

Nur wer den Boden kennt, kann ihn schützen und nachhaltig nutzen

Gedanken zur «Mechanischen Belastung von Waldböden»

Peter Lüscher

WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, peter.luescher@wsl.ch

Ökologische Erkenntnisse, ökonomisches Handeln, technische Weiterentwicklungen und gesellschaftliche Ansprüche an den Wald beziehungsweise die Waldwirtschaft erfordern grundsätzliche Überlegungen hinsichtlich künftiger Konzepte für eine nachhaltige Bodennutzung. Mit der «Waldpolitik 2020» wurden für den Bodenschutz Rahmenbedingungen gesetzt, die mit den Zielgrössen und Indikatoren – entwickelt im Projekt «Physikalischer Bodenschutz im Wald» – übereinstimmen und den Schutz des Bodens vor irreversiblen Veränderungen sicherstellen. Diese Vorgaben sollen langfristige Beeinträchtigungen des Bodens vermeiden beziehungsweise minimieren. Sie haben verbindlichen Charakter hinsichtlich Umsetzung und Vollzug in den Kantonen. Bodenkundliche Grundkenntnisse sind dabei unerlässlich, um die nachhaltige Nutzung der Waldböden zu gewährleisten. Nicht zuletzt sind sie eine wichtige Voraussetzung für die einheitliche Kommunikation der Schutzanliegen zwischen allen Beteiligten.

1 Einleitung

Das Befahren von natürlich gelagerten Waldböden mit Forstmaschinen kann auf einem Grossteil der Böden im Schweizer Wald im Bereich der Fahrspuren tiefgreifende und zum Teil lang anhaltende oder gar irreversible Bodenveränderungen verursachen, die wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen. Sind Porenvolumen und Porenvernetzung beeinträchtigt, ist die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft eingeschränkt. Die Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Luft ist aber eine unabdingbare Voraussetzung für die Fruchtbarkeit von Waldböden und für das Wachstum der darauf stockenden Bestände. Durch starke Bodenverdichtungen werden nicht nur im Keimbeet die Voraussetzungen für die Naturverjüngung drastisch verschlechtert, auch das Wurzelwachstum wird bis in beträchtliche Bodentiefen nachhaltig gestört. Dies lässt sich mit dem Begriff der «langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit nach physikalischer Belastung» treffend beschreiben und auch quantifizieren. Mit dem Projekt «Physikalischer Bodenschutz im Wald» ist das in den vergangenen Jahre weitgehend erreicht worden. Für die Umsetzung der Vorgaben sind bodenkundliche Grundkennt-

nisse eine unerlässliche Voraussetzung. Das gilt für den Oberboden, den Bodenaufbau, bestimmte Bodenmerkmale und -eigenschaften, den Bodenwasserhaushalt und insbesondere die aktuelle Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Befahrens spielt eine bedeutende Rolle. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht ist es daher zentral: Der Boden muss geschützt werden!

Ziel muss es sein, eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenverdichtung – wie im Umweltschutzgesetz (USG 1983 und

VBBo 1998), aber auch in der Waldgesetzgebung gefordert – zu erkennen, zu bewerten und durch Umsetzung bodenkundlicher Kenntnisse soweit als möglich zu verhindern bzw. zu minimieren (LÜSCHER *et al.* 2009a) um damit eine nachhaltige Bodennutzung sicherzustellen. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei, dass alle am Prozess beteiligten Akteure begrifflich eine gemeinsame Sprache finden.

2 Rahmenbedingungen zur Beurteilung der nachhaltigen Bodennutzung

Zur Beurteilung einer nachhaltigen Bodennutzung wird auf europäischer Ebene oft das Indikator-Rahmenprogramm DPSIR (Abkürzung für Driving forces, Pressure, State, Impact and Response nach EEA 1999; vgl. Abb. 1) verwendet. Damit werden unter anderem Bodenschutzprobleme erfasst, deren zeitliche Veränderungen überwacht sowie die dahinter stehenden Kräfte, Einflüsse und Aktionen kont-

D	Driving forces	Vermehrte Nutzung der Ressource Holz durch boden-gestützte Holzernte
P	Pressure	Auf und in den fruchtbaren Boden wirkende Kräfte
S	State	Struktur- und Eigenschaftsveränderungen im Boden in Abhängigkeit von statischen und dynamischen Parametern
I	Impact	Langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit mit negativen Folgen für Waldwachstum und -verjüngung
R	Response	Massnahmen wie bspw. Ausbildung und Sensibilisierung der Akteure, Vorgaben zu Holzernteverfahren, zum Einsatz von Maschinen sowie zur Maschinenteknik

Abb. 1. DPSIR-Modellansatz (EEA 1999) mit konkreter Abstimmung auf die Holzerntemassnahmen.

rolliert und gesteuert. Das Modell kann auch verwendet werden, um Umweltbelastungen und Umweltschutzmassnahmen darzustellen. Im Folgenden wird dieser Ansatz zur Beurteilung der mechanischen Belastung des Waldbodens durch die Holzerntemassnahmen eingesetzt. Die Systembetrachtung soll visualisieren, wie der Waldboden im Umfeld von Waldbestand, Waldstandort bis zur Holznutzung über die Systemgrenzen hinweg beeinflusst wird.

Im System «Ressourcennutzung Holz» sind, bezogen auf das Modell DPSIR (Abb. 2), die Holzernte und der Maschineneinsatz die treibenden Kräfte (D). Sie sind Ursache der potenziellen Belastung (P), die im Boden zu einer Veränderung (ΔS) verschiedener Bodeneigenschaften führt. Die Wirkung solcher Veränderungen ist besonders im Hinblick auf eine allfällige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit (I) zu beurteilen und zu bewerten. Zu diesem Zweck verwenden wir für die konkrete Umsetzung in der Praxis zuvor klar definierte Spurtypen, die es erlauben, durch den Maschineneinsatz entstehende Fahrspuren zu unterscheiden (Tab. 1). Im Vergleich mit bekannten Referenzgrössen lassen sich diese Spurtypen als wirkungsorientiertes Mass der Bodenveränderung nutzen. Je nach Grad der Beeinträchtigung werden entsprechende Massnahmen

(R) erforderlich, die rechtzeitig einzuleiten bzw. umzusetzen sind.

Dieser Modellansatz zeigt einen Weg für eine direkte Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Forstwirtschaft, Gesellschaft und Politik. Ebenfalls lässt sich daraus eine thematische Strategie für den Wissenstransfer ableiten (LÜSCHER *et al.* 2008a und b).

