

Schutz des Waldbodens beim Einsatz von Forstmaschinen

Herbert Borchert, Johann Kremer und Christian Ludwig Huber

Schlüsselwörter: Bodenschutz, Forstmaschineneinsatz, Fahrspuren, Bodenverdichtung, Gleisbildung, Schadensvermeidung

Zusammenfassung: Der Bodenschutz und das Erschließungssystem gewinnen bei der waldbaulichen Orientierung hin zur dauerwaldartigen Bewirtschaftung erheblich an Bedeutung. Im Sinne der Nachhaltigkeit müssen Forstmaschinen so bodenschonend eingesetzt werden, dass die Produktivität der Wälder nicht beeinträchtigt wird. Unterschiedliche Typen von Bodenverformungen durch Forstmaschinen und deren Auswirkungen, insbesondere auf das Baumwachstum, werden beschrieben. Der Schwerpunkt des Beitrags befasst sich mit den Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenschäden. Dabei werden organisatorische, technische und institutionelle Maßnahmen beschrieben.

Typen von Bodenverformung durch Forstmaschinen

Der Maschineneinsatz im Forst unterscheidet sich in mancher Hinsicht deutlich von dem in der Landwirtschaft. Das Gelände ist häufig steiler. Das Fahren wird in der Regel durch Bäume, Wurzelstöcke, Steine und Felsen behindert. Strukturveränderungen in den Böden können nicht durch Bodenbearbeitung wieder rückgängig gemacht werden. Sie bleiben meist dauerhaft bestehen, eine natürliche Regeneration findet kaum statt (Kremer 2008). Bei den Verformungen des Waldbodens durch die Befahrung mit Maschinen werden heute drei Spurtypen (Abbildung 1) unterschieden (Kremer et al. 2007; Lüscher et al. 2009).

Bei sehr trockenem Boden kommt es lediglich zu einer elastischen Verformung, bei der allenfalls Stollenabdrücke als sichtbare Spuren verbleiben (Spurtyp 1). Dabei kommt es zu keinen, allenfalls geringen Einschränkungen der Bodenfunktionalität. Bei feuchtem Boden wird dieser plastisch verformt und dabei verdichtet. Zurück bleibt eine deutliche Eintiefung in dem befahrenen Bereich, die als *Sackungsverdichtung* bezeichnet wird (Spurtyp 2). Das Porenvolumen ist ver-

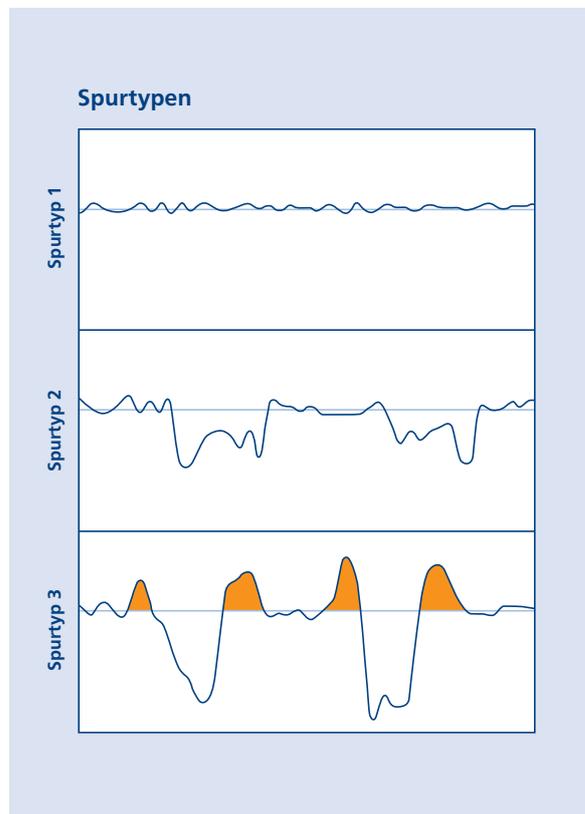


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Fahrspurtypen (aus Kremer et al. 2010, verändert)

