

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 167 (2016)

Heft: 2

Artikel: Holzerntekosten und Mindererlöse bei verschiedenen Rückegassenabständen in Fichtenbeständen

Autor: Frutig, Fritz / Thees, Oliver / Ammann, Peter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097423>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Holzerntekosten und Mindererlöse bei verschiedenen Rückegassenabständen in Fichtenbeständen

Fritz Frutig Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Oliver Thees Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Peter Ammann Fachstelle Waldbau, Lyss, und Abteilung Wald des Kantons Aargau (CH)
Peter Lüscher Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Peter Rotach Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Gruppe Waldmanagement/Waldbau (CH)

Holzerntekosten und Mindererlöse bei verschiedenen Rückegassenabständen in Fichtenbeständen

Das flächige Befahren des Waldbodens mit Holzerntemaschinen ist zu vermeiden, denn nur so kann das Risiko von Beeinträchtigungen auf bestimmte Fahrlinien, die Rückegassen, beschränkt werden. Da grössere Rückegassenabstände zu höheren Erntekosten führen, werden insbesondere bei vollmechanisierten Holzernteverfahren eher geringe Gassenabstände gewählt. Ein Gassenabstand von 20 m erlaubt bei einer Kranreichweite des Vollernters von 10 m eine flächendeckende vollmechanisierte Aufarbeitung. Durch die Anlage der Gassen geht aber Produktionsfläche verloren, und die Randbäume können durch das Befahren und die Verdichtung des Bodens Zuwachseinbussen erleiden. Beschädigte Wurzeln können zudem von Pilzen befallen werden, was langfristig zu Stammfäule und damit zu Wertverlusten führt. Grössere Gassenabstände führen zu höheren Erntekosten und in der Regel zu grösseren Schäden am verbleibenden Bestand, da ein Teil der Bäume zugefällt oder vorgerückt werden muss. In diesem Beitrag werden für einen Fichtenreinbestand der Bonität 28 die Auswirkungen verschiedener Gassenabstände analysiert und hierzu verschiedene Szenarien der Beeinträchtigung des Bodens und des Bestandes verwendet. Die Kalkulationen zeigen, dass die Mindererlöse infolge von Produktionseinbussen und Wertverlusten über eine gesamte Umtriebszeit eines Bestandes bedeutend sein können und dass es sich langfristig lohnen kann, grössere Gassenabstände zu wählen und damit kurzfristig höhere Holzerntekosten in Kauf zu nehmen. Optimal dürften Gassenabstände von 30 bis 50 m sein.

Keywords: skid road distance, optimisation, soil compaction, tree growth, skidding damages
doi: 10.3188/szf.2016.0064

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail friedrich.frutig@wsl.ch

Die Waldbewirtschaftung wurde in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend mechanisiert, was zur Folge hat, dass die Waldböden immer öfter mit schweren Maschinen befahren werden und so das Risiko von Bodenverdichtungen steigt. Durch Verdichtung werden die standortspezifischen Eigenschaften des Bodens gefährdet und mit ihnen auch die Bodenfunktionen (Lüscher et al 2009a und 2009b). Um ein flächendeckendes Befahren des Waldes zu vermeiden, werden Rückegassen angelegt. Aus Kostenüberlegungen wird dabei oft ein kleiner Gassenabstand gewählt, um eine möglichst flächendeckende vollmechanisierte Holzernte zu ermöglichen. Die längerfristig auftretenden negativen Folgen enger Gassenabstände für Boden und Bestand werden dabei meist ausgeklammert. Die Rückegassen beanspruchen einen Teil der Waldfläche, die für die Holzproduktion nicht mehr zur Verfügung steht. Durch das Befahren der Gassen mit Forstmaschinen besteht je nach gewählter Technik zudem ein unter-

schiedlich hohes Risiko, dass der Boden verdichtet und die Wurzeln der Gassenrandbäume verletzt werden, was Wachstumseinbussen und Holzentwertungen und damit Mindererlöse zur Folge haben kann. Bei grösseren Gassenabständen nehmen zwar die Holzerntekosten zu, die durch die Gassen beanspruchte Fläche wird hingegen kleiner. Damit steht mehr Produktionsfläche zur Verfügung, und weniger Gassenrandbäume sind den negativen Folgen des Befahrens ausgesetzt. Allerdings nehmen bei grösseren Gassenabständen auch die Holzernteschäden zu, wodurch sich die Mindererlöse als Folge von Holzentwertungen erhöhen.

Die Thematik der wirtschaftlichen Auswirkungen von verschiedenen Rückegassenabständen über eine Umtriebszeit wurde im Jahr 2010 in den Bodenschutzkursen für das Forstpersonal des Kantons Aargau aufgegriffen. Weil der Wunsch nach vertiefter Betrachtung aufkam, wurde an der ETH Zürich, in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen For-

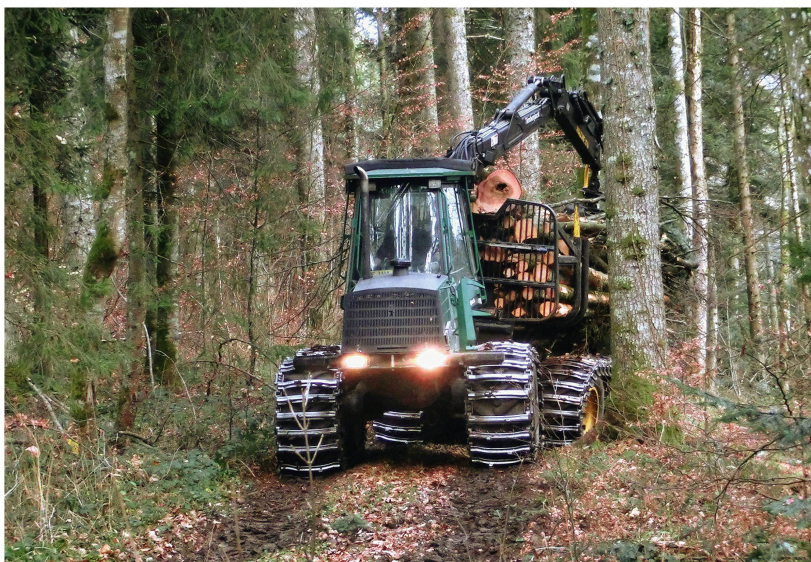


Abb 1 Im Bereich der Rückegassen kann es zu Verdichtung des Waldbodens und Schäden an Randbäumen kommen. Foto: Fritz Frutig

schungsanstalt WSL, eine Masterarbeit zum Thema durchgeführt (Jäger 2012). Diese hatte zum Ziel, die Mehrkosten der Holzernte bei Gassenabständen von mehr als 20 m modellhaft zu berechnen, die negativen Folgen wie Produktionseinbussen und Wertverluste durch Fäule auf Basis einer Literaturrecherche zu quantifizieren und daraus Folgerungen für optimale Rückegassenabstände abzuleiten. Der vorliegende Artikel basiert auf dieser Masterarbeit.