Der Boden steht über die Wurzeln der Bäume in einer engen Verbindung mit dem Waldbestand. Ein Waldbestand setzt sich aus oberirdischen Teilen (Stamm, Krone) und einem unterirdischen Teil, dem Wurzelsystem, zusammen. Das Wurzelwachstum muss sich, der baumartenspezifischen Wurzelarchitektur folgend, vom Sämling bis zum Altbestand ungestört im Boden entwickeln können und darf einzig durch natürliche Eigenschaften beeinflusst werden. Der Oberboden (Humus) mit seinen typischen Eigenschaften wird durch den Streueintrag aus dem Bestand wesentlich beeinflusst. Die standortsspezifische Humusform bildet das Keimbeet und den Wurzelraum für die Verjüngung einer nächsten Baumgeneration. Umsatzraten von Stoffen aus Wurzelwachstum und -erneuerung sind weitere Grössen, die eine interaktive Verknüpfung der beiden Systeme bewirken. Unter dem Einfluss der Standortfaktoren ergibt sich als übergeordnete Einheit

ein Waldstandort. Mittels unterschiedlicher Ernteverfahren wirken bei der Holznutzung durch den Maschineneinsatz Kräfte auf den Boden, die ein erkennbares Spurbild hinterlassen (vgl. Kap. 4.2). Dabei erfolgt eine Beeinträchtigung der Bodeneigenschaften und allenfalls auch der Bodenfruchtbarkeit. Ein ökologischer Schaden liegt vor, wenn die Bodenfruchtbarkeit langfristig beeinträchtigt wird. Die gezielte Ausbildung und Sensibilisierung aller verantwortlichen Akteure soll zur Minimierung von Bodenschäden beitragen.

3 Standortkundliche Voraussetzungen für den Schutz des Bodens

Der im Umweltschutzgesetz im Zusammenhang mit der Bodenfruchtbarkeit weitsichtig erwähnte «Standort» – hier ein «Waldstandort» – stellt ein System dar, das «Waldbestand» und «Boden» über die Standortfaktoren mit gegenseitiger Wechselwirkung verbindet. Dieser Bezug zum Standort bzw. zu den damit verbundenen bodenkundlichen Voraussetzungen, wie ihn der Gesetzgeber vorgibt, ist für eine nachhaltige Bodennutzung zentral.

So wurden beispielsweise im Merkblatt für die Praxis Nr. 45 der WSL (LÜSCHER *et al.* 2009b) die typischen Humusformen (Abb. 3) und auch die Vernässungsmerkmale (Abb. 6) beschrieben und abgebildet. Die Humusformen erlauben erste Hinweise auf die Befahrungsempfindlichkeit der Böden. Vernässungsmerkmale zeigen eine geringe oder sich verschlechternde Leitfähigkeit für Wasser und Luft im Porensystem des Bodens an. Oxidations- und Reduktionsprozesse verursachen sichtbare Farbmuster im Boden. Die Tiefe ihres Auftretens und ihre Ausprägung geben Hinweise auf die Durchlüftungssituation bzw. Vernässung im Wurzelraum und eine Bewertung erfolgt über den Vernässungsgrad (WALTHERT *et al.* 2004).

Die Ursache für das Auftreten von Vernässungsmerkmalen ist die gehemmte Wasserdurchlässigkeit bzw. das Stauwasser. Der Grund für eine gehemmte Wassersickerung kann im Bodenaufbau liegen, ist möglicherwei-

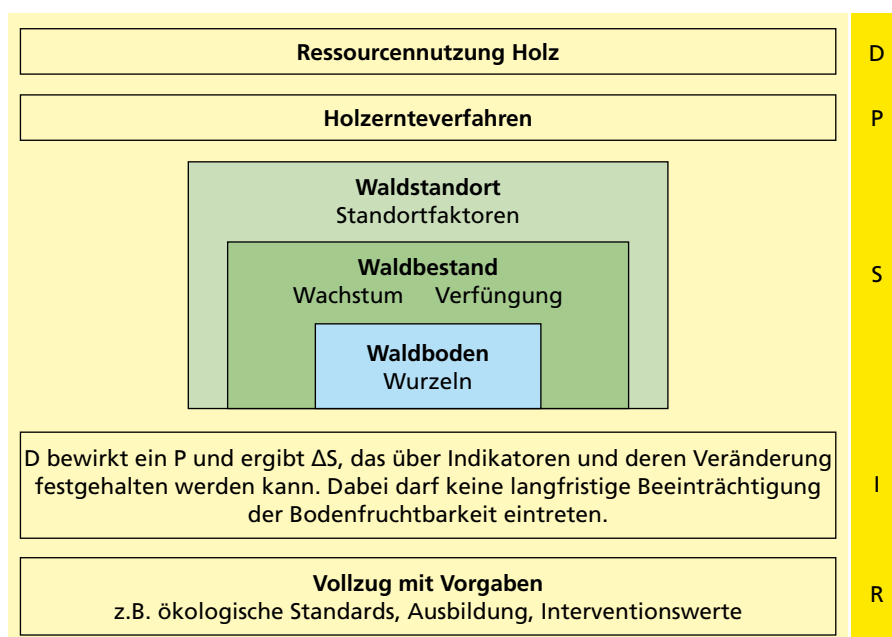


Abb. 2. Systembetrachtung im Rahmen der DPSIR-Indikatoren.

Tab. 1. Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen.

Kriterium	Spurtyp 1	Spurtyp 2	Spurtyp 3
Aufbau Oberboden	nicht gestört	+/- gestört	gestört
Spureintiefung *	bleibt in Oberbodenhorizonten (5 bis max. 10 cm)	bleibt in Oberbodenhorizonten (meist < 10 cm)	reicht bis in Unterbodenhorizonte (> 10 cm)
Verformung	keine **	Ansätze von seitlichen Auspressungen des Oberbodens	ausgeprägte seitliche Aufwölbungen
Farbe (Vernässungsmerkmale)	Vernässungsmerkmale je nach den standörtlichen Voraussetzungen vorhanden		

* Hauptkriterium ist, bis in welchen Bodenhorizont die Spureintiefung reicht und nicht die eigentliche Spurtiefe in cm.

** teilweise sind Stollenabdrücke sichtbar

se aber auch – meist bei oberflächennahem Auftreten – auf das Befahren mit Holzerntemaschinen zurückzuführen. Grund- und/oder Hangwasser-einflüsse können ebenso Ursache für wechselfeuchte bzw. ständig wassergesättigte Bodenhorizonte sein.

