Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Departement Umweltsystemwissenschaften

Quantifizierung der monetären Vorteile von intakten Waldböden und allfälliger Mehraufwände bei der Holzernte

MASTERARBEIT

VON

TOBIAS JÄGER

Februar 2012

Betreuung durch:

DR. PETER ROTACH, DR. PETER AMMANN

DR. PETER LÜSCHER, DR. OLIVER THEES, FRITZ FRUTIG

Zusammenfassung

Der Schutz des Bodens vor physikalischer (Über-)Belastung ist gesetzlich verankert. Ein gewisser Widerspruch dazu ist die anhaltende Tendenz zu grösseren Forstmaschinen in der Waldbewirtschaftung. Für den flächendeckenden Einsatz moderner Holzernteverfahren (Vollernter) werden Rückegassen in einem Abstand von 20 Metern angelegt. Damit wird der Waldboden (inklusive Baumwurzeln) auf einem Fünftel der gesamten Waldfläche den beim Befahren auftretenden Belastungen ausgesetzt. Die mechanische Belastung des Waldbodens durch den Einsatz von Forstmaschinen kann zu schwerwiegenden und lang anhaltenden Veränderungen führen, welche die Bodenfunktionen beeinträchtigen und auch die Baumwurzeln werden beim Befahren oft verletzt. All dies hat negative Auswirkungen auf den Zuwachs der Bäume. Zudem können Wurzelverletzungen zu Fäulnis führen. Ein geringerer Zuwachs und eine verminderte Qualität des durch Fäule befallenen Holzes führen, wie in dieser Arbeit aufgezeigt wird, zu teilweise hohen finanziellen Einbussen. Wird aus Gründen des Bodenschutzes der Abstand zwischen den einzelnen Rückegassen erhöht, nehmen der Aufwand für die Holzernte und die Bestandesschäden zu. In dieser Arbeit wurden die Mehrkosten der bodenschonenden Holzernte, bei der die Gassen in grösseren Abständen angelegt sind, berechnet und dem Nutzen eines intakten Waldbodens gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass sich ein, aus Bodenschutzgründen grösserer Rückegassenabstand, trotz Mehrkosten bei der Holzernte und grösserer Bestandesschäden, langfristig nicht nur ökologisch sondern auch ökonomisch auszahlen kann. Der Gassenabstand mit dem grössten erntekostenfreien Erlös (mit Berücksichtigung allfälliger Mindererlöse durch Zuwachsverluste und Fäulebefall) variiert je nach der Befahrungsempfindlichkeit eines Bodens: Bei befahrungsempfindlichen Böden ist der erntekostenfreie Erlös bei grossen Gassenabständen (50 m) am höchsten, bei wenig empfindlichen Böden bei kleineren Gassenabständen (30 m).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **V**

Tabellenverzeichnis ..... **VI**

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangslage und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung 1
1.3 Fragestellungen 2
1.4 Methodischer Ansatz 3
1.5 Aufbau der Arbeit 3

2 Stand des Wissens **5**
2.1 Auswirkungen des Befahrens auf Boden und Wurzeln 5
2.2 Produktionseinbussen infolge Rückegassen 12
2.2.1 Wachstum von Randbäumen entlang von Gassen/Wegen 12
2.2.2 Auswirkungen von Gassen/Wegen auf den Zuwachs 13
2.3 Auswirkungen des Befahrens auf das Baumwachstum 15
2.3.1 Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Kahlschlägen oder Räumungen 15
2.3.2 Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Durchforstungen 22
2.4 Mehrkosten der bodenschonenden Holzernte 25
2.5 Ernteschäden und deren Folgen 27
2.5.1 Schadensprozente bei der Holzernte 27
2.5.2 Folgen der Ernteschäden 33

3 Berechnung von Kosten und Nutzen intakter Waldböden am Bsp. eines Fichtenbestandes **37**
3.1 Holzerntekosten und Mehrkosten bei teilweisem Verzicht auf Befahrung 38
3.1.1 Auswahl der Arbeitsverfahren 38
3.1.2 Verfahrenabläufe bei den verschiedenen Holzernteverfahren 40
3.1.3 Annahmen für die Berechnung der Erntekosten 43
3.1.3 Ausgewählte Beispiele der Berechnung der Holzerntekosten 49
3.1.4 Ergebnisse der Holzerntekostenberechnungen 54
3.1.5 Diskussion der Holzerntekosten 62
3.2 Mindererlöse infolge befahrungsbedingten Zuwachseinbussen 64
3.2.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch Zuwachseinbussen 64
3.2.2 Ergebnisse: Mindererlöse durch Zuwachseinbussen 67
3.2.3 Diskussion zu den Mindererlösen durch Zuwachseinbussen 70
3.3 Mindererlöse infolge befahrungsbedingter Fäulnis 71
3.3.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch befahrungsbedingte Fäulnis 71
3.3.2 Ergebnisse: Mindererlöse durch befahrungsbedingte Fäulnis 74
3.3.3 Diskussion zu den Mindererlösen durch befahrungsbedingte Fäule 75
3.4 Mindererlöse infolge Verletzung des Holzkörpers bei der Holzernte 76
3.4.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch Ernteschäden 76
3.4.2 Ergebnisse: Mindererlöse infolge Holzernteschäden 77
3.4.3 Diskussion zu den Mindererlösen infolge Holzernteschäden 77

4 Vergleich von Kosten und Nutzen intakter Waldböden **79**

5 Diskussion **82**

5.1 Diskussion der Methoden ... 82
5.2 Diskussion der Ergebnisse ... 84
5.3 Empfehlungen für eine bodenschonende Waldbewirtschaftung ... 86
5.4 Schlusswort ... 87

Dank ... 88

Literaturverzeichnis ... 89

Anhang ... 99

A Glossar ... 100

B Maschinen- und Personaltarife für die Berechnung der Holzerntekosten ... 102

C Holzpreise für die Berechnung der Holzerlöse ... 104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche Folgen der Bodenbefahrung ... 6
Abbildung 2: Fahrspuren kartiert nach Spurtypen ... 8
Abbildung 3: Visuelle Merkmale der Spurtypen ... 9
Abbildung 4: Konsequenzen der Spurtypen für den Boden ... 10
Abbildung 5: Massnahmen und Kosten des physikalischen Bodenschutzes ... 26
Abbildung 6: Waldfläche mit Rückegassen zur Feinerschliessung ... 38
Abbildung 7: Holzernteverfahren Vollernter flächendeckend ... 40
Abbildung 8: Holzernteverfahren Vollernter mit Zufällen ... 41
Abbildung 9: Holzernteverfahren Vollernter mit Vorliefern ... 42
Abbildung 10: Holzerntekosten in Abhängigkeit des Durchmessers ... 60
Abbildung 11: Holzerntekosten über die gesamte Umtriebszeit ... 62
Abbildung 12: Mindererlöse in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes ... 70
Abbildung 13: Fäulekörper innerhalb eines Baumstammes ... 73
Abbildung 14: Erntekostenfreier Erlös bei verschiedenen Varianten ... 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durch mechanische Belastung betroffene Bodenparameter ... 6
Tabelle 2: Kriterien zur Unterscheidung der Spurtypen ... 9
Tabelle 3: Anteil Feinerschliessung bei verschiedenen Rückegassenabständen ... 12
Tabelle 4: Baumwachstum auf früher befahrenem Boden ... 20
Tabelle 5: Baumwachstum auf aktuell befahrenem Boden ... 23
Tabelle 6: Schadensprozente ... 32
Tabelle 7: Ernteverfahren ... 39
Tabelle 8: Kranbereich und Zwischenzone bei verschiedenen Rückegassenabständen ... 39
Tabelle 9: Eingesetzten Maschinen und Kostensätze ... 44
Tabelle 10: Eingesetztes Personal und Kostensätze ... 45
Tabelle 11: Erschliessungslängen an denen Holz liegt ... 46
Tabelle 12: Mittlere Vorlieferdistanzen ... 46
Tabelle 13: Vorlieferdistanzen ... 47
Tabelle 14: Tarif für die Umrechnung BHD/Mittelstamm ... 48
Tabelle 15: Holzerntekosten für das Verfahren Vollernter mit Zufällen ... 55
Tabelle 16: Holzerntekosten für das Verfahren Vollernter mit Vorliefern ... 56
Tabelle 17: Mittelhöhen der zu erntenden Bäume ... 57
Tabelle 18: Vorlieferdistanzen bei verschiedenen Gassenabständen ... 58
Tabelle 19: Erntekosten für die Baumart Fichte ... 59
Tabelle 20: Holzanfall eines Fichtenbestandes ... 61
Tabelle 21: Erntekosten über eine gesamte Umtriebszeit ... 61
Tabelle 22: Gesamtwuchsleistung Fichtenbestand ... 64
Tabelle 23: Ausgewählte Varianten ... 67
Tabelle 24: Produzierte Holzmassen bei verschiedenen Varianten ... 68
Tabelle 25: Produktionseinbussen bei verschiedenen Varianten ... 68
Tabelle 26: Erlöse bei verschiedenen Varianten ... 69
Tabelle 27: Mindererlöse infolge Zuwachseinbussen bei verschiedenen Varianten ... 69
Tabelle 28: Anzahl Bäume im verbleibenden und im ausscheidenden Bestand ... 72
Tabelle 29: Faulholz als Folge von Wurzelschäden bei verschiedenen Varianten ... 74
Tabelle 30: Mindererlöse durch Fäule infolge Wurzelschäden bei verschiedenen Varianten ... 74
Tabelle 31: Faulholz als Folge von Ernteschäden bei verschiedenen Varianten ... 77
Tabelle 32: Mindererlöse durch Fäule infolge Ernteschäden bei verschiedenen Varianten ... 77
Tabelle 33: Mindererlöse wegen Zuwachsrückgang und Fäule ... 79
Tabelle 34: Mindererlöse infolge des Befahrens des Waldbodens ... 79
Tabelle 35: Mindererlöse infolge des Befahrens und der Bestandeschäden ... 80
Tabelle 36: Erlöse bei den verschiedenen Varianten und Gasssenabständen ... 80
Tabelle 37: Erntekostenfreier Erlös bei verschiedenen Varianten ... 81
Tabelle 38: Maschinentarife ... 102
Tabelle 39: Löhne zur Berechnung der Holzerntekosten ... 103
Tabelle 40: Betriebsabrechnung Forstbetriebe Mittelland ... 105
Tabelle 41: Durchschnittlicher Nadelholzpreis ... 106
Tabelle 42: Rundholzpreise ... 107
Tabelle 43: Differenz zwischen Preise ... 108

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

In den letzten Jahrzehnten wurde die Holzernte mehr und mehr mechanisiert, wobei der Trend zu immer grösseren Forstmaschinen bis heute anhält (BORCHERT 2008). Die Mechanisierung ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Holzernte. Diesen Vorteilen stehen allerdings Nachteile in Form von Schäden an verbleibendem Bestand und Waldboden gegenüber. Das Befahren von Waldböden mit schweren Forstmaschinen kann tiefgreifende und lang anhaltende Veränderungen verursachen, welche wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen (LÜSCHER *et al.* 2009a).

In der „Waldpolitik 2020“,welche die Grundsätze der Waldpolitik in der Schweiz festlegt, gehört der Schutz des Waldbodens und die Erhaltung der Vitalität der Bäume zu einem der elf prioritären Zielen (BAFU 2011) und auch die gesetzlichen Grundlagen verlangen den Schutz des Bodens (USG 1983; VBBo 1998).

Einen Boden ohne jegliche negative Auswirkungen zu befahren ist nicht möglich (NEMESTOTHY 2009). Daher empfiehlt die Wissenschaft das Befahren auf einer möglichst kleinen Fläche in Form von sogenannten Rückegassen zu konzentrieren, um so die mit dem Befahren einhergehenden Beeinträchtigungen auf diese Flächen zu beschränken. Die übrige Fläche soll nicht befahren werden (LÜSCHER *et al.* 2008).

Damit vollmechanisiert gearbeitet werden kann, sind heute vielerorts Rückegassen in Abständen von 20 Metern angelegt. Dies hat zur Folge, dass ein wesentlicher Teil - ein Fünftel - der Waldfläche den Belastungen durch Forstmaschinen ausgesetzt ist. Zudem gehen die Feinerschliessungssysteme in Verjüngungsphasen, bei Stürmen oder infolge personellen Wechsels in den Forstbetrieben oft verloren und neue Rückegassen werden angelegt. Auf diese Weise kommt es schleichend zur flächigen Befahrung des Waldbodens.

Zum Schutz des Bodens müssen deshalb, insbesondere auf empfindlichen Böden, andere - kleinere und leichtere - Holzerntesysteme respektive grössere Rückegassenabstände in Betracht gezogen und bei schlechten Witterungsbedingungen die Arbeit ganz eingestellt werden. Arbeitsunterbrüche und grössere Gassenabstände, bei denen nicht mehr alles Holz vollmechanisiert geerntet werden kann, verteuern die Holzernte. Diesen, aufgrund des Bodenschutzes erhöhten Erntekosten steht der Nutzen gegenüber, der sich durch einen intakten Waldboden ergibt. Denn die mechanische Belastung des Bodens bei der Waldbewirtschaftung durch das Befahren kann zur Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und zu Wurzelverletzungen führen, was auch Auswirkungen auf den Zuwachs der Bäume und die Holzqualität und damit letztendlich auch auf den finanziellen Ertrag hat.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Folgen des Befahrens für den Boden und die Bäume zu beschreiben. Die Vorteile eines intakten Waldbodens sollen ökonomisch quantifiziert und den Mehrkosten von bodenschonenden Holzernteverfahren am Beispiel der vollmechanisierten Holzernte im befahrbaren Gelände gegenübergestellt werden.

1.3 Fragestellungen

Aus der Problemstellung ergeben sich folgende, an der Zielsetzung orientierte Fragestellungen, welche die Grundlage der Untersuchungen dieser Arbeit sind:

Mehrkosten von bodenschonenden Holzernteverfahren mit partiellem Befahrungsverzicht

- Welche Mehrkosten verursachen grössere Rückegassenabstände bei der Holzernte im Vergleich zu einem Gassenabstand von 20 Metern, bei welchem flächendeckend vollmechanisiert geerntet werden kann?

Mindererlöse infolge von „befahrungsbedingten“ Boden- und Wurzelschäden

- In welchem Ausmass wird das Wachstum der Bäume, auf durch Befahrung beeinträchtigten Böden beeinflusst und wie hoch sind die finanziellen Einbussen durch allfällige Zuwachsrückgänge?
- Welche Folgen haben, durch das Befahren verursachte Wurzelverletzungen?

Mindererlöse infolge von Bestandesschäden

- Welche Folgen haben bei der Holzernte verursachte Bestandesschäden und wie hoch sind allfällige holzqualitätsbedingte Wertverluste?

Beurteilung verschiedener Gassenabstände aus bodenökologischer und ökonomischer Sicht

- Wie ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis bezüglich Boden- und Bestandesschutz bei Gassenabständen von 20, 30, 40, 50 und 60 Metern?
- Gibt es einen Gassenabstand, welcher aus bodenökologischer und aus ökonomischer Sicht am besten abschneidet?

1.4 Methodischer Ansatz

Um den ökonomische Nutzen von intakten Waldböden zu quantifizieren, wird in dieser Arbeit folgender Ansatz gewählt: Bodenschäden infolge Befahren des Waldbodens mit Forstmaschinen haben negative Auswirkungen, unter anderem auch auf die Holzproduktion. Finanzielle Einbussen können die Folge sein. Diese Einbussen entsprechen den finanziellen Vorteilen respektive dem ökonomischen Nutzen von intakten gegenüber beeinträchtigten Böden.

Um intakte Waldböden möglichst wenig zu beeinträchtigen, können bodenschonende Holzernteverfahren, zum Beispiel solche, bei denen nur ein kleiner Teil der Waldfläche befahren wird (da die Rückegassen in weiten Abständen angeordnet sind), eingesetzt werden. Dies kann die Holzproduktion verteuern. Zudem entstehen bei solchen Ernteverfahren unter Umständen mehr Ernteschäden am verbleibenden Baumbestand, was wiederum zu finanziellen Einbussen führen kann. Somit dürfte es einen, wenn auch je nach Ausmass der Boden- und Bestandesschäden unterschiedlichen Abstand der Rückegasse geben, bei welchem das Kosten-Nutzen-Verhältnis hinsichtlich des Boden- und auch des Bestandesschutzes am Besten ist.

Wie die Kosten und der Nutzen des Bodenschutzes konkret berechnet werden, wird näher im dritten Kapitel dieser Arbeit erklärt. Als Grundlage für alle Berechnungen dient ein fiktiver Waldbestand. Als Baumart wird die Fichte gewählt, dies weil sie einerseits die häufigste und für die heimische Forstwirtschaft auch wichtigste Baumart ist, andererseits auch, weil zu dieser Baumart viele Studien existieren. So liegen beispielsweise viele Resultate bezüglich Ernteschäden in Fichtenbeständen vor. Während dem Bestände anderer Baumarten viel weniger häufig untersucht wurden.

Für die Mehrkosten respektive Mindererlöse werden jeweils Sensitivitätsanalysen durchgeführt, dass heisst der Einfluss von verschiedenen Inputfaktoren zum Beispiel Ausmass des Bodenschadens auf das Ergebnis (z.B. finanzieller Mindererlös) wird untersucht.

1.5 Aufbau der Arbeit

Das erste Kapitel (Einleitung) dient der Einführung ins Thema sowie der Vorstellung der Ziele und Forschungsfragen.

Im Kapitel zwei (Stand des Wissens) werden mithilfe von Literaturangaben die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Befahrens von Waldboden aufgezeigt. Recherchiert wurde auch der Stand des Wissens in den Bereichen Mehrkosten einer bodenschonenden Holzernte, sowie Ernteschäden solcher Holzernteverfahren.

Aufgrund von Annahmen, welche sich auf Literaturangaben stützen, werden im dritten Kapitel (Berechnung von Kosten und Nutzen intakter Waldböden) die finanziellen Auswirkungen, die eine Bodenbeeinträchtigung durch Befahren langfristig mit sich bringen kann, berechnet. Auch die Kosten bodenschonender Holzernteverfahren und die Einbussen als Folge der mit diesen Ernteverfahren verbundenen Bestandesschäden werden kalkuliert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden jeweils kurz diskutiert.

Im vierten Kapitel dieser Arbeit (Vergleich von Kosten und Nutzen intakter Waldböden) geht es schliesslich darum, den zuvor berechneten ökonomischen Nutzen von intakten Waldböden den Mehrkosten von bodenschonenden Holzernteverfahren sowie den finanziellen Auswirkungen aufgrund von Ernteschäden gegenüberzustellen, um so im Kapitel fünf (Diskussion) praktikable bodenschonende

Ernteverfahren vorschlagen zu können. In diesem Kapitel werden auch die Ergebnisse kritisch hinterfragt und diskutiert.