Literaturrecherche

Die Einflüsse der maschinellen Waldbewirtschaftung (Abbildung 1) auf den Waldboden und auf das Wachstum der Bäume werden schon seit vielen Jahren untersucht. Im Folgenden stellen wir wesentliche Erkenntnisse aus der umfangreichen Literaturrecherche von Jäger (2012) vor.

Wachstumseinbussen durch Bodenverdichtung

In rund 20 Studien wurde der Einfluss der Bodenverdichtung auf das Wachstum von Bäumen untersucht. Die Mehrzahl stammt aus Amerika und vergleicht den Höhen- und Volumenzuwachs von Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), verschiedenen Föhren- (*Pinus ponderosa*, *radiata*, *taeda*, *contorta*) und Fichtenarten (*Picea engelmannii*, *glauca*, *mariana*, *sitchensis*) auf befahrenen und nicht befahrenen Flächen. Lediglich vier Publikationen (Kremer 1999, Bredberg & Wästerlund 1983, Wästerlund 1983 sowie Janson & Wästerlund 1999) stammen aus Europa und untersuchen den Einfluss der Bodenverdichtung auf das Wachstum von Fichte (*Picea abies*), Föhre (*Pinus sylvestris*) und Buche (*Fagus sylvatica*).

Die Auswirkungen unterscheiden sich je nach Studie und Baumart. In der Mehrheit der Untersu-

chungen ist das Wachstum der Bäume auf verdichteten Böden deutlich geringer als auf unbeeinflussten, wobei eine Reduktion des Durchmesserwachstums um bis zu einem Viertel und eine Reduktion des Höhenwachstums um mehr als die Hälfte auftreten kann (Wert & Thomas 1981, Helms & Hipkin 1986, Gomez et al 2002, Brais 2001). Noch stärker kann das Volumenwachstum beeinträchtigt werden, welches auf verdichteten Böden bis zu 60% geringer sein kann (Fröhlich & McNabb 1984). In einigen Untersuchungen wurden hingegen keine Unterschiede zwischen verdichteten und ungestörten Böden festgestellt (Miller et al 1996, Kremer 1999). Gemäss Bredberg & Wästerlund (1983) sind die Bodenbeschaffenheit und die Bonität des Standortes entscheidend, ob Zuwachsverluste auftreten. Bei grobkörnigen Böden ist gar ein besseres Wachstum nach Befahrung möglich, da die Wasserspeicherkapazität des Bodens durch die Verdichtung erhöht werden kann (Gomez et al 2002).

Produktionseinbussen infolge von Rückegassen

Rückegassen nehmen Waldfläche in Anspruch. Bei 4 m breiten Gassen und 20 m Gassenabstand gehen rein mathematisch 20%, bei 30 m Gassenabstand 13.3% und bei 40 m 10% der produktiven Waldfläche verloren. Allerdings führt ein solcher Flächenverlust nicht zwingend zu Produktionseinbussen, da die Bäume entlang der Gassen von besseren Lichtbedingungen profitieren und damit ein verstärktes Wachstum aufweisen können. So wurde gemäss den Studien von Stratmann (1986), Landbeck (1965) und Kramer & Jünemann (1985) der Pro-



Abb 2 Verdichteter Waldboden und beschädigte Wurzeln im Bereich einer Rückegasse. Foto: Fritz Frutig



Abb 3 Durch Rückarbeiten beschädigter Wurzelanlauf. Foto: WSL

duktionsverlust der Gassen durch den Mehrzuwachs der Randbäume vollständig ausgeglichen. Andere Untersuchungen kamen zum Schluss, dass die Randbäume den Produktionsverlust der Gassen nur etwa zur Hälfte oder bis zu zwei Dritteln kompensieren können (Isomäki 1986, Pfister 1969, Bowering et al 2006). Zu Produktionsverlusten durch die Gassen kann es insbesondere dann kommen, wenn die Wurzeln der Randbäume durch das Befahren beschädigt werden und der Boden unter den Rückegassen stark verdichtet wird (Abbildung 2). Die Bäume entlang der Gassen weisen dann in den ersten Jahren nach dem Befahren ein geringeres Wachstum auf (Moehring & Rawls 1970, Fries 1975, Wästerlund 1988).

Wertverluste durch Baumverletzungen bei der Holzernte

Durch den Einsatz von Holzerntemaschinen wird auch immer ein gewisser Anteil der Bäume des verbleibenden Bestandes verletzt. Beim Befahren können Wurzeln beschädigt werden, und beim Fällen und Rücken der Bäume können Verletzungen am Holzkörper der verbleibenden Bäume entstehen (Abbildung 3). Der Anteil der verletzten Bäume im verbleibenden Bestand ist von vielen Faktoren, wie Holzerntetechnik, Rückegassenabstand, Länge des gerückten Holzes, Eingriffszeitpunkt und Eingriffsstärke, abhängig (Butora & Schwager 1986). Bei Eingriffen während der Vegetationszeit gibt es mehr und auch grössere Verletzungen als bei Eingriffen in der Vegetationsruhe (Meng 1978). Die Schadenhäufigkeit ist zudem von der Baumart und vom Alter abhängig (Nill et al 2011 und 2014, Nakou et al 2014). Die Fichte als Flachwurzler ist deutlich verletzungsfälliger als etwa die tiefwurzelnende Föhre mit ihrer verhältnismässig dicken Borke (Koch & Thongjien 1989). Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Schadenprozent. Für die vollmechanisierte Holzernte mit Vollernter und Forwarder werden in der Literatur mehrheitlich Schadenhäufigkeiten von

rund 10% angegeben (Slamka & Radocha 2010). Im Vergleich dazu ist die Schadenhäufigkeit bei motormanuellen Verfahren (Fällen und Aufarbeiten der Bäume mit der Motorsäge) höher, da die Bäume weniger kontrolliert zu Fall gebracht werden können und meist Langholz geerntet wird. Bei motormanuellen Verfahren liegt der Anteil beschädigter Bäume zwischen 10 und 25% (Ficklin et al 1997, Bacher-Winterhalter 2004, Nill et al 2011 und 2014).

