

# Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach physikalischer Belastung

Peter Lüscher Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*

## Changes in the soil and the classification of ruts according to physical loading

In Swiss environment legislation, protection of the soil is defined by reference to the long-term maintenance of soil fertility. To fulfil this commitment, long-lasting damage to the soil must be prevented, respectively reduced to a minimum. When the forest floor is driven over with heavy logging machinery, this can lead to profound and long-lasting changes in the soil structure in the ruts thus formed. Based on driving trials under controlled conditions in the Heiteren region of the forest near Bern, investigations were made to find out whether the classification of ruts into three distinct types showing morphologically determined changes in the soil could be substantiated with the help of known values in soil physics. It was shown that the non-compacted reference soils could be clearly distinguished from all three types of rut by comparison of the stratification density, the total pore space and the saturated water permeability. In addition, the three types significantly differed from each other. Damage to the soil can be reduced to a minimum through consequent planning of skidding tracks and by paying due attention to the prevailing humidity of the soil at the time when vehicles are used. Thanks to the connection established between the character of the ruts and soil functionality, the classification of rut types provides a practically relevant and objective instrument for effective physical soil protection.

**Keywords:** compaction, stratification density, pore space, water permeability

**doi:** 10.3188/szf.2010.0504

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail peter.luescher@wsl.ch

Der Schutz des Bodens wird im Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG, SR 814.01) über die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit definiert. Fruchtbarkeit des Waldbodens bedeutet, dass die Vegetationsrückstände unter den gegebenen standörtlichen Verhältnissen durch die biologische Bodenaktivität abgebaut werden, das Wurzelwachstum der Bäume nur durch natürliche Begrenzungen beschränkt wird und die Selbsterhaltung der standorttypischen Lebensgemeinschaften mit natürlicher Verjüngung möglich ist.

Werden Waldböden mit Forstmaschinen befahren, verursacht dies auf einem Grossteil der im Schweizer Wald vorkommenden Böden im Bereich der Fahrspuren tief greifende und zum Teil lang anhaltende Veränderungen der Bodenstruktur, welche wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen (Abbildung 1). Eingeschränkte Porenvolumina und Porenvernetzung verringern die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft. Die Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Luft ist aber eine unabdingbare

Voraussetzung für die Bodenfruchtbarkeit. Durch starke Bodenverdichtungen wird nicht nur das Keimbeet für die Naturverjüngung verschlechtert, sondern auch das Wurzelwachstum bis in beträchtliche Bodentiefe auf Dauer gestört. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht ist es unabdingbar, langfristige Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit und die damit verbundene Gefährdung des Holznutzungspotenzials zu verhindern. Auch ist es angezeigt, die durch Befahrung entstandenen Bodenveränderungen zu umschreiben und zu quantifizieren.

Im Grundsatz geht der Gesetzgeber davon aus, dass jegliche Bodenschädigung vorsorglich zu begrenzen ist. Bei mechanischer Belastung ist zu beachten, dass eine natürliche Regeneration nur über eine längere Zeit zu erreichen ist beziehungsweise die Schädigung oft nicht vollständig rückgängig gemacht werden kann. Im Sinne eines solchen vorsorgenden Bodenschutzes erarbeitet die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Rahmen des Projektes «Physikalischer Bodenschutz im Wald» Hilfestellungen für die Praxis,

Downloaded from [http://meridian.allenpress.com/szf/article-pdf/161/12/504/1966138/szf\\_2010\\_0504.pdf](http://meridian.allenpress.com/szf/article-pdf/161/12/504/1966138/szf_2010_0504.pdf) by guest on 08 August 2024

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

Tab 1 Kriterien zur Unterscheidung und Bewertung der drei Spurtypen.

damit diese langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit infolge Verdichtung erkennen, bewerten und möglichst verhindern kann (Lüscher et al 2009b).