2 Stand des Wissens

2.1 Auswirkungen des Befahrens auf Boden und Wurzeln

Die Einflüsse der maschinellen Waldbewirtschaftung auf den Waldboden werden schon seit vielen Jahren untersucht. So existieren denn auch viele Studien zu den vielfältigen Auswirkungen des Befahrens von Waldböden mit Forstmaschinen. Die Effekte auf den Boden sind vielfältig und viele unterschiedliche Bodenparameter sind betroffen (Tabelle 1). Eine Folge des Befahrens ist beispielsweise die Bodenverdichtung. Bei dieser nehmen als Folge der mechanischen Bodenbelastung die einzelnen Bodenteilchen eine dichtere Lagerung ein (ADAMS & FROEHLICH 1981; COCHRAN & BROCK 1985). Die Bodenverdichtung wird meist mithilfe der Lagerungsdichte oder dem Eindringwiderstand gemessen (GREACEN & SANDS 1980). Unter stark verdichteten Böden kann die Lagerungsdichte bis zu 40 % und mehr zunehmen (MILLER *et al.* 1996). Durch die dichtere Lagerung der Bodenteilchen kommt es zur Verminderung des Porenvolumens und der Porenkontinuität (Vernetzung der Poren). In erster Linie betroffen sind die Grobporen (Poren > 50 µm, auch als Makroporen bezeichnet) (HILDEBRAND 1983a; HILDEBRAND 2003; FREY *et al.* 2009). Unter Fahrspuren können diese um mehr als 50 % abnehmen (FREY *et al.* 2009). Weil die Grobporen entscheidend für den Transport von Wasser und Luft im Boden sind, werden bei einer Bodenverdichtung der Gashaushalt des Bodens und die Wasserinfiltration eingeschränkt (LÜSCHER *et al.* 2008; SCHACK-KIRCHNER *et al.* 2007). Unter stark verdichteten Fahrspuren sind die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Leitfähigkeit im gesättigten Boden) und die Luftleitfähigkeit bis auf 10 % oder noch weniger der Werte von nicht beeinträchtigten Böden reduziert (FREY *et al.* 2009). Die Folge ist ein gestörter Gashaushalt im Boden. Die CO_2-Konzentration in der Bodenluft nimmt daher in verformten Böden aufgrund mangelndem Austausch zu, die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff nimmt ab (durch Wurzelatmung verbrauchter Sauerstoff wird normalerweise durch Sauerstoff aus der Atmosphäre ersetzt und gelangt durch Diffusion in den Boden) und das Wurzelwachstum sowie die Aktivitäten der Bodenorganismen werden gehemmt (SCHÄFFER *et al.* 2002). Problematisch bei einer verminderte Gasdurchlässigkeit des Oberbodens infolge Abnahme des Grobporenvolumens und dessen Vernetzung ist, dass tiefere Bodenlagen nicht mehr am Gaswechsel teilnehmen können. Damit wird der durchwurzelbare Raum stark eingeschränkt. Somit wirkt sich ein verformter Oberboden auf den Gashaushalt des gesamten Bodens aus (HILDEBRAND 2003). Die so veränderten Bedingungen haben auch Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung der Bodenmikroorganismen. In stark verdichteten Böden nehmen die an sauerstoffarme Bedingungen angepassten anaeroben Methanbakterien stark zu, währendem in nicht durch Verdichtung beeinträchtigen Böden die aeroben Bakterien vorherrschen (FREY 2010). Auch das Wachstum und die Bodendurchdringung der Myzelien von Ektomykorrhiza-Pilzen nimmt in verdichteten Böden massiv (bis zu 80 %) ab (SKINNER & BOWEN 1974), was auch Auswirkungen auf das Baumwachstum hat, denn Mykorrhizapilze spielen für die Nährstoffaufnahme der Bäume eine entscheidende Rolle. Mit ihren feinen Pilzfäden können sie den Boden viel intensiver als Pflanzenwurzeln durchdringen und so den Bäumen Nährstoffe in einer symbiotischen Beziehung zur Verfügung stellen. Zudem haben Mykorrhizapilze viele weitere wichtige Funktionen, etwa in dem sie den Baum vor Schadstoffen schützen (EGLI & BRUNNER 2005). Durch den, aufgrund der Bodenverdichtung verminderten Flüssigkeitsaustausch, wird die Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Nährstoffen eingeschränkt (HAUCK 2001). Die Abnahme der Durchlässigkeit kann zu Staunässe und Oberflächenabfluss und als Folge davon zu Bodenerosion führen (HORN *et al.* 2007). Die veränderten Luft- und Wasserbedingungen im Boden können zur Veränderung von chemischen Prozessen und der Nährstoffverfügbarkeit führen (BALLARD 2000). Der erhöhte mechanische Widerstand des Bodens infolge höherer Lagerungsdichten erschwert die Durchwurzelung (HILDEBRAND 1983b; VEPRASKAS 1988; HAUCK 2001). Eine geringere Wurzeldichte und reduzierte Stabilität der Bäume sind die Folge (HAUCK 2001).

Tabelle 1: „Auswahl an Bodenparameter, bei denen signifikante Veränderungen in Folge mechanischer Belastung von Waldböden nachgewiesen wurden“ (SCHACK-KIRCHNER 2010).

Bodenmechanik	Bodenstruktur	Bodenchemie	Bodenbiologie
Scherwiderstand Penetrometerwiderstand Vorbelastung Spannungsverteilung	Gefügeausbildung Trockenraumdichte Gesamtporosität Makroporosität Luftleitfähigkeit Infiltrationsrate Wasserleitfähigkeit Gasdiffusionskoeffizient Porenkontinuität Hysterese der pF-Kurve Aggregatdichte	Redoximorphose Fell-Aktivität pH-Wert O_2-Gehalt CO_2-Gehalt Ethengehalt Redoxpotential	Feinwurzeldichte Wurzelarchitektur Bodenrespiration Mikrobielle Aktivität CH_4-Umsatz N_2O-Produktion Bodenenzyme Respiratorischer Quotient

Wenn beim Befahren eines Bodens Wurzeln betroffen sind, so wird einerseits die Wurzel zusammengepresst, was zu Rissbildungen und Faserbrüchen im Wurzelholz führen kann. Beschädigte Feinwurzeln werden vom Baum ersetzt. Bei groben Wurzeln können die Kräfte dazu führen, dass die Rinde abgeschält wird. Dadurch verschlechtert sich die Nährstoffversorgung des Baumes (BREDBERG & WÄSTERLUND 1983). Wenn Wurzeln mit einem Durchmesser von mehr als 2 cm beschädigt werden besteht eine grosse Gefahr von Pilzinfektionen. Gemäss MENG (1978) sind Schäden an Wurzeln eine der Hauptursachen von Stammfäulen. Abbildung 1 fasst in einer Übersicht mögliche Folgen von Bodenbefahrung für die Forstwirtschaft zusammen.

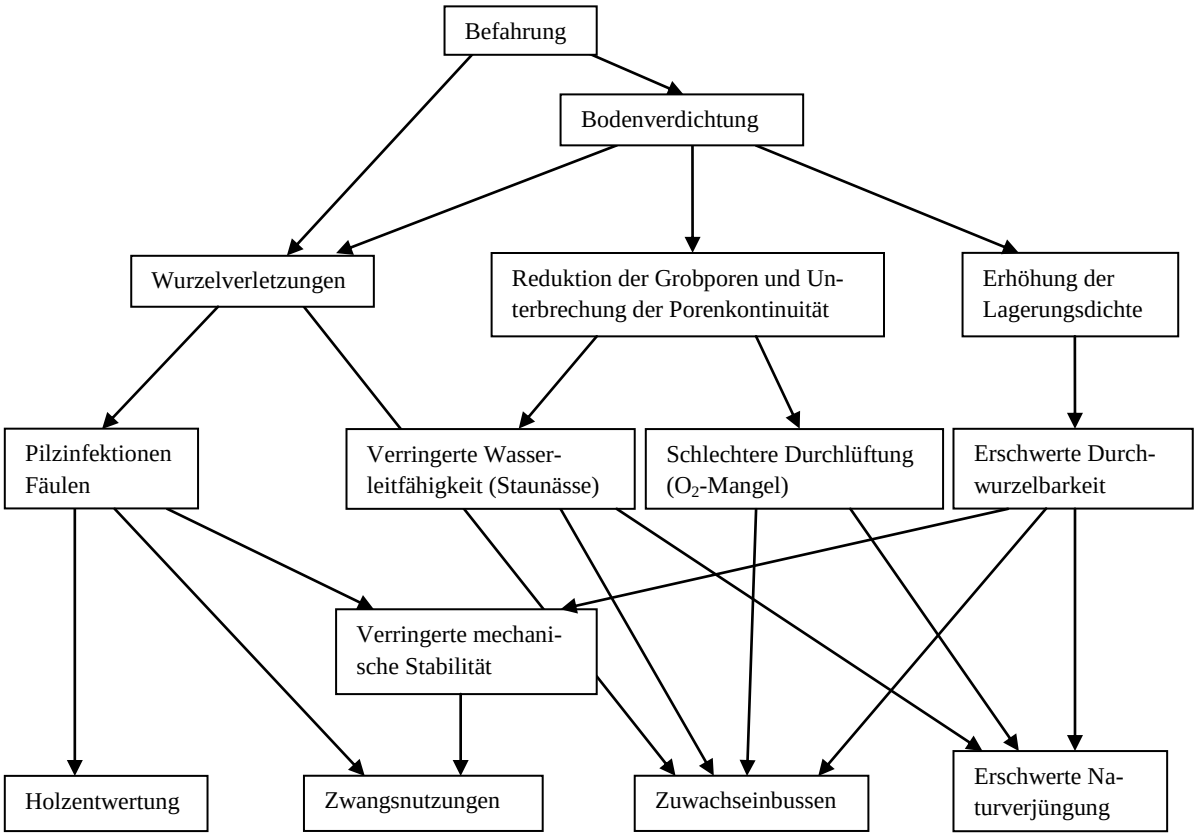


Abbildung 1: Mögliche Folgen der Bodenbefahrung (AMMANN 2010, verändert).

Das Problem der Bodenverdichtung im Wald ist ursächlich mit dem Aufkommen und der Entwicklung zu immer grösseren Holzerntemaschinen verknüpft. Vor der Mechanisierung der Forstwirtschaft wurden die manuell gefällten Bäume mit Pferden gerückt, respektive kleinere Holzstücke von Waldarbeitern bis zur nächsten Strasse getragen. Hierbei kam es kaum zu Bodenschäden. In den 1950er Jahren begann die Mechanisierung der Holzbringung. Anfänglich wurden hierfür vor allem landwirtschaftliche Traktoren eingesetzt. Zu dieser Zeit waren noch keine Feinerschliessungssysteme vorhanden. Die zu rückenden Baumstämme wurden angefahren und zur Waldstrasse gezogen (HAMBERGER 2003). Wegen der geringen Geländegängigkeit der Traktoren wurde bei Frost oder trockener Witterung gerückt und dadurch auch der Boden geschont. Bodenschäden hat es sicher auch gegeben, diese waren aber eher unauffällig und sind nur punktuell aufgetreten (SCHACK-KIRCHNER 2010). Die Bäume wurden noch weitgehend manuell gefällt. Erst in den 1960er Jahren verbreitete sich die Motorsäge immer mehr. Mit dem Aufkommen von Seilwinden konnte das Holz zu den Rückefahrzeugen zugezogen werden. In den 1970er Jahren wurden vermehrt Feinerschliessungsnetze (Rückegassen) angelegt. Zunächst vor allem in Hinblick auf die Bestandesschonung, später dann auch zur Schonung des Bodens. In den 1980er Jahren kamen vermehrt Forstspezialschlepper auf (HAMBERGER 2003). Diese weisen zwar oft niedrigere spezifische Bodendrücke auf, allerdings erlaubte die höhere Geländegängigkeit dieser Fahrzeuge Standorte zu befahren, bei denen früher eine Befahrung nicht möglich war und die Belastung des Bodens nahm zu (HILDEBRAND 1983a). Die vollmechanisierte Holzernte, bei der alle Arbeitsschritte vom Fällen bis zum Transport des Baumes vollmechanisiert ausgeführt werden, kam in Mitteleuropa in den 1980er Jahren auf (HAMBERGER 2003). Bei dieser in Schweden entwickelten Technologie wird das Fällen, Entasten und Einschneiden des Baumes von einem einem Harvester (Vollernter) ausgeführt. Das Rücken übernimmt meist ein Forwarder (Tragerückeschlepper).

Um die negativen Folgen, welche sich beim Befahren des Waldbodens mit diesen Maschinen (Harvester, Forwarder, Forstschlepper, Traktoren) nie vollständig vermeiden lassen, auf eine möglichst kleine Fläche zu begrenzen, werden wie bereits erwähnt, Feinerschliessungsnetze in Form von Rückegassen angelegt. Allerdings gehen diese Rückegassen oft verloren, so etwa in Verjüngungsphasen, bei Stürmen oder infolge personellen Wechsels in den Forstbetrieben. Zudem kann die technische Befahrbarkeit von Gassen beispielsweise infolge eines Maschineneinsatzes bei ungünstigen Witterungsbedingungen verloren gehen, so dass die Gassen nicht mehr befahren werden können. In der Folge werden neue Gassen angelegt. Mit der Zeit wird so einer immer grösserer Teil des Waldbodens befahren (Abbildung 2).

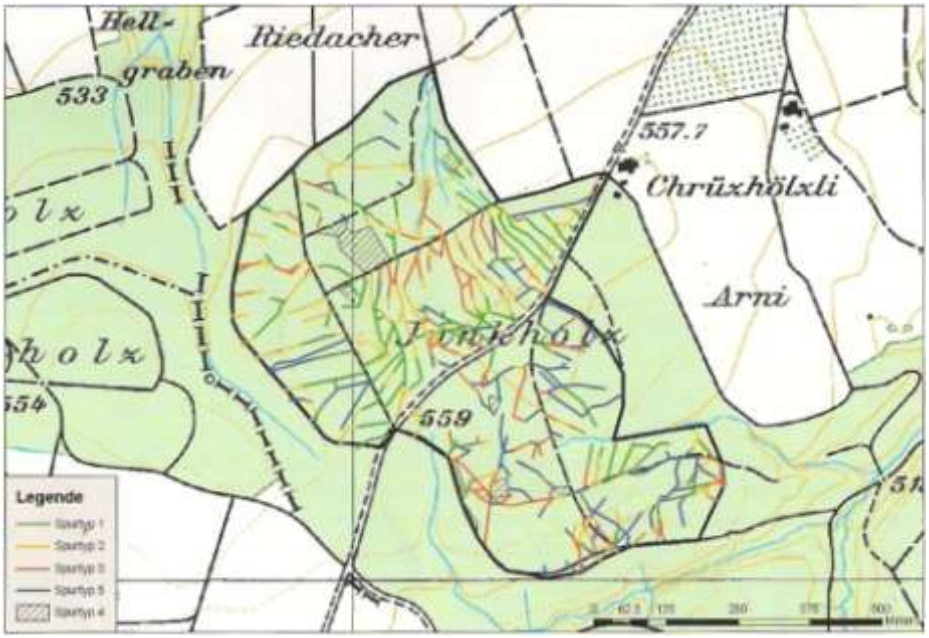


Abbildung 2: Fahrspuren in einer Waldfläche im Mittelland, kartiert nach Spurtypen. Die Spurtypen 1, 2 und 3 sind im Text beschrieben. Beim Spurtyp 4 handelt es sich um flächiges Befahren, beim Spurtyp 5 um nicht klassierbare und vermutete Spuren (LÜSCHER *et al.* 2009a). Die Karte zeigt exemplarisch das ungeplante Befahren des Waldbodens.

In wieweit ein Boden beim Befahren verändert wird, hängt von seiner Tragfähigkeit und vom, von der Forstmaschine ausgeübten Kontaktflächendruck ab (KREMER *et al.* 2010). Der mittlere Kontaktflächendruck ist das Gewicht pro Auflagefläche. Für ein Rad kann der Kontaktflächendruck berechnet werden, indem die Radlast durch die Kontaktfläche des Radreifens mit dem Boden dividiert wird (LÜSCHER *et al.* 2009a). Allerdings ist der tatsächliche Kontaktflächendruck aufgrund der beim Fahren und Arbeiten der Maschinen auftretenden dynamischen Kräfte um ein Mehrfaches höher als der „statische" Kontaktflächendruck (SCHACK-KIRCHNER 2010). Entspricht der Kontaktflächendruck der Tragfähigkeit des Bodens, so wird dieser weitgehend elastisch reagieren. Nach dem Befahren wird keine erkennbare Fahrspur zurückbleiben. Dazu müssen die Bodenfeuchte und/oder der Kontaktflächendruck sehr niedrig sein (KREMER *et al.* 2010). Mit zunehmender Bodenfeuchte und/oder zunehmendem Kontaktflächendruck steigt die Verdichtungsgefahr des Bodens an. Neben der Bodenfeuchtigkeit hängt die Verdichtungs- und Verformungsempfindlichkeit und damit auch die Befahrungsempfindlichkeit eines Bodens von vielen anderen Faktoren wie Bodenart, Kornverteilung, Skelettgehalt, Humusgehalt und Hangneigung ab. Feinkörnige, steinarme und humusreiche Böden sind beispielsweise viel befahrungsempfindlicher als grobkörnige, steinhaltige Böden mit geringem Humusgehalt. Die Befahrungsempfindlichkeit steigt auch mit zunehmender Hangneigung. Gefrorene Böden sind hingegen wenig befahrungsempfindlich (LÜSCHER *et al.* 2009a). Einen eher kleinen Einfluss auf die Bodenveränderungen hat die Anzahl Überfahrten, denn der grössten Teil der Bodenveränderungen wird bereits bei der ersten Überfahrt verursacht (FROEHLICH & MCNABB 1984; WILLIAMSON & NEILSEN 2000).

Um das Ausmass der Bodenbeeinträchtigung durch das Befahren abzuschätzen, wurde ein Klassifizierungssystem für die Fahrspuren (welche durch das Befahren entstehen) unter Berücksichtigung der Messgrössen effektive Lagerungsdichte, Grobporenvolumen, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Eindringwiderstand entwickelt (LÜSCHER *et al.* 2009b). Verschiedene Typen von Fahrspuren werden unterschieden: Fahrspuren des Typs 1 sind maximal 10 cm tief, der organische Auflagehorizont ist gepresst, der Bodenaufbau ist nicht gestört und eine Verformung bleibt aus. Beim Spurtyp 2 treten

plastische Verformungen und teilweise seitliche Aufwölbungen des Oberbodens durch Auspressen auf. Die Spuren sind meist weniger als 10 cm tief. Der Spurtyp 3 zeichnet sich durch Spurtiefen aus, welche bis in den Unterboden reichen und in der Regel mehr als 10 cm tief sind. Zudem sind deutlich ausgeprägte seitliche Aufwölbungen vorhanden (Tabelle 2 und Abbildung 3).

Tabelle 2: Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen (LÜSCHER *et al.* 2009b).

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

* kein Hauptkriterium

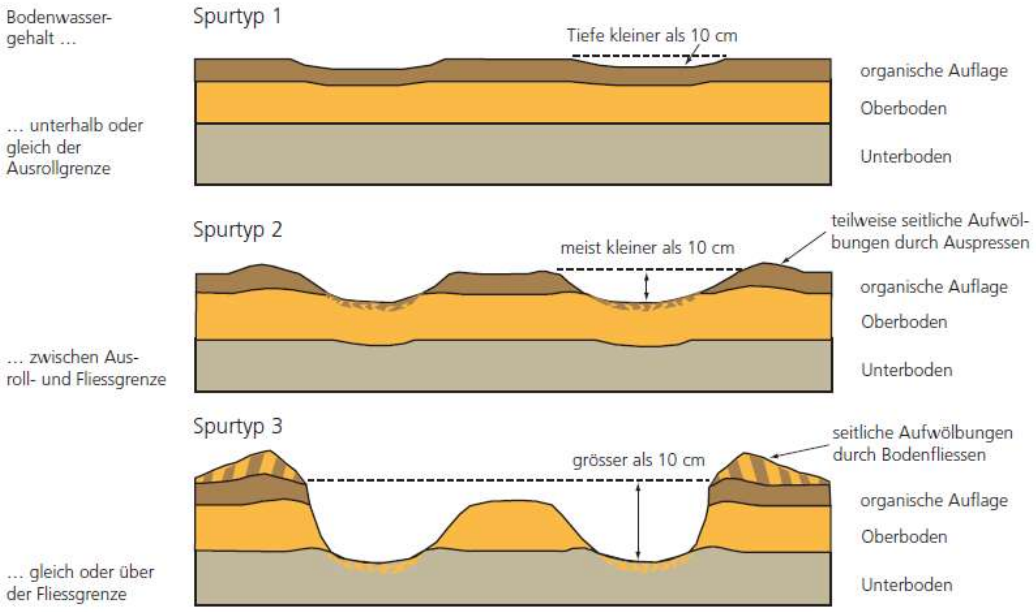


Abbildung 3: Visuelle Merkmale der Spurtypen (LÜSCHER *et al.* 2009a).