ringert, die Belüftung und Drainage gestört. Bei sehr hohen Wassergehalten sinkt die Maschine tiefer in den Boden ein, so dass Spurgleise entstehen. Dies beruht weniger auf einer Verdichtung als vielmehr auf einer visko-plastischen Verformung. Dieser Spurtyp 3 entsteht, wenn der Boden seine Tragfähigkeit verliert und fließt. Dabei wird das Bodenmaterial unter der Last der Maschine seitlich aus der Spur gedrückt. Ausgeprägte randliche Aufwölbungen entlang der Gleise sind die typischen Merkmale dieses *Grundbruchs*. Das Einsinken der Maschine endet häufig erst dann, wenn die Maschine mit der Bodenwanne aufsetzt. Das Fließen des Bodens unter der Maschinenlast führt dazu, dass die Poren im Boden senkrecht zur einwirkenden Kraft ausgerichtet werden. Der Boden verliert seine Durchlässigkeit und wird quasi versiegelt. Als Folge kann das Wasser in den Gleisen nicht versickern und bleibt dort lange stehen.

Ein weiterer Auslöser von Spurgleisen kann übermäßiger Schlupf sein. Wenn die Reifen durchdrehen, schert der Boden ab und wird aus der Fahrspur herausgeschleudert (Weise 2008). Dies kann selbst bei trockenem Boden geschehen. Die Gefahr ist am Hang oder wenn das Rad über Hindernisse wie Wurzelstöcke oder Felsen steigen muss besonders groß. An Hängen sind solche Spurgleise oftmals Ansatzpunkte für nachfolgende Bodenerosion durch abfließenden Niederschlag (Hartge und Horn 1991).

Wirkungen von Bodenstrukturveränderungen

Bodenverdichtungen mit der Folge eingeschränkter Luftleitfähigkeiten können ein verringertes Wurzelwachstum von Bäumen bewirken (Korotaev 1992; Murach et al. 1993). Das Höhenwachstum von Bäumen kann sich durch Bodenstrukturveränderungen ebenfalls reduzieren (Froehlich und McNabb 1983). Uhl (2008) stellte auch auf der Ebene ganzer Waldbestände Zusammenhänge zwischen bodenstrukturellen Parametern, die durch Krafteinwirkung von Forstmaschinen verändert werden können, und dem Wachstum fest. Allerdings ist es schwierig, Zuwachseinbußen allein den Bodenverformungen durch Forstmaschinen zuzurechnen. Die den Fahrspuren nahe stehenden Bäume genießen meist mehr Licht, was Beeinträchtigungen im Wasserhaushalt und der Belüftung wohl teil-

weise kompensieren kann. Bodenverdichtungen können allerdings dazu führen, dass der Boden zwischen den Fahrspuren zumindest über einige Jahre kaum noch als Wurzelraum genutzt werden kann. In einem gemeinsam vom Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt der Technischen Universität München (TUM), dem Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft der TUM und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) durchgeführten Befahrungsexperiment wurde der Wasserentzug aus dem Boden durch die Vegetation nach einer Holzerntemaßnahme drei Jahre lang beobachtet (Huber et al. 2011). Hierbei wurde ein etwa 70-jähriger Fichtenbestand mit einem Harvester durchforstet und die Stammstücke wurden mit einem Tragschlepper auf Rückegassen an die Forststraße transportiert. In dem Versuch sollte überprüft werden, ob es durch die Konzentration von Reisig auf den Rückegassen zu Nährstoffungleichgewichten kommen kann. Bei der maschinellen Holzernte werden die Bäume an der Rückegasse entastet und das Reisig dort konzentriert abgelegt, sofern es nicht für die Hackschnitzelherstellung entnommen wird. Im Reisig sind die Nährstoffgehalte höher als in den meisten anderen Baumkompartimenten (Jacobsen et al. 2003; Weis und Göttlein 2012). Über eine Wasseraufnahme durch Wurzeln im Bereich der Rückegasse könnten dort konzentrierte Nährstoffe wieder zurücktransportiert werden. In jeweils fünffacher Wiederholung wurden Rückegassenabschnitte mit Reisig bedeckt bzw. von Reisig freigehalten. Bei der Befahrung kam es zu einer Sack-