Eine zentrale Rolle spielt dabei einerseits die Sensibilisierung aller Akteure und andererseits die Erarbeitung von verbindlichen, nachvollziehbaren ökologischen Vorgaben, sogenannten Interventionswerten. Zu diesem Zweck wurde mithilfe von ausgewählten morphologischen Merkmalen eine Typisierung der Fahrspuren entwickelt, die auf ökologisch wirksame Veränderungen im Boden schliessen lässt. Spurtyp 1 (Tabelle 1) mit einer Spurtiefe von weniger als 10 cm zeigt eine Pressung der organischen Auflagehorizonte in Form von Reifenabdrücken. Der Spurtyp 2 befindet sich im Bereich der plastischen Verformung mit einer deutlichen Vertiefung von meist weniger als 10 cm im A-Horizont (dunkler Durchmischungshorizont aus mineralischer Feinerde und abgebautem organischem Material). Auch ist der Aufbau des Oberbodens teilweise gestört, und seitliche Aufwölbungen sind in geringem Ausmass vorhanden. Der Spurtyp 3 wird durch drei Merkmale charakterisiert, die alle erfüllt sein müssen: 1) Die Spurtiefe ist in der Regel grösser als 10 cm und reicht 2) bis in den Unterboden. Zusätzlich sind 3) deutlich ausgeprägte seitliche Aufwölbungen (Verformungen) vorhanden. Spurtyp 3 hat sowohl eine grössere Tiefenwirkung als auch eine grössere Breitenwirkung als die Spurtypen 1 und 2.

Zur quantitativen Hinterlegung dieser morphologisch erkennbaren Spurtypen können Veränderungen der effektiven Lagerungsdichte des Bodens, des Grobporenvolumens, der gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie des Eindringwiderstandes, aber auch mikrobiologische Parameter herangezogen werden (BGS 2004, Frey et al 2009, Frey 2010, dieses Heft). Die so definierten drei Spurtypen sollen – analog zum 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.

Ziel des vorliegenden Artikels ist es, die in einem Fahrversuch unter kontrollierten Bedingungen entstandenen Spurtypen mit bodenphysikalischen Messwerten zu belegen, ihre morphologische Unterscheidung mit Messwerten zu verifizieren und die Messwertbasis für ökologische Interpretationen zu bilden. Zusätzlich wird mit der Kartierung der Feinerschliessung auf einer Testfläche eine Anwendungsmöglichkeit dieser Spurtypenklassierung gezeigt.

## Methodisches Vorgehen

Mit Befahrungsexperimenten im Forst (Heiteren) bei Bern im schweizerischen Mittelland – der Standort gehört zum Waldmeister-Buchenwald (Ehlenberg & Klötzli 1972) – wurde versucht, die auf



Abb 1 Eine Befahrung von Waldböden mit Forstmaschinen kann im Bereich der Fahrspuren zu tief greifenden und lang anhaltenden Veränderungen im Boden führen, die von aussen nicht sichtbar sind. Foto: Barbara Allgaier Leuch

grund von morphologischen Kriterien ausgeschiedenen Spurtypen 1, 2 und 3 unter kontrollierten Bedingungen, d.h. bei bekanntem Bodenwassergehalt und mit definierten Maschinenmassen, künstlich zu erzeugen. Dazu wurde in ebener Lage mit möglichst einheitlichen Bodeneigenschaften über je drei Fahrlinien ein Feuchtegradient angelegt, durch den beim Befahren die angestrebten Fahrspurtypen entstanden. Der unmittelbar benachbarte, unbefahrene Boden wurde als Kontrolle verwendet.

Die verwendete Forstmaschine war ein Forstspeziialschlepper HSM 805 HD der Burgergemeinde Bern mit einem Gewicht von 11.5 t und einer Reifenbreite von 700 mm. Der Reifeninnendruck wurde auf 1.5 bar eingestellt.