Ist beim Befahren des Bodens nur der Oberboden betroffen und sind die Verformungen wenig ausgeprägt, wird der Bodenaufbau also kaum gestört, wie beim Spurtyp 1, so hat dies keine langfristigen Auswirkungen auf den Boden und seine Funktionen. Bei Bodenbeeinträchtigung in einem Ausmass wie es dem Spurtyp 2 entspricht, handelt es sich bereits um einen Bodenschaden. Es wird aber davon ausgegangen, dass sich der Boden mittelfristig wieder erholen wird. Beim Spurtyp 3, bei welchem die Spurtiefe bis in den Unterboden reicht und welcher ausgeprägte Verformungen aufweist, wird von einer langfristigen Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit ausgegangen (Abbildung 4) (LÜSCHER *et al.* 2009b).

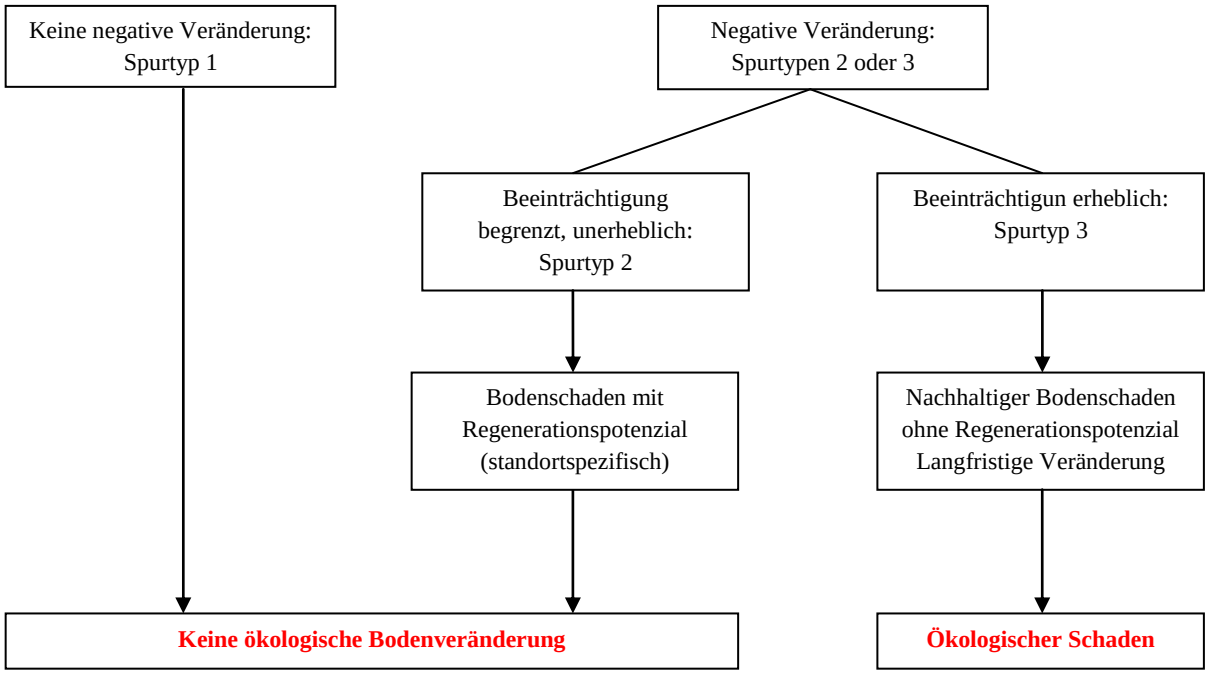


Abbildung 4: Konsequenzen der Spurtypen für den Boden (LÜSCHER *et al.* 2009b).

Die Auswirkungen des Befahrens auf den Boden halten lange Zeit an. Durch natürliche Prozesse wie Frosthebung, Gefrieren - Auftauen, Befeuchten - Trocknen und die Aktivität von Bodenlebewesen kann ein verdichteter Boden wieder gelockert und regeneriert werden (FROEHLICH & MCNABB 1984). Dies braucht aber relativ viel Zeit und insbesondere im Unterboden ist die Regenerationsfähigkeit eingeschränkt (LÜSCHER *et al.* 2009a).

Die in der Literatur genannten Zeiträume, welche notwendig sind, bis ein verdichteter Boden wieder seine ursprüngliche Dichte erreicht, sind unterschiedlich. So schätzte beispielsweise PERRY (1964), dass etwa 40 Jahre notwendig sind, damit ein durch Forstmaschinen verdichteter Boden in alten Rückegassen wieder die ursprüngliche Infiltrationskapazität erreicht. Einen ähnlichen Zeitdauer (mehr als 40 Jahre) fand VORA (1988) für einen Lehmboden unter Rückegassen, bis dieser wieder die ursprünglichen Bodendichten erreicht. In einer von WERT & THOMAS (1981) durchgeführten Untersuchung, war die Lagerungsdichte eines lehmigen Bodens unter Rückegassen in 20 bis 30 cm Tiefen 32 Jahre nach dem Befahren immer noch signifikant höher, als jene des angrenzenden ungestörten Bodens. Nur die obersten Zentimeter des Bodens erreichten wieder ihre ursprünglichen Dichten. FROEHLICH *et al.* (1985) verglichen 23 Jahre nach Befahren die Lagerungsdichten des Bodens unter Rückegassen in verschiedenen Tiefen (5.1, 15.2 und 30.5 cm) mit denen des angrenzenden, nicht befahrenen Bodens. Dabei wurden die Untersuchungen in zwei unterschiedlichen Bodentypen, einem auf granitischem Material (Xeropsamment) und einem aus vulkanischem Material entstandenen (Cryochrept) durchgeführt. Bis auf die obersten 5.1 cm des Bodens aus granitischem Ausgangsmaterial waren die nach der Holzernte um 20 bis mehr als 40 % erhöhten Lagerungsdichten in den Rückegassen immer noch um 5 bis über 20 % höher als auf dem ungestörten Boden. CORNS (1988) fand auf durch Holzernte verdichteten, lehmigen Luvisol-Böden in denen die Lagerungsdichte um 3 bis 39 % erhöht war, dass es 10 bis 21 Jahre dauert, bis der Boden wieder die ursprüngliche Lagerungsdichte erreicht hat. HATCHELL & RALSTON (1971) massen die Dichten von verdichteten und ungestörten lehmigen Böden und fanden dabei, dass die verdichteten Böden nach 18 Jahren wieder ihre ursprünglichen Dichten erreichten. DICKERSON (1976) fand in seiner Studie aus der Regression von Daten welche in den ersten Jahren nach der Ernte aufgenommen wurden, dass die sandige Böden in Fahrspuren, bei welchen die Lage-

rungsdichten nach Befahren um 20 % grösser als die des angrenzenden ungestörten Bodens, 12 Jahre nach Befahren wieder ihre ursprünglichen Dichten erreichen. VOORHEES & SHARRATT (1997) fanden hingegen, dass bis zu 100 Jahre notwendig sind um einen verdichteten Tonboden wieder zu regenerieren.

2.2 Produktionseinbussen infolge Rückegassen

Die Rückegassen, welche zur maschinellen Bewirtschaftung im Wald angelegt werden, beanspruchen Waldfläche, auf welcher während eines grossen Teils der Umtriebszeit (vom Anlegen der Rückegassen, respektive Aushauen der vorhandenen Gassen im jungen Bestand bis zur Räumung am Ende der Umtriebszeit) keine Bäume mehr wachsen. Je kleiner der Abstand zwischen den Rückegassen ist, umso mehr Waldfläche wird durch die Gassen beansprucht (Tabelle 3).

Tabelle 3: Anteil der Feinerschliessung an der Gesamtfläche bei verschiedenen Rückegassenabständen.

Rückegassenabstand (m)[1]	Rückegassendichte (m´/ha)	Flächenanteil Feinerschliessung an gesamter Fläche (%)[2]
20	500.00	20.00
30	333.33	13.33
40	250.00	10.00
50	200.00	8.00
60	166.67	6.67

[1] der Rückegassenabstand ist die Entfernung von Gassenmitte zu Gassenmitte
[2] berechnet mit einer Gassenbreite von vier Metern

Allerdings sind mit solchen Flächenverlusten nicht unbedingt Produktionseinbussen verbunden. Denn die Bäume entlang der Gassen profitieren durch die einseitige Freistellung von besseren Lichtbedingungen, ihre Kronen haben mehr Raum zur Verfügung und die Konkurrenz durch Nachbarbäume ist geringer.

2.2.1 Wachstum von Randbäumen entlang von Gassen/Wegen

Verschiedene Studien zeigen, dass die Randbäume entlang der Rückegassen ein verstärktes Wachstum aufweisen. Bereits 1958 untersuchte KRAMER den Zuwachs in an Wege angrenzenden Fichten- (*Picea abies*) und Buchenbeständen (*Fagus sylvatica*). In Beständen beider Baumarten wiesen die Randbäume entlang von Gassen ein grösseres Höhen- und Dickenwachstum auf, als die Bäume abseits der Gassen. ISOMÄKI & NIEMISTÖ (1990) fanden ein um 25 % besseres Wachstum der Randbäume zehn Jahren nach Anlegen von vier Meter breiten Rückegassen in Fichtenbeständen (*Picea abies*). Auch die Bäume hinter den Randbäumen bis zu einem Abstand von drei Metern von den Gassenrändern wiesen ein verstärktes Wachstum auf. SPELLMANN & NAGEL (2000) stellten in einem 49-jährigen Fichtenbestand (*Picea abies*) fest, dass 25 Jahre nach Anlegen der Gassen, Bäume in drei Meter breiten Randstreifen entlang der fünf Meter breiten Gassen durchschnittlich 14-16 % dicker waren, als Bäume abseits der Gassen (im Inneren der Parzelle). STEMPSKI *et al.* (2010) fanden, dass Randbäume einen grösseren mittleren BHD haben, als Bäume abseits der Gassen. Der Durchmesser der Randbäume war um bis mehr als 20 % grösser. Zudem wurde auch bei den Bäumen in der 2. und 3. Reihe (3.5 m Abstand) von der Gasse ein besseres Wachstum nachgewiesen. Auch in den Untersuchungen von MÄKINEN *et al.* (2006) in Fichtenbeständen (*Picea abies*) wird ein Abstand von drei bis vier Metern vom Rand der Gassen angegeben, in welchem das verstärkte Wachstum infolge des Randeffektes festgestellt werden kann.

2.2.2 Auswirkungen von Gassen/Wegen auf den Zuwachs

Ob die Flächeninanspruchnahme durch Rückegassen zu Produktionseinbussen führt, ist davon abhängig, inwieweit der Mehrzuwachs der Randbäume respektive der Bäume in einem Streifen entlang der Gassen den Produktionsverlust der bestockungsfreien Zonen, also der Gassen auszugleichen vermag. In den Untersuchungen von KRAMER (1958) zu den Auswirkungen von vier bis mehr als 20 Meter breiten Wegen auf den Zuwachs in angrenzenden 30- bis 150-jährigen Fichten- (*Picea abies*) und Buchenbeständen (*Fagus sylvatica*) zeigte sich, dass „in Fichtenbeständen holzfreie Streifen bis zu einer Breite von fünf Meter keinen Zuwachsverlust des Waldes hervorrufen". Buchen reagieren stark auf Freistellung und aufgrund der Kompensation durch den starken Lichtungszuwachs dürfte erst bei Wegebreiten über zwölf Meter ein Produktionsausfall auftreten. LANDBECK (1965) machte ähnliche Untersuchungen in 60- bis 120-jährigen Waldföhrenbeständen (*Pinus sylvestris*). Er fand nur einen sehr geringen Vorratsausfall von weniger als 2 % durch Wege bis zu einer Breite von 6.5 m im Vergleich zu Flächen ohne Wege.

Auch in späteren Jahren wurden immer wieder Untersuchungen durchgeführt, um herauszufinden, ob die Gassen Produktionseinbussen zur Folge haben oder nicht. Die Resultate dieser Untersuchungen werden nachfolgend kurz beschrieben. Dabei sind die Untersuchungen chronologisch aufgeführt.

KRAMER & JÜNEMANN (1985) untersuchten die Auswirkungen unterschiedlicher Durchforstungen auf das Wachstum eines zu Versuchsbeginn 28 Jahre alten Fichtenbestandes (*Picea abies*). Eine Fläche wurde nur mit 4.5 m breiten Gassenhieben (Gassenabstand betrug 9 m) durchforstet. Auf einer anderen Fläche wurden zwischen den ausgehauenen Gassen (Gassenabstand 15 m, Gassenbreite 4.5 m) auch noch Auslesedurchforstungen durchgeführt. Daneben wurden auch noch eine undurchforstete Kontrollflächen eingerichtet. In den behandelten Flächen mit den Gassendurchforstungen nahm das Wachstum der Randbäume stark (bis mehr als 20 % grösseres Durchmesserwachstum) zu. Zudem wurde auch bei den Bäumen in der 2. und 3. Reihe (3.5 m Abstand) von der Gasse ein besseres Wachstum nachgewiesen. In einem Zeitraum von fünf Jahren nach der Durchforstung war der Volumenzuwachsverlust in den Flächen mit den Gassendurchforstungen 9 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrollfläche. In einer weiteren fünfjährigen Beobachtungsperiode nach einer zweiten, auf allen Flächen ausser der Kontrollflächen einheitlich durchgeführten Auslesedurchforstung, waren die durchforsteten Flächen den Kontrollflächen im Durchmesser- und Grundflächenzuwachs deutlich überlegen. Der Volumenzuwachs der Gassendurchforstungen war 2 bis 8 % grösser als auf den undurchforsteten Flächen. Damit haben die durchforsteten Flächen die Volumenzuwachsverluste bereits zu einem guten Teil wettgemacht.

STRATMANN (1986) vermutet, dass bei Gassenabständen von 25-35 m und Gassenbreiten zwischen 3 und 5 m der Mehrzuwachs der Randbäume die Zuwachsverluste mittelfristig ausgleicht. Er berichtet auch von einem Versuch, in einem jungen Fichtenbestand (*Picea abies*) mit 5 m breiten Gassen. Die bestockten Flächen zwischen den Gassen hatten eine Breite von 9, 18 und 27 m. Nach zehn Jahren konnten keine Unterschiede im laufenden Zuwachs und in der Gesamtwuchsleistung zwischen der Variante mit der 27 m breiten, bestockten Fläche mit 5 m breiten Gassen und einer undurchforsteten Vergleichsfläche festgestellt werden. Bei der 18-m-Variante werden langfristig ebenfalls keine Unterschiede in der Produktionsleistung erwartet. Bei der 9-m-Variante hingegen könnte es durchaus zu Produktionseinbussen kommen. Solch enge Rückegassenabstände sind allerdings in der Praxis nicht üblich.

PFISTER (1969) untersuchte die Auswirkungen von Strassen auf das Wachstum von Westlichen Weymouth-Kiefern (*Pinus monticola*). Die untersuchten Bestände waren zwischen 25 und 50 Jahre alt und stockten auf einem Gelände mit Hangneigungen zwischen 20 und 40 %. Die Strassen weisen dement-

sprechend berg- und talseitige Böschungen auf. Die mittlere bestockungsfreie Breite (Strassenbreite plus seitliche Böschungen) beträgt rund 5.6 Meter. Die Bäume entlang dieser bestockungsfreien Zonen, besonders jene unterhalb der Strasse, wiesen ein besseres Wachstum auf, als Bäume weit abseits der Strasse. Das grössere Wachstum reichte, um 4 m der bestockungsfreien Zone den Zuwachsverlust zu kompensieren. Für das untersuchte Waldgebiet mit einem durchschnittlichen Strassenabstand von 120 Metern resultierte schlussendlich ein Produktionsverlust von 1.4 %. Wenn noch beachtet wird, dass die Randeffekte bei älteren Beständen (50 Jahre bis 80 Jahre) viel grösser als die von in dieser Studie untersuchten jungen Beständen sind, so dürfte der Produktionsverlust über die ganze Umtriebszeit noch geringer sein.

Auch ISOMÄKI (1986) kam in seinen Untersuchungen zu den Auswirkungen von Gassen auf das Wachstum von Randbäumen in Fichten- (*Picea abies*) und Föhrenbeständen (*Pinus sylvestris*) zum Schluss, dass das verstärkte Wachstum dieser Bäume nicht in der Lage ist, den Produktionsverlust der Rückegassen vollständig zu kompensieren. In den Fichten-Versuchsflächen mit 5 m breiten Gassen konnte durch das verstärkte Wachstum der Randbäume, respektive der Bäume in einem Randstreifen der Produktionsverlust für eine Gassenbreite von 2 bis 3.5 m ausgeglichen werden.

ISOMÄKI & NIEMISTÖ (1990) schätzten die Produktionseinbussen infolge 4 m breiten und in einem Abstand von 30 m angeordneten Rückegassen in Fichtenbeständen auf etwa 10 m^3/ha während einer Periode von 15 Jahren. Die Bonität der untersuchten Beständen war H_{100} = 27-30 m.

BOWERING *et al.* (2006) untersuchten das Wachstum von Küstenkiefern (*Pinus contorta*) in verschiedenen Abständen zu Waldstrassen. Innerhalb eines 5 m breiten Randstreifens war die Grundfläche der Bäume um durchschnittlich rund 30 % höher als bei Bäumen mit grosser Entfernung (30 m) zur Strasse nach 3 bis 15 Jahren nachdem die Schneise für die Waldstrasse gerodet wurde. Sie schätzten, dass der grössere Zuwachs dieses Randstreifens den Verlust einer unbestockten Fläche mit einer Breite von etwa über 3 m kompensieren kann.

Die Resultate aus den Studien sind also unterschiedlich. In vier der hier wiedergegebenen Untersuchungen ist man zum Schluss gekommen, dass die Flächeninanspruchnahme durch Gassen oder Wege (mit einer Breite von weniger als fünf Metern) zumindest langfristig keine Produktionseinbussen zur Folge hat. Den Ergebnissen aus den anderen vier hier vorgestellten Studien zufolge, führen die Gassen oder Strassen hingegen zu einer geringeren Holzproduktion. Das verstärkte Wachstum der Randbäume entlang der Gassen kann gemäss diesen Studien den Produktionsverlust (auch von nur fünf Meter breiten Gassen oder Wege) nur teilweise ausgleichen. In den Untersuchungen von PFISTER (1969), ISOMÄKI (1986) und BOWERING *et al.* (2006) waren die Randbäume entlang der Rückegassen respektive der Waldstrassen in der Lage jeweils etwa die Hälfte bis zwei Drittel des Produktionsverlustes auf der unbestockten Fläche der Gassen/Strassen auszugleichen. Zu Produktionseinbussen wegen den bestockungsfreien Gassen dürfte es insbesondere dann kommen, wenn die Randbäume beim Befahren der Gassen mit Forstmaschinen in Mitleidenschaft gezogen werden. Denn Wurzelverletzungen, aber auch Bodenverdichtung können grosse Auswirkungen auf das Baumwachstum haben, wie unter Kapitel 2.3.2 aufgezeigt wird.