Je nach Bodenaufbau, Bodenmerkmalen und -eigenschaften ergibt sich eine unterschiedliche standortspezifische Beurteilung der Befahrungsempfindlichkeit eines Bodens (Abb. 4).

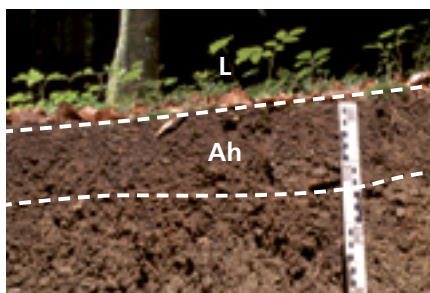
Wo Bodenkarten vorhanden sind, kann – als Planungsgrundlage für den vorsorglichen physikalischen Bodenschutz – die Verdichtungsempfindlichkeit auch in Form von grossmassstäbigen Karten dargestellt werden (vgl. VON ROHR *et al.* in diesem Tagungsband).

4 Umsetzung des Bodenschutzes bedingt Bodenkenntnisse

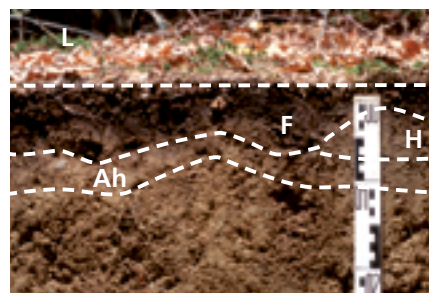
4.1 Bodenaufbau und Bodenwasserhaushalt

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

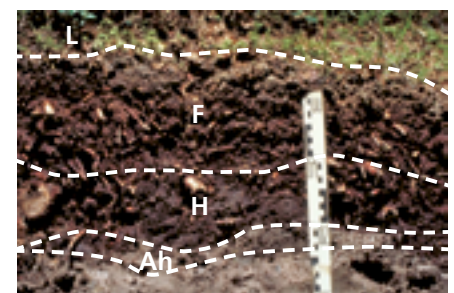
ständig wassergesättigten Horizont. Dabei ist die Tiefe, in der wassergesättigte Zustände auftreten sowohl im Winter als auch im Sommer, in Abhängigkeit vom Vernässungsgrad, deutlich unterschiedlich (Abb. 4). Dies zeigt, dass Vernässungsmerkmale bei der Beurteilung eines Bodens bezüglich Befahrungsempfindlichkeit 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.



Zur Humusform **Mull** (L/Ah) gehört eine grosse biologische Aktivität mit raschem Streuabbau (meistens zwischen ein und zwei Jahren) und inniger Vermischung von Humusstoffen und mineralischer Feinerde. Solche Oberböden sind allgemein mit Nährstoffen gut versorgt, locker gelagert und weisen eine Krümelstruktur auf. Sie sind nach mechanischer Belastung je nach Abbaumilieu unterschiedlich regenerationsfähig.



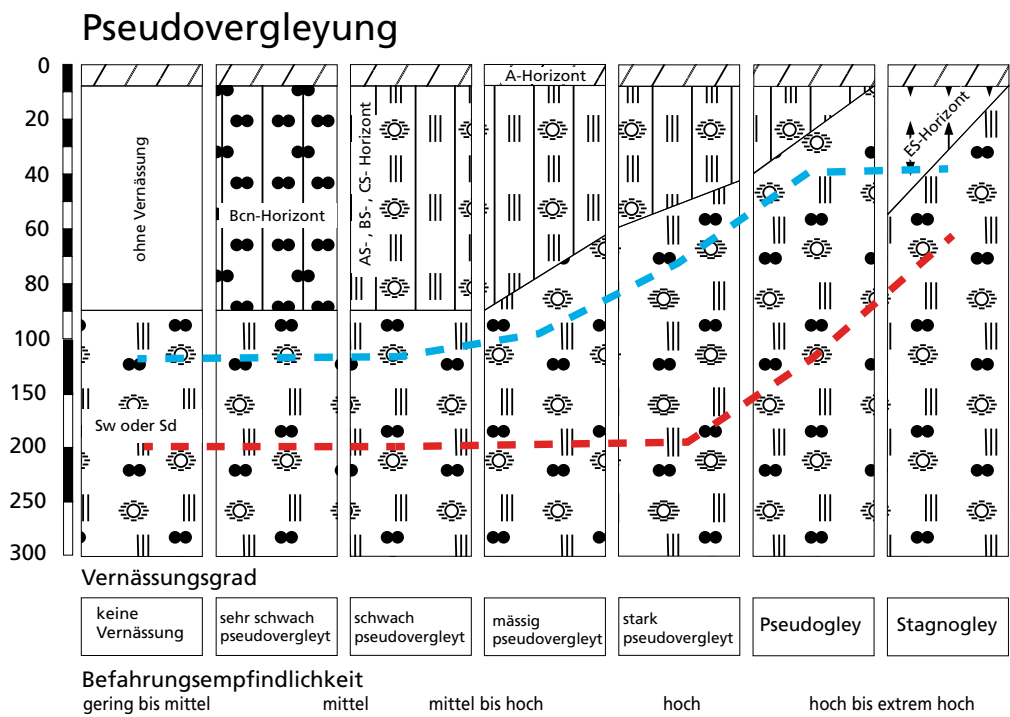
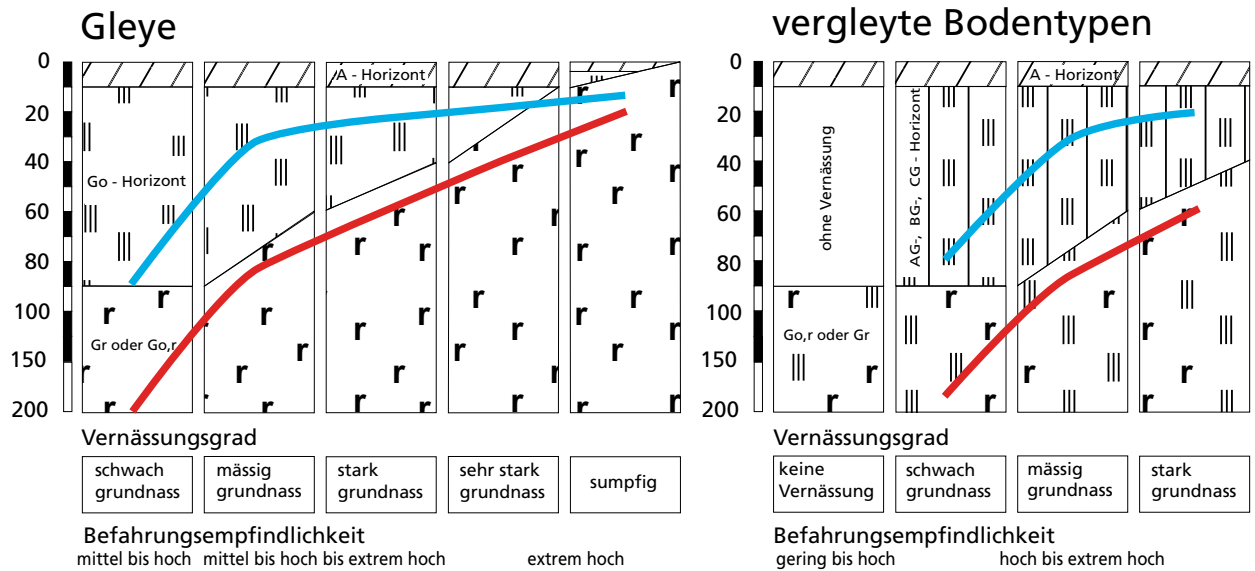
Moder (L/F/[H]/Ah) wird vor allem in krautarmen Laub- und Nadelwäldern mit relativ nährstoffarmen Oberböden oder unter kühlfeuchten Klimaverhältnissen gebildet (Entwicklungszustand zwischen Mull und Rohhumus).