Das Verdichtungsrisiko wird auf der Fläche des Befahrungsexperimentes aufgrund der Bodeneigenschaften und des Waldstandorttyps nach Schmider et al (2003) als mittel eingestuft. Der Skelettgehalt liegt unter 30%<sub>v</sub>. Die Bodenart entspricht einem sandigen Lehm, und im Boden sind kaum Vernässungsmerkmale erkennbar. Die Humusform wurde als Mull mit Übergängen zu Moder klassiert.

Um das Ausmass der Bodenveränderungen nach der Befahrung in Abhängigkeit von der Spurausprägung beurteilen zu können, wurden an je 15 Stechzylinderproben aus zwei verschiedenen Tiefen (5–10 cm und 15–20 cm) die folgenden Messwerte bestimmt: Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und die gesättigte Wasserleitfähigkeit. Die Auswahl der Kennwerte erfolgte nach den vorgeschlagenen Leitlinien für Richt- und Prüfwerte (BGS 2004). Darin enthalten sind ebenfalls die Vorgaben

für die Bestimmung der einzelnen Parameter. Die Wassergehaltmessungen im Gelände wurden alle mit TDR-Sonden (Trime FM, Imko GmbH) durchgeführt. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Mann-Whitney-U-Test. Dieser Test wurde angewendet, da nicht alle Daten normal verteilt sind.

Daneben erfolgte eine flächendeckende Kartierung der Spurtypen auf einer Testfläche von 95 ha, welche im Rahmen von früheren Holzerntemassnahmen befahren wurde.

## Resultate

Alle gemessenen Grössen zeigen deutliche Unterschiede zwischen der unbefahrenen Referenzfläche und den drei Spurtypen. Die Lagerungsdichte steigt nach dem Befahren in beiden Messtiefen deutlich an (Abbildung 2, links). In 5–10 cm Tiefe zeigt sie einen sprunghaften Anstieg von 1.05 kg/dm<sup>3</sup> in der Referenz auf 1.26 kg/dm<sup>3</sup> im Spurtyp 1 und danach einen allmählichen auf 1.33 kg/dm<sup>3</sup> im Spurtyp 3. In der Tiefe 15–20 cm ist der Anstieg eher kontinuierlich von 1.10 kg/dm<sup>3</sup> in der Referenz auf 1.41 kg/dm<sup>3</sup> im Spurtyp 3. Damit ist im Spurtyp 3 die Lagerungsdichte in beiden Tiefen um den Faktor 1.3 grösser als in der Referenz. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrspurtypen sind mit Ausnahme desjenigen zwischen Spurtyp 2 und 3 in 5–10 cm Tiefe signifikant.

In beiden Messtiefen nimmt die gesättigte Wasserleitfähigkeit infolge Befahrung deutlich ab (Abbildung 2, Mitte). Liegt die gesättigte Wasserleitfähig-

