Merkblatt
für die Praxis

ISSN 1422-2876

Eidg. Forschungsanstalt WSL
CH-8903 Birmensdorf

© WSL Birmensdorf, 2009

WSL, Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
E-Mail: eshop@wsl.ch
http://www.wsl.ch/publikationen/

2. Auflage
45
August
2010

Physikalischer Bodenschutz im Wald

Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen

Peter Lüscher, Fritz Frutig, Stéphane Sciacca, Sandra Spjevak und Oliver Thees

Abb. 1. Das Befahren von Waldböden mit Forstmaschinen bewirkt Verdichtungen und Verformungen im Boden. Ziel des physikalischen Bodenschutzes ist, diese Beeinträchtigungen durch verschiedene Massnahmen zu verringern.

Boden ist eine nicht erneuerbare Ressource. Deshalb kommt dem Schutz des Bodens in seiner Funktion als Lebensgrundlage für künftige Generationen eine besondere Bedeutung zu. Böden sind auch im Wald zunehmend durch ein weites Spektrum menschlicher Einflüsse gefährdet. Risiken entstehen insbesondere beim Einsatz von Forstmaschinen in der Holzernte. Langfristige Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit sind möglich. Diese wirken sich nachteilig auf die Funktionen und Leistungen des Waldes und seine nachhaltige Nutzung aus. Darum ist der physikalische Bodenschutz im Umweltschutzgesetz verankert.

Problematik

Gesunde Böden sind eine grundlegende Voraussetzung für die Erhaltung einer umfassenden Nachhaltigkeit im Wald. Sie stellen ein System mit grosser Selbsterhaltungskraft dar und gewährleisten die Erfüllung der Bodenfunktionen. Das unsachgemässe Befahren von natürlich gelagerten Waldböden mit Forstmaschinen verursacht auf einem Grossteil der im Schweizer Wald vorkommenden Böden im Bereich der Fahrspuren tiefgreifende und langfristig wirksame Veränderungen, welche die Bodenfunktionen beeinträchtigen. Eingeschränkte Porenvolumina und Porenvernetzungen verringern die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft. Die Versorgung der Wurzeln mit

Wasser und Luft ist jedoch eine unabdingbare Voraussetzung für die Bodenfruchtbarkeit. Eine reduzierte Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt die Leistungsfähigkeit der Holzproduktion, deren Aufrechterhaltung im Eigeninteresse der Waldeigentümer liegt. Auch die Leistungen des Waldes, an denen ein öffentliches Interesse besteht, wie Klima- und Trinkwasserschutz, sind gefährdet.

Hohe Maschinengewichte führen zu grossen Radlasten und erhöhen damit das Schadrisiko bei der Holzernte. Naturverjüngung im Keimbeet und Wurzelwachstum sind gefährdet. Die nachhaltige Nutzung des Rohstoffes Holz bedingt aus wirtschaftlichen Gründen den Einsatz effizienter Arbeitsverfahren. Diese geraten in Konflikt mit den aus Gründen der Nachhaltigkeit erhobenen Ansprüchen an einen gesunden Waldboden. Diese Problematik erhält auf politischer Ebene zunehmende Aufmerksamkeit, wie beispielsweise im Waldprogramm Schweiz 2004. Bei der Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben und der neusten Forschungserkenntnisse bestehen allerdings Defizite. Diese sollten so behoben werden, dass die Ressource Waldboden vorsorglich geschont wird und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Holzproduktion erhalten bleibt. Die Herausforderung besteht darin, ein Qualitätsmanagement zu entwickeln und in Betrieb und Verwaltung einzuführen, welches einer umfassenden Nachhaltigkeit gerecht wird.

Dieses Merkblatt gibt einen Überblick über die bodenkundlichen Grundlagen und die zu treffenden Massnahmen beim physikalischen Bodenschutz im Wald. Es soll die Akteure in der Praxis informieren, sensibilisieren und die Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben fördern. Es ist wie folgt aufgebaut:

Problematik
Gesetzliche Vorgaben

Was ist Boden?
Funktionen des Bodens
Bodenaufbau
Bodenveränderungen durch mechanische Belastung

Verantwortlichkeiten im physikalischen Bodenschutz
Massnahmen bei der Planung der Holzernte
Massnahmen bei der Maschinentechnik
Massnahmen bei der Arbeitsausführung
Regenerationsmassnahmen
Ökonomische Überlegungen

Gesetzliche Vorgaben

Bodenschutzanliegen werden im schweizerischen Umweltschutzgesetz über die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit definiert (Art. 1 USG). Auf den Wald bezogen heisst dies, dass die Selbsterhaltung der standortstypischen Lebensgemeinschaft Wald mit Naturverjüngung nachhaltig gewährleistet sein muss. In Anlehnung an die Verordnung über Belastungen des Bodens (Art. 2 VBBo) darf das Wurzelwachstum der standortsgerechten Baumarten nur durch natürliche Limiten eingeschränkt werden. Zudem muss die biologische Bodenaktivität den ungehemmten Abbau der Vegetationsrückstände unter den gegebenen standörtlichen Verhältnissen ermöglichen. Wenn der Boden bewirtschaftet wird, sind unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auszuwählen und einzusetzen, dass Verdichtungen vermieden werden, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden (Art. 6 VBBo). Auch die schweizerische Waldgesetzgebung sieht vor, dass die Kantone Massnahmen zur Verminderung physikalischer Belastungen des Bodens treffen müssen, um Waldschäden zu verhüten. Als Waldschäden gelten nach der Waldverordnung Schäden, welche die Erhaltung des Waldes gefährden können, insbesondere auch die physikalischen Belastungen des Bodens (Art. 28 WaV). Zudem müssen die Kantone nach dem Waldgesetz Planungs- und Bewirtschaftungsvorschriften erlassen und dabei den Erfordernissen des naturnahen Waldbaus Rechnung tragen (Art. 20 WaG). Wer bei der Holzernte zumindest aus pflichtwidriger Unvorsicht so vorgeht, dass der Boden nachhaltig verdichtet wird, handelt gegen das Gesetz. Diese strafrechtliche Übertretung wird geahndet (Art. 61 USG).

Was ist Boden?

Böden bilden die oberste Schicht der Erdkruste. Sie reichen in ihrer Mächtigkeit von der Bodenoberfläche bis zum Ausgangsgestein. Boden entsteht durch die Verwitterung von mineralischen Bestandteilen und die Umwandlung von organischen Stoffen durch zahllose Lebewesen. Er 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 Festsubstanz, dem Ausgangsgestein, der Atmosphäre, der Hydrosphäre sowie den Bodenlebewesen und den Pflanzen statt.

Funktionen des Bodens

Boden als Pflanzenstandort
Die Böden dienen den Pflanzen als Wuchsort, wo sie Verankerungsmöglichkeiten, Wasser und Nährstoffe finden. Die Bodenfruchtbarkeit ist deshalb die wohl bedeutsamste Eigenschaft eines Bodens, denn die Vegetation muss sich den natürlichen Gegebenheiten anpassen. In der Forst- und Landwirtschaft stellt der Boden die Produktionsgrundlage dar.

Boden als Puffer und Filter
Gegen Versauerung besitzen Böden eine enorme Pufferkapazität. Sie bilden zudem einen wirksamen Filter für unerwünschte Stoffe, die das Grundwasser belasten und dadurch die Trinkwasserqualität gefährden können. Durch diese Filterwirkung werden viele solcher Stoffe, zum Beispiel Schwermetalle, für eine sehr lange Zeit im Boden gespeichert und können über den Nährstoffkreislauf wieder in die Biosphäre zurückgelangen.

Boden als Lebensraum
Böden sind Lebensraum für unzählige Lebewesen wie Bakterien, Milben, Insekten, Nematoden, Würmer, Pilze usw.