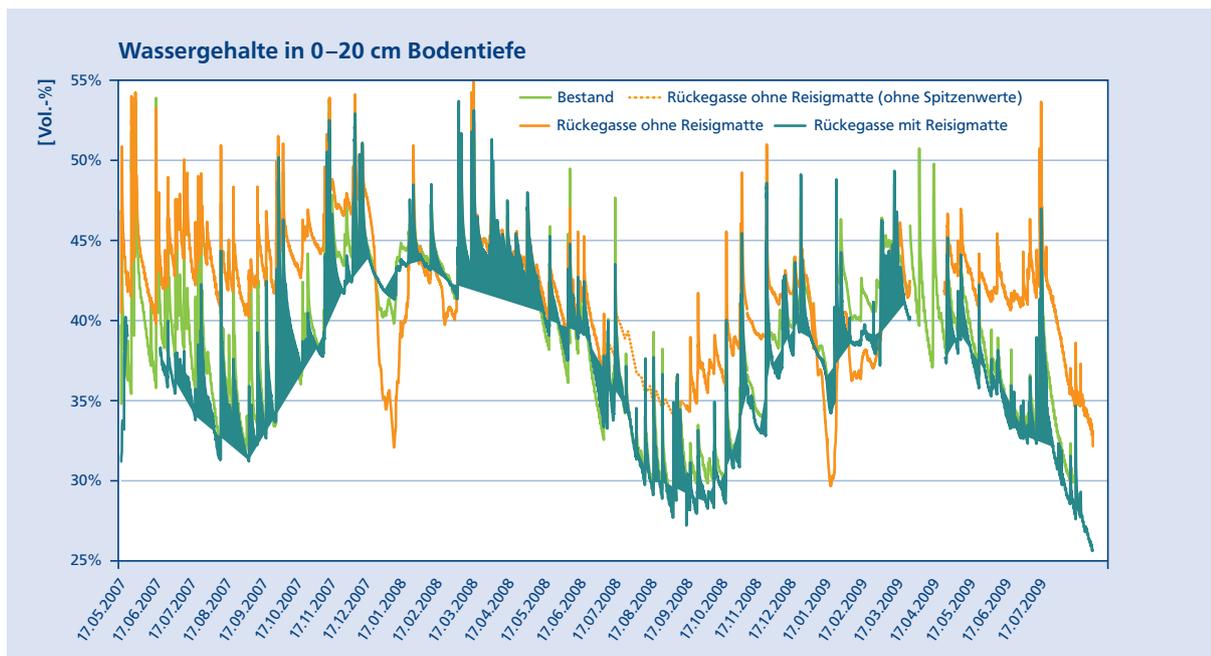


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Wassergehalte in 0–20 cm Tiefe im Bestand (Referenz), in der Mitte der Rückegasse mit und ohne Reisigauflage (Huber et al. 2011)

ungsverdichtung, die vor allem eine Verringerung des Grobporenraums sowie der Luft- und Wasserleitfähigkeiten bewirkte. Durch die Reisigmatte konnte eine Verdichtung des Bodens nicht gänzlich verhindert werden.

Zur Einschätzung der Funktionsfähigkeit der Feinwurzeln im Oberboden von Bestand und Rückegasse wurde mit ECH2O-Sonden der Bodenwassergehalt in den obersten 20 cm des Mineralbodens bestimmt. Bei allen fünf Wiederholungen wurden die Verhältnisse im Inneren des Bestands, an der Grenze Bestand/Rückegasse, in der Fahrspur und in der Mitte der Rückegasse zwischen den Fahrspuren mit je fünf Sonden an jedem Messort aufgezeichnet. Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte im Bestand (Referenz) sowie in der Mitte der Rückegassen mit und ohne Reisigmatte. Auffällig ist der ähnliche Kurvenverlauf der mit Reisig bedeckten Rückegassen mit der Referenz. Bei Niederschlagsereignissen steigt der Wassergehalt zunächst stark an und geht infolge der Drainage der Grobporen ebenso schnell wieder zurück. Im Innern des Bestandes und auf der mit Reisig bedeckten Gasse sinkt der Wassergehalt danach während der Vegetationszeit bis zum nächsten Niederschlag weiter deutlich ab, während er auf den Rückegassen ohne Reisig kaum weiter zurückgeht. Die höhere Bodenfeuchte auf der unbedeckten Rückegasse ist ein deutlicher Hinweis auf die dort beeinträchtigte Wurzel-Wasseraufnahme. Auch Dietrich (2011) stellte unter der Reisigauflage einer Rückegasse einen trockeneren Boden fest als in Abschnitten ohne Reisig. Die niedrigeren Wassergehalte auf den Rückegassen ohne Reisigauflage im Winter dürften auf Bodenfrost beruhen.