2.3 Auswirkungen des Befahrens auf das Baumwachstum

Wie bereits erwähnt, kann das Baumwachstum durch das Befahren des Walbodens beeinträchtigt werden. Einerseits werden beim Befahren oft die Baumwurzeln beschädigt, andererseits können durch befahrungsbedingte Veränderungen des Bodens die Umwelt- und Wuchsbedingungen der Baumwurzeln negativ beeinflusst werden (erschwerte Durchwurzelung von verdichteten Böden, reduzierte Sauerstoff- und Nährstoffversorgung, Staunässe). Die infolge des Befahrens auftretenden Bodenveränderungen und deren Effekte auf das Baumwachstum sind von einer Vielzahl von Faktoren wie den Bodeneigenschaften, dem Ausmass der Bodenbeeinträchtigung und den betroffenen Baumarten abhängig (GREACEN & SANDS 1980).

2.3.1 Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Kahlschlägen oder Räumungen

Verschiedene Studien untersuchten die Entwicklung der Bäume, welche nach Kahlschlägen oder Endnutzungen auf geräumten Flächen gepflanzt wurden oder durch Naturverjüngung neu aufgekommen sind und verglichen dabei das Wachstum der Bäume auf befahrenem Boden (etwa auf ehemaligen Rückegassen) mit demjenigen der Bäume auf nicht befahrenen, nicht verdichteten Boden. Nachfolgend werden die Resultate einiger Studien, geordnet nach den Baumarten, an welchen die Untersuchungen durchgeführt wurden, wiedergegeben.

Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*)

WERT & THOMAS (1981) untersuchten das Wachstum von Douglasien auf einem lehmigen Braunerdeboden. Aufgrund des geringeren Baumwachstums in den Fahrspuren und in an diese angrenzenden Zonen (drei Meter auf beiden Seiten der Rückegassen) war das Volumen der Bäume auf den früher benutzten Rückegassen 32 Jahre nach Befahren um 74 % und jenes der Bäume, in den an die Fahrspuren angrenzenden Zonen, um 25 % geringer verglichen mit dem Volumen der Bäume, die auf intaktem Boden standen. Zudem fand man auf den Fahrspuren 41 % und auf den Grenzzonen 17 % weniger Bäume pro Hektare im Vergleich zu den ungestörten Zonen. Für die gesamte Fläche resultierte ein Volumenverlust von 11.8 % im Vergleich zu ungestörten Beständen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen FROEHLICH & MCNABB (1984). Wenn die Wachstumseinbussen in ehemaligen Fahrspuren und Rückegassen infolge Bodenverdichtung auf ganze Bestände hochgerechnet werden, so ist in diesen das Bestandeswachstum um 5 bis 15 % tiefer. Auch GRIGAL (2000) gibt für den Produktionsverlust infolge Bodenveränderungen und Bodenverdichtungen einen Wert von 10 % an.

Das Wachstum von gepflanzten Douglasien in ehemaligen Fahrspuren auf einem schluffigen Lehm wurde von HENINGER *et al.* (2002) untersucht. Zehn Jahre nach Pflanzung waren die Bäume in den Fahrspuren durchschnittliche 10 % kürzer, hatten einen um 14 % geringeren Brusthöhendurchmesser und 29 % weniger Volumen als die Bäume, die abseits der Fahrspuren auf nicht verdichtetem Boden gepflanzt wurden. Allerdings nahmen die Differenzen zwischen dem Baumwachstum auf verdichtetem und nicht verdichteten Boden mit der Zeit ab. So war das Höhenwachstumsdefizit der Bäume in den Fahrspuren im vierten Jahr nach der Pflanzung 24 %, verringerte sich danach auf 6 % im Jahr sieben und in den Jahren acht bis zehn nach der Pflanzung unterschied sich das Wachstum der Bäume in den Fahrspuren nicht mehr vom Wachstum der Bäume abseits der Fahrspuren.

Keine Unterschiede im Wachstum von, auf befahrenen und nicht befahrenen Flächen, gepflanzten Douglasien fanden ARES *et al.* (2005) auf einem produktiven Standort. Obwohl die Lagerungsdichte in den obersten 30 cm des Bodens auf den befahrenen Flächen um 27 % erhöht war, konnten vier Jah-

ren nach Pflanzung keine Unterschiede in der Höhe und dem Durchmesser zwischen den Bäumen auf befahrenen und nicht befahrenen Flächen festgestellt werden.

Gelbkiefer (*Pinus ponderosa*)

FROEHLICH *et al.* (1986) untersuchten die Entwicklung von Gelbkiefern auf und neben Fahrspuren auf einem lehmigen, skelettreichen Boden 23 Jahre nach Befahren. Dabei war die Lagerungsdichte im Mittel immer noch um 15 % höher als auf ungestörten Standorten. Das Höhenwachstum der untersuchten 9- bis 18-jährigen Bäume war durchschnittlich um 5 %, das Durchmesserwachstum um 8 % und die Volumenzunahme um 20 % geringer als auf den unbefahrenen, ungestörten Flächen.

HELMS & HIPKIN (1986) fanden in ihrer Studie in einer 16-jährigen Gelbkiefer-Pflanzung im Boden unter den Rückegassen und in Zonen angrenzend an diese eine um bis zu 30 % höhere Lagerungsdichte im Vergleich zu ungestörten Standorten. Das Volumen der Bäume auf diesen beeinträchtigten Flächen war um bis zu 55 % geringer als auf den ungestörten Flächen.

Die Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das Wachstum von drei- bis achtjährigen, gepflanzten Gelbkiefern auf Ton- und Lehmböden und auf sandigen Lehmböden bei denen zudem der organische Auflagehorizont entfernt worden ist, wurde von GOMEZ *et al.* (2002) untersucht. Die Bodenverdichtung beeinflusste das Stammvolumen der Bäume auf dem lehmigen Boden nicht, obschon die Lagerungsdichten von etwa 1.00 g/cm^3 durchschnittlich um 19 % grösser war als auf den nichtverdichteten Stellen. Auf dem tonigen Boden hingegen führte eine durchschnittliche Zunahme der Lagerungsdichte von 19 % auf Dichten von mehr als 1.40 g/cm^3 zu einer Abnahme des Stammvolumens um 45 % im Vergleich zu den Bäumen auf den unverdichteten Stellen. Auf dem sandigen Lehmboden führte eine Zunahme der Lagerungsdichte um 17 % auf über 1.30 g/cm^3 schliesslich zu einer markanten Zunahme des Wachstums. Bäumchen auf den verdichteten Boden hatten, im Vergleich zu den Bäumchen auf nicht verdichtetem Boden, ein um 173 % grösseres Stammvolumen.

Monterey-Föhre (*Pinus radiata*)

MURPHY (1983) untersuchte das Wachstum von Monterey-Föhren vier Jahre nach Pflanzung auf und neben ehemaligen Rückegassen auf tonigen Böden. Das Höhenwachstum der Bäume auf den Rückegassen war signifikant kleiner (32 %) als auf nicht befahrenen Flächen.

In einer anderen Untersuchung befassten sich MURPHY *et al.* (1997) mit den Auswirkungen von Bodenstörungen auf das Wachstum von gepflanzten Monterey-Föhren während den ersten elf Jahren auf einem tonigen Boden. Die Bäume auf gestörtem Boden hatten im Vergleich zur Kontrollgruppe (Föhren auf nicht beeinträchtigten Boden) im Alter 11 ein um 20 % geringeres Baumvolumen, wenn der organische Auflagehorizont entfernt wurde, ein um 55 % geringeres Volumen wenn der Oberboden entfernt und der Unterboden durch zwei Überfahrten des Forwarders verdichtet wurde, und ein um 65 % geringeres Volumen wenn Oberboden entfernt wurde und der Unterboden durch acht Überfahrten des Forwarders verdichtet wurde.

Das Wachstum von Monterey-Föhren auf Böden, welche durch die Holzerntemaschinen gestört und verdichtet wurden, analysierten MURPHY *et al.* (2004). Im Alter 21 war die Höhe der Bäume auf Boden, welcher stark verdichtet und dessen Oberboden gestört und entfernt worden war im Vergleich zu den Bäumen auf unbeeinflusstem Boden um bis zu 9 %, der Durchmesser um bis zu 23 %, und das Volumen um bis zu 42 % kleiner. Die Differenzen im Volumen zwischen den Bäumen auf dem gestörten Boden und jenen auf unbeeinflusstem Boden waren am Anfang noch grösser und nahmen dann ab.

In einer Untersuchung von LACEY & RYAN (2000) zum Wachstum von jungen gepflanzten Monterey-Föhren auf verdichteten und unbeeinflussten tonigen Böden unterschieden sich die Höhen und Volumina der vierjährigen Bäumchen nicht von denen auf nicht verdichtetem Boden.

Weihrauchkiefer (*Pinus taeda*)

PERRY (1964) fand in einem 26 Jahre alten Weihrauchkiefern-Bestand bei den Bäumen, welche in ehemalige Fahrspuren gepflanzt wurden, ein um 13 % geringeres Höhen- und ein um 53 % geringeres Volumenwachstum verglichen mit den Bäumen, die auf nicht verdichtetem Boden abseits der Fahrspuren wuchsen.

HATCHELL (1981) kam in seinen Untersuchungen über das Wachstum von gepflanzten Weihrauchkiefern auf verdichtetem Boden in ehemaligen Fahrspuren und auf nicht verdichtetem Boden (abseits der ehemaligen Fahrspuren) auf lehmigem Boden und sandigem Ton zum Schluss, dass Bodenverdichtung das Wachstum der Bäumchen reduziert (nach vier Wachstumsperioden etwa um 18 % geringere Höhe), nicht jedoch deren Überlebensraten. Auch die Biomasse der Kiefern auf den Fahrspuren war nach vier Vegetationsperioden ein Drittel geringer als auf nicht verdichtetem Boden.

LOCKABY & VIDRINE (1984) fanden ein um 39 % reduziertes Höhenwachstum bei fünfjährigen Weihrauchkiefern, welche in ehemalige Rückegassen gesät wurden, verglichen mit den Bäumen auf dem nicht verdichteten Boden. Die Lagerungsdichte des feinlehmigen, silikatischen Bodens war um durchschnittlich 12 % höher auf den Rückegassen als auf den nicht befahrenen Flächen. Die Anzahl Pflanzen auf den Gassen war im Vergleich zu nicht befahrenen Flächen um 88 % reduziert.

Weitere Baumarten

SMITH & WASS (1979) untersuchten das Wachstum von Felsentannen (*Abies lasiocarpa*) und Engelmann-Fichten (*Picea engelmannii*) auf unterschiedlichen Böden (Podsol, Luvisol, Brunisol). Dabei verglichen sie das Wachstum der Bäume, welche in den Fahrspuren von ehemaligen Rückegassen stocken mit dem Wachstum der Bäume auf unbeeinflussten Flächen. Die untersuchten Bäume waren 9 bis 22 Jahre alt. Auf feinkörnigen Lehmböden stellten sie bei den Felsentannen ein um bis zu 15 % geringeres Höhenwachstum und bei den Engelmann-Fichten ein bis zu 12 % geringeres Höhenwachstum fest. Auf grobkörnigeren Böden fanden sie hingegen auf den befahrenen Flächen ein für Felsentanne um bis zu 18 % und für die Engelmann-Fichten um bis zu 22 % besseres Wachstum als auf den unbefahrenen Flächen.

CLAYTON *et al.* (1987) untersuchten das Wachstum von Küstenkiefern (*Pinus contorta*) und Gelbkiefern (*Pinus ponderosa*) auf verdichteten Böden. Bei einem Bestand mit durchschnittlich 15-jährigen Küstenkiefern auf Boden mit schluffig-lehmiger Textur war der BHD der Bäume auf dem verdichteten Boden bis 25 % geringer als der BHD der Bäume auf unbeeinflusstem Boden. Die Lagerungsdichte in 0 bis 17 cm Bodentiefe war im Mittel mit 1.30 g/cm^3 um 45 % höher als auch ungestörtem Boden. In einem Bestand mit 19-jährigen Küstenkiefern auf schluffig-lehmigen Boden, war der BHD um 22 % geringer. In einem 20- bis 25-jähriger Gelbkieferbestand auf schluffig-lehmigen Boden zeigte sich hingegen kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Lagerungsdichte von 13 % und dem Baumwachstum.

THOMPSON *et al.* (1990) führten eine Untersuchung über das Wachstum von Engelmann-Fichten (*Picea engelmannii*) auf kiesig-sandigem Lehmboden auf und neben ehemaligen Rückegassen durch. Die 12-jährigen Fichten in den Fahrspuren waren bis zu 59 % kürzer als jene auf den nicht gestörten Flächen.

Das Wachstum von *Gmelina arborea* und *Terminalia brassii* auf einem Oxisol-Boden auf und neben Fahrspuren wurde von CHEATLE (1991) untersucht. Sieben Jahre nach Pflanzung der Bäume war die Grundfläche von *Gmelina arborea* in den Fahrspuren bis zu mehr als 60 % kleiner und diejenige von *Terminalia brassii* war bis zu 50 % kleiner im Vergleich zu den Bäumen, welche auf unverdichteten Boden abseits ehemaliger Fahrspuren gepflanzt worden sind. Zudem war die Mortalität der Bäume in den Fahrspuren um mehr als 30 % erhöht.

SHEPPERD (1993) fand in seinen Untersuchungen zu den Auswirkungen der Ernte mit Forstschleppern/Traktoren in 1- bis 12-jährigen Espenbeständen (*Populus tremuloides*), dass die Bodendichte auf den befahrenen Rückegassen im Vergleich zu nicht befahrenen Flächen um 30 % erhöht war. Die Wurzeldichte und das Wurzelvolumen unter den ehemaligen Rückegassen war weniger als ein Drittel so gross wie auf unbefahrenen Flächen. Zudem waren auch zehnmal weniger Espenschösslinge vorhanden im Vergleich zu den unbefahrenen Flächen.

BRAIS (2001) verglich das Wachstum von Weissfichten (*Picea glauca*), Schwarzfichten (*Picea mariana*) und Banks-Kiefern (*Pinus banksiana*) auf und neben den Fahrspuren miteinander. Auf feinkörnigem Lehmboden (Luvisol) war sechs Jahre nach Befahren die Lagerungsdichte in 0 bis 10 cm Tiefe um 16 % erhöht. Die Weissfichten, welche in ehemalige Fahrspuren gepflanzt wurden, zeigten nach fünf Jahren ein um 25 % grösseres Höhenwachstum als jene Weissfichten, auf dem ungestörten Boden neben den Fahrspuren. Gleichzeitig war aber auch die Mortalität der Bäume in den Fahrspuren höher als auf den ungestörten Flächen. Auf einem grobkörnigeren lehmigen Sandboden war sechs Jahre nach Befahren die Lagerungsdichte um 26 % erhöht im Vergleich zu ungestörten Boden. Auf diesem Boden wurden Schwarzfichten und Banks-Kiefern gepflanzt. Fünf Jahre nach der Pflanzung war das Wachstum der Schwarzfichten in den Fahrspuren bis zu 42 % und jenes der Banks-Kiefern bis zu 26 % grösser als auf ungestörten Flächen. Gründe für das bessere Wachstum waren einerseits die geringere Konkurrenzsituation durch die Untergrundvegetation (Ericaceaen, Gräser, Seggen) und Laubbäume, welche auf den Fahrspuren weniger vorhanden waren als auf den unbeeinflussten Flächen. Andererseits zeigte sich auf den grobkörnigen Böden, dass die Bäume durch den im verdichteten Boden erhöhten Wasserrückhalt profitieren konnten.

Anderen Studien zufolge hat das Befahren keine Auswirkungen auf das Wachstum von Bäumen. MILLER *et al.* (1996) fanden auf tiefgründigen, gut entwässerten, kiesarmen, tonigen Lehmen mit viel organischem Material im Oberboden keine statistisch signifikanten Effekte der Bodenverdichtung auf das Höhenwachstum und die Volumenzunahme der Baumarten Sitka-Fichte (*Picea sitchensis*) Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Westamerikanische Hemlocktanne (*Tsuga heterophylla*), welche auf Rückegassen gepflanzt wurden. Die Lagerungsdichte war acht Jahre nach Befahrung auf den ehemaligen Rückegassen um 20 % höher als auf den nicht befahrenen Flächen.

KREMER (1999) fand in seinen Untersuchungen auf durchschnittlich bis gut nährstoff- und wasserversorgten Standorten keine Zuwachsverluste von Fichten (*Picea abies*), Föhren (*Pinus sylvestris*) und Buchen (*Fagus sylvatica*) durch das Befahren vom Waldboden. Gemäss BREDBERG *et al.* (1983) ist die Bonität eines Standorts von grosser Bedeutung Zuwachsverluste auftreten oder nicht. Bei hoher Bonität sind die Einbussen infolge Bodenverdichtung gering. WÄSTERLUND (1983) führt die geringeren Wachstumseinbussen infolge Verdichtung auf guten Standorten auf das tiefere Wurzelsystem und die bessere Wüchsigkeit der Bäume zurück. JANSSON & WÄSTERLUND (1999) nehmen an, dass Bäume, welche auf guten Standorten wachsen, mehr Störungen tolerieren können im Vergleich zu Bäumen auf armen Standorten, ohne dass ihr Wachstum negativ beeinflusst wird. Zudem sind nicht alle Baumarten gleich empfindlich auf Bodenverdichtung. So scheinen Wachstumseinbussen als Folge von Befahrung in Fichtenbeständen (*Picea abies*) höher auszufallen als in Föhrenbeständen (*Pinus sylvestris*). Nach BREDBERG *et al.* (1983) erträgt die Waldföhre eine höhere Verdichtung als die Fichte.

Das Wurzelwachstum der Fichte wird durch Verdichtung viel mehr gehemmt als jenes der Waldföhre (WÄSTERLUND 1985).

Wie die Resultate aus den vorgestellten Untersuchungen zeigen, sind die Auswirkungen von befahrungsbedingten Bodenveränderungen auf das Baumwachstum sehr unterschiedlich. Der Mehrheit der hier präsentierten Studien zufolge, ist das Wachstum der Bäume auf verdichteten Boden geringer als jenes der Bäume auf nicht beeinträchtigen Boden. Eine Reduktion des Durchmesserzuwachses von bis zu einem Viertel und eine Reduktion des Höhenwachstums um einen Drittel oder sogar um mehr als die Hälfte bei den Bäumen auf verdichtetem Boden, im Vergleich zu Bäumen welche auf nicht durch Befahrung in Mitleidenschaft gezogenen Boden wachsen, treten auf. Mehr noch als das Höhenwachstum wird meistens das Volumenwachstum der Bäume durch Bodenverdichtung beeinflusst (FROEHLICH & MCNABB 1984). So können Bäume auf verdichtetem Boden durchaus nur halb soviel oder sogar mehr als 60 % weniger Volumen aufweisen, als Bäume auf nicht befahrenem Boden.

In mehreren Studien wurde festgestellt, dass die Differenzen zwischen dem Baumwachstum auf verdichteten und nicht verdichteten Stellen mit der Zeit abnehmen, dass heisst die Wachstumseinbussen werden geringer.

Werden die auf die Zuwachsminderungen der Bäume auf verdichteten Stellen im Wald auf den Zuwachs über die gesamte Waldfläche gerechnet, so kommen mehrere Studien auf Produktionseinbussen von um die 10 %. Der Produktionsverlust beträgt insgesamt also um die 10 %.