Alle diese Lebewesen bilden eine Zersetzerkette und haben wichtige Funktionen beim Abbau, Umbau und Neuaufbau der organischen Substanz. Darüber hinaus tragen sie durch die Ausscheidung organischer Säuren zur Gesteinsverwitterung sowie zur Mobilisierung von Mikro-Nährstoffen bei. Mykorrhizapilze begünstigen die Wasser- und Nährstoffaufnahme vieler Pflanzen, insbesondere von Waldbäumen. Durch die rege Aktivität der Wurmfauna entstehen Ton-Humus-Komplexe sowie andere günstige Gefügeformen.

Bodenaufbau

Organische Auflagen und Humusformen

Die frischen 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 Of-Horizont, in welchem die Pflanzenreste vermodert (fermentiert) sind und der Oh-Horizont in dem das organische Material vorwiegend bereits zu Huminstoffen abgebaut ist.

Humusformen werden auf der Grundlage von Abfolge und Ausprägung dieser Horizonte definiert (Abb. 2). Mull entsteht bei rascher Zersetzung der Vegetationsrückstände und tiefgründiger Einarbeitung des abgebauten organischen Materials in die mineralische Feinerde. Rohhumus zeichnet sich durch mächtige organische Auflagehorizonte und geringe Durchmischung mit dem darunterliegenden Mineralboden aus. Er entsteht bei einer eingeschränkten biologischen Bodenaktivität. Die Humusform Moder ist eine Zwischenform.

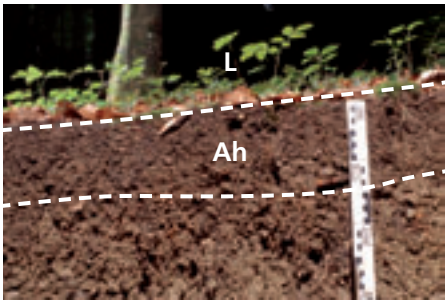
Humusformen sind ein Indikator für das Nährstoffumsetzungsvermögen im Oberboden und damit für die biologische Bodenaktivität an einem Standort. Störungen im Oberboden hemmen Nährstoffumsetzung und -verfügbarkeit. Bei starker Beeinträchtigung ist die Keimbeetfunktion des Oberbodens für die natürliche Waldverjüngung gefährdet. Die Humusformen erlauben erste Hinweise auf die Befahrungsempfindlichkeit der Böden.

Mineralbodenhorizonte

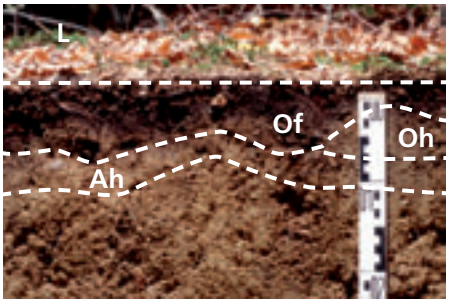
Die Mineralbodenhorizonte werden in Oberboden (A-Horizont) und Unterboden (B-Horizont) eingeteilt. Darunter liegt das Ausgangsgestein (C-Horizont). A-, B- und C-Horizonte bestehen hauptsächlich aus mineralischen Bestandteilen. Diese sind im Oberboden mit organischer Substanz vermischt. Je grösser der Anteil an organischer Substanz im Oberboden ist, umso empfindlicher ist der Boden gegenüber Verdichtung und somit auch gegenüber Befahrung. Die Verdichtung wirkt sich bis in den Unterboden aus, wo die Regenerationsfähigkeit eingeschränkt ist.

Vernässungsmerkmale

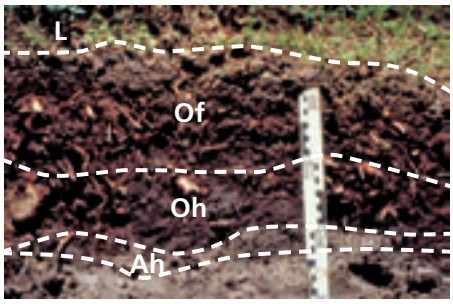
Die geringe und sich ändernde Leitfähigkeit von Wasser und Luft im Porenraum bewirkt Reduktions- und Oxidationsprozesse, welche sichtbare Merkmale im Boden hervorrufen (Abb. 3). Die Tiefe ihres Auftretens und ihre Ausprägung geben Hinweise auf die Durchlüftungssituation bzw. Vernässung im Wurzelraum. Die Dauer der durch Wassersättigung verursachten Phasen mit Durchlüftungsproblemen führt zu unterschiedlich ausgeprägten Vernässungsmerkmalen. Die schwächste Stufe der Vernässung ist gekennzeichnet durch Mangankonkretionen in Form kleiner dunkelvioletter bis schwarzer Flecken. Daneben entstehen in stauwasserbeeinflussten Horizonten Fahl-Rot-Färbungen (Marmorierungen). Diffuse Rostflecken unterschiedlicher Grösse (mm bis cm) weisen auf mittlere Durchlüftungsprobleme hin. Schliesslich entstehen bedingt durch anhaltenden Sauerstoffmangel blaugraue grössere Farbflecken dort, wo der Boden ständig wassergesättigte Poren aufweist (Abb. 4). Eine Durchwurzelung ist hier praktisch ausgeschlossen. Die Ursache der gehemmten Wasserdurchlässigkeit bzw. des Stauwassers kann befahrungsbedingt sein, kann im Unterboden aber auch unter natürlichen Bedingungen vorkommen.



Zur Humusform **Mull (L/Ah)** gehört eine grosse biologische Aktivität mit raschem Streuabbau und inniger Vermischung von Humusstoffen und mineralischer Feinerde (meistens zwischen ein und zwei Jahren). Solche Oberböden sind allgemein mit Nährstoffen gut versorgt und weisen mit einer Krümelstruktur einen günstigen Wasser- und Lufthaushalt auf.

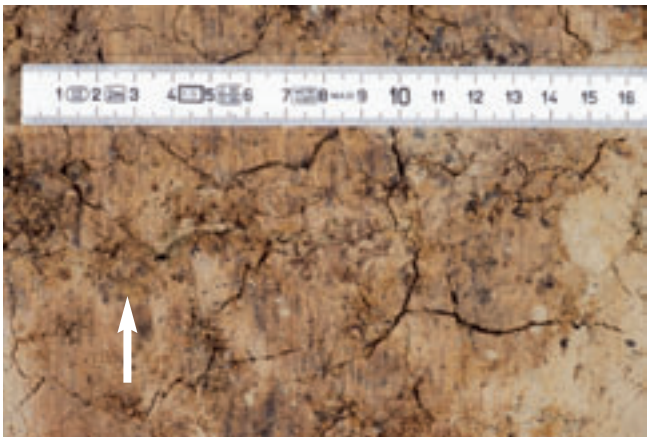


Moder (L/Of/[Oh]/Ah) wird vor allem in krautarmen Laub- und Nadelwäldern mit relativ nährstoffarmen Oberböden oder unter kühlfeuchten Klimaverhältnissen gebildet (Entwicklungszustand zwischen Mull und Rohhumus).