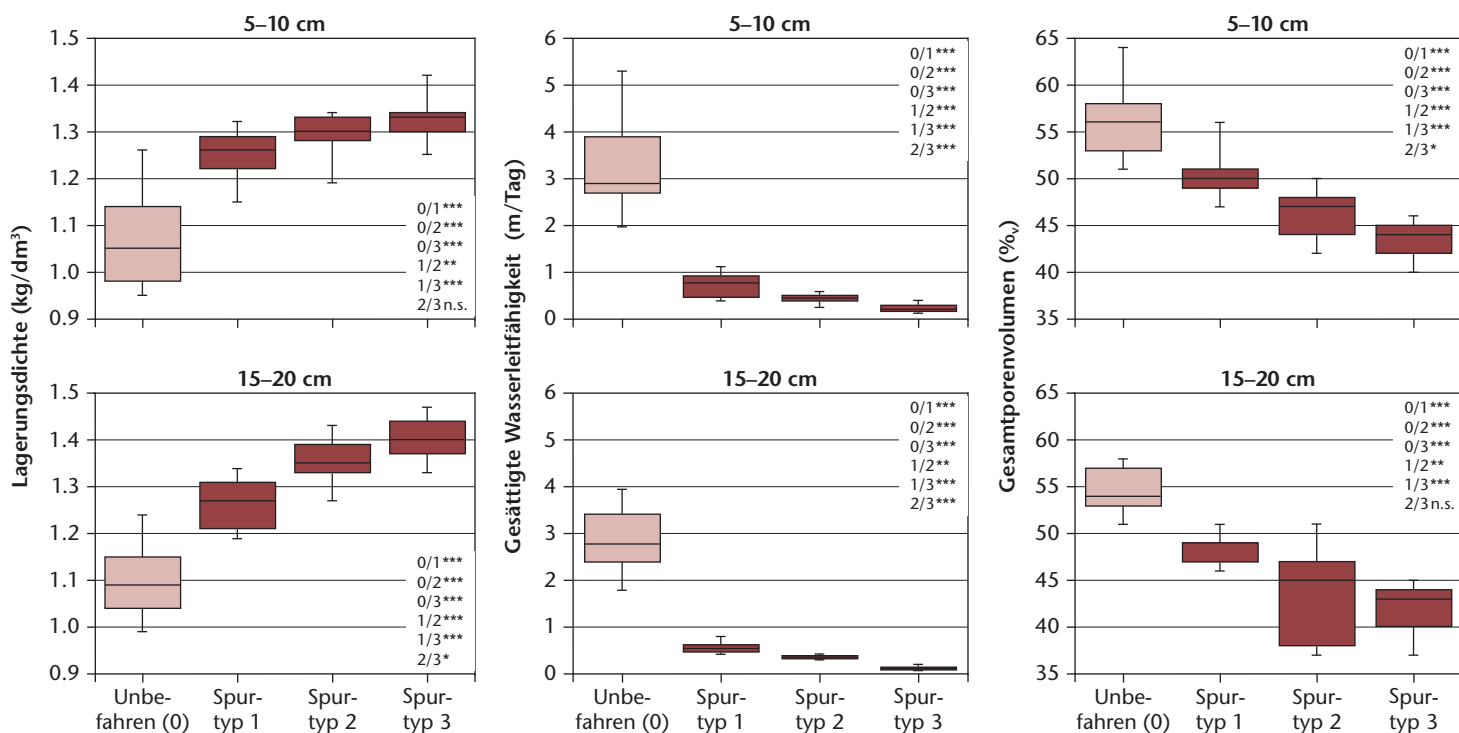


Abb 2 Lagerungsdichte (links), gesättigte Wasserleitfähigkeit (Mitte) und Gesamtporenvolumen (rechts) für die unbefahrene Referenz (0) im Vergleich mit den Spurtypen 1, 2 und 3 für die Tiefen 5–10 cm und 15–20 cm. Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , n.s. nicht signifikant.