Rohhumus (L/F/H/Ah) ist typisch für extrem nährstoffarme und meist grobkörnige Oberböden unter einer Pflanzendecke, die schwer abbaubare Streu liefert. Dichte, lichtarme Nadelwälder ohne krautigen Unterwuchs oder mit Zwergstrauchbewuchs begünstigen eine Rohhumusbildung ebenso wie ein kühlfeuchtes Klima. Die verschiedenen organischen Auflagehorizonte sind klar unterscheidbar.

Abb. 3. Typische Humusformen im Wald. Um den Waldboden zu schützen, muss sein Aufbau bekannt sein. Die Humusformen geben Hinweise auf die Befahrungsempfindlichkeit und das Regenerationsvermögen.

L Streuhorizont (weitgehend unzersetzte Vegetationsrückstände); F Fermentationshorizont (teilweise zersetzte, mehrjährige Vegetationsrückstände); H Humusstoffhorizont (mehrheitlich organische Feinsubstanz); Ah humushaltiger Oberbodenhorizont (dunkel gefärbt).



- 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
- ||| Rostflecken
- ☉ Fahl-Rot-Färbung
- r Reduktionsfarben

Horizontbezeichnungen

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

Abb. 4. Vernässungsgrad in grund- und stauwasserbeeinflussten Böden mit Bezug zur Befahrungsempfindlichkeit (nach WALTHERT *et al.* 2004 ergänzt aus RICHARD *et al.* 1983).

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 drei bis fünf Tagen nach einem Regenereignis zulässt.

Diese Betrachtungen helfen bei der Planung der Holzernte zur Einschätzung der Befahrungsempfindlichkeit. Zum Zeitpunkt einer Befahrung ist aber immer noch die aktuelle Bodenfeuchte in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf zu berücksichtigen (vgl. Kap. 4.4).

4.2 Spurbilder und Oberboden

Für die Spurtypen als Indikatoren zur Beurteilung der Beeinträchtigung der

Bodenfruchtbarkeit ist die Ansprache und die Unterscheidung von Ober- und Unterboden wichtig (Tab. 1). Der Spurtyp 3 wird durch drei Merkmale charakterisiert, die alle erfüllt sein müssen: 1) Die Spureintiefung reicht bis in den Unterboden, 2) es sind zusätzlich deutlich ausgeprägte seitliche Aufwölbungen (Verformungen) vorhanden und 3) die Spurtiefe beträgt in der Regel mehr als 10 cm. Das Spurbild und die damit zusammenhängende Bodenfunktionalität definieren gemeinsam den Spurtyp 3. Wo dieser auftritt, ist ein ökologischer Schaden im Boden sehr wahrscheinlich, was nach entsprechenden Massnahmen ruft. Der Spurtyp 3 ist für die praktische Arbeit im Wald ein einfacher und zugleich deutlich erkennbarer Indikator für eine starke Bodenbeeinträchtigung: Bis bessere Bedingungen herrschen, sind hier die Holzernarbeiten umgehend einzustellen.

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,

erkenntbar. Je höher der Humusgehalt umso dunkler bis schwärzlich ist in der Regel die Bodenfarbe. In den standortkundlichen Grundlagenwerken der einzelnen Kantone oder im NaiS-Ordner (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 IST-Zustand einer Humusform und der beobachteten Mächtigkeit des Oberbodens lassen sich meist durch waldbauliches Handeln in der Vergangenheit erklären (Abb. 5).

4.3 Relevante Merkmale für die Tragfähigkeit des Bodens

Anhand ausgewählter Bodenmerkmale lässt sich die Tragfähigkeit bzw. die Verdichtungsempfindlichkeit von Waldböden ansprechen, abschätzen und beurteilen. Der Skelettgehalt (Stein-/Kiesgehalt), die Korngrössenzusammensetzung (Bodenart), das Gefüge, der Vernässungsgrad, der

Tab. 2. Grundsätze zur Bewertung der Befahrungsempfindlichkeit.