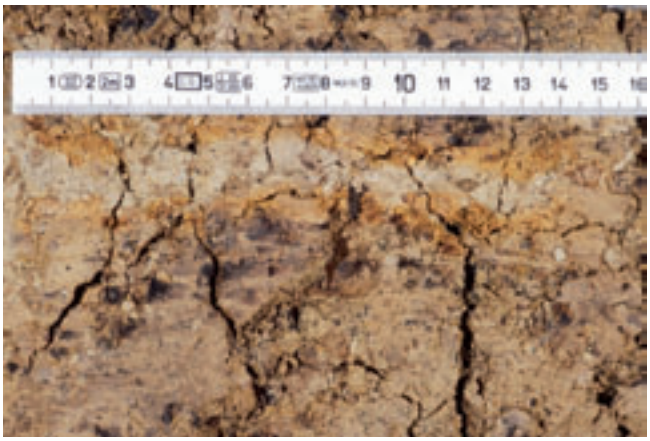


Rohhumus (L/Of/Oh/Ah) ist typisch für extrem nährstoffarme und meist grobkörnige Oberböden unter einer Pflanzendecke, die schwer abbaubare Streu liefert. Dichte, lichtarme Nadelwälder ohne krautigen Unterwuchs oder mit Zwergstrauchbewuchs begünstigen eine Rohhumusbildung ebenso wie ein kühlfeuchtes Klima.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

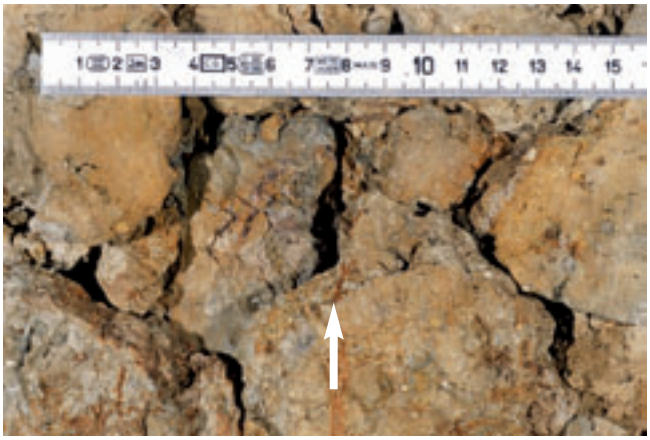
Abb. 2. Typische Humusformen im Wald. Um den Boden im Wald zu schützen, muss sein Aufbau bekannt sein. Die Humusformen geben Hinweise auf die Befahrungsempfindlichkeit und das Regenerationsvermögen.



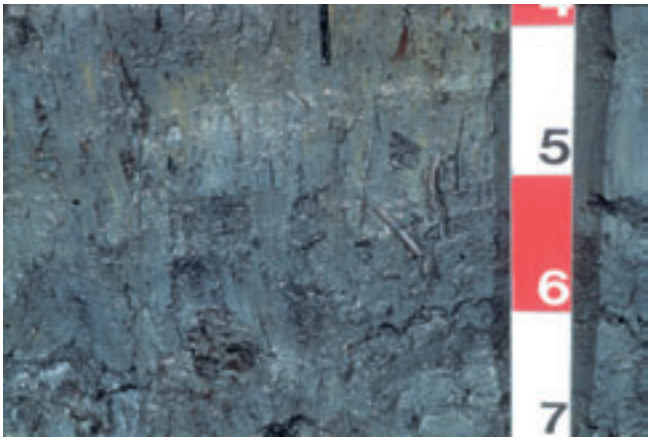
Mangankonkretionen
Die kleinen dunkelvioletten bis schwarzen Flecken kennzeichnen die schwächste Stufe der Vernässung.



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

Abb. 4. Fahrspur mit Vernässungsmerkmalen. Reduktionsfarben (graublau) und Rostflecken sind ein Hinweis auf die eingeschränkte Durchlüftung. Durch das Befahren wurde der Porenraum verkleinert und die Porenkontinuität unterbrochen.

Bodenveränderungen durch mechanische Belastung

Forstmaschinen verursachen Verdichtungen und Verformungen im Boden, welche die Bodenfunktionen beeinträchtigen. Das Porenvolumen und die Porenkontinuität nehmen ab, wobei vor allem das für Wassersickerung und Belüftung des Wurzelraumes wichtige Grobporensystem betroffen ist (Abb. 5). Die Lebensbedingungen für Wurzeln und Bodenfauna werden verschlechtert. Die Wurzeln können den Boden infolge der Verdichtung und wegen des ungünstigen Wasser- und Lufthaushaltes nicht optimal erschliessen und nutzen. Von natürlichen Regenerationsprozessen sind nur sehr langsame Verbesserungen zu erwarten.

Spurtypen – Indikator für das Management des Bodenschutzes

Befahrungsbedingte Veränderungen des Bodens können mit der Ausprägung der sichtbaren Fahrspuren in Zusammenhang gebracht werden. Für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes wurde eine Typisierung der Fahrspuren entwickelt (Abb. 6). Aufgrund mittlerweile wissenschaftlich fundierter Zusammenhänge zwischen Spurbild und Bodenfunktionalität ist es möglich, einen Spurtyp zu definieren, dessen Auftreten ein eindeutiges Signal für einen ökologischen Schaden im System Boden darstellt (Spurtyp 3). Damit ist für die praktische Arbeit im Wald ein einfaches Kriterium gegeben, an dem sich die Akteure orientieren können: Beim Auftreten vom Spurtyp 3 sind die Arbeiten zu unterbrechen.

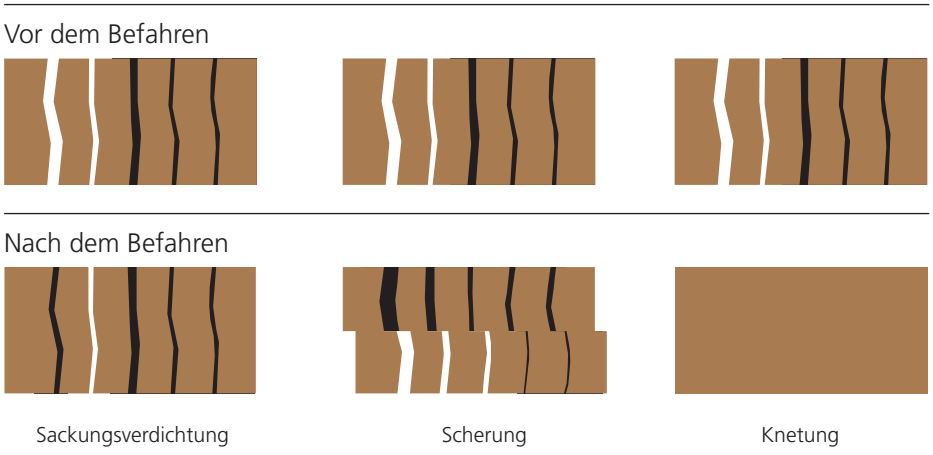


Abb. 5. Das Befahren bewirkt Veränderungen im Boden. Eine Sackungsverdichtung führt zu einer Verringerung des Grobporenvolumens. Bei einer Scherung werden die Bodenporen abgeschert, sie sind danach nicht mehr durchgängig. Knetung bedeutet die Zerstörung der Bodenstruktur (Quelle: Tobias *et al.* 1999, abgeändert).

Spurtyp 1 stellt eine Pressung der organischen Auflagehorizonte in der Form von Reifenabdrücken dar, die Spurtiefe beträgt weniger als 10 cm. 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). Beginnende seitliche Aufwölbungen des Oberbodens (A-Horizont) sind möglich. Der Spurtyp 3 (Abb. 7) wird durch drei Merkmale charakterisiert, die alle erfüllt sein müssen: Spurtiefe in der Regel grösser als 10 cm, bis in den Unterboden reichend und deutlich ausgeprägte seitliche Aufwölbungen vorhanden. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Spurtyp 3 nicht nur eine grössere Tiefenwirkung, sondern auch eine grössere Breitenwirkung aufweist als die Spurtypen 1 und 2.

Die Ansprache der Spurtypen auf den Feinerschliessungslinien erlaubt es, die Arbeitsqualität zu beurteilen und gegebenenfalls Massnahmen zu ergreifen (siehe auch Abb. 11).