Bei Gassenabständen über 20 m müssen bei hochmechanisierten Arbeitsverfahren die Bäume ausserhalb des Kranbereichs des Vollernters motormanuell zugefällt und vorgerückt werden, weshalb die Schadenhäufigkeit mit zunehmendem Rückegassenabstand im Allgemeinen zunimmt (Sauter & Busmann 1994, Morat et al 1998, Han & Kellogg 2000, Nakou et al 2014). In einer Untersuchung von Bort et al (1993) waren bei 20 m Gassenabstand 3.4% der Z-Bäume beschädigt, bei 30 m Gassenabstand waren es doppelt so viele und bei 40 m Abstand gar dreimal so viele.

Bäume entlang der Rückegassen werden häufiger verletzt als die übrigen Bäume (Bettinger & Kellogg 1993, Heitzman & Grell 2002, Nill et al 2011, Nakou et al 2014). Neben Verletzungen am Stamm und an den Wurzelanläufen kommt es bei Gassenrandbäumen zusätzlich zu Wurzelverletzungen aufgrund des Befahrens der Gassen. Borchert et al (2008) fanden beispielsweise in einem Fichtenbestand bei 40% der Gassenrandbäume verletzte Wurzeln, und in einer Untersuchung von Fries (1975) in Fichtenbeständen wiesen gar 84% aller Randbäume Wurzelverletzungen auf.

Über Baumwunden können Fäuleerreger wie der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*), der Hallimasch (*Armillaria spec.*) oder Schichtpilze (*Stereum spec.*) in den Baum eindringen und das Holz entwerten. Ob eine Baumverletzung zu Fäulebefall führt, hängt von der Lage und dem Ausmass der Wunde ab und davon, in welcher Jahreszeit die Verletzung entstanden ist. Mit zunehmender Grösse und Schwere der Verletzung nimmt die Gefahr einer Pilzinfektion zu (Meng 1978). Verletzungen in Bodennähe werden sehr oft mit Fäuleerregern infiziert, mit zunehmender Höhe der Verletzung am Baum nimmt die Infektionsgefahr hingegen ab (Schönhar 1979). Aufgrund dieser verschiedenen Faktoren, welche die Infektionsanfälligkeit verwundeter Bäume beeinflussen, variieren die Angaben in der Literatur zum Fäulebefall. Schönhar (1979) fand beispielsweise bei 63% der verletzten Bäume einen Befall mit Fäule. In den Untersuchungen von Butora & Schwager (1986) waren rund 60% der beim Holzrücken beschädigten Fichten von Fäulepilzen infiziert, und Borchert et al (2008) konnten bei fast allen Gassenrandbäumen mit Wurzelverletzungen nachfolgende Fäulen feststellen. Der Anteil Fäule nach Verletzung nimmt im Laufe der Zeit markant

zu. Mäkinen et al (2007) fanden sechs Jahre nach der Verletzung bei 10% und 20 Jahre nachher bei 20% der beschädigten Fichten Stammfäule.

Von der Wunde breitet sich die Fäule immer weiter im Holz aus, dabei ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit vor allem von der Grösse und der Schwere der Verletzung abhängig. In mehreren Studien wurden Ausbreitungsraten zwischen 10 und 20 cm pro Jahr gefunden, mit welcher sich die Fäule in die Höhe ausbreitet (Bazzigher 1973, Meng 1978, Mäkinen et al 2007, Borchert 2008). Hingegen sind zur radialen Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Literatur kaum Angaben zu finden. Durch die Fäule wird das Holz verfärbt, abgebaut und entwertet. Da bei der Holzernte vor allem der unterste und damit auch der wertvollste Teil eines Baumes von Verletzungen betroffen ist, können die Wertverluste beträchtlich sein.

Baumverletzungen und Fäule beeinträchtigen schliesslich auch das Baumwachstum. Verletzte oder zerstörte Wurzeln behindern die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen (Kozlowski 1969). Zudem kann der Transport von Kohlehydraten von der Krone zur Wurzel durch Stammverletzungen beeinträchtigt sein (Fröhlich et al 1977). Schliesslich werden Ressourcen für die Wund- und Verteidigungsreaktion verbraucht, die nicht mehr für das Wachstum zur Verfügung stehen. Verletzte und mit Fäule befallene Fichten zeigten beispielsweise in einer Untersuchung von Bendz-Hellgren & Stenlid (1995) ein um 5% geringeres Durchmesserwachstum als gesunde Bäume und ein um 10% vermindertes Volumenwachstum während der Untersuchungszeit von 20 Jahren. Keine Zuwachseinbussen nach Rindenschäden zeigten hingegen Fichte, Tanne und Buche in Untersuchungen von Kohnle (2014).

durchforstung des fiktiven Fichtenbestandes im Alter 20 stattfindet und dass der Bestand nach 110 Jahren beim Erreichen des Zieldurchmessers von 60 cm geräumt wird.

Modelle

Modell zur Ermittlung der Mindererlöse durch Produktionseinbussen

Wie die Literaturrecherche zeigt, können die Auswirkungen der Bodenverdichtung auf das Baumwachstum sehr unterschiedlich sein. Deshalb wurden mit dem Modell verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Produktionseinbussen berechnet (Tabelle 1). In Szenarium 1 wird angenommen, dass die Randbäume den Produktionsverlust des Rückgassenaushiebs zu 100% kompensieren. In Szenarium 2 können die Gassenrandbäume den Produktionsverlust der Gassen zur Hälfte ausgleichen. Keinen Ausgleich des Produktionsverlustes der Gassen durch die Randbäume gibt es in Szenarium 3. In den Szenarien 1 bis 3 wurde angenommen, dass der Boden abseits der Gassen in der Vergangenheit nicht befahren wurde. In den Szenarien 2a und 2b, welche gewissermassen Unterszenarien des Szenariums 2 darstellen, wurde hingegen die Annahme getroffen, dass der Boden zusätzlich auf einem Teil der Fläche abseits der aktuellen Gassen durch früheres Befahren in Mitleidenschaft gezogen wurde (Tabelle 1). In Szenarium 2a wurde der davon betroffene Flächenanteil auf 20% festgelegt und die Produktionseinbussen auf dieser Fläche auf 10%, in Szenarium 2b wird eine stärkere frühere Befahrung angenommen mit einer Beeinträchtigung von 50% der Fläche abseits der Rückgassen und einer Produktionseinbussen der Bäume um 30%.

Für die einzelnen Szenarien wurden die Produktionseinbussen berechnet und von der anhand der Ertragstafel ermittelten Gesamtwuchsleistung abgezogen. Zusätzlich wurden 10% als Ernteverluste abgezogen. Danach wurde die produzierte Holzmenge mit dem Holzpreis für Fichte (90 CHF/m³, gewichteter Durchschnitt über alle Sortimenten) multipliziert, woraus der Erlös über eine gesamte Umtriebszeit resultiert.