Befahrungsempfindlichkeit (=Verdichtungs- und Spurbildungsrisiko)	Bodeneigenschaften Durchlässigkeit Skelettgehalt Bodenart Vernässung Vernässungsgrad Humusgehalt	Bodenaufbau (Bodenentwicklung, Bodentypen)	Bemerkungen
gering	übermässig durchlässige, skelettreiche, grobkörnige Böden keine Vernässung	rohe Böden wie: Gesteinsrohböden, Ranker, Rendzinen, Regosole	keine besonderen Massnahmen aktuelle Bodenfeuchte beachten bei nasser Witterung
mittel	Normaldurchlässige Böden mit geringen Skelettgehalten und sehr unterschiedlichen Korngrössen Vorsicht: bei Tonverlagerung wird unter Umständen die Durchlässigkeit reduziert	Verwitterungsböden wie: Braunerden Parabraunerden Podsole	Zeitpunkt der Befahrung bedeutsam: – Bodenfeuchte messen – Boden ggf. abtrocknen lassen
hoch minimale Befahrung	Gehemmt durchlässige Böden Grund-, Hangwasser beeinflusste Böden oft feinkörnige Böden	staunasse Böden wie: Pseudogleye und Stagnogleye sowie Nassböden wie Gleye	Zeitpunkt der Befahrung besonders bedeutsam: nach längeren trockenen Perioden oder bei gut gefrorenem Boden möglichst keine Befahrung oder Beschränkung auf wenige Fahrlinien Reisigmatten anlegen
Extrem hoch Keine Befahrung	Oberflächennah vernässte Böden	Stagnogleye Torfe, Organische Böden	

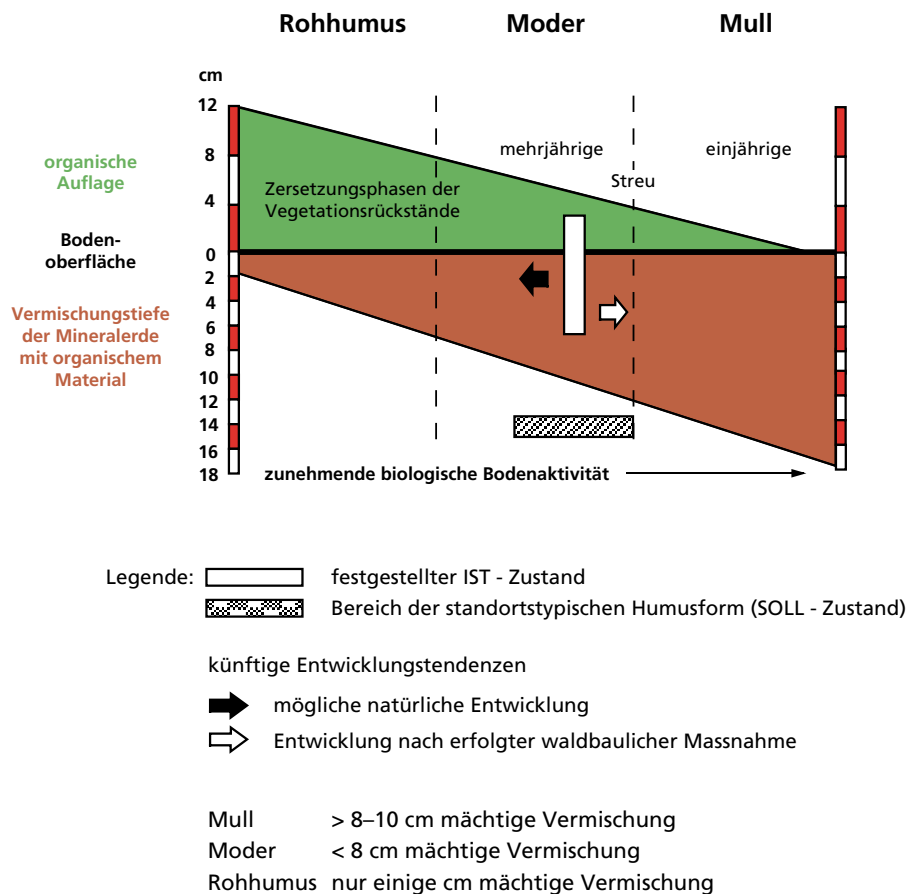


Abb. 5. Typische Humusformen mit organischer Auflage und Vermischungstiefe der Mineralerde mit organischem Material.

Humusgehalt und vor allem die aktuelle Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Befahrens sind dafür die massgeblichen Kriterien. Die Befahrungsempfindlichkeit wird von gering über mittel bis hoch beziehungsweise extrem hoch (nicht befahrbar) eingestuft (Abb. 4 und Tab. 2). Diese Einteilung erlaubt es, zu beurteilen, wie tragfähig ein Boden ist, was vor allem bei der Planung von Feinerschliessungssystemen wie auch bei umfassenden Holzerntemassnahmen sehr wichtig ist. Dieses Vorgehen wurde im Kapitel 4.1 bereits kurz erwähnt.

Skelettgehalt

Zum Skelettgehalt (Stein-/Kiesgehalt) eines Bodens werden alle mineralischen Bodenbestandteile mit einem Durchmesser von mehr als 2 mm gezählt (Kiesel, Steine und Blöcke). Mit zunehmendem Skelettgehalt nimmt der Feinerdeanteil und somit das für die Wurzeln nutzbare Bodenvolumen ab.

Das Skelett hat eine Stützfunktion und verleiht dem Boden eine gute Stabilität gegenüber mechanischen Belastungen. Ein stark skeletthaltiger Boden ist beim Befahren mit schweren Maschinen widerstandsfähiger gegen Verdichtung als ein Boden mit geringerem Skelettgehalt. Ab 50 %_v Skelett kann von einem unempfindlichen Boden und damit von einem sehr geringen Verdichtungsrisiko ausgegangen werden.

Bodenart und Gefüge

Die Körnung, auch als Bodenart bezeichnet, kann zur groben Beurteilung des Verdichtungsrisikos verwendet werden. Sie ist Ausdruck der prozentualen Verteilung von Ton, Schluff und Sand in der Feinerde. Je feinkörniger ein Boden ist, desto plastischer und empfindlicher reagiert er – dies auch in Abhängigkeit vom Wassergehalt – auf eine mechanische Belastung.

Tonböden sind im trockenen Zustand extrem hart und tragfähig. Mit zunehmender Feuchtigkeit werden sie plastisch und stärker verformbar, was ihre Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung erhöht. Zudem binden Tonböden das Bodenwasser in den Feinporen sehr stark, trocknen also langsamer aus und benötigen nach einem Regen mehr Zeit als

Messnetze mit laufend aktualisierten Werten zur Bodenfeuchte

Folgende Adressen (Auswahl) sind zur Zeit aktiv und berücksichtigen teilweise auch Waldstandorte:

- Kt. SO, AG, BL (Nordwestschweiz): www.bodenmessnetz.ch; Abfrage 1.9.2013
Messstationen im Wald sind zur Zeit in Breitenbach (SO), Dulliken (SO) und Etziken (SO).
- Kt. AI, AR, GL, GR, SG SH TG, ZH, FL (Ostschweiz): 17 Stationen im Freiland www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch; Abfrage 1.9.2013
- Kt. BE: 6 Stationen im Freiland http://www.vol.be.ch/vol/de/index/landwirtschaft/landwirtschaft/bodenschutz/bodenzustand/messwerte_bodenfeuchte.html; Abfrage 1.9.2013
- Kt. LU: 6 Stationen im Freiland http://www.umwelt-luzern.ch/index/themen/bodenschutz/messnetz_bodenfeuchte.htm; Abfrage 17.10.2013
- Kt. UR: <http://www.boden-uri.ch>; Abfrage 1.9.2013 (1 Station im Freiland)
- WSL, LWF: http://www.wsl.ch/info/organisation/fpo/lwf/results/data/swc_DE; Abfrage 1.9.2013
Wassergehaltmessungen auf den Stationen (Wald): Bettlachstock (SO), Vorderwald (AG), Othmarsingen (AG), Schänis (SG), Davos (GR), Celerrina (GR), Beatenberg (BE) und Lausanne (VD)

andere Böden, bis sie wieder schonend befahren werden können.