Abbildung 3 zeigt sehr anschaulich die unterschiedlich starke Durchwurzelungsintensität von zwei Bodensäulen, die nach der Befahrung entnommen, im Computertomographen analysiert und anschließend wieder eingebaut worden waren. In der Bodensäule aus der mit einer Reisigmatte bedeckten Fahrspur fanden sich nach zwei Jahren fünf bis sechsmal mehr Wurzeln als in dem Boden aus der Fahrspur ohne Reisigauflage.

Obleich es mit Sackungsverdichtungen bis etwa 10 cm zu keinen schwerwiegenden Bodenverformungen gekommen ist, wurden ohne den Schutz der Reisigmatte die Wurzeln der randständigen Bäume offenbar gequetscht oder abgesichert und die Transferfunktionen des Bodens erheblich eingeschränkt. Über zumindest drei Vegetationsperioden hinweg konnten die Bäume den Bereich zwischen den Fahrspuren als Wurzelraum kaum wieder erschließen.



Abbildung 3: Die Durchwurzelung von Bodensäulen zwei Jahre nach der Befahrung unter einer Fahrspur, links ohne und rechts mit Reisigauflage Fotos: J. Kremer

Neben den negativen Auswirkungen auf das Baumwachstum können Bodenstrukturveränderungen auch die weitere Befahrbarkeit erschweren und das Waldbild beeinträchtigen. Tiefe Spurgleise behindern die weitere Befahrbarkeit von Rückegassen. Die Fahrer von Forstmaschinen neigen dazu, in solchen Fällen versetzt zu den Spurgleisen zu fahren. Dadurch wird der von Bodenverformungen betroffene Bereich zunehmend ausgedehnt. Auf viele Waldbesucher wirken tiefe Spurgleise in den Wäldern abstoßend. Derartige Bilder sind häufig der Anlass für Kritik an der Forstwirtschaft durch die Medien. Auch um die gesellschaftliche Akzeptanz für die Waldbewirtschaftung nicht zu verlieren, ist im Hinblick auf die Waldästhetik darauf zu achten, dass die Gleisbildung möglichst vermieden wird.

Vermeidung von Bodenschäden

Befahrene Fläche gering halten

Da sich Bodenverformungen beim Fahren auf natürlich gelagerten unbefestigten Waldböden selten ganz vermeiden lassen, sollte die befahrene Fläche möglichst gering gehalten werden. Es ist forstlicher Standard, dass Maschinen abseits der Forststraßen nur auf Rückegassen fahren. Rückegassen sind Schneisen, die in regelmäßigen Abständen, zum Beispiel 20, 30 oder 40 m, in die Bestände geschlagen werden und als Fahrlinien dienen, ohne dass die Stöcke gerodet oder der Boden befestigt wird. Das Netz solcher Rückegassen bildet das Feinerschließungssystem eines Waldgebietes. Auf den Rückegassen werden Bodenstrukturveränderungen in Kauf genommen, solange die Gassen noch gut befahrbar bleiben, keine Erosion droht und das Waldbild nicht negativ beeinträchtigt wird (Erler et al. 2010).

Abbildung 4:
Gleisbildung auf einer
Rückegasse, nachdem das
tragende Wurzelgeflecht
gerissen war. Foto: LWF



Die Rückegassen sollen dauerhaft genutzt werden, weshalb es zweckmäßig ist, wenn diese besitzübergreifend und unabhängig von der aktuellen Bestockung angelegt werden. Bislang gibt es noch keine befriedigenden Lösungen, um Rückegassen zum Beispiel nach Sturmwürfen mit ausreichender Genauigkeit wiederaufzufinden. Derzeit arbeiten einige Bundesländer daran, zumindest im Landeswald die Rückegassen kartographisch zu erfassen.