Modell zur Schätzung der Mindererlöse durch Wertverluste

Für die in Tabelle 1 dargestellten Szenarien wurden in einem weiteren Modell die Wertverluste durch Fäulebefall als Folge von Baumverletzungen bei der Holzernte und beim Befahren der Rückgassen berechnet. Berücksichtigt wurden dabei Wurzelverletzungen sowie oberirdische Verletzungen an Wurzelanläufen und Stamm. Dabei wurde für das Szenarium 1 (Basisszenarium) die Annahme getroffen, dass keine Wertverluste durch Fäulebefall eintreten.

In Bezug auf die Wurzelverletzungen wurde für die verbleibenden Szenarien aufgrund der Er-

Szenarium	Produktionseinbussen	
	auf Rückgassen	abseits von Rückgassen
1	0%	0%
2	50%	0%
2a	50%	10% auf 20% der Fläche zwischen den Gassen
2b	50%	30% auf 50% der Fläche zwischen den Gassen
3	100%	0%

Tab 1 Szenarien, für welche der Mindererlös durch Produktionseinbussen berechnet wurde.

Modellhafte Schätzung von Mindererlösen und Holzerntekosten

Zur Schätzung von Mindererlösen und Holzerntekosten in Abhängigkeit des Rückgassenabstands wurden Excel-basierte Modelle entwickelt. Als Grundlage für die Berechnungen dienten die Daten zur Gesamtwuchsleistung eines Fichtenbestandes mit Bonität 28 aus der Ertragstafel (Badoux 1968), wobei angenommen wurde, dass die Erst-

gebnisse der Literaturrecherche angenommen, dass Bäume mit einem Abstand von bis zu 4 m vom Rückegassenrand von solchen betroffen sein können, da ihre Wurzeln bis in den Gassenbereich reichen. Weiter wurde die Annahme getroffen, dass bei jeder Durchforstung bei 40% dieser Bäume Wurzeln verletzt werden, 60% der verletzten Bäume von Fäulepilzen befallen werden und dass es durchschnittlich zehn Jahre dauert, bis die Fäule von den Wurzeln bis in den Stamm vordringt. Im Stamm breitet sich die Fäule für unsere Berechnung vertikal mit einer Geschwindigkeit von 12 cm und radial mit 5 mm pro Jahr aus.

Oberirdische Verletzungen im Zuge der Holzernnte treten ebenfalls besonders oft entlang der Rückegassen auf. Für die Berechnungen wurde für die Szenarien 2, 2a, 2b und 3 angenommen, dass bei jeder Durchforstung 20% der Bäume innerhalb eines

2 m breiten Streifens entlang der Gassen oberflächlich verwundet werden. Ausserhalb dieses Streifens nimmt die Schadenhäufigkeit am verbleibenden Bestand wegen des notwendig werdenden Zufällens und Vorrückens der Bäume mit zunehmendem Rückegassenabstand zu. Bei einem Gassenabstand von 20 m wurde die Schadenhäufigkeit auf 10% festgelegt, bei einem Abstand von 30 m auf 12.5%, bei 40 m auf 15%, bei 50 m auf 17.5% und bei mehr als 60 m auf 20%. Es wurde wiederum davon ausgegangen, dass sich bei 60% der verletzten Bäume Fäule entwickelt und dass sich diese vertikal mit einer Geschwindigkeit von 12 cm und radial mit einer solchen von 5 mm pro Jahr ausbreitet.

Mithilfe der Gesamtwuchsleistung aus der Ertragstafel konnte so die Faulholzmenge über die gesamte Umtriebszeit berechnet werden. Es wurde angenommen, dass fäulebefallenes Holz im Durchschnitt einen 40% geringeren Holzpreis hat als gesundes Holz. Diese Annahme ist vorsichtig gewählt. Hätte nämlich die Fäule zur Folge, dass das Holz nur noch als Energieholz verwertet werden kann, wäre der Wertverlust grösser.

Modell zur Schätzung der Holzerntekosten

Für die Berechnung der Holzerntekosten wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Standardholzernteverfahren für befahrbares Gelände ausgewählt. Alle Bäume innerhalb eines 10 m breiten Streifens beidseits der Rückegasse können vom Radvollernter erreicht werden. Für einen flächendeckenden Einsatz des Vollernters darf also der Abstand zwischen den Rückegassen nicht grösser als 20 m sein. Bei grösseren Gassenabständen gibt es eine Zwischenzone, in welcher die Bäume je nach Baumdimension und Gassenabstand zugefällt oder vorgerückt werden müssen (Tabelle 3). Die eingeschnittenen Sortimentsstücke werden mit einem Forwarder zu einem Lagerplatz an der Waldstrasse gebracht, wobei eine durchschnittliche Rückedistanz von 180 m angenommen wurde.

Die Holzerntekosten wurden mit dem Holzernteproduktivitätsmodell HeProMo (Erni et al 2003) berechnet. Mit diesem Modell können die Kosten in Abhängigkeit des Brusthöhendurchmessers (BHD) der zu erntenden Bäume geschätzt werden, jedoch nicht in Abhängigkeit des Gassenabstandes. Zur Berechnung der Erntekosten für die Gassenabstände

Holzernteverfahren	BHD der zu erntenden Bäume	Beschreibung der Holzernteverfahren
Vollernter (Kranzone)	≤40 cm	Fällen und Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
	>40 cm	Fällen motormanuell, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
Vollernter mit Zufällen aus Zwischenzone	Bäume aller Durchmesser	Zufällen motormanuell, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
Vollernter mit Vorrücken aus Zwischenzone	Bäume aller Durchmesser	Fällen motormanuell, Vorrücken mit Schlepperseilwinde, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder

Tab 2 Im Modell gewählte Holzernteverfahren für einen Fichtenbestand. Die Kranreichweite des Vollernters beträgt 10 m. Bäume bis zu einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von 40 cm werden mit dem Vollernteraggregat gefällt, dickere Bäume mit der Motorsäge.

Gassenabstand (m)	BHD der zu erntenden Bäume (cm)	Verfahren für Bäume in der Zwischenzone
20–30	12–60	Zufällen
30–40	12	Vorrücken
	14–60	Zufällen
40–50	12–16	Vorrücken
	18–60	Zufällen
50–60	12–22	Vorrücken
	24–60	Zufällen

Tab 3 Für das Modell gewählte Holzernteverfahren für Bäume in der Zwischenzone, d.h. ausserhalb der Kranreichweite des Vollernters. BHD: Brusthöhendurchmesser.