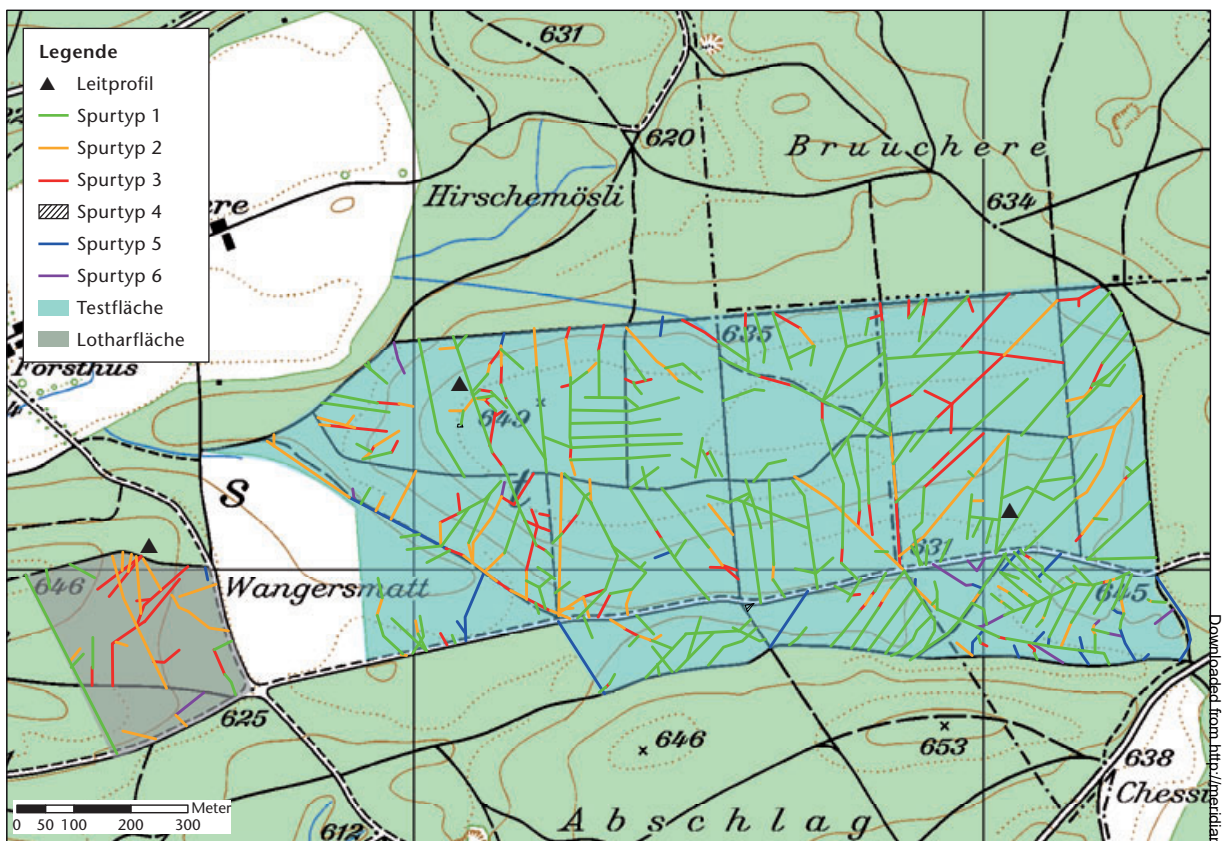


Abb 3 Kartierte Fahrspuren auf der Testfläche Heiteren.

Kartendaten: pixmaps © 2010 swisstopo (5704 000 000).

keit auf der unbefahrenen Referenzfläche im Bereich «äusserst hoch» (> 3 m pro Tag; Arbeitskreis Standortkartierung 1996) in 5–10 cm und «sehr hoch» (1–3 m pro Tag) in 15–20 cm Tiefe, so befindet sie sich nach Befahrung in den Wertebereichen «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 lassen sich alle signifikant trennen.

Die Abnahme des Gesamtporenvolumens ist in beiden Bodentiefen vergleichbar (Abbildung 2, rechts), wobei die Werte in der Tiefe 15–20 cm in allen Behandlungen um etwa 1.5 %-Punkte geringer sind als in 5–10 cm Tiefe. Mit Ausnahme der Spurtypen 2 und 3 in 15–20 cm Tiefe unterscheiden sich alle paarweisen Vergleiche signifikant. 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.

Abbildung 3 zeigt die kartierte Testfläche. Die kritischen Stellen mit Spurtyp 3 sind deutlich ersichtlich. Sie betragen in der Länge gut 10% der gesamten Feinerschliessung.