Bäume auf befahrenem Boden müssen nicht immer ein geringeres Wachstum aufweisen als solche auf nicht befahrenem Boden. So gibt es einige Studien, welche zum Schluss kommen, dass es keine Unterschiede im Wachstum zwischen Bäumen auf befahrenem und nicht befahrenem Boden gibt. In einigen Untersuchungen fand man auf befahrenen Böden gar ein besseres Baumwachstum als auf unbeeinflussten Böden. Etwa bei grobkörnigen Böden der Fall, wo durch Verdichtung die Wasserspeicherkapazität des Bodens erhöht wird, wodurch sich die Bedingungen für das Baumwachstum verbessern (GOMEZ *et al.* 2002).

Eine Übersicht über die, in den verschiedenen Untersuchungen, gefundenen Ergebnisse zum Wachstum auf verdichteten Böden gibt die Tabelle 4.

Tabelle 4: Untersuchungen und Resultate zum Baumwachstum auf befahrenem Boden.

Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Kahlschlag/Räumung					
Studie	**Land/Region**	**Boden/Bodenart**	**Baumart**	**Alter Bäume**	**Baumwachstum auf befahrenem Boden im Vergleich zu nicht befahrenem Boden**
ARES *et al.* (2005)	USA; Washington	Ton	*Pseudotsuga menziesii*	4 Jahre	keine
BRAIS (2001)	Kanada; Quebec	schluffiger Lehm	*Picea glauca*	5 Jahre	Höhe: bis zu +25 %
		lehmiger Sand	*Picea mariana*		Höhe: bis zu +42 %
			Pinus banksiana		Höhe: bis zu +26 %
CLAYTON *et al.* (1987)	USA; Idaho	schluffiger Lehm	*Pinus contorta*	15 bis 19 Jahre	Höhe: bis -25 %, BHD: bis -25 %
			Pinus ponderosa	20 bis 25 Jahre	keine
CHEATLE (1991)	Salomonen	Oxisol	*Gmelina arborea*	7 Jahre	Grundfläche: bis mehr als -60 %
		Ton	*Terminalia brassii*		Grundfläche: bis zu -50 %
FROEHLICH *et al.* (1986)	USA; südliches Washington	Andic Xerochrept	*Pinus ponderosa*	9 bis 18 Jahre	Höhe: - 5 %, Durchmesser -8%, Volumen: -20 %
		Andic Cryochrept	*Pinus contorta*	10 bis 13 Jahre	keine
GOMEZ *et al.* (2002)	USA; Kalifornien	Ton	*Pinus ponderosa*	3 bis 8 Jahre	Volumen: -45 %
		Lehm			keine
		Sandiger Lehm			Volumen: +173 %
HATCHELL (1981)	USA; Coastal Plain	schluffiger Lehm Bodentextur: silt loam	*Pinus taeda*	5 Jahre	Höhe: -18 %
HELMS & HIPKIN (1986)	USA; Kalifornien	Lehm	*Pinus ponderosa*	16 Jahre	Volumen: -55 %
HENINGER *et al.* (2002)	USA; Oregon	toniger Lehm	*Pseudotsuga menziesii*	10 Jahre	Höhe: -10 %, BHD: -14 %, Volumen: -29 %

LACEY & RYAN (2000)	Australien; New South Wales	Ton	*Pinus radiata*	4 Jahre	keine
LOCKABY & VIDRINE (1984)	USA; Louisiana	schluffiger Lehm	*Pinus taeda*	5 Jahre	Höhe: -39 %, Bäume/ha: -88 %
MILLER *et al.* (1996)	USA; Washington	Haplumbrept und Dysteran-dept schluffiger Lehm	*Picea sitchensis* *Pseudotsuga menziesii* *Tsuga heterophylla*	8 Jahre	keine
MURPHY (1983)	Neuseeland	toniger Lehm	*Pinus radiata*	4 Jahre	Höhe: -32 %
MURPHY *et al.* (1997)	Neuseeland	Hapludult toniger Lehm	*Pinus radiata*	11 Jahre	Volumen: -20 bis -65 %
MURPHY *et al.* (2004)	Neuseeland	toniger Lehm	*Pinus radiata*	21 Jahre	Höhe: -9 %, Durchmesser: bis zu -23 %, Volumen: bis zu -42 %
PERRY (1964)	USA; North Carolina	Ultisol	*Pinus taeda*	26 Jahre	Höhe: -13 %, Volumen: -53 %
SMITH & WASS (1979)	Kanada; British Columbia	sandiger Boden schluffiger Lehm	*Abies lasiocarpa* *Picea engelmannii* *Abies lasiocarpa* *Picea engelmannii*	9 bis 22 Jahre	Höhe: bis zu +18 % Höhe: bis zu +22 % Höhe: bis zu -15 % Höhe:bis zu -12 %
THOMPSON *et al.* (1990)	Kanada; British Columbia	sandiger Lehm	*Picea engelmannii*	12 Jahre	Höhe: bis zu -59 %
WERT & THOMAS (1981)	USA; Oregon	toniger Lehm	*Pseudotsuga menziesii*	32 Jahre	Bäume in Rückegassen Höhe: -30 %, BHD: -28 %, Volumen: -74 % Bäumen in einer drei Meter breiten Zone entlang der Rückegassen Höhe: -8 %, BHD: -5 %, Volumen: -25 %

2.3.2 Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Durchforstungen

Durch Wurzelverletzungen und Bodenverdichtung beim Befahren kann das Wachstum der verbleibenden Bäume nach Durchforstungen, etwa entlang von Rückegassen beeinträchtigt werden. FRIES (1975) fand beispielsweise in einem Fichtenbestand (*Picea abies*) entlang einer zwei Meter breiten Zone seitlich der Fahrspuren fünf Jahren nach einer maschinellen Durchforstung Zuwachsverluste von 20 %. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt WÄSTERLUND (1988). Er untersuchte die Auswirkungen des Befahrens auf das Wachstum von gepflanzten, 7 bis 16 Jahre alten Fichten (*Picea abies*) auf einem sandigen Moränenboden. Die Bäume im Bereich von einem halben Meter Abstand von den Fahrspuren wiesen während den ersten zwei Jahren nach Befahren ein um durchschnittlich 25 % reduziertes Höhenwachstum auf. MOEHRING & RAWLS (1970) fanden heraus, dass das jährliche Grundflächenwachstum der Bäume in einem 40-jährigen Weihrauchkiefern-Bestand (*Pinus taeda*) auf schluffig-lehmigem Boden, welcher bei regnerischem Wetter (in nassem Zustand) Befahren wurde (auf drei und vier Seiten der Bäume hat Befahrung stattgefunden, ein grosser Teil der Wurzel/des Wurzelraums war also betroffen), während den ersten fünf Jahren durchschnittlich 62 und 54 % dessen, der unbeeinflussten Bäume war. Danach war das Wachstum der beeinflussten Bäume wieder etwas besser und die Differenzen zu den unbeeinflussten Bäumen verringerten sich. FROEHLICH (1979) untersuchte die Auswirkungen des Befahrens von Rückegassen auf das Wachstum eines verbleibenden Gelbkiefern-Bestandes (*Pinus ponderosa*). 16 Jahre nach dem Befahren waren die Bodendichten in den Rückegassen bis in 15.9 cm Tiefe um 18 % und in Tiefen von 30 cm um 9 % grösser als auf dem benachbarten unbefahrenen Boden. Das Wachstum der an den Rückegassen wachsenden Gelbkiefern wurde untersucht. Das Grundflächenwachstum der Bäume, bei denen weniger als 10 % der Wurzelzone von Bodenverdichtung betroffen waren, war im Mittel um 6 %, dasjenige von Bäume, bei denen mehr als 10 % Wurzelzone beeinträchtigt wurde, war durchschnittliche um 12 % geringer im Vergleich zum Wachstum der Bäume, deren Wurzelraum nicht durch Befahren beeinflusst wurde. ADAMS & FROEHLICH (1981) berichten von 5 bis 15 % Einbussen beim Volumenwachstum in durchforsteten Beständen auf verdichteten Böden in den USA, wobei einzelne Bäume Wachstumseinbussen von 0 bis 40 % zeigen. JANSSON & WÄSTERLUND (1999) untersuchten die Folgen von einmaligem Befahren eines Podsols mit leichten Maschinen (fünf bis neun Tonnen Gewicht) auf das Wachstum von jungen Fichtenbeständen. Drei Jahre nach Befahren wurden die Baumhöhen und -durchmesser aufgenommen. Das Wachstum der Bäume direkt an den Fahrspuren (0-1 m Abstand) unterschied sich nicht signifikant von jenen, welche in einer grösseren Distanz von den Fahrspuren entfernt wuchsen (> 2 m Abstand). Das Wachstum von Türkischen Tannen (*Abies bornmuelleriana*) die direkt an regelmässig befahrenen Rückegassen stehen untersuchten YILMAZ *et al.* (2010) und verglichen es mit dem Wachstum der Bäume abseits der Gassen. Die durchschnittlich 47.5 Jahre alten Bäume an der Gasse hatten im Mittel einen rund 10 % geringeren Durchmesser und eine 1.7 % geringere Höhe als die durchschnittlich 44.5 Jahre alten Bäume abseits der Gassen. Zudem waren die Jahrringbreiten der Bäume an den Gassen markant kleiner als die der Bäume abseits Die Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die, in den verschiedenen Studien gefundenen Resultate.

Tabelle 5: Untersuchungen und Resultate zu den Auwirkungen des Befahrens während Durchforstungen auf das Wachstums der verbleibenden Bäume.

Baumwachstum auf verdichtetem Boden nach Durchforstung					
Studie	**Land/Region**	**Boden/Bodenart**	**Baumart**	**Alter Bäume**	**Baumwachstum auf befahrenem Boden im Vergleich zu nicht befahrenem Boden**
ADAMS & FROEHLICH (1981)	USA; Pazifischer Nordwesten	verschiedene	verschiedene	verschiedene	Einzelbäume Volumen: 0 bis -40 % Bestände Volumen: -5 bis -15 %
FRIES (1975)	Schweden	verschiedene	*Picea abies*	nicht bekannt	Entlang 2 m breiten Zone seitlich von Fahrspuren 20 % Zuwachsverluste nach 5 Jahren nach Befahren
FROEHLICH (1979)	USA; Oregon	sandiger Lehm	*Pinus ponderosa*	64 Jahre (im Durchschnitt)	Grundflächenwachstum 16 Jahre nach Befahren 6 bis 12 % kleiner
JANSSON & WÄSTERLUND (1999)	Zentral- und Südschweden	Podsol auf Moräne	*Picea abies*	6 bis 20 Jahre	keine
MOEHRING & RAWLS (1970)	USA; Arkansas	schluffiger Lehm	*Pinus taeda*	40 Jahre	keine wenn der Boden bei trockenem Wetter befahren wurde wenn der Boden bei nassem Zustand befahren wurde war Grundflächenwachstum 5 Jahre nach Befahren bis zu 46 % kleiner
WÄSTERLUND (1988)	Schweden	sandiger Boden auf Moräne	*Picea abies*	7 bis 16 Jahre	auf zwei Versuchsflächen: Entlang ½ m breiten Zone seitlich von Fahrspuren 25 % geringeres Höhenwachstum während 2 Jahren nach Befahren auf einer Versuchfläche: Auch die Bäume in einer Zone mit einem Abstand von ½ m bis1 m seitlich von Fahrspuren zeigten um ein um 21 % reduziertes Höhenwachstum
			Pinus contorta	11 Jahre alt	keine
YILMAZ *et al.* (2010)	Türkei	nicht bekannt	*Abies bornmuelleriana*	≈ 45 Jahre (im Durchschnitt)	Höhe: -1.7 %, Durchmesser: -10 %

Kommentare zu den Studien/zur Literatur über die Zuwachseinbussen

Viele der vorgestellten Untersuchungen wurden in den USA und Kanada durchgeführt, andere in Australien und Neuseeland (siehe Tabellen 4 und 5). Nur wenige Studien über das Baumwachstum auf durch Befahrung mit Forstmaschinen verdichteten Böden wurden in Europa durchgeführt. Was auffällt ist, dass in den meisten der hier präsentieren Studien Reinbestände untersucht wurden, wobei Nadelholzbestände deutlich überwiegen. Inwieweit die Resultate aus den vorgestellten Untersuchungen auf mitteleuropäische Verhältnisse übertragbar sind, ist fraglich. Immerhin sind, was die Bodenart betrifft in den Untersuchungsgebieten, in welchen die Studien durchgeführt wurden, zum Teil gleiche Bedingungen wie etwa im Schweizer Mittelland anzutreffen (lehmige und tonige Böden).

Insgesamt kann gesagt werden, dass es immer noch sehr grosse Wissenslücken bezüglich der Auswirkungen von Bodenveränderungen/Bodenverdichtung auf das (langfristige) Wachstum und die Produktivität von Waldbeständen gibt. Einerseits infolge fehlender Langzeitstudien andererseits aber auch infolge der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen der Umwelt und dem Wachstum der Bäume (ARNUP 1998)

2.4 Mehrkosten der bodenschonenden Holzernte

Um kostengünstig Holz zu ernten, werden heute vielerorts vollmechanisierte Holzernteverfahren eingesetzt. Moderne Radharvester haben eine Kranreichweite von zehn Meter und benötigen somit einen Rückegassenabstand von 20 Meter, um die gesamte Hiebsfläche vollmechanisiert aufarbeiten zu können. Allerdings wird bei einem solchen Gassenabstand dennoch ein wesentlicher Teil des Bodens (bei einer Rückegassenbreite von vier Metern und einem Gassenabstand von 20 Metern sind es 20 %) der Waldfläche befahren und beeinträchtigt (siehe auch Tabelle 3). Denn ein Befahren ohne jegliche Bodenbeeinträchtigung ist nicht möglich (HORN *et al.* 2007). Wenn aus Bodenschutzgründen, etwa zur Schonung von verdichtungsempfindlichen Böden, die Rückegassen in grösseren Abständen angeordnet sind, müssen die Bäume in der Zwischenzone motormanuell zugefällt respektive vorgeliefert (zuziehen der Bäume zum Beispiel mit Seilwinden oder Pferden) werden. Dies führt zu höheren Kosten. Nach BORT *et al.* (1993) sind die Erntekosten für 20- bis 45-jährige Nadelholzbestände (ebene Lagen) bei einem Rückegassenabstand von 30 Metern um das 1.25fache und bei einem 40 m-Rückegassenabstand um das 1.7fache gegenüber einem 20 m-Rückegassenabstand erhöht. Nach BECKER (1997) sind die Erntekosten bei einem 40 m-Rückegassenabstand im Vergleich zum 20 m-Abstand um 25-35 % erhöht. SPJEVAK & THEES (2009) berechneten die Mehrkosten für den teilweisen Verzicht auf Befahrung. Infolge grösserer Abstände zwischen den Rückegassen kann nicht alles Holz mit dem Vollernter erreicht werden und muss mit einem Forstspezialschlepper beigeseilt werden, was Mehrkosten von 30 SFr./m^3 verursacht. Umgerechnet für einen Betrieb mit 300 ha und einer Umtriebszeit von 120 Jahren und der Annahme, dass rund ein Drittel des genutzten Holzes vorgeliefert werden muss (was einem Rückegassenabstand von etwa 30 m entsprechen würde), sind dies Kosten von 110 SFr./ha und Jahr.

Neben einem grösseren Rückegassenabstand gibt es auch noch andere Massnahmen um den Boden zu schonen. Einen systematischen Überblick von kostenrelevanten Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz wird durch SPJEVAK & THEES (2009) gegeben:

Beispiele sind Investitionen in leichtere Holzerntemaschinen, Breitreifen, Bogiebänder (raupenartige Bänder, welche über die Räder aufgezogen werden können) oder Reifendruckanlagen, mit denen der Reifeninnendruck den Bodenverhältnissen angepasst werden kann (Reifeninnendruck wird etwa während der Fahrt auf befestigtem Untergrund, wie zum Beispiel Waldstrassen erhöht und für die Fahrt auf unbefestigtem Untergrund, wie zum Beispiel auf Rückegassen gesenkt). Massnahmen, wie die Waldstandortskartierung, um Kenntnisse über die Befahrungsempfindlichkeit zu erlangen und die Markierung und Dokumentation der Feinerschliessungsnetze, damit diese jederzeit wieder gefunden werden, können ebenfalls zu den Investitionen in den Bodenschutz gerechnet werden.

Neben diesen Investitionen gibt es auch Massnahmen bei der praktischen Umsetzung. Hierzu zählen beispielsweise das Unterbrechen der Arbeiten, das Ausweichen auf andere Flächen oder das Rücken mit reduzierter Last. Für das Rücken mit reduzierter Last geben SPJEVAK & THEES (2009) zusätzliche Rückekosten von 1.5 SFr./m^3 an. Abbildung 5 gibt einen Überblick der Massnahmen für den Bodenschutz bei der Waldbewirtschaftung und was sie Kosten können.

Überblick über kostenrelevante Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz

	Zusätzliche Investitionen ($Fr.\cdot ha^{-1}\cdot a^{-1}$)		Zusätzliche Massnahmen beim einzelnen Holzschlag verursachen			
			fixe Kosten	($Fr.\ ha^{-1}\cdot a^{-1}$)	variable Kosten	($Fr.\cdot ha^{-1}\cdot a^{-1}$)
Planung (Betrieb)	- **Weiterbildung Betriebsleiter**	**1**	- Festlegen von Ausweichflächen	1		
	- Standortskartierung im Hinblick auf Befahrbarkeit	0.5	- Umweltleistungsbewertung bezüglich Bodenschutz	3		
	- Markierung und Dokumentation der Feinerschliessung	6				
Steuerung und Durchführung (Betrieb)	- **Weiterbildung Maschinenführer**	**1**	- **Beurteilung des Bodenzustandes → Entscheid fahren/nicht fahren**	**1**	- Partieller Verzicht auf Befahrung → grössere Beiseilentfernung beim Rücken	110*
	- Software zur Beurteilung der Befahrbarkeit[1]	0.5	- Unterbruch der Arbeiten und Umsetzen auf Ausweichflächen	10	- Rücken mit reduzierter Last bzw. kleinerer Maschine	17
	- Instrumente zur Messung der Bodenfeuchte	0.5	- Regenerationsmassnahmen	3	- Wechsel von boden- auf seilgestützte Erntesysteme[2]	-
	- Spezifische Maschinenausrüstungen: Reifen mit vergrösserter Nennbreite, Reifendruckanlage, Bogiebänder, Traktions-hilfswinde[3]	4	- **Abnahme der Arbeiten**[4]	3		
Überwachung (Kanton)			- Kontrolle und ggf. Sanktionsmassnahmen	2		

1 Es gibt Prototypen für solche Software, wie z. B. ProFor.
2 Eine teure Massnahem, die fallweise in Erwägung zu ziehen ist.
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 daraus bestehend, dass z. B. der Leiter des Forstbetriebs den Fahrspuren entlanggeht, sie erfasst, beurteilt , einzeichnet und digitalisiert.

* korrigiert gemäss FRUTIG (2012, mündl. Mitt.) 10 Potenz-Fehler in der Berechnung in Quelle

Abbildung 5: Massnahmen und deren Kosten für den physikalischen Bodenschutzes bei der Waldbewirtschaftung (SPJEVAK & THEES 2009).

