmyzele, Wurzelhaare und Bakterien lebensfähig, welche für die Bodenaktivität wichtig sind.

Vernässungsgrad

Tiefe des Auftretens und Ausprägung von Vernässungsmerkmalen.

Verformung, elastisch

Eine elastische Verformung stellt keine bleibende Veränderung dar. Die Bodenstruktur bleibt weitgehend in ihrem ursprünglichen Zustand.

Verformung, plastisch

Bei einer plastischen Verformung wird die Bodenoberfläche dauerhaft deformiert.

Verformung, viskoplastisch

Eine plastische Verformung mit viskosem Fließen, wobei eine vollständige Veränderung der Bodenstruktur erfolgt.

Vorverdichtung

Mass für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens. Sie gibt an, wie stark der Boden bereits belastet wurde und bis zu welcher erneuten Belastung keine zusätzliche Verdichtung zu erwarten ist.

Wasserhaushalt

Die im Laufe des Jahres wechselnden Witterungsbedingungen führen zu einem charakteristischen Verlauf der Wasserzufuhr zum Boden und zu Wasserverlusten aus dem Boden. Der Verlauf der Veränderungen wird als Wasserhaushalt bezeichnet und hängt nebst dem Klima von den Bodeneigenschaften und von der hydrologischen Situation ab.