Szenarium	Mindererlös durch Produktionseinbussen (CHF/ha)					Mindererlös durch Wertverluste (CHF/ha)				
	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	14855	9903	7428	5942	4952	6947	6305	6317	6568	6921
2a	17826	12875	10399	8913	7923	6792	6170	6184	6431	6777
2b	37139	32187	29711	28225	27235	5789	5292	5320	5542	5847
3	29711	19807	14855	11884	9904	5723	5489	5705	6078	6513

Tab 4 Mindererlöse pro Hektare durch Produktionseinbussen und Wertverluste über eine gesamte Umtriebszeit bei verschiedenen Rückegassenabständen (Fichte, Bonität 28).

Szenarium	Mindererlös pro Hektare (CHF/ha)					Mindererlös pro Kubikmeter (CHF/m ³)				
	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	21 802	16 209	13 745	12 510	11 872	14	10	9	8	7
2a	24 619	19 045	16 583	15 344	14 700	15	12	10	10	9
2b	42 928	37 479	35 031	33 767	33 082	27	24	22	21	21
3	35 434	25 297	20 561	17 963	16 416	22	16	13	11	10

Tab 5 Summe der Mindererlöse pro Hektare und pro Kubikmeter geerntetes Holz infolge von Produktionseinbussen und Wertverlusten über eine gesamte Umtriebszeit bei verschiedenen Rückegassenabständen (Fichte, Bonität 28).

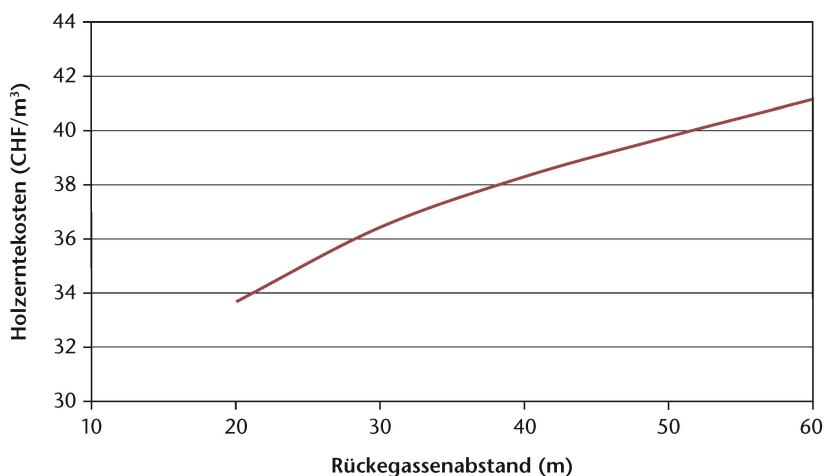
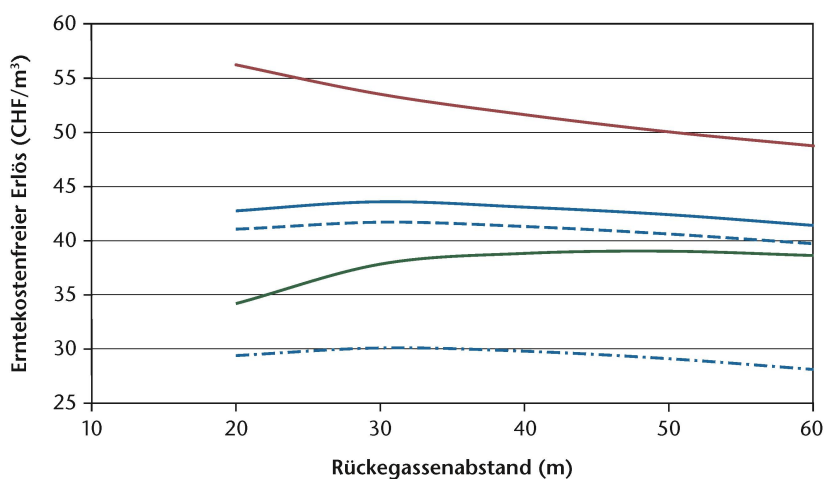


Abb 4 Durchschnittliche Holzerntekosten pro Kubikmeter über eine gesamte Umtriebszeit bei verschiedenen Rückegassenabständen (Fichtenbestand, Bonität 28).



— Szenarium 1 — Szenarium 2 - - - Szenarium 2a - · - · Szenarium 2b — Szenarium 3

Abb 5 Erntekostenfreie Erlöse in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes für verschiedene Szenarien. Die Szenarien unterscheiden sich durch die Höhe der Produktionseinbusse auf der Rückegassenfläche (Szenarium 1: 0%, Szenarium 2: 50%, Szenarium 3: 100%) und abseits der Rückegassen (Szenarien 2a und 2b) sowie in der Höhe der Wertverluste durch Fäulebefall (Szenarium 1: kein Wertverlust; Szenarien 2, 2a, 2b, 3: mit Wertverlust).

von 20, 30, 40, 50 und 60 m wurde deshalb ein Excel-basiertes Modell entwickelt. Die ermittelten Erntekosten für die einzelnen BHD wurden mit den Holz mengen, die während der Umtriebszeit von 110 Jahren im fiktiven Fichtenbestand anfallen, multipliziert. Damit konnte die Summe der Holzerntekosten über eine gesamte Umtriebszeit in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes berechnet werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die Mindererlöse wegen Produktionseinbussen und Wertverlusten über eine gesamte Umtriebszeit sind je nach Szenarium recht bedeutend (Tabelle 4). Bedingt durch die angenommene, hohe Bonität der Fichte in der vorliegenden Modellrechnung sind die Mindererlöse durch Produktionseinbussen meist bedeutender als die fäulebedingten Wertverluste. Die durch Produktionseinbussen verursachten Mindererlöse sind bei kleinen Rückegassenabständen hoch und verringern sich mit zunehmendem Gassenabstand. Die Mindererlöse als Folge des Fäulebefalles nehmen mit zunehmendem Gassenabstand zunächst ab (Minimum bei 30 m Gassenabstand), steigen danach aber wieder an. Dies lässt sich folgendermassen erklären: Bei einem Gassenabstand von 20 m ist ein relativ grosser Teil der Bäume von Wurzelverletzungen betroffen. Mit zunehmendem Abstand sind weniger Gassenrandbäume betroffen, weil die Anzahl der Gassen und somit auch diejenige der Randbäume entlang dieser Gassen abnimmt. Allerdings nehmen mit zunehmendem Gassenabstand die oberirdischen Holzernteschäden infolge der längeren Vorrückedistanzen zu, sodass die Wertverluste ab einem Abstand von 30 m insgesamt wieder grösser werden. Tabelle 5 zeigt die Summe der Mindererlöse als Folge von Produktionseinbussen und Wertverlusten pro Hektare und umgerechnet auf den Kubikmeter verkaufte Holz.