Organisatorische Maßnahmen

Um die Befahrbarkeit der Rückegasse zu erhalten, sollte im Zustand hoher Wassersättigung des Bodens grundsätzlich nicht gefahren werden (Borchert 2010). Bei der Beurteilung kann der »Ausrolltest« hilfreich sein. Ist der Mineralboden so trocken, dass er sich in der Hand nicht ausrollen lässt, kann die Rückegasse ohne Bedenken befahren werden. Lässt er sich ausrollen, ist eine Sackungsverdichtung zu erwarten. Bei der Fahrt sollte jetzt die Spurbildung beobachtet werden. Entstehen randliche Aufwölbungen entlang der Fahrspuren, sollte die Last verringert oder der Einsatz abgebrochen werden. Dabei kann der rein optische Eindruck einer Bodentragfähigkeit trügerisch sein: Er kann kurzzeitig vorgetäuscht werden, weil das Wurzelgeflecht die mechanische Belastung teilweise aufnimmt. Niemand kann jedoch einschätzen, wann dessen Tragfähigkeit überschritten wird. Häufig kommt es dann zum plötzlichen Einsinken der Maschine, weil das tragende Netz der Wurzeln reißt (Abbildung 4). Aus diesem Grund sind Richtlinien zu den Grenzen

einer zulässigen Befahrung ungeeignet, wenn sie allein auf die Tiefe von Fahrspuren abstellen. Ist eine Bodenprobe so nass, dass sie sich in der Hand nicht ausrollen lässt, sondern verschmiert, droht auf jeden Fall eine Gleisbildung. Ohne technische Vorkehrungen, die ein Einsinken bei stark durchfeuchtem Boden verhindern, sollte jetzt keine Maschine fahren.

Der Wassergehalt in Waldböden unterliegt charakteristischen saisonalen Schwankungen (Abbildung 5). Obgleich der meiste Niederschlag in den Sommermonaten fällt, sinkt der Wassergehalt aufgrund der hohen Transpiration während der Vegetationszeit kontinuierlich ab. Gegen Ende der Vegetationsperiode erreicht er ein Minimum. Werden Holzerntearbeiten auf empfindlichen Standorten schwerpunktmäßig während dieser Zeit durchgeführt, treten unerwünschte Bodenverformungen seltener auf.

Um teure Standzeiten bei Forstmaschinen zu vermeiden, sollten Ausweichflächen vorgehalten werden. Dies ist naturgemäß in größeren Forstbetrieben leichter zu realisieren als in den meisten Privatwäldern mit ihren oft kleinen Waldgrundstücken. Werden die Holzerntemaßnahmen im »Kleinprivatwald« durch die Forstbetriebsgemeinschaften organisiert, können die Maschinen auch dort eher standorts- und witterungsangepasst eingesetzt werden.