2.5 Ernteschäden und deren Folgen

Bei der Holzernte wird immer ein gewisser Anteil der verbleibenden Bäume verletzt. So können - wie bereits oben erwähnt - beim Befahren des Bodens mit Forstmaschinen Wurzeln beschädigt werden. Aber auch beim Fällen, Vorliefern und Rücken der Bäume kommt es zu Verletzungen an Wurzeln und Stämmen der verbleibenden Bäume. Der Anteil der verletzten Bäume im verbleibenden Bestand wird als Schadenhäufigkeit bezeichnet (BUTORA & SCHWAGER 1986). MENG (1978) verwendet anstelle der Schadenhäufigkeit den Begriff Schadensprozent, worunter er aber das gleiche versteht, nämlich den Anteil der Bäume des verbleibenden Bestandes, die bei einer Durchforstung beschädigt wurden, wobei ein einzelner Baum dabei eine oder mehrere Verletzungen (mit einer Fläche von mehr als 10 cm^2) erlitten haben kann. Die Schadenhäufigkeit oder das Schadensprozent ist im Wesentlichen von der eingesetzten Holzerntetechnik, dem Rückegassenabstand, dem Hiebszeitpunkt, der Holzaushaltung, dem Bestandesalter, der Eingriffsstärke und der Topographie abhängig (BUTORA & SCHWAGER 1986). Höhere Eingriffsstärken, längere Sortimente und steigende Hangneigungen haben beispielsweise zunehmende Bestandesschäden zur Folge. Bei Eingriffen während der Vegetationszeit gibt es mehr und grössere Verletzungen als bei Eingriffen während der Vegetationsruhe (MENG 1978). Auch die Baumart spielt eine Rolle. So hat etwa die Fichte als Flachwurzler viele Wurzeln nahe an der Bodenoberfläche und zudem eine relativ dünne Borke. Damit ist sie verletzungsanfälliger als etwa die Waldföhre mit ihrer verhältnismässig dicken Borke und den Pfahlwurzeln (KOCH & THONGJIEM 1989). Am meisten wird die Schadenhäufigkeit wahrscheinlich von der Geschicklichkeit und dem Können der Forstwarte und Forstmaschinenführer beeinflusst (JÄGHAGEN & LAGESON 1996).

2.5.1 Schadensprozente bei der Holzernte

Die Resultate aus Studien über die Ernteschäden bei der Holzernte sind aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren recht unterschiedlich. In der Folge werden die Ergebnisse aus einigen Untersuchungen wiedergegeben. In einem ersten Teil für die vollmechanisierter Holzernte mit Vollernter und in einem zweiten Teil für die Holzernte, bei denen die Bäume motormanuell gefällt respektive aus grösserer Entfernung beigeseilt werden müssen.

Vollmechanisierte Holzernte

MCNEEL & BALLARD (1992) untersuchten die Schäden in einem, mit Rückegassen erschlossenen Douglasienbestand nach der mechanisierten Durchforstung mit Vollernter und Forwarder. Sie fanden in diesem Bestand, welcher auf einem Gelände mit Hangneigungen von 0-17 % stockt und bei dem der Anteil der Rückegassen an der gesamten Waldfläche weniger als 20 % beträgt, eine Schadenhäufigkeit von weniger als 5 %.

BETTINGER & KELLOGG (1993) fanden nach einer Durchforstung eines 47-jährigen Bestandes mit Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*) und Westamerikanischen Hemlocktannen (*Tsuga heterophylla*) mit dem Sortimentsprinzip (Vollernter und Forwarder), dass 40 % der verbleibenden Bäume verletzt waren, wobei die verletzten Bäume vor allem entlang der Gassen zu finden waren.

Die Schäden an den verbleibenden Bäumen nach der Holzernte im Herbst in zwei Beständen wurde von ATHANASSIADIS (1997) untersucht. Für einen 30-jährigen Bestand mit Fichten (*Picea abies*), in dem die 3.4 m breiten Rückegassen in einem Abstand von 19.2 m angelegt waren, und welcher mit einem Traktor mit angebautem Harvesterkran durchforstet wurde, wobei die Bäume ausserhalb des Kranbereichs manuell zugefällt und dann vom Vollernter aufgearbeitet wurden, resultierte ein mittleres Schadensprozent von 6.3. Für einen zweiten 90-jährigen Bestand bestehend aus Fichten (*Picea abies*), Waldföhren (*Pinus sylvestris*), Birken (*Betula pendula*) und Espen (*Populus tremula*), bei wel-

chem die Bäume mit dem Vollernter geerntet wurden, war das Schadensprozent 6.5. Die Schäden wurden nach der Ernte mit dem Traktor/Vollernter aufgenommen (ohne Rücken). 65 % der Wunden waren kleiner als 50 cm^2. 81 % der Verletzungen waren am Stamm bis 1.5 m oberhalb des Wurzelhalses, 10 % der Verletzungen am Stamm oberhalb 1.5 m und 9 % im Bereich des Wurzelhalses und an den (sichtbaren) Wurzeln.

LAGESON (1997) stellte in Waldföhrenbeständen (*Pinus sylvestris*), welche mit dem Vollernter durchforstet wurden Schadenhäufigkeiten von um die 5 % fest. In einer Untersuchung von HEITZMAN & GRELL (2002) zu den Schäden an den verbleibenden Bäumen nach Durchforstung im Winter mit dem Sortimentsverfahren mit Vollernter und Forwarder in 50- bis 70-jährigen Amerikanischen Rotfichtenbeständen (*Picea rubens*) (Hangneigung < 10 %) waren zwischen 25 und 46 % der verbleibenden Bäumen verletzt.

LIMBECK-LILIENAU (2003) untersuchte die Schadenhäufigkeit in Beständen (2-11 % Hangneigung), welche mit Hilfe von Rad- resp. Raupenharvester und Forwarder durchforstet wurden. Der Anteil der verletzten Bäume im verbliebenen Bestand betrug für die Bestände, welche im Winter mit einem Radharvester durchforstet wurden, 3 und 6 %. Dabei wurden 13.6 respektive 14.2 % der Bäume entnommen. Für jene Bestände, bei welchen die Durchforstung im Sommer durchgeführt wurde, wurden 12 und 15 % der verbliebenen Bäume verletzt. Dabei wurden 46.5 respektive 41.8 % der Bäume entnommen. Bei den Beständen, welche mit dem Raupenharvester durchforstet wurden lagen die Schadensprozente bei ähnlicher Durchforstungsintensität etwas höher (zwischen 10 und 21 %). Die Analyse der Grösse der Schäden ergab, dass Durchforstungen im Sommer zu schwereren und grösseren Verletzungen führte. So gab es im Sommer beim Radharvester dreimal so viel Wunden mit einer Grösse von mehr als 200 cm^2 als im Winter. Zudem werden im Sommer viel mehr Wurzeln verletzt als im Winter, wenn Schnee liegt und der Boden gefroren ist. So liegen im Sommer total 38 % aller Verletzungen an den Wurzeln im Vergleich zum Winter mit 6 %.

Untersuchungen zu den Schäden an den verbleibenden Bäumen in von Zuckerahorn (*Acer saccharum*) dominierten Laubholzbeständen in ebenem Gelände wurden von SEABLOM & REED (2005) durchgeführt. Der Anteil der verbliebenen, verletzten Bäume lag in den Beständen, in welchen die Bäume motormanuell, dass heisst mit der Motorsäge gefällt und mit Forstschleppern oder Forwardern gerückt wurden zwischen etwa 3 und 6 %. Bei den Beständen, in welchen die Bäume mit Fäller-Bündlern gefällt und mit Schleppern oder Forwardern gerückt wurden, waren etwa 10 bis 20 % der verbleibenden Bäume verletzt worden.

In einer Untersuchung zu den Baumschäden nach dem Einsatz von Harvestern in Fichtenbeständen mit Rückegassendichten von über 500 m/ha (entspricht einem mittleren Gassenabstand von weniger als 20 m) wiesen 2-3.6 % der verbliebenen Bäume Schäden auf. Je nach Altersklasse war der Anteil der Wurzelschäden an den Gesamtschäden zwischen 26.5 und 30 %. Die übrigen Schäden betrafen den Stammanlauf und den Stamm. Die Grösse der meisten Verletzungen lag im Bereich zwischen 51-200 cm^2. Es wird erwartet, dass zwischen 61-77 % der beschädigten Bäume von Fäulnisbefall bedroht sind (DVORÁK 2006).

SLAMKA & RADOCHA (2010) untersuchten die Schäden an den verbleibenden Bäumen nach der vollmechanisierten Durchforstung in verschiedenen Nadelholzbeständen (auf Gelände mit Hangneigungen von 10-40 %) mit Harvestern und Forwardern. In den 35- bis 50-jährigen Beständen, in welchen 20-40 % der Bäume entnommen wurden, wurde ein Schadensprozent von durchschnittlich 9 festgestellt. Ein 70-jährigen Fichtenbestand mit Kalamitätsschäden, in welchem 54 % der Bäume entnommen wurden, hatte ein Schadensprozent von 17.

Die Schadenhäufigkeit, also der Anteil der nach einer Durchforstung verletzten Bäume im verbleibenden Bestand beträgt bei der vollmechanisierte Holzernte mit Vollernter und Forwarder gemäss den hier präsentierten Studien zwischen weniger als fünf bis mehr als 40 Prozent. Wobei in der Mehrzahl der untersuchten Beständen ein Schadenprozent von um die zehn Prozent gefunden wurde.

Andere Holzernteverfahren/grössere Rückegassenabstände

Werden die Bäume motormanuell (d. h. mit der Motorsäge) und nicht vollmechanisiert durch den Vollernter gefällt, so hat dies auch Folgen für die Schadenhäufigkeit. Mit dem Vollernter können die Bäume kontrolliert zu Fall gebracht werden. Das Schadensprozent ist deshalb bei der vollmechanisierten Holzernte im Allgemeinen niedriger als bei motormanuellen Verfahren (HAN & KELLOGG 2000). Gemäss BACHER-WINTERHALTER (2004) liegt der Anteil beschädigter Bäume im Altersklassenwald für motormanuelle Holzerntesysteme bei 10-25 % und für vollmechanisierte bei 5-15 %. Nach BUTORA & SCHWAGER (1986) werden beim Rücken mit dem Traktor in befahrbarem Gelände 25 %, beim Bodenseilzug 33 %, beim Seilkran 34 % und beim Reisten 38 % der verbleibenden Bäume beschädigt. Ficklin et al. (1997) fanden in Eichen-Föhrenbeständen (Quercus velutina, Quercus alba, Pinus echinata) auf Gelände mit Hangneigungen von 16-26 %, in welchem die motormanuell gefällten Bäume mit einem Forstschlepper gerückt wurden, dass im Mittel 23.5 % der verbleibenden Bäume Verletzungen aufweisen. Im Vergleich dazu waren beim Rücken mit Pferden dreimal weniger Bäume verletzt. VON AUFSESS (1978) untersuchte die Auswirkungen der Durchforstungsschäden in 35- bis 60-jährigen Fichtenbeständen (*Picea abies*). Dabei wurden die Bäume motormanuell gefällt und mit einer Seilwinde bis zur Rückegasse gezogen. Insgesamt wiesen nach Durchforstungen im Sommer 16.3 und im Winter 12.9 % der verbleibenden Bäume Verletzungen auf. Allerdings gibt es auch Untersuchungen, in denen bei der mechanisierten Hozernte mit Vollernter und Forwarder eine grössere Schadenhäufigkeit gefunden wurde als beim motormanuellen Fällen. So fanden FJELD & GRANHUS (1998), welche die Schäden nach Einzelbaumernte in mehrschichtigen Fichtenbeständen (*Picea abies*) untersuchten, bei der mechanisierten Holzernte (Harvester und Forwarder) eine grössere Verletzungsrate als beim motormanuellen Fällen mit Zuziehen mithilfe von Seilwinden an die Rückegassen. In der Untersuchungsfläche mit dem motormanuellen Fällen und dem Seilvorliefern waren die Gassen in einem Abstand von 36 m angeordnet, bei der Fläche mit dem mechanisierten Verfahren in einem Abstand von 24 m. Die Breite der Gassen war für beide Ernteverfahren 3.5 bis 4 m. Die Verletzungsrate (Anteil verletzte Bäume) war, bei gleicher Entnahmerate, 8.7 % für das motormanuelle Verfahren und 13.7 % für das vollmechanisierte Verfahren. Dabei hatten nur 12 % der verletzten Bäume Schäden an den Wurzeln, 62 % Schäden am Baum und 55 % Schäden an den Kronen. Zudem zeigte sich, dass die Verletzungsrate mit zunehmender Eingriffsstärke zunimmt.

Nicht flächendeckend vollmechanisiert geerntet werden kann, wenn die Rückegassen aus Bodenschutzgründen in grösseren Abständen (> 20m) angeordnet sind. Andere Holzernteverfahren müssen eingesetzt werden. Dies hat Auswirkungen auf die Häufigkeit und das Ausmass der Schäden, welche bei der Ernte entstehen. Im Allgemeinen nimmt mit zunehmendem Rückegassenabstand die Schadenhäufigkeit zu. Auf Kosten einer geringeren Befahrung und einer Bodenschonung müssen höhere Rückeschäden in Kauf genommen werden (BORT *et al.* 1993). Bei grösserem Gassenabstand muss ein Teil der Bäume motormanuell zugefällt oder über eine gewisse Distanz vorgeliefert werden. Das Risiko von Verletzungen an den verbleibenden Bäumen steigt an (HAN & KELLOGG 2000). So erhöhen sich nach MORAT *et al.* (1998) die Schäden am verbleibenden Bestand durch das Zufällen aus den, mit dem Harvester nicht erreichbaren Zwischenzonen, um 5 %. SAUTER & BUSMANN (1994) fanden in einem 20- bis 45-jährigen Fichtenbestand welcher durchforstet wurde, für einen 20 m Gassenabstand ein Schadensprozent von 7.3. Bei Gassenabständen von 30 und 40 m war das Schadensprozent bei 10.6 respektive 10.9. Beim Gassenabstand von 20 m wurden die Bäume vom Harvester gefällt und

aufgearbeitet, bei einem Abstand von 30 m wurden Bäume in den Zwischenzonen ausserhalb des Kranbereichs motormanuell zugefällt und mit dem Harvester aufgearbeitet, beim 40 m Gassenabstand wurden die Bäume aus den Zwischenzonen vorgeliefert und anschliessend mit dem Harvester aufgearbeitet. Gerückt wurden die Sortimentsstücke bei allen Gassenabständen mit dem Forwarder. Auf der gleichen Untersuchungsfläche stellten BORT *et al.* (1993) beim 30 Meter Gassenabstand fest, dass 6.8 % der Z-Bäume beschädigt wurden. Dies ist doppelt so hoch wie bei einem 20 m Gassenabstand bei welchem das Schadensprozent der Z-Bäume nur 3.4 war. Beim 40 m Gassenabstand fand man gar dreimal so viele Z-Bäume beschädigt wie beim 20 Meter Abstand. Am häufigsten waren bei allen Gassenabständen kleinere Schäden mit Schadensgrössen von 10 bis 50 cm^2. Beim 30 m Gassenabstand mit motormanuellem Zufällen waren 35 % der Schäden eine Schadensgrösse von 50 bis 200 cm^2 und 18 % der Schäden sogar eine Grösse von mehr als 200 cm^2. Im Vergleich dazu waren beim 20 m Gassenabstand nur 15 % der Verletzungen 50 bis 200 cm^2 gross und Verletzungen mit einer Grösse von mehr als 200 cm^2 gab es gar keine. Gründe für die häufiger auftretenden grösseren Verletzungen beim 30 m Abstand liegen im schwierigeren kontrollierten Zufallbringen der Bäume als beim Einsatz mit dem Harvester. Zudem müssen die Bäume in den auf der anderen Seite der Rückegasse liegenden Bestandesteil geschoben werden, damit der Harvester am Stammfuss (dickörtig) die Bäume aufarbeiten kann. Auch MENG (1978) fand einen engen Zusammenhang zwischen dem Schadensprozent und dem Rückegassenabstand. Für teilmechanisierte Verfahren (motormanuelles Fällen und Vorliefern mit Schlepperseil) fand er bei einem Abstand von ca. 40 m die tiefsten Schadensprozente. Oberhalb eines Gassenabstandes von 40 bis 50 m steigen die Schäden am verbleibenden Bestand deutlich an. Ein Rückegassenabstand von 70 m führt zu einem Drittel mehr beschädigter Bäume gegenüber einem Gassenabstand von 40 m. KORTEN (2004) hingegen fand in seinen Untersuchungen, dass Rückegassenabstand und -breite hingegen keinen entscheidenden Einfluss auf die Holzernteschäden an Verjüngung haben. BUTORA & SCHWAGER (1986) untersuchten die Rückeschäden beim Vorliefern der Bäume von den Rückegassen (Baumstämme wurden von der Rückegasse aus zugezogen). Bei einer Rückedistanz von 20 m war der Anteil der beschädigten Bäume im verbleibenden Bestand etwas über 10 %. Bei grösser werdenden Rückedistanz stieg die Schadenhäufigkeit - mit abflachender Tendenz - an, so dass auch bei Rückedistanzen von über 100 m die Schadenhäufigkeit den Wert von 20 % nicht überschreitet.

Räumliche Verteilung der Ernteschäden

In mehreren Studien zeigte sich, dass Bäume entlang der Gassen häufiger verletzt werden als die übrigen Bäume. So waren etwa in der Untersuchung von BETTINGER & KELLOGG (1993) verletzte Bäume vor allem entlang der Rückegassen zu finden. Auch HEITZMAN & GRELL (2002) kamen zum Schluss, dass Bäume entlang der Gassen häufiger verletzt werden, als die übrigen Bäume. Auch MENG (1978) fand in seinen Untersuchungen zu teilmechanisierten Holzernteverfahren ein höheres Schadensprozent bei den Rückegassen-Randbäume. Auch bei vollmechanisierten Verfahren treten Verletzungen gehäuft an den Bäumen entlang der Gassen auf. In den Untersuchungen von HAN & KELLOGG (2000) waren bei Durchforstungen von Waldföhrenbeständen (*Pinus sylvestris*) mit Harvester und Forwarder (Sortimentsverfahren) 64 % der Schäden innerhalb von 4.6 m von der Mittellinie der Rückegasse zu finden. Bei den von SLAMKA & RADOCHA (2010) untersuchten Beständen war ein grosser Teil (40-50 %) der Baumverletzungen innerhalb eines Abstandes von einem Meter von den Rückegassenrändern aufgetreten. SEABLOM & REED (2005) fanden in ihren Untersuchungen zu den Schäden an den verbleibenden Bäumen in Laubholzbeständen hingegen, dass die Entfernung zur Rückegasse keinen Einfluss auf die Häufigkeit der Verletzungen hat.

Für MENG (1978) liegen die Gründe dafür, dass die Randbäumen entlang der Gassen gehäuft beschädigt werden, einerseits in den Vorlieferschäden, welche an den Rückegassen aufgrund des „Einschwenkens“ des Holzes in die Rückegassen vermehrt auftreten. Andererseits treten auch mehr Rücke-

schäden durch die Schlepperfahrten auf den Gassen auf. Dazu zählen insbesondere Wurzelverletzungen. FRIES (1975) führte Untersuchungen in neun Fichtenbeständen (*Picea abies*), welche drei bis neun Jahren zuvor durchforstet wurden, wobei das Holz mit einem Traktor gerückt wurde. Alle Bäume innerhalb eines Meters von jedem Weg wurden untersucht. 84 % aller Bäume wiesen Wurzelschäden auf. Bei anderen Untersuchungen der Wurzelverletzungen in einem Fichtenbestand hatten etwa 40 % aller Randbäume entlang von mit Forwarder und Harvester befahrenen Rückegasssen verletzte Wurzeln (BORCHERT *et al.* 2008).