Schluffböden erreichen bei Niederschlägen den plastischen Bereich wesentlich früher als Tonböden. Sie sind deshalb sehr empfindlich und im zeitlichen Ablauf rasch gefährdet. Nach einem Starkregen können sie wegen ihres grossen Anteils an Fein- und Mittelporen kaum vor drei Tagen bis zu zwei Wochen später schonend befahren werden.

Reine Sandböden 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.

Das Bodengefüge bildet sich unter dem Einfluss von Bodenlebewesen sowie durch chemische und physikalische Prozesse. Je nach Form und Anordnung der festen Bodenbestandteile unterscheidet sich der Zusammenhalt der Bodenpartikel und damit die Reaktion auf eine Belastung des Bodens u.a. durch Forstfahrzeuge. Je nach Gefügeform besitzt ein Boden ein unterschiedlich grosses und verzweigtes Hohlraumsystem. Dieses ergibt eine für natürlich gewachsene Böden typische zum Teil lockere Lagerung. Besonders ausgeprägt ist dies beim Krümelgefüge in biologisch aktiven Oberböden, das gegenüber Befahrung oft empfindlich reagiert, umgekehrt aber auch regenerationsfähig ist. Durch das Gefüge werden wichtige Eigenschaften wie der Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt sowie die Wasserdurchlässigkeit beeinflusst.

Vernässungsmerkmale und Vernässungsgrad

Zu den Vernässungsmerkmalen gehören Mangankonkretionen, Fahl-Rot-Färbungen (Marmorierungen), Rostflecken in wechselfeuchten Bereichen und Reduktionsfarben (Abb. 6), entstanden in Horizonten mit ständiger Wassersättigung.

Um eine nachvollziehbare und einheitliche Beurteilung der Vernässung zu gewährleisten, wird die in Abbildung 4 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.

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 Tragfähigkeit des Bodens nimmt mit zunehmendem Vernässungsgrad ab (Abb. 4).

Humusgehalt

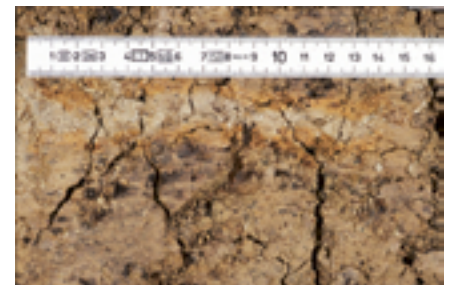
Der Humusgehalt bezeichnet den Gehalt an organischer Substanz in einem Boden. Er kann in weiten Grenzen schwanken und variiert je nach biologischer Bodenaktivität, Bodenaufbau, Bodenfeuchtigkeit, Pflanzendecke, Klima und Waldnutzung. Als Faustregel gilt: je dunkler die Farbe der Matrix, desto höher der Gehalt an organischer Substanz.

Das mechanische Verhalten von Humus ist mit demjenigen von Ton vergleichbar. Je höher der Humusgehalt, desto plastischer wird sich der Boden bei entsprechend höheren Wassergehalten unter mechanischer Belastung verhalten. Je höher der Humusgehalt des Bodens ist (jedoch unterhalb der Grenze zu anmoorigen Bedingungen),



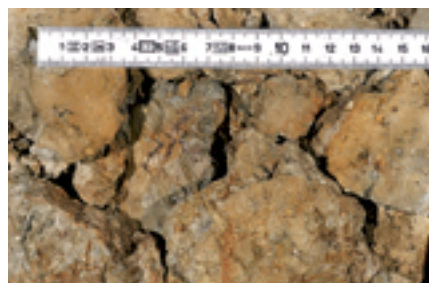
Mangankonkretionen

Die kleinen dunkelviolett bis schwarzen Flecken kennzeichnen die schwächste Stufe der Vernässung.



Marmorierungen/Fahl-Rot-Färbungen

Marmorierungen/Fahl-Rot-Färbungen entstehen bei einem kleinräumigen Wechsel von gebleichten und rostfarbigen Zonen, bedingt durch örtliche Verdichtungen.



Rostflecken

Diffuse Rostflecken sind Hinweise von mittelfristigen Durchlüftungsproblemen.



Reduktionsfarben

Die blaugrauen Reduktionsfarben entstehen dort, wo ein Bereich des Bodens ständig wassergesättigte Poren aufweist.

Abb. 6. Die Vernässungsmerkmale zeigen die Durchlüftungssituation im Boden. Die Ursache der gehemmten Wasserdurchlässigkeit kann befahrungsbedingt sein, kann aber auch im Unterboden unter natürlichen Bedingungen vorkommen.