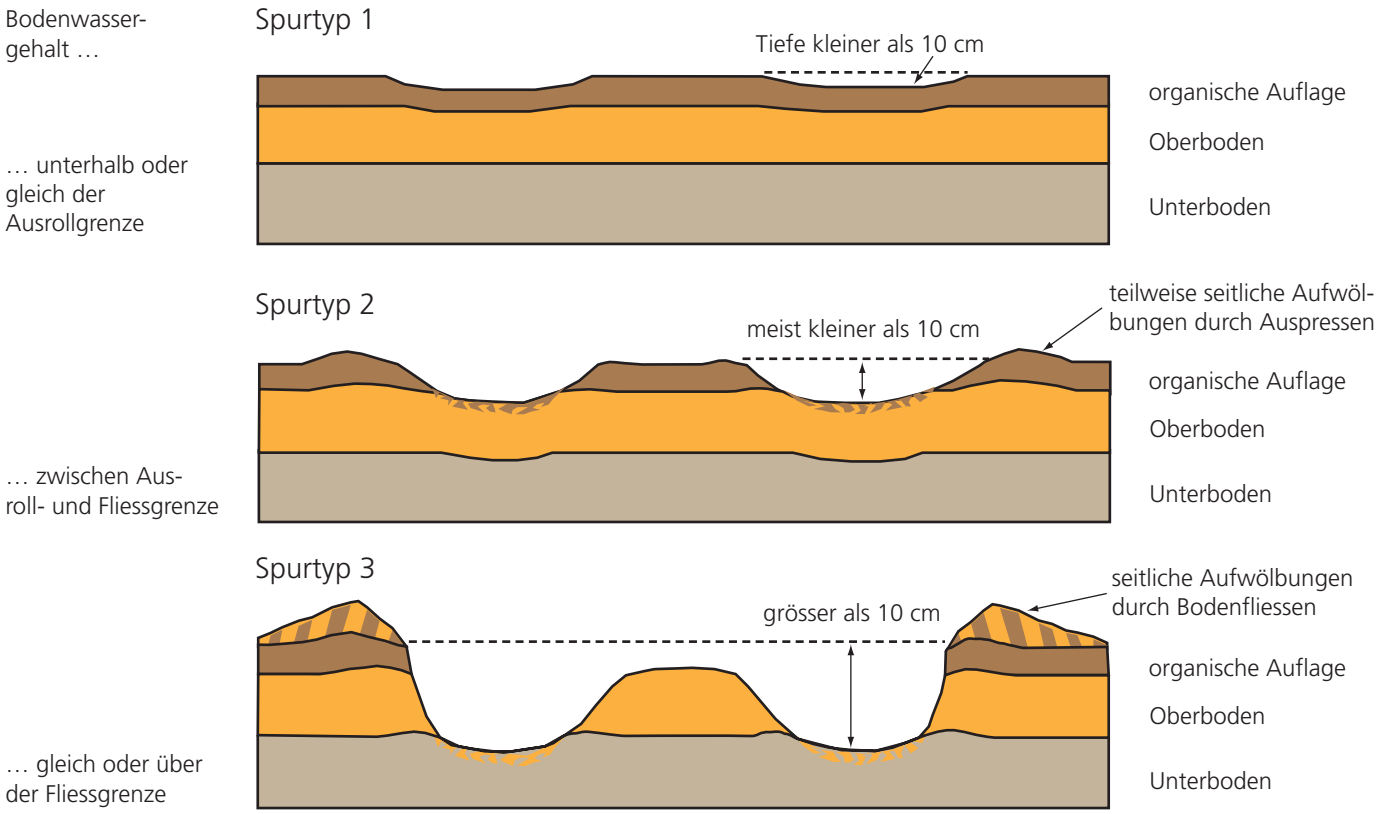


Abb. 6. Visuelle Typisierung der Fahrspuren nach der Art von Veränderungen im Boden.

Abb. 7. Die Fahrspur vom Typ 3 hat eine langfristige Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit zur Folge und stellt einen ökologischen Schaden dar.

Empfindlichkeit der Böden gegenüber Befahrung

Die Verdichtungs- und Verformungsempfindlichkeit eines Bodens hängt von der aktuellen Bodenfeuchte und damit weitgehend vom Witterungsverlauf ab. Weiter spielen folgende Gegebenheiten ein Rolle: Kornverteilung, Steingehalt, Ausprägung der Wechselfeuchte (vgl. Abb. 3), Humusgehalt und Hangneigung. Je höher der Wassergehalt im Boden desto niedriger sind die Reibungskräfte zwischen den Bodenteilchen, was zu einer niedrigeren Tragfähigkeit führt. Als einfache Faustregel gilt für durchlässige Böden (z. B. sandreiche Böden), dass nach einem mittleren Niederschlagsereignis mindestens drei regenfreie Tage abzuwarten sind, bevor das Befahren bodenschonend erfolgen kann. Grobkörnige und/oder steinhaltige Böden mit geringem Humusgehalt im Oberboden sind wenig oder kaum empfindlich. Feinkörnige und/oder steinarme Böden mit grossem Humusgehalt im Oberboden weisen ein grösseres Gefährdungspotenzial auf. Die Bodenempfindlichkeit steigt aber auch mit zunehmender Hangneigung. Gefrorene Böden sind weniger befahrungsempfindlich. Abbildung 8 zeigt, wie verschiedene Bodeneigenschaften die Bodenempfindlichkeit beeinflussen. Ob ein Boden in einem bestimmten Zustand schonend befahrbar ist, hängt auch von der eingesetzten Maschine ab (Gewicht, Bereifung, usw.).

Die Konsequenzen des Befahrens sind nicht nur im Oberboden zu finden, sondern auch im Unterboden. Verdichtungen im Unterboden werden vor allem durch hohe Radlasten verursacht. Untersuchungen mit einem Messgerät, das den Eindringwiderstand des Bodens misst, zeigen eine Zunahme des Eindringwiderstandes bis zu einer Tiefe von 70 bis 80 cm (Abb. 9).

Verantwortlichkeiten im physikalischen Bodenschutz

Für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes sind zahlreiche Akteure verantwortlich (Abb. 10): Waldeigentümer, Forstbetrieb, Forstunternehmer und kantonaler Forstdienst. Der kantonalen Bodenschutzfachstelle obliegt als zuständigem Vollzugsorgan die Überprüfung der einzuhaltenden gesetzlichen Vorgaben. Das BAFU, die Forschungsanstalt WSL und die Ausbildungsstätten bieten Hilfe bei der Umsetzung.

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 in der Phase der Planung die nahezu alleinige Verantwortung. Bei der Arbeitsausführung (Holzernte) ist er auf die Zusammenarbeit mit den jeweils 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 Vorga-

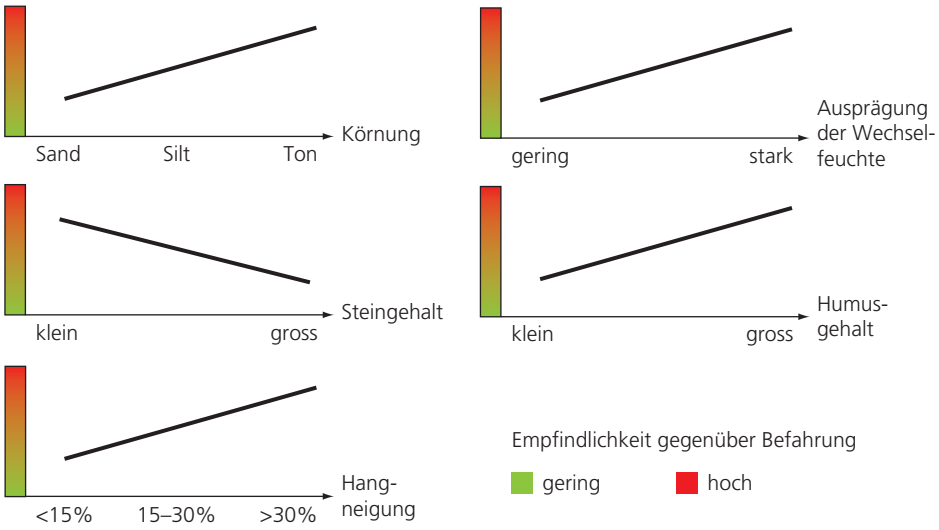


Abb. 8. Einfluss von ausgewählten Bodeneigenschaften und der Hangneigung auf die Befahrungsempfindlichkeit.