Bei der motormanuellen (teilmechanisierten) Holzernte entsteht der grössere Teil der Schäden beim Rücken. BUTORA & SCHWAGER (1986) fanden in ihren Untersuchungen zu den Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen, dass etwa zwei Drittel aller Baumverletzungen auf das Rücken, und ein Drittel auf das Fällen zurückzuführen sind. Zudem sind die Verletzungen, die durch das Rücken verursacht werden, meist schwerwiegender als jene die auf das Fällen zurückgehen. Wobei die Untersuchungsbestände teilmechanisiert mit Bodenseilzug, Traktorrücken oder Reisten geerntet wurden. Bei der vollmechanisierten Holzernte mit Harvester und Forwarder ergibt sich ein anderes Bild. So entsteht der grösste Teil der Baumverletzungen bei Fällen und Aufarbeiten mit dem Harvester. Beim Forwarder werden die Baumstämme/Sortimentsstücke über dem Boden (getragen) transportiert, dadurch entstehen nur wenige Schäden am verbleibenden Bestand (AKAY *et al.* 2006). Nach HAN & KELLOGG (2000) werden im Sortimensverfahren durch den Harvester mehr als zweimal so viel verbliebene Bäume verletzt als durch den Forwarder (63.8 % vs. 28.6 %). 7.6 % der verletzten Bäume wurden durch beide Maschinen getroffen/verletzt. Bei Rücken mit dem Forwarder werden viel weniger Bäume (oberflächlich) verletzt. Hier kommt es vor allem zu Wurzelverletzungen. Allgemein werden durch das Sortimentsverfahren mit Harvester und Forwarder auch weniger schwere Wunden verursacht als beim Rücke mit dem Traktor (HAN & KELLOGG 2000).

Tabelle 6: Untersuchungen und Resultate zu den Schadensprozenten.

Studie	Baumart	Alter Bäume	Eingesetzte Erntemaschinen/Verfahren	Schadensprozent
ATHANASSIADIS (1997)	*Picea abies*	30 Jahre	Traktor mit Prozessorkran, teilweise motormanuelles Zufällen	6.3
	Picea abies, Pinus sylvestris, Betula pendula, Populus tremula	90 Jahre	Vollernter	6.5
BETTINGER & KELLOGG (1993)	*Pseudotsuga menziesii*	47 Jahre	Vollernter und Forwarder	40
DVORÁK (2006)	*Picea abies*	verschiedene	Vollernter	2 bis 3.6
FICKLIN *et al.* (1997)	*Quercus velutina, Quercus alba, Pinus echinata*	verschiedene	Motormanuelles Fällen, Rücken mit Forstschlepper	23.5
FJELD & GRANHUS (1998)	*Picea abies*	verschiedene	Vollernter und Forwarder	13.7
			Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Seilwinde	8.7
HEITZMAN & GRELL (2002)	*Picea rubens*	50 bis 70 Jahre	Vollernter und Forwarder	25 bis 46
LAGESON (1997)	*Pinus sylvestris*	verschiedene	Vollernter	5
LIMBECK-LILIENAU (2003)	*Picea abies* und weitere	50 bis 100 Jahre	Radvollernter und Forwarder	3 bis 6
			Raupenvollernter und Forwarder	10 bis 21
MCNEEL & BALLARD (1992)	*Pseudotsuga menziesii*	25 Jahre	Vollernter und Forwarder	< 5
SAUTER & BUSMANN (1994)	*Picea abies*	20 bis 45 Jahre	Vollernter und Forwarder	7.3
			Vollernter, teilweise Motormanuelles Zufällen, Forwarder	10.6
			Vollernter, teilweise Motormanuelles Fällen und Vorliefern mit Seilwinde, Forwarder	10.9
SEABLOM & REED (2005)	*Acer saccharum*	50 Jahre	Motorsäge (motormanuelles Fällen) und Schlepper/Forwarder	3 bis 6
			Fäller-Bündler und Forwarder	10 bis 20
SLAMKA & RADOCHA (2010)	Nadelholz	35 bis 50 Jahre	Vollernter und Forwarder	9
	Picea abies	70 Jahre	Vollernter und Forwarder	17
VON AUFSESS (1978).	*Picea abies*	35 bis 60 Jahre	Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Seilwinde	12.9 bis 16.3

2.5.2 Folgen der Ernteschäden

Infektion der Baumverletzungen durch Fäuleerreger

Die Folgen der Baumverletzungen sind je nach Ausmass, Position und Jahreszeit, in der sie entstehen, unterschiedlich. Während die Beschädigung von Feinwurzeln meist ohne Konsequenzen bleibt, besteht bei der Verletzung von Wurzeln mit mehr als 2 cm Durchmesser eine grosse Gefahr, dass es zu Pilzinfektionen kommt (MENG 1978). Über solche Wurzelverletzungen können Pilze wie zum Beispiel der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) oder der Hallimasch (*Armillaria spec.*) erleichtert in den Baum eindringen und Wurzelfäule verursachen (BUTIN 1989). Bei der Fichte dringt die vom Wurzelschwamm verursachte Fäule bis in den Kern der Wurzeln ein und den Stamm hoch und breitet sich hier nach oben und radial nach aussen aus. Hier führt sie zur Kernfäule, welche bei Nadelbäumen auch als Rotfäule bezeichnet wird (SCHÜTZ 2003). Gemäss BUTIN (1989) werden in Europa etwa 70 % der Rotfäule durch den Wurzelschwamm verursacht. Der restliche Anteil geht auf andere Pilzarten, wie den Hallimasch zurück. Auch bei (oberirdischen) Verletzungen am Stamm und an den Wurzelanläufen besteht die Gefahr von Infektionen durch Fäuleerreger, welche Wundfäule verursachen können (SCHÜTZ 2003). Die Wundfäule breitet sich im Stamm von der Wunde aus nach innen, nach oben und nach unten aus (BUTIN 1989). Verursacht wird die Wundfäule bei der Fichte vor allem durch Schichtpilze (*Stereum spec.*). Durch Wurzelkontakte - über Wurzelverwachsungen oder eng aneinander liegende Wurzeln - können die Fäulepilze auch andere, nicht verletzte Bäume befallen (BUTIN 1989).

Ob Baumwunden von holzzerstörenden Pilzen infiziert werden, hängt von der Lage der Wunden am Baum ab. Verletzungen in Bodennähe werden meistens mit Fäuleerregern infiziert. Mit zunehmender Höhe der Verletzung am Baum nimmt die Infektionsgefahr ab (ISOMÄKI & KALLIO 1974). So fanden PARKER & JOHNSON (1960) in ihren Untersuchungen zu den Folgen von Baumverletzungen bei Weissfichten (*Picea glauca*) 15 Jahre nach der Durchforstung, bei welcher die Verletzungen entstanden sind, in allen Wurzelverletzungen Fäulepilze. Die Wunden an den oberirdischen Wurzelanläufen waren hingegen nur zu 70 % und jene weiter oben am Stamm nur zu 38 % mit Fäulnispilzen infiziert.

Die Wundgrösse hat ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Entstehung von Fäulen (VON AUFSESS 1978). Mit zunehmender Grösse und Schwere der Verletzung steigt die Infektionsrate von Fäule verursachenden Pilzen an (ISOMÄKI & KALLIO 1974). Nach MENG (1978) werden Verletzungen mit einer Fläche von weniger als 10 cm^2 nur selten von holzzerstörenden Pilzen befallen, weil der Baum eine Infektion abwehren kann. Bei Verletzungsflächen über 10 cm^2 steigt der Anteil der Verletzungen mit Wundfäule - das Fäuleprozent - mit der Grösse der Verletzung an. Grosse Wunden werden meistens von Fäuleerregern infiziert und zwar unabhängig von ihrer Position. In der Studie von PARKER & JOHNSON (1960) wurden beispielsweise in fast allen Verletzungen mit einer Grösse von mehr als 13 cm^2 Fäulepilze gefunden unabhängig davon, ob die Wunden an den Wurzelanläufen oder weiter oben am Stamm lagen.

Auch die Schwere von Verletzungen beeinflusst die Infektionsrate durch Fäulepilze. Wunden bei denen nur die äussere Rinde verletzt oder gequetscht wird, werden selten von Pilzen befallen. Wenn die Rinde abgeschürft und das Holz somit frei aber nicht verletzt wird, kommt es meistens zu Pilzbefall und Fäulnis. Wird die Rinde abgeschürft und das Holz leicht bis schwer beschädigt, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass Wundfäulepilze auftreten stark (BUTORA & SCHWAGER 1986).

Bei Wurzelverletzungen spielt der Abstand vom Stammfuss eine entscheidende Rolle, ob eine Verletzung mit Fäulepilzen infiziert wird oder nicht. Stammnahe Wurzelwunden führen häufig zu Rotfäulebefall des Stammholzes. Mit zunehmendem Distanz nehmen die Infektionsraten ab. In einer von SCHÖNHAR (1979) durchgeführten Untersuchung über den Befall beim Holzrücken verwundeter Fich-

tenwurzeln durch Rotfäulepilze waren Wurzeln mit stammnahen, 1 bis 30 cm vom Stammfuss entfernten, fünf bis zehn Jahre alten Verletzungen zu 52 % mit Rotfäule verursachenden Pilzen infiziert. Bei 38.5 % dieser so verletzen Wurzeln hatte sich die Fäule bis zum Stamm ausgedehnt. Verletzungen im Abstand von 31-100 cm waren im Mittel zu 27.5 % mit Fäule infiziert und durchschnittlich 9 % dieser Verletzungen hatten zu Fäulen im Stamm geführt. Wurzelverletzungen mit einem Abstand von mehr als einem Meter zum Stammfuss hatten keine Stammfäule zur Folge. Dabei wurden im Mittel 9.5 % der so verletzten Wurzeln mit Fäulepilzen infiziert.

Fäuleprozente

Wie oben aufgezeigt, hängt die Infekton von verwundeten Bäumen mit Fäuleerregern von verschiedenen Faktoren ab. In einigen Studien wurde untersucht, in wie vielen der verwundeten Bäume später tatsächlich Fäule festgestellt werden kann. In einer von SCHÖNHAR (1975) durchgeführten Untersuchung zum Befall rückegeschädigter Fichten (*Picea abies*) durch Wundfäulepilze wiesen nach einem Jahr 35 % und nach drei Jahren 63 % der verletzten Fichten einen Fäulebefall auf. In der von FRIES (1975) durchgeführten Untersuchung zu den Wurzelschäden in Fichtenbeständen (*Picea abies*) entlang von Gassen, hatten drei bis neun Jahre nach dem die Wurzeln bei einer Durchforstung und dem anschliessenden Holzrücken verletzt wurden, 75 % aller Bäume Pilzbefall an den Wurzeln. Bei 14 % der Bäume wurden Fäuleschäden in den Stämmen festgestellt. BUTORA & SCHWAGER (1986) fanden bei rund 60 % aller beim Holzrücken verletzten Fichten Infekionen durch Fäulepilze. In den Untersuchungen von EL ATTA & HAYES (1987) waren in einem 31-jährigen Fichtenbestand (*Picea abies*) vier Jahre nach einer Durchforstung 47 % der verletzen Bäume von Fäule befallen. In einem 54-jährigen Fichtenbestand hatten acht Jahre nach der Durchforstung 54 % der verwundeten Bäume Fäule. WITHNEY (1991) fand bei 40 % der Weymouthskiefern (*Pinus strobus*), welche zehn Jahre zuvor verletzt wurden, Fäule verursachende Pilze. In einer Untersuchung von MÄKINEN *et al.* (2007) hatten sechs Jahre nachdem die Bäume verletzt worden waren, 10 % der verletzten Fichten Stammfäulnis, nach 20 Jahren waren es fast 80 % der verletzten Bäume. BORCHERT *et al.* (2008) konnten in ihren Untersuchungen über die Wurzelverletzungen der Gassenrandbäume bei faste allen Bäumen mit Wurzelverletzungen Fäulen feststellen.

Der Anteil der verletzten Bäume, bei welchen nach der Verletzung auch Fäulebefall auftritt, ist also sehr unterschiedlich. Zudem nimmt der Fäulebefall mit dem Alter noch zu, dass heisst einjährige Wunden, welche noch nicht mit Fäuleerregern infiziert wurden, werden oft erst später mit Fäule infiziert.

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule

Ausgehend von den Wunden breitet sich die Fäule immer weiter im Holz aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt dabei von der Grösse und der Schwere (Tiefe) der Verletzung ab. Da im Sommer im Allgemeinen grössere und schwerere Verletzungen entstehen hat die Jahreszeit, in welcher die Verletzung entstanden ist, ebenfalls ein Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule. Der Fäulefortschritt steht auch in einem positiven Zusammenhang mit dem jährlichen Durchmesserwachstum (ISOMÄKI & KALLIO 1974).

In mehreren Studien wurden Raten von zwischen 10 und 20 cm pro Jahr gefunden, mit in welchen sich die Fäule in die Höhe ausbreitet. MENG (1978) stellte beispielsweise eine Ausbreitung der Wundfäule von durchschnittlich 17.5 cm pro Jahr fest. BAZZIGHER (1973) rechnet in seinen Untersuchungen zur Wundfäule in Fichtenbeständen (*Picea abies*) mit einem jährlichen Fäulezuwachs von 11 bis 12 cm. Auch HILSCHER (1964) kommt zu Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Rotfäule in verwundeten Fichten von 12 cm pro Jahr. MÄKINEN *et al.* (2007) fanden durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkei-

ten der Fäule bei der Fichte (*Picea abies*) von jährlich 14 cm und BORCHERT *et al.* (2008) schätzten, dass sich die Kernfäule 9 bis 21 cm pro Jahr ausbreitet. Einen grösseren Fäulefortschritt fanden KOCH & THONGJIEM (1989). Sie stellten eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit von 46 cm pro Jahr für von *Amylostereum areolatum* und 60 cm pro Jahr für von *Stereum sanguinolentum* verursachter Fäule fest. Nach LÖFFLER (1975) nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule mit der Zeit ab. So fanden ISOMÄKI & KALLIO (1974) in ihren Untersuchungen in den ersten zehn Jahren nach der Verletzung Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Fäule von durchschnittliche 21 cm pro Jahr, danach nahm die Ausbreitungsgeschwindigkeit ab.

Zur seitlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule gibt es kaum Literatur. Immerhin wurde in einigen Untersuchungen das Verhältnis zwischen Fäulehöhe und Fäuledurchmesser bestimmt. Nach MENG (1978) ist in einem Baum der Fäuledurchmesser in mm etwa zwischen 1.3 und 3.5 mal geringer als die Fäulehöhe in cm. Das heisst, wenn die Faulhöhe 100 cm beträgt, hat die Fäule einen Durchmesser von um die 50 mm.

Folgen für das Baumwachstum

Baumverletzungen und dadurch verursachte Fäulnis können das Baumwachstums beeinträchtigen. Wenn das Wurzelsystem verletzt oder zerstört wird, wird der Baum in der Wasser- und Nährstoffaufnahme eingeschränkt (KOZLOWSKI 1969). Der Transport von Kohlenhydraten von der Krone zu den Wurzeln wird etwa bei Stammverletzungen, bei denen das Phloem beschädigt wird, beeinträchtigt (FROEHLICH *et al.* 1977). Ein Grund für den Zuwachsverlust von verletzten Bäumen kann auch darin liegen, dass für Wundreaktionen/Verteidigungsreaktionen Ressourcen gebraucht werden, welche dann nicht mehr fürs Wachstum zur Verfügung stehen.

BENDZ-HELLGREN & STENLID (1995) untersuchten die Auwirkungen von Fäulnis auf das Wachstum von Fichten (*Picea abies*). Die Entwicklung von gesunden und von Fäulnis befallenen Bäume wurde miteinander verglichen. Die befallenen Fichten wiesen ein um 8-10 % kleineres Durchmesserwachstum auf als die gesunden Bäume. Die Entwicklung von vom Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) befallenen Fichten (*Picea abies*) untersuchten BENDZ-HELLGREN & STENLID (1997). Das Wachstum von Durchmesser, Höhe und Volumen zweier Bestände wurde während einem Zeitraum von 12 und 20 Jahren rekonstruiert. In einem Bestand, welcher acht Jahre zuvor durchforstet wurde, und die aufgetretenen Baumverletzungen durch *Heterobasidion annosum* infiziert worden sind, gab es keine Unterschiede im Wachstum zwischen den gesunden und den befallenen Bäumen. Im zweiten Bestand, welcher vor 17 Jahre durchforstet wurde, fanden sie ein um 5 % geringeres Durchmesserwachstum und ein um 10 % geringeres Volumenwachstum im Vergleich zu den nicht durch Fäule befallenen Bäume während der Untersuchungsdauer von 20 Jahren. MÄKINEN *et al.* (2007) untersuchten die Auswirkungen der Ernteschäden auf den Zuwachs bei Fichten (*Picea abies*) und Waldföhren (*Pinus sylvestris*). Nach 5 bis 20 Jahren unterschieden sich die verletzten Bäume nicht von denen, welche nicht verletzt wurden.

Ob Baumverletzungen das Wachstum der betroffenen Bäume beeinflusst oder nicht, hängt auch von der Position und dem Ausmass der Verletzung ab. Isomäki and Kallio (1974) fanden in ihren Untersuchungen, dass Wurzelverletzungen und deren Folgen (Fäulnis) das Wachstum von Fichten mehr reduziert als Verletzungen am Stamm. Bei den Bäumen mit oberflächlichen Verletzungen war das Durchmesserwachstum im Mittel um 10 % und bei Bäumen mit schwerwiegenden tiefen Verletzungen und Wurzelverletzungen um bis zu 50 % reduziert.

Die Vitalität der Bäume, welche bei der Holzernte verletzt wurden nimmt oft ab (MOEHRING & RAWLS 1970). Und besonders flachwurzelnde Baumarten wie zum Beispiel die Fichte (*Picea abies*)

sind bei Verletzungen anfälliger auf Windwurf, Trockenstress und Borkenkäferbefall (KUENNEN *et al.* 1979).

Finanzielle Folgen der Ernteschäden

Durch Fäule wird das Holz verfärbt, abgebaut und entwertet. Weil von Verletzungen durch die Holzernte meist der unterste Teil des Baumes betroffen ist, hier aber gleichzeitig auch das wertvollste Holz ist, können Holzernteschäden grosse finanzielle Auswirkungen haben.

FRIES (1975) schätzte, dass bei der Räumung alle Bäume innerhalb eines Meters von der Gasse einen infolge Fäule um 50 % reduzierten Wert haben und dass aufgrund dieser Wertminderung der Bruttowert des gesamten Endhiebs um 4 % geringer ausfällt.

MENG (1978) berechnete die Wertverluste von Rohschäften mit unterschiedlichem Fäulebefall. Er kommt für eine Faullänge von 1 m auf einen Wertverlust von 5.0 %, bei 2 m Faullänge beläuft sich der Wertverlust auf 10.4 % und bei einer Faullänge von 3 m auf 13.3 %.

Schätzungen von BUTORA & SCHWAGER (1986) zufolge, sind in einem 120-jährigen Endnutzungsbestand 40 % der Bäume von Pilzen befallen bei einer Annahme, das während jeder Durchforstung dieses Bestandes 35 % der verbleibenden Bäume beschädigt worden sind. Dadurch reduzieren sich die Holzerlöse in den Durchforstungsbeständen um 11.6 und in den Endnutzungsbeständen um 8.2 %.

BORCHERT *et al.* (2008) berechneten in ihrer Studie die Mindererlöse infolge der Rotfäule, die als Folge der Wurzelverletzungen, welche durch das Befahren mit Forstmaschinen verursacht werden, entsteht. Etwa 40 % aller Randbäume entlang der Gassen wiesen Verletzungen auf. Sechs Jahre nach Verletzung wiesen fast alle Bäume Fäulen auf. Die Kernfäule in den Bäumen entwerteten die untersten Stammstücke, welche 36 % der Holzmasse ausmachen. Bei einem Preisabschlag für dieses rotfaule Holz von 20 Prozent war der Mindererlös 1 bis 2 % des Holzerlöses, der sich aus dem Verkauf aller Gassenrandbäume nach Abzug der Erntekosten hätte erzielen lassen, wenn kein Baum eine Kernfäule aufweisen würde. Dabei wurden nur die Verletzungen der Randbäume durch Befahrung berücksichtig. Die bei einer Durchforstung entstehenden Verletzungen wurden nicht untersucht.