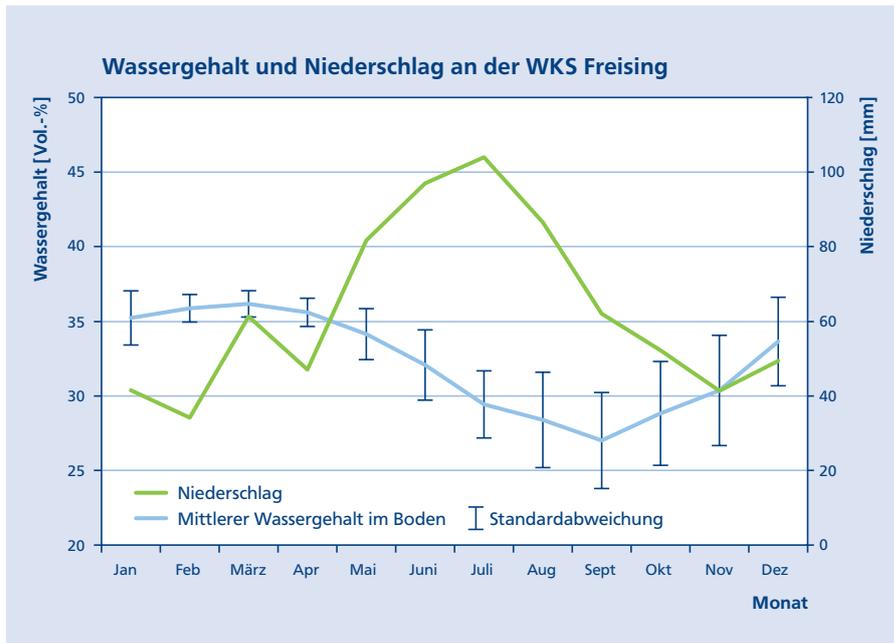


Abbildung 5: Mittlere monatliche Wassergehalte eines Waldbodens an der Waldklimastation Freising im Zeitraum 2000 bis 2011 und ihre Standardabweichung sowie der mittlere Freiland-Niederschlag im selben Zeitraum

Technische Möglichkeiten

Entsprechend der verschiedenen Ursachen für die Gleisbildung gibt es einerseits technische Möglichkeiten, die Last auf den Boden besser zu verteilen und andererseits Maßnahmen, um den Schlupf zu reduzieren (Borchert 2010).

Die Last kann besser verteilt werden, indem die Aufstandsfläche der Maschine erhöht wird, zum Beispiel durch eine größere Zahl von Rädern. Hier ist die Situation in Deutschland bereits sehr günstig. Fast alle eingesetzten Tragschlepper (Forwarder) sind 8-Rad-Maschinen. Die meisten Vollernter (Harvester) sind mit sechs Rädern ausgestattet. Wichtig ist aber auch eine möglichst ausgeglichene Lastverteilung auf der Maschine zwischen vorne und hinten. Die in den letzten Jahren neu hinzugekommenen Tragschlepper sind tendenziell immer schwerer geworden. Darauf deutet die Auswertung des in der Forstlichen Unternehmerdatenbank der LWF erfassten Maschinenbestandes nach Baujahren hin. Die Lastverteilung im beladenen Zustand wird dadurch immer ungünstiger, ein immer größerer Teil lastet auf dem Hinterwagen.

Die Aufstandsfläche kann auch durch eine größere Dimensionierung der Reifen erhöht werden. Größere Reifendurchmesser verbessern zudem die Steigfähigkeit bei Hindernissen. Der Raddurchmesser wird an Bogieachsen jedoch durch den Abstand der beiden Räder begrenzt. Seit einigen Jahren werden zunehmend breitere Reifen verwendet. Bei einer Fahrzeugbreite von nur 3 m erreichen die breitesten Reifen derzeit 940 mm (Borchert et al. 2012). Ein beträchtliches

Potenzial besteht noch beim Reifeninnendruck. Derzeit werden die Reifen meist mit sehr hohem Reifenfülldruck gefahren. Auf weichem Untergrund, wie er häufig im Wald vorkommt, könnte mit erheblich niedrigerem Luftdruck gefahren und damit die Aufstandsfläche erhöht werden. Gerade die Druckspitzen mittig unter den Reifen würden dadurch erheblich reduziert. Reifendruckregelanlagen, die eine rasche Anpassung des Fülldrucks ermöglichen, sind, anders als in der Landwirtschaft, bei Forstmaschinen noch nicht im Einsatz. Bisher gibt es diese dort nur an Prototypen. Konstruktionsbedingt erfordern die meisten Forstreifen auch einen vergleichsweise hohen Fülldruck. Den Konstrukteuren ging es bisher vorrangig um eine große Widerstandsfähigkeit und Tragfähigkeit unter sehr schwierigen Geländebedingungen. Das Ergebnis sind sehr steife Reifen meist in Diagonalbauweise mit einem guten Flankenschutz, die einen recht hohen Fülldruck brauchen.

Eine weitere technische Möglichkeit, die Last besser zu verteilen, bieten Bogiebänder, wenn diese als sogenannte Softbänder ausgestaltet sind. Bogiebänder sind Bänder von Stahlplatten, die über je zwei Reifen einer Bogieachse aufgespannt werden und mit Spikes bestückt sind. Als Softbänder haben sie besonders breite Platten. Es gibt sie inzwischen auch aus Polyurethan oder mit Hartgummi bestückt, was für die Wurzeln schonender ist. Nachteilig ist die geringe Traktion dieser Bänder.