Die Holzerntekosten steigen mit zunehmendem Gassenabstand an, wobei der Anstieg unterproportional verläuft (Abbildung 4). Die durchschnittlichen Holzerntekosten über eine gesamte Umtriebszeit liegen für einen Gassenabstand von 20 m bei 33 CHF/m³ und steigen auf 41 CHF/m³ bei einem Gassenabstand von 60 m.

Werden die bei den verschiedenen Szenarien berechneten Mindererlöse vom Erlös des Szenariums 1 (Referenz, 90 CHF/m³) abgezogen, erhält man die durchschnittlichen Erlöse pro Kubikmeter über eine Umtriebszeit. Nach Abzug der Holzerntekosten ergeben sich die erntekostenfreien Erlöse (Abbildung 5). Szenarium 1 ist das Referenzszenarium, bei welchem keine Mindererlöse auftreten, d.h., die Produktionseinbusse auf der Rückegassenfläche wird vollständig durch die Randbäume der Rückegassen kompensiert, und es treten keine Wertverluste durch

Fäule auf. Dies wird in der Praxis wohl selten der Fall sein, das Szenarium zeigt jedoch, wo der theoretisch erreichbare Idealzustand in Bezug auf den erntekostenfreien Erlös in Abhängigkeit des Rückegassenabstands liegen würde. In den Szenarien 2 und 3, die Produktionseinbussen und Wertverluste berücksichtigen, liegt denn der erntekostenfreie Erlös auch deutlich tiefer, mit Differenz zum Idealzustand von 7 bis 14 CHF/m³ bei Szenarium 2 und 10 bis 22 CHF/m³ bei Szenarium 3.

Die Szenarien 2, 2a und 2b zeigen den gleichen Verlauf der erntekostenfreien Erlöse in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes, die einzelnen Kurven liegen jedoch auf stark unterschiedlichem Niveau. Dies, weil den Szenarien 2a und 2b zusätzlich eine Produktionseinbusse als Folge früherer Befahrung abseits der heutigen Rückegassen zugrunde liegt (Abbildung 5). Dies führt zu entsprechend geringeren holzerntekostenfreien Erlösen. Szenarium 2b weist die ungünstigsten Rahmenbedingungen auf, entsprechend beträgt die Differenz zu Szenarium 1 zwischen 21 und 27 CHF/m³. Auch wenn es sich hier um eine Modellrechnung mit zahlreichen Annahmen handelt, zeigt sich doch die Grössenordnung der Verluste, die in einem ungünstigen Fall entstehen können.

Die Kurve des holzerntekostenfreien Erlöses verläuft in den Szenarien 2, 2a und 2b eher flach (Abbildung 5), mit einem Maximum bei einem Rückegassenabstand von 30 m, was bedeutet, dass hier zwar der beste Kompromiss zwischen Verlust an Produktionsfläche durch Rückegassen, Wertverlust durch Fäule sowie Holzernteaufwand liegt, dass sich dieses Optimum aber je nach gewählten Annahmen leicht in Richtung 20 oder 40 m Gassenabstand verschieben kann. Ab einem Rückegassenabstand von 30 m sinkt die Kurve des erntekostenfreien Erlöses, was auf die höheren Holzerntekosten und die zunehmenden Holzernteschäden bei längeren Vorrückedistanzen zurückzuführen ist.

Bei Szenarium 3 wurde angenommen, dass die Produktionseinbusse auf Rückegassen 100% beträgt, die Randbäume also keinen vermehrten Zuwachs leisten. Gegenüber Szenarium 2 mit 50% Produktionsverlust liegen die erntekostenfreien Erlöse deshalb tiefer, bei Gassenabständen von 20 oder 30 m sogar deutlich tiefer. Da bei diesen Gassenabständen die durch die Rückegassen beanspruchte Fläche 20 respektive 30% der Gesamtfläche des Bestandes beträgt, wirkt sich die Annahme, dass die Randbäume den Produktionsverlust überhaupt nicht auszugleichen vermögen, drastisch aus. Mit zunehmendem Gassenabstand sinkt der Anteil der Rückegassenfläche an der Gesamtfläche des Bestandes, sodass dieser Effekt schwächer wird und die Kurve des erntekostenfreien Erlöses sich derjenigen von Szenarium 2 annähert. Für Gassenabstände ab 40 m ist der erntekostenfreie Erlös annähernd konstant.

Folgerungen

Produktionseinbussen auf Rückegassen wie auch Schäden am verbleibenden Bestand lassen sich kaum gänzlich vermeiden. Die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Szenarien 2, 2a und 3 dürften der Wirklichkeit recht nahe kommen. Szenarium 1 (keine Mindererlöse durch Produktionseinbussen und Wertverluste) ist bei der Waldbewirtschaftung in der Praxis wohl kaum anzutreffen. Als Vergleichsmaßstab zeigt es jedoch die Grössenordnung der Verluste auf, die durch verschiedenen starke Beeinträchtigungen von Boden und Bestand durch die Holzernte entstehen können. In Szenarium 1 ist auch sehr deutlich zu sehen, wie die Holzerntekosten vom Rückegassenabstand beeinflusst werden.

Der optimale Abstand der Rückegassen, also jener Abstand, bei welchem die erntekostenfreien Erlöse über eine gesamte Umtriebszeit gerechnet am höchsten sind, liegt beim betrachteten Fichtenbestand der Bonität 28 je nach Szenarium im Bereich von 30 bis 50 m. Dies entspricht in vielen Fällen dem Gassenabstand, der heute in der Praxis, mehrheitlich aus anderen Gründen, bereits häufig anzutreffen ist. Allerdings kann aufgrund des flachen Kurvenverlaufs aus der vorliegenden Modellrechnung nicht von einem eindeutigen Optimum gesprochen werden. Weitere Modellrechnungen mit anderen Annahmen, insbesondere anderen Bonitäten, könnten hier aufschlussreiche Ergebnisse liefern.

Wie die Szenarien 2a und 2b zeigen, kann das Befahren der Waldböden abseits von Rückegassen einen grossen Einfluss auf den erntekostenfreien Erlös haben. Das spricht eindeutig dafür, dass künftig nur noch auf einem für einen längeren Zeitraum geplanten Rückegassennetz gefahren wird. Damit kann das Risiko einer Beeinträchtigung des Bodens und der Wurzeln auf eine genau definierte, räumlich begrenzte Fläche beschränkt werden.

Die Ergebnisse (Holzerntekosten bei verschiedenen Gassenabständen, Mindererlöse wegen Produktionseinbussen und Wertverlusten) beruhen auf Modellen mit zahlreichen Annahmen und gelten so wie hier dargestellt nur für Fichtenreinbestände der hohen Bonität 28. Es wurde versucht, die Annahmen möglichst gut abzustützen. Zu einigen Themen wie etwa dem Wachstum von Bäumen auf verdichteten Böden gibt es allerdings nur wenig Literatur aus Mitteleuropa. Oft fehlen auch langfristige Untersuchungen, oder sie sind sehr selten, wie zum Beispiel zum Wachstum von Gassenrandbäumen. Deswegen wurden für die Modellierung, etwa für die Produktionseinbussen, eher vorsichtige Annahmen getroffen.