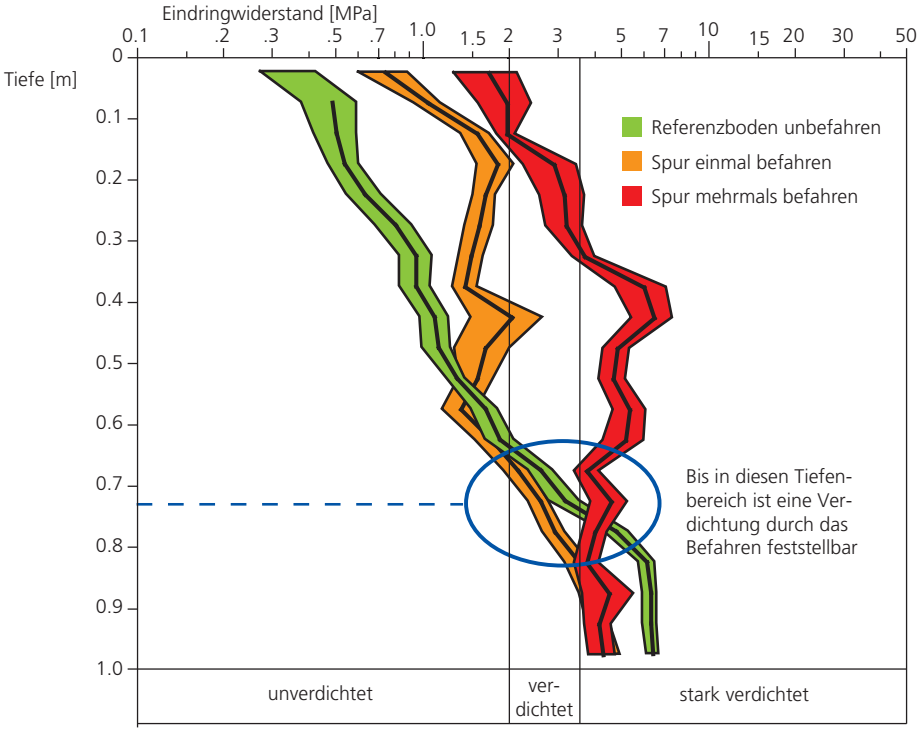


Abb. 9. Eine mechanische Belastung des Bodens wirkt sich bis in grössere Tiefen aus. Verdichtungen können mit einer Messsonde, welche den Eindringwiderstand des Bodens misst, erhoben werden. Verglichen werden ein unbefahrener Boden, eine einmal befahrene Spur und eine mehrmals befahrene Spur, bei gleichmässiger Wassergehaltsverteilung über die gesamte Messtiefe.

Phasen	Aufgaben \ Akteure	Waldeigentümer[1]	Betriebsleiter[2]	Forstunternehmer	Maschinenführer	Forstdienst[2]	Bodenschutzfachstelle
Planung	Betriebsplanung	x	x			x	
	Jahresplanung	x	x			x	
	Feinerschliessungsplanung		x				
	Termin- und Kapazitätsplanung		x				
Steuerung und Durchführung	Verfahrens- und Maschinenwahl		x	x			
	Ausschreibung/Vertragsabschluss		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[5]
	Massnahmenentscheid					(x)[5]	x[5]

[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 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 an den Forstdienst delegiert werden.

Abb. 10. Der physikalische Bodenschutz liegt in der gemeinsamen Verantwortung aller an der Waldbewirtschaftung beteiligten Akteure. Die Abbildung zeigt, wie die Aufgaben grundsätzlich verteilt sind. Die dargestellten Verantwortlichkeiten treffen nicht in jedem Einzelfall zu.

ben zum Bodenschutz ausgeführt werden. Als Träger der Mechanisierung in der Holzernte haben die Forstunternehmer eine besondere Verantwortung für den Bodenschutz.

Maschinenführer: Der Maschinenführer, der für den Forstbetrieb oder Forstunternehmer arbeitet, ist der entscheidende Akteur beim Vollzug des Bodenschutzes. Er ist unmittelbar für die Qualität der Arbeit verantwortlich. Dabei ist es wichtig, dass er vor und während der Arbeit den Bodenzustand ermittelt bzw. feststellt, ob ein schonendes Befahren möglich ist.

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 Vorgaben zum Bodenschutz.

Bodenschutzfachstelle: Die Bodenschutzfachstelle ist als zuständiges Vollzugsorgan für die Einhaltung der gesetzlich verankerten Vorgaben verantwortlich und ist Ansprechpartner für diesbezügliche Fragen. Diese Aufgaben können an den Forstdienst delegiert werden.

Damit alle Akteure ihre Verantwortung wahrnehmen können, ist es unerlässlich, sie für den Bodenschutz zu sensibilisieren und auszubilden. Der physikalische Bodenschutz sollte in die Ziele und Strategien aller Akteure einfliessen. Massnahmen zur Verminderung von Bodenbeeinträchtigungen sind auf verschiedenen Ebenen zu treffen: Planung der Holzernte, Maschinentechnik und Arbeitsausführung.

Massnahmen bei der Planung der Holzernte

Feinerschliessung systematisch anlegen

Die Feinerschliessung (Rückegassen, Maschinenwege und Seillinien) ist für jede sogenannte Feinerschliessungseinheit zu planen und nicht nur wie heute vielfach üblich für einen einzelnen Holzschlag. Diese Planung ist spätestens dann vorzunehmen, wenn innerhalb der Feinerschliessungseinheit ein Eingriff in einem Bestand erfolgen soll. Als Faustregel für die Abgrenzung einer Feinerschliessungseinheit gilt, dass kein Holz über deren Grenzen gerückt wird. Grenzen sind häufig Waldstrassen, kön-

nen aber auch Gewässer, Felspartien oder Waldränder sein. Eine gut geplante Feinerschliessung hilft mit, den Anteil der befahrenen Waldfläche möglichst gering zu halten und das Risiko von Bodenbeeinträchtigungen auf festgelegte Fahrlinien zu beschränken. Im kleinparzellierten Privatwald sollte die Feinerschliessung eigentumsübergreifend geplant werden, was eine intensive Beratungstätigkeit erfordert.

In der Vergangenheit sind Waldareale, insbesondere auch nach Sturmereignissen, häufig ungeplant befahren worden. Diese zeigen entsprechende Veränderungen in ihrer Bodenstruktur. Aus Sicht des Bodenschutzes sind daher schon bestehende Befahrungslinien soweit als möglich und ökonomisch sinnvoll in zukünftige Feinerschliessungsnetze zu integrieren, um den Anteil der insgesamt befahrenen Fläche möglichst gering zu halten. Gute Grundlagen für die Feinerschliessungsplanung sind topografische Karten, Standorts- und Bodenkarten.

Feinerschliessung dokumentieren

Falls die Rückegassen auf einer Karte eingezeichnet und im Gelände markiert sind, findet man sie für jeden künftigen Eingriff rasch wieder. Auch im Sturmschadenfall kann so die befahrene Fläche gering gehalten werden, wenn auch gewisse Kompromisse (z. B. Umfahren von Wurzelstöcken umgestürzter Bäume) eingegangen werden müssen. Die geplanten und die vorhandenen Rückegassen sind auf einem Plan und im Gelände so zu markieren, dass sie jederzeit wieder auffindbar sind. Markierungen können mit handelsüblichem Farbspray erfolgen, sie müssen aber periodisch erneuert werden.

Befahrungsempfindlichkeit in die Planung der Holzschläge einbeziehen

Voraussetzung für die Berücksichtigung der Befahrungsempfindlichkeit ist eine entsprechende Einstufung der Waldböden. Sie bildet eine wichtige Grundlage für die Wahl der Maschinen und Arbeitsverfahren sowie die Terminplanung der Holzschläge. Grundsätzlich sind Holzschläge auf Böden mit hoher Befahrungsempfindlichkeit dann auszuführen, wenn die Bedingungen günstig sind, z. B. in Frostperioden und bei trockener Witterung. Hier könnte allenfalls in zwei Schichten gearbeitet werden. Diesem Vorgehen sind allerdings durch den Personaleinsatz, Lärmbelastungen am Abend sowie Arbeitserschwernisse bei Dunkelheit Grenzen gesetzt. Bei Holzschlägen auf weniger befahrungsempfindlichen Böden besteht eine grössere zeitliche Flexibilität. Ausweichflächen können fallweise auch in Nachbarbetrieben vorgesehen werden, was eine gute zwischenbetriebliche Koordination voraussetzt.