Eine erheblich bessere Lastverteilung wird möglich, wenn Raupenfahrwerke verwendet werden. Im Forst sind Harvester nicht selten damit ausgestattet. Die sehr schweren Harvester mit großer Kranreichweite für die Starkholzernte sind durchweg Raupenfahrzeuge. Aber auch bei großer Hangneigung haben sich Raupenfahrwerke bewährt. Nachteilig sind die stärkeren Wurzelverletzungen, die durch Raupenfahrwerke verursacht werden. Obgleich Forwarder meistens die größere Gefahr für die Böden darstellen, sind Raupenfahrwerke dort komplett wieder vom Markt verschwunden. Die Gründe sind nicht ganz klar. Vermutlich sind es sowohl die höhere Fahrgeschwindigkeit der Radfahrwerke als auch die geringere Beschädigung der Forststraßen, welche bei Tragschleppern den Ausschlag für den eindeutigen Vorzug der Radfahrwerke gegeben haben.



Abbildung 6: Durch eine Seilwinde am Tragschlepper kann die Traktion bei Fahrten am Hang unterstützt werden.
Foto: M. Wolf

Es gibt auch verfahrenstechnische Möglichkeiten, die Lasten breitflächiger zu verteilen. Der Harvester kann die Bäume gezielt über der Rückegasse entasten, so dass eine Reisigmatratze als Fahrunterlage entsteht. Auch das Auslegen von Stammteilen als sogenannte Knüppeldämme dient diesem Zweck. Aufgrund des großen Holzbedarfs und Zeitaufwandes lohnen sich Knüppeldämme jedoch nur, um kurze problematische Gassenabschnitte zu überwinden.

Etliche technische Maßnahmen an Forstmaschinen dienen dazu, die Traktion zu verbessern und den Schlupf zu reduzieren. Dazu zählen der Allradantrieb und das hydrostatische Getriebe. Auch die Traktionsprofile bei den Reifen mit ihren hohen Stollen und großen Zwischenräumen dienen diesem Zweck. Bei diesen Profilen wird allerdings die Last wieder stärker konzentriert und damit der Kontaktflächendruck auf den Boden erhöht. Softprofile mit deutlich flacheren

Stollen und wenig Zwischenräumen verteilen die Last dagegen besser. Reicht bei diesen die Traktion nicht aus, können Bogiebänder mit hohen Stegen, sogenannte Traktionbänder aufgezogen werden. Sehr häufig werden auch Gleitschutzketten verwendet. Beim Einsatz von Tragschleppern am Hang werden immer häufiger Traktionsseilwinden verwendet, die das Durchdrehen der Räder verhindern. Dabei wird das Seil am Oberhang an einem Baum befestigt und je nach Fahrtrichtung synchron mit dem Radantrieb eingezogen oder ausgelassen, womit es die Traktion der Maschine unterstützt (Abbildung 6).

Institutionelle Maßnahmen

Verschiedene institutionelle Maßnahmen eignen sich, um das Auftreten von Bodenschäden zu minimieren. Durch Aus- und Fortbildung von Waldeigentümern, Forstpersonal und Forstunternehmern kann die Informationslage verbessert werden. Ein besseres Verständnis der Zusammenhänge versetzt diese Akteure in die Lage, Vermeidungsstrategien umzusetzen. Anreize werden geschaffen, wenn der Einsatz schonender Technik finanziell honoriert wird. Manche Forstbetriebe gewähren zum Beispiel für den Einsatz von Bändern höhere Entgelte. Ein weiteres Instrument kann eine gerechte Risikoverteilung sein. Wenn die Risiken eines Auftrags für ein Forstunternehmen nicht kalkulierbar sind, entstehen immer wieder Situationen hohen Leistungsdrucks. In solchen Situationen werden die Grenzen einer schadlosen Befahrung leicht überschritten. Schriftliche Arbeitsaufträge mit protokollierten »Altschäden«, regelmäßige Kontrollen während der Einsätze und Abnahmeprotokolle am Schluss stärken die Verbindlichkeit der Akteure im Hinblick auf den Bodenschutz. Zudem bedarf es wirkungsvoller Sanktionsmechanismen wie der drohende Ausschluss von Folgeaufträgen. Durch Umlegen der Kosten von Reparaturmaßnahmen auf den Schadensverursacher werden diese Kosten internalisiert. Oft handelt es sich bei diesen Reparaturen um ein Glattziehen der Rückegassen mithilfe von Baggern (Wickel 2009). Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass dadurch die Tragfähigkeit wiederhergestellt wird.