Die Holzerntekosten, welche heute oder in naher Zukunft anfallen, sind den Waldeigentümern und Bewirtschaftern meist bewusst, sie sind für sie auch wichtig, weil sie oft einem hohen Kosten- und Liquiditätsdruck unterliegen. Viel schwieriger ist es

hingegen, die Folgen heutigen Handelns in die Gesamtbetrachtung einzubeziehen. Zur Einschätzung der langfristigen finanziellen Folgen von heute zu realisierenden Feinerschliessungen ist dies allerdings notwendig. Nur so können beispielsweise die langfristig positiven Aspekte des Bodenschutzes überzeugen. Mit den hier dargestellten Erkenntnissen hoffen die Autoren, diese Aspekte vermehrt ins Bewusstsein der Waldbewirtschafter zu rücken. Weiter ist zu hoffen, dass diese erste Modellkalkulation zu vertiefter Forschung Anlass gibt. ■

Eingereicht: 22. Mai 2015, akzeptiert (mit Review): 30. November 2015

Dank

Der vorliegende Artikel beruht auf den Ergebnissen der Masterarbeit von Tobias Jäger aus dem Jahr 2012. Seine umfangreichen Literaturrecherchen zu Produktionsverlusten und Holzentwertungen sowie die Verknüpfung mit den Holzerntekosten und den Rückegassenabständen führten zu vertieften Erkenntnissen und ermöglichten den vorliegenden Artikel.

Literatur

- BACHER-WINTERHALTER M (2004)** Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzertesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes. Freiburg i.Br.: Albert-Ludwigs-Univ, Dissertation. 228 p.
- BADOUX E (1968)** Ertragstafeln für Fichte. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt forstl. Vers.wes.
- BAZZIGHER G (1973)** Wundfäule in Fichtenwäldungen mit alten Schältschäden. Eur J For Pathol 3: 71–82.
- BENDZ-HELLGREN M, STENLID J (1995)** Long-term reduction in the diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. For Ecol Manage 74: 239–243.
- BETTINGER P, KELLOGG LD (1993)** Residual stand damage from cut-to-length thinning of second-growth timber in the Cascade Range of western Oregon. For Prod J 43: 59–64.
- BORCHERT H (2008)** Bodenschutz bei der Holzernte. Freising: Bayer Landesanstalt Wald Forstwirtschaft, LWF aktuell 67: 3–4.
- BORCHERT H, BLASCHKE M, METAN M (2008)** Wurzelverletzungen unter Raupe und Rad. Freising: Bayer Landesanstalt Wald Forstwirtschaft, LWF aktuell 67: 16–18.
- BORT U, MAHLER G, PFEIL C (1993)** Mechanisierte Holzernte. Wechselwirkungen von Erschliessungsdichte, Pfléglichkeit und Betriebserfolg. Forsttech Inf 45 (11): 121–124.
- BOWERING M, LEMAY V, MARSHALL P (2006)** Effects of forest roads on the growth of adjacent lodgepole pine trees. Can J For Res 36: 919–929.
- BRAIS S (2001)** Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. Soil Sci Soc Am J 65: 1263–1271.
- BREDBERG CJ, WÄSTERLUND I (1983)** Wurzel- und Bodenschäden durch Fahrzeuge. Forstwiss Cent.bl 102: 86–98.
- BUTORA A, SCHWAGER G (1986)** Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Birmensdorf: Eidgenössische Anst. forstl. Vers.wes, Ber 288. 51 p.
- ERNI V, LEMM R, FRUTIG F, BREITENSTEIN M, RIECHSTEINER D ET AL (2003)** HeProMo – Produktivitätsmodelle für Holzerntearbeiten. Windows-Software. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
- FICKLIN RL, DWYER JP, CUTTER BE, DRAPER T (1997)** Residual tree damage during selection cuts using two skidding systems in the Missouri Ozarks. In: Pallardy SG, Cecich RA, Garrett HG, Johnson PS, editors. Proceedings of the 11th Central Hardwood Forest Conference; Columbia, MO, March 23–26, 1997. pp. 36–46. www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/other/gtr_nc188/CH volume11page036.pdf (5.11.2015)
- FRIES J (1975)** Ökologische Aspekte der mechanisierten Durchforstung. Forst- Holzwirt 30: 315–320.
- FROEHLICH HA, MCNABB DH (1984)** Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests. In: Stone EL, editor. Forest soils and treatment impacts. Proceedings of the 6th North American Forest Soils Conference. Univ Tennessee, Knoxville. June 1983. pp. 159–192. http://forest.moscowfls.wsu.edu/smp/solo/documents/RPs/Froehlich_McNabb_1983.pdf (5.11.2015)
- FROEHLICH RC, COWLING EB, COLLICOTT LV, DELL TR (1977)** *Fomes annosus* reduces height and diameter growth of planted slash pine. For Sci 23: 299–306.
- GOMEZ A, POWERS RF, SINGER MJ, HORWATH WR (2002)** Soil compaction effects on growth of young Ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. Soil Sci Soc Am J 66: 1334–1343.
- HAN HS, KELLOGG LD (2000)** Damage characteristics in young Douglas-fir stands from commercial thinning with four timber harvesting systems. West J Appl For 15: 27–33.
- HEITZMAN E, GRELL AG (2002)** Residual tree damage along forwarder trails from cut-to-length thinning in Maine spruce stands. North J Appl For 19: 161–167.
- HELMS JA, HIPKIN C (1986)** Effects of soil compaction on tree volume in a California ponderosa pine plantation. West J Appl For 1: 121–124.
- ISOMÄKI A (1986)** Effects of line corridors on the development of edge trees. Folia Forestalia 678. 30 p. (in Finnisch mit englischer Zusammenfassung).
- JÄGER T (2012)** Quantifizierung der monetären Vorteile von intakten Waldböden und allfälliger Mehraufwände bei der Holzernte. Zürich: ETH Zürich, Gruppe Waldmanagement/Waldbau, Masterarbeit. 107 p.
- JANSSON KJ, WÄSTERLUND I (1999)** Effect of traffic by lightweight forest machinery on the growth of young *Picea abies* trees. Scand J For Res 14: 581–588.
- KOCH J, THONGJIEM N (1989)** Wound and root damage in Norway spruce following mechanical thinning. Opera Bot 100: 153–162.
- KOHNLE U (2014)** Zuwachseinbussen durch Rindenschäden. AFZ/Der Wald 96 (24): 20–21.
- KOZLOWSKI TT (1969)** Tree physiology and forest pests. J Forestry 67: 118–123.
- KRAMER H, JÜNEMANN D (1985)** Der Einfluss starker individueller und schematischer Jungdurchforstung auf das Wachstum der Fichte. Die Entwicklung des Olper Fichtendurchforstungsversuches. Forstarchiv 56: 253–258.
- KREMER J (1999)** Auswirkungen der Befahrung auf das Wachstumsverhalten von Fichten, Kiefern und Buchen auf ausgewählten Standorten. Forsttechn Inf 51 (1+2): 13–16.
- LANDBECK H (1965)** Wegebreite und Randwirkung bei der Kiefer. Arch Forstwes 14: 41–59.
- LÜSCHER P, FRUTIG F, SCIACCA S, SPJEVAK S, THEES O (2009A)** Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Merkbl Praxis 45. 12 p.
- LÜSCHER P, BORER F, BLASER P (2009B)** Langfristige Beeinträchtigung des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O, Lemm R, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: VDF. 816 p.
- MÄKINEN H, HALLAKSELA AM, ISOMÄKI A (2007)** Increment and decay in Norway spruce and Scots pine after artificial logging damage. Can J For Res 37: 2130–2141.