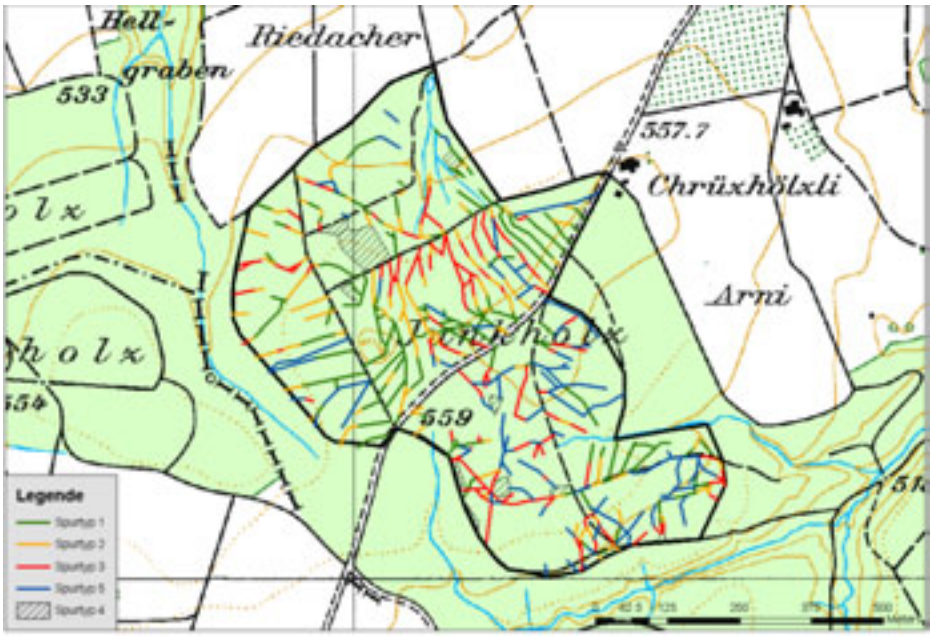


Abb. 11. Fahrspuren auf einer Waldfläche im Mittelland, kartiert nach Spurtypen. Die Spurtypen 1, 2 und 3 sind in Abbildung 6 erläutert, beim Spurtyp 4 handelt es sich um flächiges Befahren, beim Typ 5 um nicht klassierbare sowie vermutete Spuren. Die Karte zeigt beispielhaft, dass in der Vergangenheit der Waldboden vielerorts ungeplant befahren wurde. Für die Zukunft gilt es nun eine systematische Feinerschliessungsplanung vorzunehmen, bei der möglichst viele der bestehenden Fahrlinien übernommen werden.

Abb. 12. Eine systematisch geplante Feinerschliessung ist die Grundvoraussetzung für einen effizienten Bodenschutz im Wald.

Unternehmer, die ein gewisses Auftragsvolumen innerhalb der gleichen Region erhalten, besitzen ebenfalls eine grössere Flexibilität zur Anpassung ihrer Einsatzzeitpunkte an die witterungsbedingten Gegebenheiten.

Die Möglichkeit, Ausweichschläge vorzusehen, hängt von vielen Rahmenbedingungen ab und ist sicher nicht überall gegeben. Insbesondere in Gebieten, die grossräumig ähnliche Böden aufweisen, herrschen zur gleichen Zeit auch überall ähnliche Bedingungen. Die vorliegenden Ausführungen sind im Sinne einer Anregung zu verstehen. Sie können zu einer besseren Umsetzung des Bodenschutzes beitragen.

Vorgaben für den Bodenschutz schriftlich festhalten

In den Verträgen mit Forstunternehmern und den Arbeitsaufträgen für das eigene Personal sind verbindliche Regelungen für den Bodenschutz zu treffen. Insbesondere empfiehlt es sich,

- das Fahren ausschliesslich auf den Rückegassen zu fordern;
- das Unterbrechen der Arbeiten bei hoher Bodenfeuchte zu regeln, d. h. wenn die Fliessgrenze überschritten wird und der Spurtyp 3 auftritt;
- die erwartete Qualität des Arbeitsergebnisses festzulegen und eine Abnahme der Arbeiten zu vereinbaren.

Massnahmen bei der Maschinentechnik

Kontaktflächendruck verringern

Mit verschiedenen technischen Massnahmen wird versucht, den Kontaktflächendruck zu vermindern. Der mittlere Kontaktflächendruck eines Rades lässt sich theoretisch aus der Radlast und der Aufstandsfläche des Reifens herleiten. Der tatsächliche Kontaktflächendruck kann jedoch bis zu dreifach höher sein, weil beim Fahren und Arbeiten auf der Rückegasse dynamische Kräfte wie Beschleunigung, Verzögerung, Vibrationen und Kraftmomente aus der Kranarbeit oder dem Überfahren von Hindernissen auftreten.

Massgebend für die Bodenbelastung sind die Räder mit dem jeweils höchsten Kontaktflächendruck. Deshalb ist eine möglichst ausgeglichene Verteilung der Maschinenmasse zwischen Vorder- und Hinterachse anzustreben, was insbesondere bei den Rückefahrzeugen mit ihren wechselnden Beladungszuständen schwierig zu erreichen ist. Im beladenen Zustand liegen hier häufig 60 bis 70 Prozent der Masse auf der Hinterachse.

Der Kontaktflächendruck lässt sich grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten verringern:

Radlast verkleinern

- geringes Gesamtgewicht
- möglichst grosse Anzahl Räder bei gleichem Gewicht
- möglichst ausgeglichene Gewichtsverteilung vorne/hinten

Kontaktfläche vergrössern

- niedriger Reifenfülldruck
- breite Reifen
- grosse Raddurchmesser.

Eine geringe maximale Radlast und ein niedriger Reifenfülldruck in Verbindung mit breiten Reifen sind die wirksamsten Massnahmen zur Verringerung des Kontaktflächendruckes. Die Reifenbreite allein wirkt sich nur geringfügig auf die Grösse der Kontaktfläche und damit auf den Kontaktflächendruck aus. Hingegen erlauben breitere Reifen ein weiteres Absenken des Fülldruckes, was die Kontaktfläche wirksam vergrössert. Bei niedrigem Fülldruck ist die Tragfähigkeit der Reifen geringer. Deshalb ist der Mindestfülldruck bei grossen Radlasten höher als bei kleinen. Folglich kann bei leichten Maschinen der Reifenfülldruck stärker abgesenkt werden als bei schweren.

Das Fahren auf befestigten Fahrbahnen und mit höheren Geschwindigkeiten führt bei niedrigem Reifenfülldruck zu hohem Reifenverschleiss. Falls bei der Arbeit häufig zwischen langen Strassenfahrten und Fahrten auf Rückegassen gewechselt werden muss, sollte der Reifenfülldruck dauernd den wechselnden Einsatzbedingungen angepasst werden. Eine Lösung bietet hier die vollautomatische Reifendruck-Regelanlage, mit welcher der Fülldruck der Reifen während langsamer Fahrt von der Fahrerkabine aus verändert werden kann. Eine Maschine mit einer Reifendruck-Regelanlage auszurüsten, kann sich trotz der hohen Investitionskosten auch aus wirtschaftlicher Sicht lohnen. Je nach Einsatzbedingungen steigt die Anzahl jährlicher Einsatztage, da auch bei höherer Bodenfeuchte noch bodenpfleglich gearbeitet werden kann.