Die hier aufgeführten Quellen enthalten verschiedene, vertiefte Grundlagen und Ausführungen zum Thema:

- BAFU Umwelt-Wissen 2014: Physikalischer Bodenschutz im Wald. (in Vorbereitung, LÜSCHER *et al.* 2014)
In diesem Handbuch wird von den gesetzlichen Vorgaben und den bodenkundlichen Grundlagen ausgegangen. Im Weiteren werden ökologische und ökonomische Aspekte erläutert bis zu Hinweisen und Anleitungen zur praktischen Umsetzung des Bodenschutzes.
- Merkblatt für die Praxis Nr. 45, 2010: Das Merkblatt «Physikalischer Bodenschutz im Wald» fasst in leicht verständlicher Weise die wichtigsten Hinweise zusammen, mit denen sich die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten lässt (LÜSCHER *et al.* 2009b).
- Waldböden der Schweiz, 2004 ff: Bände 1–3
In drei Bänden werden 95 ausgewählte Böden morphologisch, physikalisch und chemisch charakterisiert. Die Daten werden bodengenetisch und -ökologisch interpretiert. Allfällige ökologische Risiken u.a. Hinweise zur Verdichtungsgefährdung werden aufgezeigt. Durch Analogieschlüsse zu den dokumentierten Böden lassen sich Eigenschaften an beliebigen Waldstandorten abschätzen. Im Grundlagenteil des ersten Bandes werden die morphologischen Bodenmerkmale z.B. Vernässung, Gefüge, Körnung, etc. eingehend erläutert (WALTHERT *et al.* 2004; BLASER *et al.* 2005; ZIMMERMANN *et al.* 2006).
- Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz (Lokalformen), 1978ff Sammlung von 23 Profilen (Lokalformen) mit bodenphysikalischen Daten u.a. Desorptionskurven (Zusammenhang zwischen der Sauspannung und dem Wassergehalt bei einem Austrocknungsvorgang), z.T. mit Sauspannungsmessungen (im Gelände erhoben) (RICHARD und LÜSCHER 1983).
- Waldböden – Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz (2013): Davon 15 Böden aus der Schweiz. Auf vier Seiten werden pro Standort die wichtigsten Informationen zusammengestellt u.a. mit einer einfachen Risikoabschätzung (3 Stufen) bezüglich Trockenstress, Luftmangel, Nährstoffmangel, Verdichtung und Erosion (LEITGEB *et al.* 2013).
- Standorte der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF) der WSL (2003): <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=bericht&nr=276>
ausgewählte LWF-Flächen mit Wassergehaltsmessungen (vgl. Kap. 4.4; WALTHERT 2003)

ten Bodeneigenschaften die Geschwindigkeit, mit der sich Änderungen der Bodenfeuchte einstellen.

Die Bodenfeuchte kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfasst werden, entweder misst man den Wassergehalt oder die Saugspannung. Während der Wassergehalten Wasseranteil im Porenraum eines bestimmten Bodenvolumens darstellt (ausgedrückt in Volumenprozenten, %_v), beschreibt die Saugspannung diejenige Kraft (physikalisch ausgedrückt ein Unterdruck), die benötigt wird, um dem Boden Wasser entziehen zu können.

Die Saugspannung stabilisiert die festen Bodenteilchen mit zunehmendem Unterdruck immer stärker und hat damit einen direkten Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit des Bodens. Bei hoher Saugspannung ist die Tragfähigkeit des Bodens viel grösser und die Gefahr von Bodenschäden durch Verdichtung klein. Hingegen ist bei feuchtem oder gar nassem Boden und der damit verbundenen geringen Saugspannung die Verdichtungsgefährdung viel grösser.

Die Saugspannung wird mit einem sogenannten Tensiometer ermittelt. Die Masseinheiten für die Saugspannung sind cmWS (cm Wassersäule), hPa (Hektopascal) oder – diese Druckeinheit wird heute am häufigsten verwendet – cbar (Centibar). Die Saugspannung als Mass für die aktuelle Bodenfeuchte ermöglicht eine Bewertung der Tragfähigkeit und damit der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens.

Folgende Saugspannungsbereiche sollen für Akteuren, die mit Böden in Land- und Forstwirtschaft sowie im Bauwesen arbeiten, eine Orientierungshilfe sein und standardmässig in Entscheidungsprozesse miteinbezogen werden.

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

Das Befahren eines Bodens ist ab einer Saugspannung von 10 cbar grundsätzlich möglich. Beim Einhalten dieser Belastungsgrenze kann mit eher leichten Maschinen und optimaler Berei-

desto geringer wird das Verdichtungsrisiko durch das Befahren. Ähnlich wie Tone, zeigen stark humose Böden erst bei sehr hohen Wassergehalten viskoplastisches Verhalten.

4.4 Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Befahrens

Der Boden besteht aus festen Bestandteilen (Matrix) und Hohlräumen. Diese bilden ein zusammenhängendes Porensystem für den Gas- und Wasserhaushalt im Boden. Bei Wassersät-

tigung (z.B. nach starken Niederschlägen, zum Zeitpunkt der Schneeschmelze oder in der Vegetationsruhe beim Ausbleiben der Transpiration) sind oft alle Poren mit Wasser gefüllt. Bedingt durch die Schwerkraft entleeren sich grosse Poren aber sehr schnell. In den mittleren und feinen Poren hingegen verbleibt das Bodenwasser aufgrund der hier wirkenden Kapillarkräfte. Der Anteil wassergesättigten Porenraums eines bestimmten Bodenvolumens ist ein Mass für die Bodenfeuchte, die stark von der jeweils aktuellen Witterung abhängt. Daneben bestimmen hauptsächlich die vorgängig erwähn-

fung eine bodenschonende Befahrung sichergestellt werden. Für schwere Maschinen sind höhere Saugspannungen einzuhalten.

Die Bodenfeuchte wird in der Regel in 35 cm Tiefe bestimmt, d.h. an der theoretischen Grenze des Unterbodens. Im Wald kann es zweckmässig sein, sich auf eine zusätzliche Messung im Bereich des Oberbodens abzustützen, vor allem wenn der Oberboden nicht bis 35 cm Tiefe reicht.

Als Alternative zur Saugspannungsmessung kann der Wassergehalt einfach mit einem TDR-Gerät (Time Domain Reflectometry) bestimmt werden. Die Interpretation des Wassergehaltes hinsichtlich Befahrungsempfindlichkeit ist beispielsweise mit dem Informationssystem ProFor (ZIESAK 2004) der Technischen Universität München möglich. Dabei wird mittels Kennziffern der Forstmaschine inklusive Reifen und spezifischer Bodendaten (vgl. Kap. 4.3) ein Grenzwassergehalt ermittelt, der ein bodenschonendes Befahren erlaubt.

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, vereinzelte Stationen auch im Wald) können direkt im Internet abgerufen werden. Diese Informationen dienen als wichtige Hinweise zu witterungsbedingten, auch saisonalen Tendenzen. Sie sind wesentliche Entscheidungshilfen für einen bodenschonenden Arbeitseinsatz.