Der Schutz des Waldbodens als Grundlage für das Waldwachstum ist eine essenzielle Anforderung einer nachhaltigen Forstwirtschaft. Sowohl die Forschung als auch die Praxis entwickeln Technik und Verfahren, um dieser Anforderung gerecht zu werden.

Literatur

Borchert, H. (2010): In der Spur bleiben. Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. Lohnunternehmen Nr. 7, S. 32–34

Borchert, H.; Egner, J.-P.; Feist, H.; Wolf, M.; Prommersberger, J.; Diepold, A. (2012): Vollmechanisierte Nadelholzernte auf befahrungsempfindlichen Standorten. In: Tagungsführer zur 16. KWF-Tagung 2012, Bopfingen, S. 73–77

Dietrich, K. (2011): Auswirkungen einer Reisigaufgabe auf die Bodenfeuchte einer Rückegasse. Masterarbeit an der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden, 82 S.

Erler, J.; Borchert, H.; Schack-Kirchner, H. (2009): Ergebnisse des Arbeitskreises »Technisch-biologische Maßnahmen zur Wiederherstellung der Rückegasse«. Forsttechnische Informationen Nr. 9 + 10, S. 6–8

Froehlich, H. A.; McNabb, D. H. (1984): Managing soil compaction in the Pacific Northwest. In: Stone, E. L. (ed.): Proc. 6th North American Forest Soils Conference, July 1983 in Knoxville Tennessee

Hartge, K. H.; Horn, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. 2. Aufl. Stuttgart, Enke Verlag, 303 S.

Huber, C.; Borchert, H.; Kremer, J.; Matthies, D.; Göttlein, A. (2011): Biomasse- und Nährelementverschiebungen bzw. -verluste bei Harvesterdurchforstungen und deren Auswirkungen auf Bodeneigenschaften und Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Abschlussbericht (unveröffentlicht)

Jacobsen C.; Rademacher P.; Meesenburg H.; Meiwes K.J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten Literaturstudie und Datensammlung im Auftrage des BMVEL. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Göttingen, 81 S.

Korotaev, A. A. (1992): Bodenverdichtung und Wurzelwachstum der Bäume. Forstarchiv 63, S. 116–119

Kremer, J.; Wolf, B.; Matthies, D.; Borchert, H. (2010): Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. LWF Merkblatt 22, 2. Auflage

Kremer, J. (2008): Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. LWF aktuell 67, S. 13–15

Lüscher, P.; Sciacca, S.; Thees, O. (2007): Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. LWF aktuell 67, S. 19–21

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

Murach, D.; Ilse, L.; Klaproth, F.; Parth, A.; Wiedemann, H. (1993): Rhizotron-Experimente zur Wurzelverteilung der Fichte. Forstarchiv 64, S. 191–194

Uhl, E. (2008): Bodenstruktur und Bestandeswachstum. LWF aktuell 67, S. 8–10

Weise, G. (2008): Entwicklung und Einsatz von Forstreifen. LWF aktuell 67, S. 24–27

Weis, W.; Göttlein A. (2012): Nährstoffnachhaltige Biomassenutzung. LWF aktuell 90, 44–47

Wickel, F. (2009): Erhaltung und Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen. Bachelorarbeit an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaften, 76 S.

Keywords: Soil protection, forest machinery, soil compaction, soil displacement, prevention of damage

Summary: In terms of sustainability forest machinery should operate as carefully as possible so that site productivity is not affected. Different types of soil deformation by load of forest machines and the impact on tree growth are described in particular. The main part of the article addresses measures to prevent soil damage. Organisational, technical and institutional measures are described.