Bogiebänder sind Stahl- oder Kunststoffbänder, die über die Räder einer Pendelachse aufgezogen werden (Abb. 13). Ihr ursprünglicher Zweck war die Verbesserung der Traktion und der Sicherheit am Hang. Mit dem Ziel der bodenschonenden Befahrung wurden später sogenannte tragende Bänder entwickelt, welche sich für den Einsatz

Abb. 13. Der Forwarder wurde zu Demonstrationszwecken mit zwei verschiedenen Arten von Bogiebändern ausgerüstet: links Traktionsbänder zur Verbesserung der Steigfähigkeit und der Sicherheit am Hang, rechts tragende Bänder zur schonenderen Befahrung schlecht tragfähiger Böden in ebenem und leicht geneigtem Gelände.

auf schlecht tragfähigen Böden in ebenem und leicht geneigtem Gelände eignen. Hier lassen sich mit tragenden Bändern die Einsatzmöglichkeiten der Maschine erweitern und durch die geringere Abhängigkeit von der Witterung die Anzahl jährlicher Einsatztage erhöhen. Diesen Vorteilen stehen jedoch eine Reihe von Nachteilen gegenüber: Hohe Investitionskosten, Montageaufwand, zusätzliches Maschinengewicht, zusätzlicher Transportaufwand für die Bänder, höherer Treibstoffverbrauch, Risiko der Verschmutzung und Beschädigung der Waldstrassen, Einschränkungen für kurzfristiges Umsetzen zwischen mehreren Einsatzorten, Aufschürfen des Bodens bei Kurvenfahrt sowie Gefahr von Wurzelverletzungen an den Randbäumen der Rückegassen. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Wirkungen von Bogiebändern auf den Boden sind komplex und noch nicht abgeschlossen.

Mit Raupenfahrwerken werden vor allem Vollernter für den Einsatz am Hang ausgerüstet, um die Geländegängigkeit, insbesondere die Steigfähigkeit, zu verbessern. Sofern die Raupen tatsächlich auf der Bodenoberfläche aufliegen, ist die Kontaktfläche gegenüber vergleichbaren Radfahrzeugen beträchtlich grösser und der Kontaktflächendruck entsprechend geringer. Rückegassen weisen aber häufig Unebenheiten auf, so dass lange und starre Raupen häufig nur teilweise Bodenkontakt haben. Als Folge davon können punktuell sehr hohe Kontaktflächendrücke entstehen. Die Vortriebskräfte werden ebenfalls über die reduzierte Kontaktfläche übertragen, was zum Aufreissen der obersten Bodenschicht führen kann. Nachteilig sind weiter Bodenverletzungen infolge grosser seitlicher Scherkräfte bei Richtungsänderungen der Maschine. Mit verschiedenen technischen Massnahmen wird versucht, diese Nachteile zu mindern. Raupenfahrwerke mit vertikal beweglichen Laufrollen sollen auch bei grosser Bodenrauheit die Anpassung der Raupenketten an die Geländeoberfläche verbessern. Eine andere Lösung mit dem gleichen Ziel stellt eine knickgelenkte Maschine mit vier einzelnen, pendelnd aufgehängten Raupenfahrwerken dar.

Bei Raupenfahrwerken besteht generell ein hohes Risiko für Wurzelverletzungen an den Gassenrandbäumen. Diesem wird mit gummibewehrten Raupen sowie Raupen aus Kunststoff begegnet.

Schlupf minimieren

Die beim Fahren durch die Reifen erzeugten Scherkräfte im Boden unterbrechen die Porenkontinuität. Besonders nachteilig wirkt sich das Durchdrehen der Antriebsräder, der sogenannte Reifenschlupf, aus. Mit verschiedenen konstruktiven Massnahmen wie Allradantrieb, hydrostatischen Fahrantrieben, möglichst ausgeglichener Gewichtsverteilung sowie einem niedrigen Reifenfülldruck kann dieser Schlupf minimiert werden. Beim Rücken am Hang sollte die Lastfahrt möglichst abwärts erfolgen. Bei kritischer Bodentragfähigkeit kann allenfalls die Leerfahrt aufwärts über Waldstrassen durchgeführt werden. Mit einer sogenannten Traktionshilfswinde, bei welcher die Seilgeschwindigkeit mit dem Fahrantrieb synchronisiert wird, kann der Schlupf praktisch ganz aufgehoben werden.

Massnahmen bei der Arbeitsausführung

Mit Maschinen konsequent auf Rückegassen bleiben

Die Maschinen dürfen die Feinerschliessungslinien nicht verlassen. Insbesondere bei Forstschleppern mit Rückekränen ist die Versuchung gross, mit der Maschine links und rechts von der Rückegasse aus in den Bestand zu fahren, um mit dem Kran weiter entfernt liegendes Holz zu erreichen.

Rückegassen in gut befahrbarem Zustand erhalten

Rückegassen sind bestockungsfreie Linien ohne bauliche Massnahmen. Langfristig gehören sie zur produktiven Waldfläche und nicht zur Erschliessungsinfrastruktur wie die Waldstrassen und Maschinenwege. In Einzelfällen kann deren Befahrbarkeit jedoch durch lokal begrenzte Massnahmen verbessert werden, wie zum Beispiel die Überbrückung kleiner Wasserläufe mit einem Durchlassrohr oder mit Holzeinlagen.

Die Rückegassen sind so schonend zu befahren, dass sie nach Abschluss der Holzerntearbeiten in gutem Zustand hinterlassen werden, damit sie für die späteren Massnahmen im Bestand gut befahrbar bleiben. Rückegassen mit tiefen Fahrspuren wirken sich negativ auf die Produktivität aus und führen zu einem höheren Maschinenverschleiss. Waldeigentümer, Forstdienst und Forstunternehmer müssen deshalb auch kurzfristig aus ureigenem Interesse Sorge zu den Rückegassen tragen.

Reisigmatten anlegen

Eine Reisigmatte auf der Rückegasse bewirkt eine gleichmässigere Verteilung der Kräfte im Boden und mindert damit die Auswirkungen der Radlasten (Verdichtung) im Boden. Allerdings kommt es dabei stark auf die Qualität der Reisigmatte an. Astteppiche in Laubholzschlägen haben diesbezüglich eine geringere Wirkung als Reisigmatten aus Nadelholzschlägen. Eine sehr positive Wirkung von Reisigmatten ist der Schutz des Oberbodens vor dem Aufreissen durch die Traktionskräfte der Räder.

Mit reduziertem Lastgewicht rücken

Bei Forwardern und Rückeschleppern hat die Nutzlast bzw. die Aufsattellast einen wesentlichen Einfluss auf die Radlasten. Je höher die Nutzlast desto grösser sind die Radlasten und damit der Kontaktflächendruck. Dieser lässt sich wirksam vermindern, wenn das Lastgewicht reduziert wird. «Rücken mit halber Last» kann bei kritischen Bodenverhältnissen durchaus eine Alternative zum Unterbrechen der Arbeit sein. Mit weniger Last fahren, bedeutet aber auch mehr Fahrten und damit höhere Kosten. Diese Lösung bietet sich vor allem dann an, wenn sich während der Rückearbeiten in einem Holzschlag die Bodenfeuchte wegen einsetzendem Regen so ändert, dass der Spurtyp 3 entsteht, man aber die Arbeit noch beenden möchte.

Arbeiten unterbrechen

Wenn bei Arbeiten in einem Holzschlag auf den Rückegassen der Spurtyp 3 auftritt, heisst dies, dass die Bodenfeuchte für das Fahren mit der betreffenden Maschine zu hoch ist.

In diesem Fall bestehen verschiedene Handlungsmöglichkeiten:

– mit technischen Massnahmen den Kontaktflächendruck vermindern (Reifenfülldruck absenken, mit geringerem Lastvolumen rücken oder

leichtere Maschine einsetzen, Bogiebänder aufziehen);
– Arbeit unterbrechen und erst weiterarbeiten, wenn der Boden abgetrocknet ist;
– Arbeit unterbrechen und die Maschinen auf eine Ausweichfläche umsetzen. Diese muss bodenschonend befahrbar sein (anderer Bodenaufbau, andere Bodenfeuchte) und im Falle von terminierten Lieferverträgen die verlangten Sortimente liefern können.

Regenerationsmassnahmen

Durch die Bepflanzung mit Schwarzerlen werden die verdichteten Bodenhorizonte unter einer Fahrspur durchwurzelt, was zu einer schnelleren Regeneration der Bodeneigenschaften und damit der Bodenfunktionen führt. Mit weiteren Forschungsarbeiten soll die Wiederherstellung der Wurzelfunktionen auf befahrenem Waldboden abgeklärt werden.