5 Folgerungen

Die Beeinträchtigungen des Waldbodens durch mechanische Belastung lassen sich mittels dreier klar definierter Spurtypen beurteilen und bewerten. Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität wurde es möglich, den Spurtyp 3 zu definieren, dessen Auftreten ein eindeutiges Signal für einen ökologischen Schaden im Boden ist und nach ent-



Abb. 7. Fahrspur mit Vernässungsmerkmalen. Mangankonkretionen, Rostflecken und Reduktionsfarben (graublau) sind ein Hinweis auf die eingeschränkte Durchlüftung. Durch das Befahren wurde der Porenraum verkleinert und die Porenkontinuität unterbrochen.

sprechenden Massnahmen ruft. Damit ist für die praktische Arbeit im Wald ein einfacher Indikator gegeben, an dem sich die Praktiker orientieren können: Beim Auftreten vom Spurtyp 3 sind die Holzerntearbeiten aus bodenökologischer Sicht zu unterlassen. Damit steht für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes ein Instrument zur Verfügung, womit die Umsetzung und die Kommunikation über die zu treffenden Massnahmen gefördert und objektiviert wird. Dazu sind aber Kenntnisse der bodenkundlichen Grundlagen nötig. Erst damit lässt sich eine nachhaltige Bodennutzung direkt im Gelände umsetzen.

Beim Fehlen der auf Basis von detaillierten Bodenkarten erstellten Verdichtungsempfindlichkeitskarten (vgl. von ROHR *et al.* in diesem Tagungsband) kann auch mit Bodenkennwerten die Verdichtungsempfindlichkeit vorsorglich abschätzt und diese als Planungsgrundlage u.a. für die Feinerschliessung verwendet werden (vgl. FREULER in diesem Tagungsband).

In den vergangenen Jahren führten viele Kantone und die WSL umfassende Aus- und Weiterbildungen zur Planung und Ausführung von Holzernte-

massnahmen durch. Diese verbesserten bei mehr als 1800 Forstleuten und Unternehmern die bodenkundlichen Grundkenntnisse. Diese Massnahmen stärken, nebst einer Wissensvermehrung, bei vielen Praktikern auch das Bewusstsein für das Vorsorgeprinzip in der forstlichen Tätigkeit, was der präventiven Grundhaltung in der Schweizerischen Umweltgesetzgebung entspricht.

Es ist festzuhalten, dass sich Bodenschädigungen durch konsequente Planung und durch Nutzung der Feinerschliessung unter Berücksichtigung des Standortes minimieren lassen. Wenn zum Zeitpunkt des Befahrens von Waldböden die aktuelle Bodenfeuchte als Entscheidungsgrundlage berücksichtigt wird, kann eine Vielzahl von Beeinträchtigungen verhindert werden. Die Aufgaben der verschiedenen Verantwortungsträger für den physikalischen Bodenschutz werden im WSL Merkblatt für die Praxis Nr. 45 zum Thema «Physikalischer Bodenschutz im Wald» (LÜSCHER *et al.* 2009b) eingehend beleuchtet.

Mit dem aufgezeigten Weg kann eine nachhaltige Bodennutzung nach dem DPSIR-Prinzip gewährleistet werden.

6 Literatur

- BAFU (Hrsg.) 2013: Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizerwaldes. Bern, Bundesamt für Umwelt. 66 S.
- BLASER, P.; ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; WALTHERT, L.; LÜSCHER, P., 2005: Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep Verlag. 920 S.
- EEA, European Environment Agency, 1999: Environment in the European Union at the turn of the Century. Copenhagen, Denmark, EEA.
- FREHNER, M.; WASSER, B.; SCHWITTER, R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Vollzug Umwelt, Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 564 S.
- FREULER, A., 2013: Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald. Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. 99–102.
- LEITGEB, E.; REITER, R.; ENGLISCH, M.; LÜSCHER, P.; SCHAD, P.; FEGER, K.H., (Hrsg.) 2013: Waldböden – Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. WILEY-VCH Verlag. 387 S.
- LÜSCHER, P.; SCIACCA, S.; THEES, O., 2008a: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. LWF aktuell 67/2008 Jg. 15. 19–21.
- LÜSCHER, P.; SCIACCA, S. UND FRUTIG, F., 2008b: Bodenschutz-Ausbildung in der Schweiz. LWF aktuell 67/2008 Jg. 15. S. 33–34.
- LÜSCHER, P.; BORER, F.; BLASER, P., 2009a: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit von Waldböden. In: THEES, O.; LEMM, R. (Hrsg.): Management zukunftsorientierter Waldnutzung. Beiträge aus einem Forschungsprogramm für die Schweizer Waldwirtschaft. Zürich, Vdf-Verlag. 261–270.
- LÜSCHER, P.; FRUTIG, F.; SCIACCA, S.; SPJEVAK, S.; THEES, O., 2009b: Physikalischer Bodenschutz im Wald: Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Merkbl. Prax. 45: 12 S.
- LÜSCHER, P.; THEES, O.; FRUTIG, F., 2014: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Umwelt-Wissen Nr. Bern, Bundesamt für Umwelt (in Vorbereitung).
- RICHARD, F.; LÜSCHER, P., 1983: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Sonderserie EAFV.
- USG, 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Okt. 1983, AS 1984 1122, SR 814.01. Bern, EDMZ.
- VBBo, 1998: Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens. SR 814.12. Bern, EDMZ.
- VON ROHR, G.; MARGRETH, S.; HAUERT, C., 2013: Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn. Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. 103–106.
- WALTHERT, L.; BLASER, P.; LÜSCHER, P.; LUSTER, J.; ZIMMERMANN, S., 2003: Langfristige Waldökosystemforschung LWF in der Schweiz. Ergebnisse der ersten Erhebung 1994–1999. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=bericht&nr=276>
- WALTHERT, 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.
- ZIESAK, M., 2004: Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Fortstmaschineneinsatz. Lehrstuhl für forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. München. TU München. 130 S.
- ZIMMERMANN, S.; BLASER, P.; WALTHERT, L.; LÜSCHER, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Region Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.

Abstract

Understanding the soil is essential for its protection and sustainable use: Some thoughts on mechanical stress of forest soils

Future policies for sustainable soil use require fundamental reflection to take into account ecological findings, economic activity, technical advances and social demands on forests and forestry. The Swiss Confederation's Forest Policy 2020 specifies conditions for soil protection corresponding to the targets and indicators developed as part of the 'Physical protection of forest soils' project, aimed at protecting soil from irreversible changes. These measures for implementation and enforcement in the cantons are binding and are intended to avoid or minimise long-term soil damage. In this context, basic pedological knowledge is vital to ensure forest soils are used sustainably, and communication with all stakeholders about protection issues is consistent.

Keywords: physical soil protection, soil compaction, soil quality, soil properties, soil fertility