- MENG W (1978)** Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmass und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Stuttgart: Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Band 53. 159 p.
- MILLER RE, SCOTT W, HAZARD JW (1996)** Soil compaction and conifer growth after tractor yarding at three coastal Washington locations. *Can J For Res* 26: 225–236.
- MOEHRING DM, RAWLS IW (1970)** Detrimental effects of wet weather logging. *J Forestry* 68: 166–167.
- MORAT J, FORBRIG A, GRAUPNER J (1998)** Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der BRD. Gross-Umstadt: Kuratorium Waldarbeit Forsttechnik, KWF-Bericht 25. 109 p.
- NAKOU A, NILL M, SAUTER HU, KOHNLE U (2014)** Rindenschäden durch Holzernte: Analysen, Modellierung und Evaluierung auf der Basis zweier Praxis-Grossversuche. *Allg Forst- Jagdztg* 184: 97–112.
- NILL M, KOHNLE U, SAUTER UH (2011)** Rindenschäden mit mutmasslichem Bezug zur Holzernte im Spiegel der Betriebsinventuren in Baden-Württemberg. *Forstarchiv* 82: 216–224.
- NILL M, KOHNLE U, SAUTER UH (2014)** Nehmen die Rindenschäden eher ab oder zu? *AFZ/DerWald* 69 (24): 15–16.
- PFISTER RD (1969)** Effect of roads on growth of western white pine plantations in northern Idaho. Ogden: USDA Forest Service, Research Paper INT-65. 8 p.
- SAUTER UH, BUSMANN C (1994)** Bestandesschäden bei der Durchforstung von Fichtenbeständen mit Kranvollerntern unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rückegassenabstände. *Forsttech Inf* 46 (12): 137–141.
- SCHÖNHAR S (1979)** Über den Befall beim Holzrücken verwundeter Fichtenwurzeln durch Rotfäulepilze. *Allg Forst- Jagdztg* 150: 76–78.
- SLAMKA M, RADOCHA M (2010)** Results of harvesters and forwarders operations in Slovakian forests. *Lesnícky časopis – Forestry Journal* 56: 1–15.
- STRATMANN H (1986)** Bestandesfeinerschliessung, Zuwachs, Risiko. *Forst Holz* 41: 204–207.
- WÄSTERLUND I (1983)** Growth reduction of trees near strip roads resulting from soil compaction and damaged roots. A literature survey. *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift*, 81: 97–109 (Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).
- WÄSTERLUND I (1988)** Damages and growth effects after selective mechanical cleaning. *Scand J For Res* 3: 259–272.
- WERT S, THOMAS BR (1981)** Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. *Soil Sci Soc Am J* 45: 629–632.

Coûts de récolte et pertes selon la distance entre les layons de débardage dans des peuplements d'épicéas

Le passage de machines sur le sol forestier doit être évité, de manière à concentrer les risques d'atteintes au sol sur quelques lignes précises, les layons. Du fait que de grandes distances entre les layons augmentent les coûts de récolte, des intervalles réduits entre les layons sont favorisés, notamment pour la récolte mécanisée. Une distance de 20 m permet à une récolteuse munie d'une grue d'une portée de 10 m d'exploiter d'une manière mécanisée l'ensemble de la surface. Les layons ont comme conséquence une perte de surface productive, et la croissance des arbres bordant les layons peut être réduite par le passage des machines et le compactage du sol. De plus, des racines endommagées peuvent être attaquées par des champignons, ce qui a pour conséquence à long terme de la pourriture et une perte de valeur. De grandes distances entre les layons ont comme inconvénients une augmentation des coûts d'exploitation et de plus forts dégâts au peuplement restant en raison de l'abattage manuel et du débusquage de certains arbres. Ce travail analyse les conséquences de différentes distances entre les layons dans un peuplement d'épicéas pur d'une bonité de 28 en considérant différents scénarios de l'influence sur le sol et le peuplement. Les calculs démontrent que la perte de valeur, due à une perte de croissance et de valeur, sur une rotation est significative et, qu'à long terme, il est préférable d'opter pour de plus grands intervalles entre les layons, quitte à accepter des coûts de production plus élevés à court terme. La distance optimale entre les layons est estimée à 30 à 50 m.

Timber harvesting costs and losses for different spacing of skid roads in spruce forests

Skid roads are essential to prevent negative impacts of heavy machines on soil fertility and timber growth. Today, skid roads are frequently laid out with a spacing of 20 m because modern harvesters can reach and cut trees as far as 10 m. Skid roads not only use up space which is no longer available for production, they also have negative effects on the growth of adjacent trees due to soil compaction and root damage caused by the passage of forestry machines. Damaged roots will eventually cause butt rot and reduce the amount of valuable timber. A narrow spacing of skid roads thus leads to reduced volume and value production in the long run. In the short run, on the other hand, wider spacing will result in higher costs of timber harvesting and in a higher number of damaged trees since a number of trees need to be cut and pre-delivered manually. In this paper we calculated the advantages and disadvantages of different spacings of skid roads in a spruce stand for various scenarios of negative impacts of soil compaction, root damage and butt rot frequencies. Our results indicate that the losses due to reduced growth and a lower amount of valuable timber may be quite important if they are calculated over a whole rotation period. So, it may pay off to use wider spacing in the long run and to accept higher harvesting costs in the short run. Optimal distances for skid roads could be in the range of 30 to 50 m.