### Diskussion

Die Befahrung des Waldbodens in der Heiteren mit einem 11.5 t schweren Forstspezialschlepper führte zu einer Verdichtung des Bodens, zu

geringeren Wasserleitfähigkeiten und zu einer Abnahme des Gesamtporenvolumens. Die Auswirkungen waren umso grösser, je feuchter und damit verdichtungsempfindlicher der Boden war. Die Veränderungen der physikalischen Messgrössen stehen in einem engen Zusammenhang mit den morphologisch feststellbaren und in Spurtypen klassierbaren Bodenveränderungen.

Die Lagerungsdichte der unbefahrenen Referenz entspricht derjenigen von vergleichbaren Moräneoberböden unter Waldmeister-Buchenwäldern (Zimmermann et al 2006). Die in den Fahrspuren ermittelten Lagerungsdichten sind im Durchschnitt 20–25% grösser. Zudem ist ersichtlich, dass der Bereich von Dichtewerten um 1.4 kg/dm<sup>3</sup> – der eine Durchwurzelung erschwert (Gisi et al 1997) – beim Spurtyp 3 in 15–20 cm Tiefe erreicht wurde (Abbildung 2, links).

Anhand der gesättigten Wasserleitfähigkeit in verschiedenen Bodentiefen sind Rückschlüsse auf die Veränderungen der ökologischen Funktionalität des Porenraumes in Abhängigkeit des Spurtyps möglich. Durch die veränderten Wassersickerungsverhältnisse ergeben sich höhere Wassersättigungsgrade, und diese lassen die über Vernässungsmerkmale festgestellten gestörten Durchlüftungsverhältnisse als plausibel erscheinen. Zudem sind die in der Heiteren zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahresverlauf (2007–2009) gemessenen Wassergehalte in den Fahrspuren durchschnittlich um 5–15% höher als in der unbefahrenen Kontrollfläche. Die längeren Phasen mit Durchlüftungsschwierigkeiten sind

die Ursache für die hauptsächlich bei den Spurtypen 2 und 3 zunehmend sichtbare Hydromorphie.

Bodenveränderungen durch das Befahren mit schweren Maschinen werden in zwei Kategorien eingeteilt. Eine ohne negative Auswirkung (Spurtyp 1; Tabelle 1) und eine zweite Kategorie mit negativen Folgen für die Bodenfruchtbarkeit (Spurtypen 2 und 3, in welchen die Messwerte meistens, aber nicht immer signifikant verschieden sind). Erfasst die Fahrspur nur den Oberboden und sind die Verformungen wenig ausgeprägt, so wird der Bodenaufbau kaum gestört. Bei Veränderungen, wie sie beim Spurtyp 2 erkennbar sind, wird davon ausgegangen, dass sich der Boden mittelfristig aufgrund des natürlichen, standortspezifischen Regenerationspotenzials erholen wird. Eine solche Beeinträchtigung ist somit zeitlich begrenzt und wird deshalb als unerheblich betrachtet. Beim Spurtyp 3 hingegen wird angenommen, dass die Beeinträchtigung erheblich sowie von langfristiger Natur ist und die Bodenfruchtbarkeit dadurch nachhaltig geschädigt ist (Lüscher et al 2009a).

Ausgeprägte Verformungen beim Spurtyp 3 entstehen, wenn zum Zeitpunkt des Befahrens der Feuchtezustand des Bodens über der Fliessgrenze liegt. Dadurch wird der Porenraum derart verändert und verdichtet, dass ein ökologischer Schaden entsteht. Der Bodenaufbau wird gestört, und die Spurtiefe erreicht den Unterboden, wo eine rasche natürliche Regeneration kaum möglich ist und die grossen Lagerungsdichten eine Durchwurzelung erschweren. Mit einer Messsonde, welche den Eindringwiderstand des Bodens misst, kann eine Verdichtung bis in den Unterboden nachgewiesen werden (Lüscher et al 2009b). In einem vergleichbar zur Fahrversuchsfläche aufgebauten Moräneboden 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.