Ökonomische Überlegungen

Dem Nutzen des physikalischen Bodenschutzes für Waldwirtschaft und Gesellschaft stehen Kosten gegenüber. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die kostenrelevanten Massnahmen. Anhand dieser werden die Kosten abgeschätzt. Der Schwerpunkt liegt auf den betrieblichen Massnahmen. Investive Massnahmen werden unterschieden von solchen, welche beim einzelnen Holzschlag anfallen. Grundlegende Massnahmen auf der Ebene des Betriebs sind die Weiterbildung sowie die Bodenzustandsermittlung und die Abnahme der Arbeiten nach Beendigung eines Holzschlages. Darüberhinaus werden hier alle anderen Massnahmen als optional angesehen, das heisst, sie sind im Einzelfall je nach standörtlichen und betrieblichen Verhältnissen zu wählen. Die minimalen Kosten, die sich aus den grundlegenden Massnahmen ergeben, betragen rund 5 CHF pro ha und Jahr bzw. 0,5 CHF pro m³ und haben damit einen Anteil von knapp einem Prozent am mittleren Holzernteaufwand im Mittelland. Bei schwierigen Verhältnissen und hohen Ansprüchen können die Kosten allerdings sehr stark ansteigen. Nach unserer Modellrechnung liegen sie im Extremfall bei 60 CHF pro ha und Jahr bzw. 6 CHF pro m³.

Diese Investitionen in den Bodenschutz gewährleisten die langfristige Erhaltung der Produktionsgrundlage Boden im Wald.

Überblick über kostenrelevante Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz

	Zusätzliche Investitionen	Zusätzliche Massnahmen beim einzelnen Holzschlag verursachen	
		fixe Kosten	variable Kosten
Planung (Betrieb)	– **Weiterbildung Betriebsleiter** – Standortskartierung im Hinblick auf Befahrbarkeit – Markierung und Dokumentation der Feinerschliessung	– Festlegen von Ausweichflächen – Umweltleistungsbewertung bezüglich Bodenschutz[1]	
Steuerung und Durchführung (Betrieb)	– **Weiterbildung Maschinenführer** – Software zur Beurteilung der Befahrbarkeit[2] – Instrumente zur Messung der Bodenfeuchte – Spezifische Maschinenausrüstungen: Reifen mit vergrösserter Nennbreite, Reifendruckregelanlage, Bogiebänder, Traktionshilfswinde[3]	– **Beurteilung des Bodenzustandes → Entscheid fahren/nicht fahren** – Unterbruch der Arbeiten und Umsetzen auf Ausweichflächen – Regenerationsmassnahmen – **Abnahme der Arbeiten**[4]	– Partieller Verzicht auf Befahrung → grössere Beiseilentfernungen beim Rücken – Rücken mit reduzierter Last bzw. kleinerer Maschine – Wechsel von boden- auf seilgestützte Erntesysteme[5]
Überwachung (Kanton)		Kontrollen	

[1] Die Umweltleistungsbewertung ist ein freiwilliger Managementprozess, um die anhand des Forstbetriebs 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. ProFor.
[3] Im Rahmen der Kalkulationen der Zusatzausrüstungen wurde die Traktionshilfswinde nicht berücksichtigt.
[4] Im Rahmen der Kalkulationen der Abnahmen der Arbeiten wurde nur der Zusatzaufwand hinsichtlich des Bodenschutzes berücksichtigt. Der Zusatzaufwand kann darin bestehen, dass z. B. der Leiter des Forstbetriebs den Fahrspuren entlanggeht, sie erfasst, beurteilt, einzeichnet und digitalisiert.
[5] Eine teure Massnahme, die fallweise in Erwägung zu ziehen ist.

Abb. 14. Die Kosten für den physikalischen Bodenschutz bei der Waldbewirtschaftung hängen von den standörtlichen und betrieblichen Verhältnissen ab. Die untere Kostengrenze ergibt sich aus den grundlegenden Massnahmen, die in der Tabelle hervorgehoben sind. Im Einzelfall können die Kosten, je nach notwendigen Massnahmen, stark ansteigen.

Ausblick

Das Merkblatt geht von der ökologischen und ökonomischen Problematik und den gesetzlichen Vorgaben aus, gibt Hinweise zu den bodenkundlichen Grundlagen und zum Management des Bodenschutzes. Es zeigt auf, dass der ausgewiesene Handlungsbedarf an der Schnittstelle Maschine-Boden nur gemeinsam mit allen Akteuren in der Praxis gelöst werden kann.

Es bleibt eine ganze Reihe von offenen Fragen durch Wissenschaft und Praxis zu klären, wie beispielsweise die Beurteilung der Befahrbarkeit auf quantitativer Grundlage und das tolerierbare Ausmass der Fahrspuren im Rahmen der Waldbewirtschaftung.

Um der Bedeutung des Bodenschutzes und den vielfältigen Ansprüchen Rechnung zu tragen sowie allfällige neue Erkenntnisse umzusetzen, werden künftig themenspezifische – aber auch auf einzelne Akteursgruppen ausgerichtete – Faltblätter als Beilage zum vorliegenden Merkblatt erarbeitet und über das Internet zugänglich gemacht (www.wsl.ch/merkblatt_45). Damit wird der Prozess der Information und der Sensibilisierung in Gang gehalten sowie die Umsetzung der Bodenschutzanliegen gefördert.

Weitere Informationen

Frey, B.; Lüscher, P., 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. LWF Waldforschung aktuell, Nr. 67/2008, Jg. 15, 5–7.

Lüscher, P.; Borer, F.; Blaser, P., 2009: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees, O.; Lemm, R. (Hrsg.) Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, VDF. 261–270.

Lüscher, P.; Sciacca, S.; Thees, O., 2008: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. LWF Waldforschung aktuell, Nr. 67/2008, Jg. 15, 19–21.

Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E.E., 2009: Wie lässt sich das «Verformungsexperiment» in unseren Waldböden stoppen? Freiburger forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 1–9.

Waldböden der Schweiz, Band 1 bis 3

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.

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.

Zimmermann, S.; Luster, J.; Blaser, P.; Walthert, L.; Lüscher, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep Verlag. 847 S.

Dieses Merkblatt entstand in enger Zusammenarbeit zwischen den Forschungseinheiten Boden-Wissenschaften und Forstliche Produktionssysteme der WSL und wurde unterstützt durch die Abteilung Wald und die Sektion Boden des BAFU.

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Merkblatt für die Praxis ISSN 1422-2876

Konzept

Forschungsergebnisse werden zu Wissens-Konzentraten und Handlungsanleitungen für Praktikerinnen und Praktiker aufbereitet. Die Reihe richtet sich an Forst- und Naturschutzkreise, Behörden, Schulen, interessierte Laien usw.

Französische Ausgaben erscheinen in der Schriftenreihe
Notice pour le praticien ISSN 1012-6554

Italienische Ausgaben erscheinen in loser Folge in der Zeitschrift
Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi.

Zuletzt erschienen

Forster, B.; Meier, F., 2008: Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Risikomanagement im Forstschutz. Merkbl. Prax. 44: 8 S.

Wohlgemuth, T.; Brigger, A.; Gerold, P.; Laranjeiro, L.; Moretti, M.; Moser, B.; Rebetez, M.; Schmatz, D.; Schneiter, G.; Sciacca, S.; Sierro, A.; Weibel, P.; Zumbrunnen, T.; Conedera, M., 2010: Leben mit Waldbrand. Merkbl. Prax. 46: 16 S.

Die neuesten Ausgaben und pdf

www.wsl.ch/publikationen/reihen/merkblatt/

Managing Editor

Dr. Ruth Landolt
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
E-mail: ruth.landolt@wsl.ch
www.wsl.ch/publications/

Lektorat: Martin Moritzi, WSL
Layout: Sandra Gurzeler, WSL

Druck: Sihldruck AG