Vernässungsmerkmale können in unterschiedlicher Intensität bei allen Spurtypen auftreten. Sie sind Ausdruck des durchschnittlichen Durchlüftungszustandes des Bodens. 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. Dieser Sachverhalt wird durch die erhobenen physikalischen Parameter und die Wassergehaltsmessung gestützt.

Wechselwirkungen zwischen standörtlichen, maschinenbedingten und verfahrenstechnischen Faktoren sind gesamtheitlich schwierig fassbar und daher nur schwer abschätzbar. Prognosen von Bo-

denschäden sowie die Herleitung und Begründung von Grenzwerten für einen ökosystemverträglichen Maschineneinsatz sind dementsprechend schwierig. Weitere Untersuchungen im Rahmen des Fahrversuches Heiteren zeigen aber, dass sich auch die mikrobiellen Aktivitäten und Lebensgemeinschaften durch eine Bodenverdichtung mit schweren Erntemaschinen verändern. So werden diejenigen Mikroorganismen, die an sauerstoffarme Lebensbedingungen angepasst sind, durch anaerobe Verhältnisse in den verdichteten Fahrspuren gefördert (Frey et al 2009, Frey 2010, dieses Heft).

## Schlussbemerkungen

Schutzgut ist der fruchtbare Boden mit seinen umfassenden ökologischen Funktionen als Pflanzenstandort, als Puffer und Filter sowie als Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Die Beeinträchtigungen des Waldbodens durch physikalische Belastung können – wie der Fahrversuch Heiteren zeigt – mittels der drei Spurtypen beurteilt und bewertet werden. Damit steht für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes ein praxisnahes und objektives Instrument zur Verfügung.

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: Aus bodenökologischer Sicht sind beim Auftreten vom Spurtyp 3 die Holzernte- und Rücketechniken anzupassen oder die Arbeiten zu unterbrechen.

Bodenschädigungen lassen sich durch eine konsequente Planung der Feinerschliessung und der Berücksichtigung der zum Zeitpunkt des Befahrens herrschenden Bodenfeuchte minimieren. Da es sich hierbei um Massnahmen mit Vorsorgecharakter handelt, kommt der Ausbildung der in der Planung und Ausführung der Holzernte tätigen Personen eine grosse Bedeutung zu. Die Verantwortlichkeiten der verschiedenen Akteure für den physikalischen Bodenschutz werden im Merkblatt «Physikalischer Bodenschutz im Wald» (Lüscher et al 2009b) eingehend beleuchtet.

Die Klassierung der Spurtypen erlaubt es, die Qualität der Feinerschliessungslinien zu dokumentieren und diese für künftige Nutzungsmöglichkeiten zu beurteilen, kritische Stellen zu identifizieren sowie gegebenenfalls Massnahmen zu ergreifen (Abbildung 3). Damit sind die Voraussetzungen für die bestmögliche Integration von bestehenden Fahrspuren in eine künftige systematische Planung von Rückegassen gegeben. Im Weiteren ist es denkbar, die

Klassierung der Spurtypen – auch unter Einbezug der Kartierung – zur Formulierung von Qualitätsanforderungen bei der Holzernte zu verwenden. ■

Eingereicht: 14. Juni 2010, akzeptiert (mit Review): 5. November 2010

## Dank

Wir danken Hans Kremer und Dietmar Matthies (Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaften und Angewandte Informatik, TU München) für die Unterstützung beim Fahrversuch und bei den bodenphysikalischen Untersuchungen, Stéphane Sciacca für die Planung und Durchführung des Fahrversuches und der Bürgergemeinde Bern – insbesondere Oberförster Franz Weibel und Förster Roland Rupli – für die Möglichkeit, in ihrem Wald die Befahrung durchführen zu dürfen. Die Projektfinanzierung erfolgte durch das Bundesamt für Umwelt (Sektionen Wald und Boden).

## Literatur

**ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996)** Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. München: IHW-Verlag, 5 ed. 352 p.

## Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach physikalischer Belastung

Der Schutz des Bodens wird in der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung über die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit definiert. An dieser verpflichtenden Vorgabe hat sich die Vermeidung beziehungsweise die Minimierung langfristiger Beeinträchtigungen des Bodens zu orientieren. Werden Waldböden mit Forstmaschinen befahren, kann dies im Bereich der Fahrspuren zu tief greifenden und lang anhaltenden Veränderungen der Bodenstruktur führen. Anhand von Fahrversuchen unter kontrollierten Verhältnissen im Forst (Heiteren) bei Bern wurde untersucht, ob sich die mithilfe von morphologisch feststellbaren und in drei Spurtypen klassierbaren Bodenveränderungen mit bodenphysikalischen Kennwerten untermauern lassen. Es zeigt sich, dass mit der Lagerungsdichte, dem Gesamtporenvolumen und der gesättigten Wasserleitfähigkeit die Spurtypen signifikant vom unbefahrenen Referenzboden getrennt werden können und auch die drei Spurtypen untereinander sich meist signifikant unterscheiden. Bodenschädigungen lassen sich durch eine konsequente Planung der Feinerschliessung und der Berücksichtigung der zum Zeitpunkt des Befahrens herrschenden Bodenfeuchte minimieren. Dank den gezeigten Zusammenhängen zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität steht mit den Spurtypen ein praxisnahes und objektives Instrument für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes zur Verfügung.

- BGS (2004)** Definition und Erfassung von Bodenschadverdrichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Zollikofen: Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale. 32 p.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972)** Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt Schweiz Anst Forstl Versuchsw 48: 589–930.
- FREY B ET AL (2009)** Compaction of forest soils 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 Forstwes 161: 498–503. doi: 10.3188/szf.2010.0498
- GISI U, SCHENKER R, SCHULIN R, STADELMANN FX, STICHER H (1997)** Bodenökologie. Stuttgart: Thieme, 2 ed. 350 p.
- LÜSCHER P, BORER F, BLASER P (2009A)** Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O, Lemm R, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: VDF. pp. 261–270.
- LÜSCHER P, FRUTIG F, SCIACCA S, SPJEVAK S, THEES O (2009B)** Physikalischer Bodenschutz im Wald. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft, Merkblatt Praxis 45. 12 p.
- SCHMIDER P, WINTER D, LÜSCHER P (2003)** Wälder im Kanton Thurgau. Waldgesellschaften, Waldstandorte, Waldbau Mitt Thurgau Nat.forsch Ges 58. 268 p.
- ZIMMERMANN S, LUSTER J, BLASER P, WALTHERT L, LÜSCHER P (2006)** Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Bern: Hep. 847 p.

## Altérations du sol et typologie des ornières après sollicitation physique

La protection du sol est définie dans la législation environnementale suisse par la conservation de sa fertilité. Ainsi est donné un cadre contraignant pour éviter ou réduire les atteintes à long terme au sol. Le passage de machines sur le sol forestier peut provoquer, au niveau des ornières, des changements profonds et durables de la structure du sol. À l'aide d'essais dans des conditions contrôlées, réalisés à Forst (Heiteren), près de Berne, il a été examiné si des paramètres pédologiques peuvent confirmer les changements du sol observables à l'aide de caractéristiques morphologiques et classifiables en trois types d'ornières. Les types d'ornières peuvent être différenciés significativement du sol de référence par la compacité, la porosité et la conductivité hydraulique en milieu saturé. De même, les trois types d'ornières peuvent, dans la plupart des cas, être différenciés significativement entre elles. Les atteintes au sol peuvent être minimisées par une planification soignée de la desserte fine et par la considération des conditions d'humidité du sol avant l'utilisation des layons. Grâce à la démonstration des relations entre les caractéristiques observables des ornières et les fonctionnalités du sol, on peut conclure que la typologie des ornières est un instrument pratique et objectif au service de la protection du sol.