3 Berechnung von Kosten und Nutzen intakter Waldböden am Beispiel eines Fichtenbestandes

In diesem Kapitel werden die Kosten und Nutzen von intakten Waldböden modellhaft kalkuliert. Der Nutzen eines intakten Waldbodens entspricht den verhinderten negativen Auswirkungen und den damit verbundenen Kosten, welche bei beeinträchtigtem Boden entstehen. Wie in Kapitel 2 aufgezeigt, kann es auf, durch Befahrung mit Forstmaschinen beeinträchtigten Waldböden, zu erheblicher Abnahme des Baumwachstums kommen und durch Befahrung verursachte Wurzelschäden führen oft zu Fäulebefall. Sowohl die Abnahme des Zuwachses als auch die Fäulnis haben finanzielle Einbussen zur Folge. Wenn der Waldboden vor der Belastung durch schwere Forstmaschinen geschützt wird, können diese finanziellen Einbussen verhindert oder zumindest reduziert werden. Die Kosten eines solchen Schutzes fallen also dadurch an, dass der Boden schonend respektive nicht mehr oder nur mehr zu einem kleinen Teil befahren wird. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Berechnung der Mehrkosten bei grösserem Gassenabständen bei denen ein geringerer Anteil der Waldfläche befahren wird. Allerdings nehmen bei grösseren Gassenabständen die Bestandesschäden zu. Die Folgekosten dieser Schäden in Abhängigkeit des Gassenabstandes werden deshalb ebenfalls berechnet.

3.1 Holzerntekosten und Mehrkosten bei teilweisem Verzicht auf Befahrung

Wird zur Schonung des Waldbodens die Befahrung auf wenige Feinerschliessungslinien (Rückegassen) konzentriert und sind die Gassen, auf welchen die Forstmaschinen fahren (und damit den Boden potenziell beeinträchtigen) in grösseren Abständen angelegt, hat dies Folgen für die Holzernte und die Erntekosten. Denn die Holzerntekosten sind von verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel dem eingesetzten Ernteverfahren abhängig. Und je nach Abstandsweiten der Gassen kommen andere Verfahren zur Anwendung.

3.1.1 Auswahl der Arbeitsverfahren

Moderne Vollernter (Harvester) haben eine Kranreichweite von zehn Metern. Für eine flächendeckende, vollmechanisierte Holzernte müssen die Rückegassen daher in einem Abstand von 20 Metern angeordnet sein, damit alle Bäume mit dem Vollernter geerntet werden können. Wenn die Gassenabstände grösser sind, kommen zusätzlich andere Ernteverfahren zum Einsatz, um die Bäume in den Zwischenbereichen, welche nicht mit dem Kran des Vollernters erreicht werden, zu ernten (Abbildung 6).

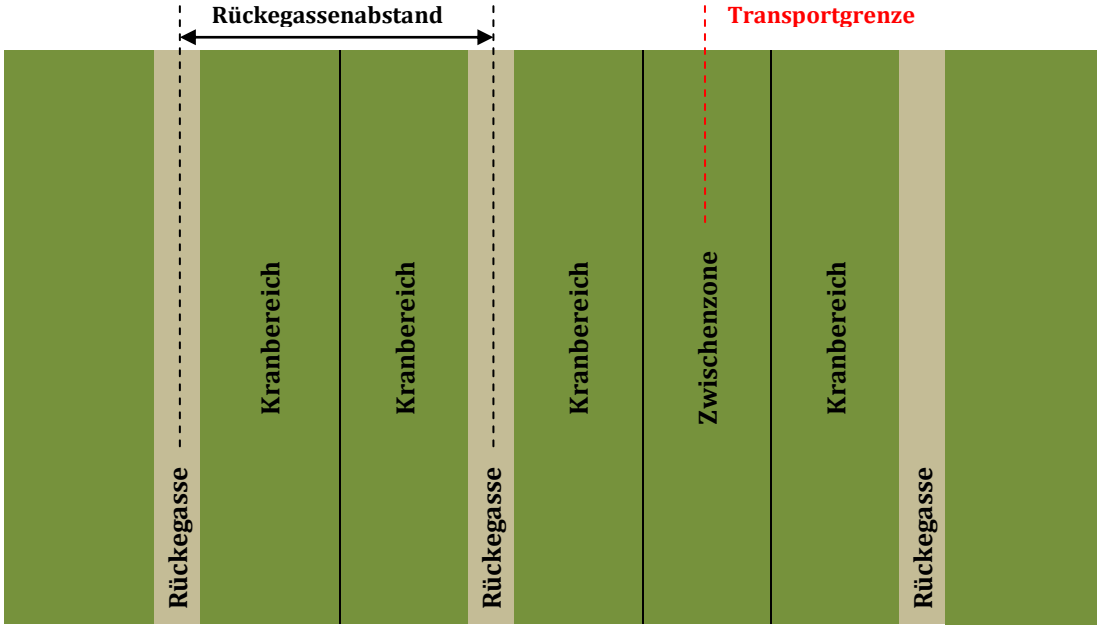


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Waldfläche mit Rückegassen zur Feinerschliessung. Der Abstand zischen der linken Gasse und der Gasse in der Mitte beträgt 20 Meter (oder weniger), damit liegen alle Bäume auf der Fläche zwischen den Gassen in der Reichweite des Vollernters. Zwischen der Gasse in der Mitte und jener rechts in der Abbildung beträgt der Abstand mehr als 20 Meter. Ausserhalb des Kranbereichs gibt es eine Zwischenzone, welche nicht in der Reichweite des Vollernters liegt. Bäume in dieser Zwischenzone müssen motormanuell in Richtung Gassen gefällt oder vorgeliefert werden. In der Abbildung ist auch die Transportgrenze zwischen der mittleren und der rechten Gassen eingezeichnet. Die Transportgrenze ist die Zone, welche am weitesten von einer Erschliessung entfernt ist.

Die Modellrechnung der Holzerntekosten wird mit der, in Tabelle 7 vorgestellten Ernteverfahren durchgeführt. Dies sind Arbeitsverfahren, welche im befahrbaren Gelände häufig zum Einsatz kommen.

Tabelle 7: Ernteverfahren, für welche die Erntekosten berechnet werden.

Bereich	Durchschnittlicher BHD der zu erntenden Bäume	Ernteverfahren
Kranbereich	≤ 40 cm	**Vollernter flächendeckend** Fällen und Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
	> 40 cm	**Vollernter mit motormanuellem Fällen** Motormanuelles Fällen, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
Zwischenzone[1] (bei Gassenabständen von mehr als 20 Metern)	Bäume aller Durchmesser[2]	**Vollernter mit Zufällen** Motormanuelles Zufällen, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder
	Bäume aller Durchmesser[2]	**Vollernter mit Vorliefern** Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Schlepper, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder

[1] für die Breite der Zwischenzone bei verschiedenen Gassenabständen siehe Tabelle 8
[2] je nach Baumhöhe und Rückengassenabstand kommt das Verfahren Vollernter mit Zufällen oder Vollernter mit Vorliefern zum Einsatz (Erklärung unter 3.1.2)

Die Tabelle 8 zeigt die Breiten der Zwischenzonen bei den verschiedenen Rückegassenabständen. Bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern gibt es, bei einer angenommen Reichweite des Vollernterkrans von zehn Metern, keine Zwischenzone. Die Transportgrenze liegt in der Mitte zwischen zwei Rückegassen. Bei einem Gassenabstand von 30 Metern ist die Distanz von beiden Rückegassen bis zur Transportgrenze jeweils 15 Meter. Zehn Meter davon können mit dem Vollernter erreicht werden. Die restlichen fünf Meter liegen ausserhalb der Reichweite des Vollernters (Zwischenzone). Damit sind bei einem 30 m Gassenabstand der Kranbereich 20 Meter und die Zwischenzone zehn Meter breit.

Tabelle 8: Breite des Kranbereichs und der Zwischenzone bei verschiedenen Rückegassenabständen.

Rückegassenabstand (m)	Distanz Rückegasse – Tranportgrenze (m)	Kranbereich (m)	Zwischenzone (m)
20	10	2·10 = 20	2·0 = 0
30	15	2·10 = 20	2·5 = 10
40	20	2·10 = 20	2·10 = 20
50	25	2·10 = 20	2·15 = 30
60	30	2·10 = 20	2·20 = 40

Nachfolgend werden nun die Ernteverfahren beschrieben und die Holzerntekosten bei den verschiedenen Verfahren berechnet, um die Mehrkosten bei grösseren Gassenabständen (im Vergleich zum Gassenabstand von 20 Metern) zu erhalten.

3.1.2 Verfahrenabläufe bei den verschiedenen Holzernteverfahren

Im folgenden Abschnitt werden die Abläufe bei den verschiedenen Ernteverfahren beschrieben. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Sortimentsverfahren eingesetzt wird, andere Verfahren werden nicht berücksichtigt. Beim Sortimentsverfahren werden die Bäume im Bestand gefällt, entastet und eingeschnitten. Die Sortimente werden anschliessend zur Waldstrasse gerückt (HEINIMANN 2003).

Vollernter flächendeckend (Rückegassenabstand ≤ 20 Meter)

Die zu fällenden Bäume werden vom Vollernter gefällt, entastet, in Sortimentsstücke eingeschnitten und seitlich an der Rückegasse abgelegt. Die Äste der so aufgearbeiteten Bäume werden auf die Rückegassen vor dem Fahrzeug abgelegt und bilden eine Reisigmatte, die so etwas zur Armierung des Bodens und damit zu dessen Schutz beiträgt. Anschliessend lädt der Forwarder die an der Rückegasse abgelegten Sortimentsstücke auf und rückt diese zu einem Lagerplatz an die Waldstrasse (Abbildung 7). Dort wird das Holz schliesslich von einem Lastwagen verladen und zur Weiterverarbeitung abtransportiert.

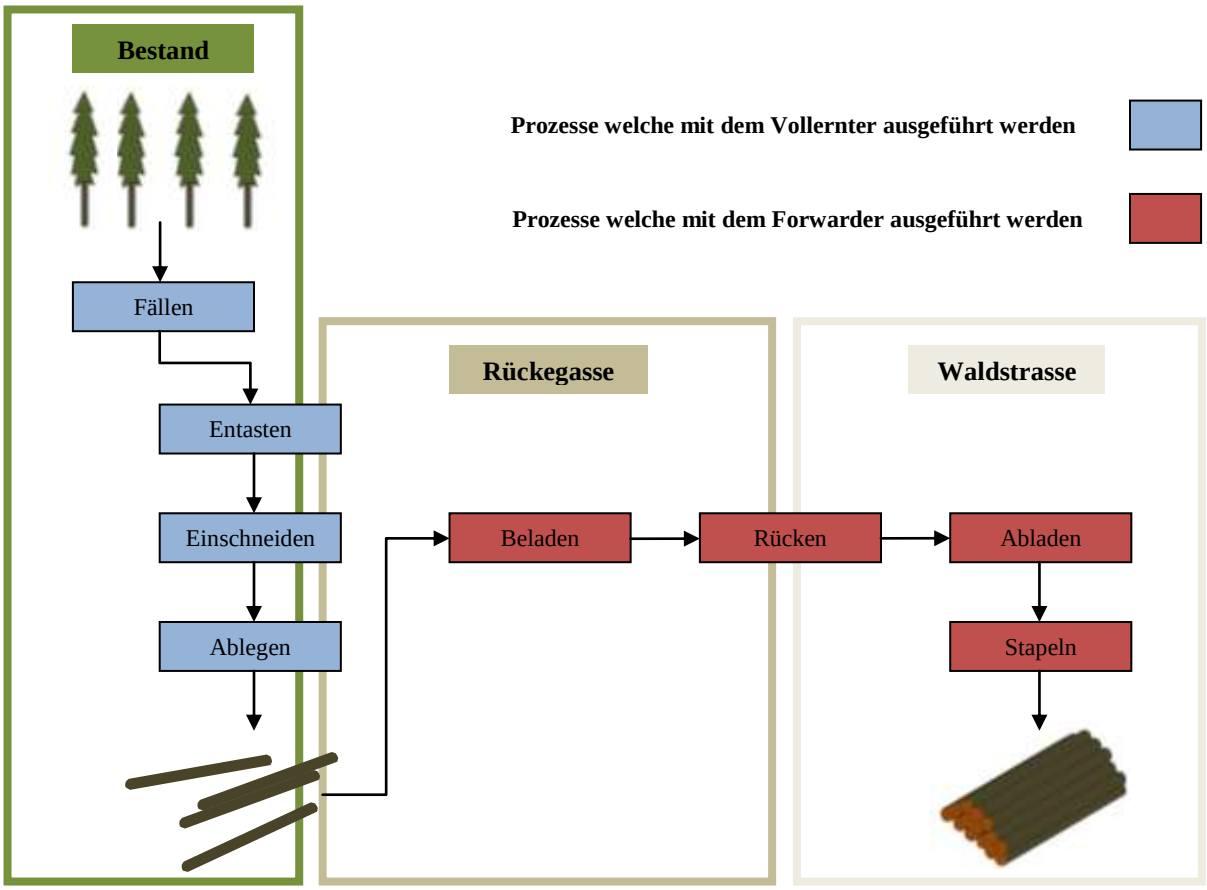


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Holzernteverfahrens Vollernter flächendeckend: Fällen und Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder (eigener Entwurf nach HEINIMANN 2003).

Vollernter mit motormanuellem Fällen (Rückegassenabstand ≤ 20 Meter)

Bäume, deren Durchmesser bestimmte Dimensionen übersteigen, können nicht mehr mit Hilfe des Vollernters gefällt werden. Das Fällen erfolgt in diesem Fall motormanuell. Anschliessend wird der Baum geschrotet, dass heisst die Wurzelanläufe werden mit der Motorsäge weggesägt, damit der Vol-

lernter den Baum entasten und einschneiden kann. Alternativ kann der Baum auch stehend geschrotet werden und anschliessend vom Vollernter gefällt und aufgearbeitet werden. Das Rücken der Sortimentsstücke übernimmt der Forwarder.

Vollernter mit Zufällen (Rückegassenabstand > 20 Meter)

Bäume in der Zwischenzone (ausserhalb der Reichweite des Vollernters) werden motormanuell in Richtung Rückegasse gefällt. Der Vollernter greift dann den Baum an dessen Krone und schiebt ihn in die gegenüberliegenden Bestandesfläche (auf der anderen Seite der Rückegasse), um am Stammfuss des Baumes (dickörtig) mit der Aufarbeitung (inklusive Einmessen) beginnen zu können. Der Baum wird entastet und eingeschnitten. Die Sortimentsstücke werden später mit dem Forwarder gerückt.

Zufällen ist nur möglich, wenn ein Teil der Krone des in Richtung Rückegasse gefällten Baumes in den Kranbereich des Vollernters zu liegen kommt, denn der Vollernter muss den Baum greifen können, ohne das dabei die Krone abbricht. Werden Bäume, die in einem grossen Abstand zur Rückegasse stehen, in Richtung dieser Gasse gefällt und kann der Vollernter die Krone dieser Bäume nicht greifen, weil sie ausserhalb seiner Reichweite liegen, so ist das Zufällen nicht möglich. Ob Zufällen möglich ist, hängt also von der Grösse des zu fällenden Baumes und dessen Entfernung von der Rückegasse ab. Auch bei sehr dichten Beständen ist das Zufällen nicht möglich.

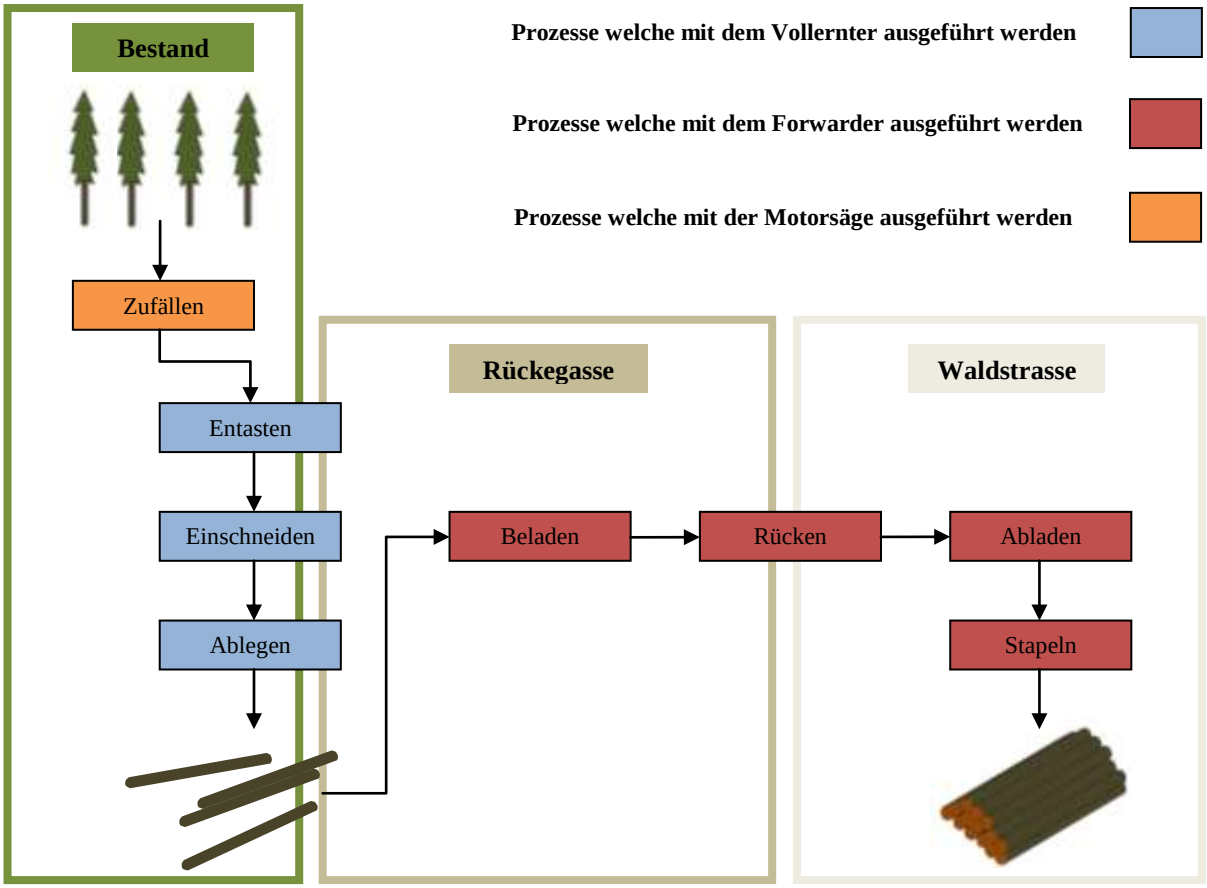


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Holzernteverfahren Vollernter mit Zufällen: Motormanuelles Zufällen, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder (eigener Entwurf nach HEINIMANN 2003).

Vollernter mit Vorliefern (Rückegassenabstand > 20 Meter)

Bäume ausserhalb des Kranbereichs können auch vorgeliefert werden, insbesondere dann, wenn Zufällen aufgrund der zu grossen Distanz zur Rückegasse oder der hohen Bestandesdichte nicht mehr möglich ist. Beim Vorliefern wird der Baum motormanuell so gefällt, dass er dickörtig (mit dem Stammfuss) in Richtung Rückegasse zu liegen kommt. Mit einer Seilwinde wird der Baum zur Rückegasse gezogen. Hier erfolgt die Aufarbeitung maschinell durch den Vollernter. Gerückt wird wieder mit dem Forwarder.

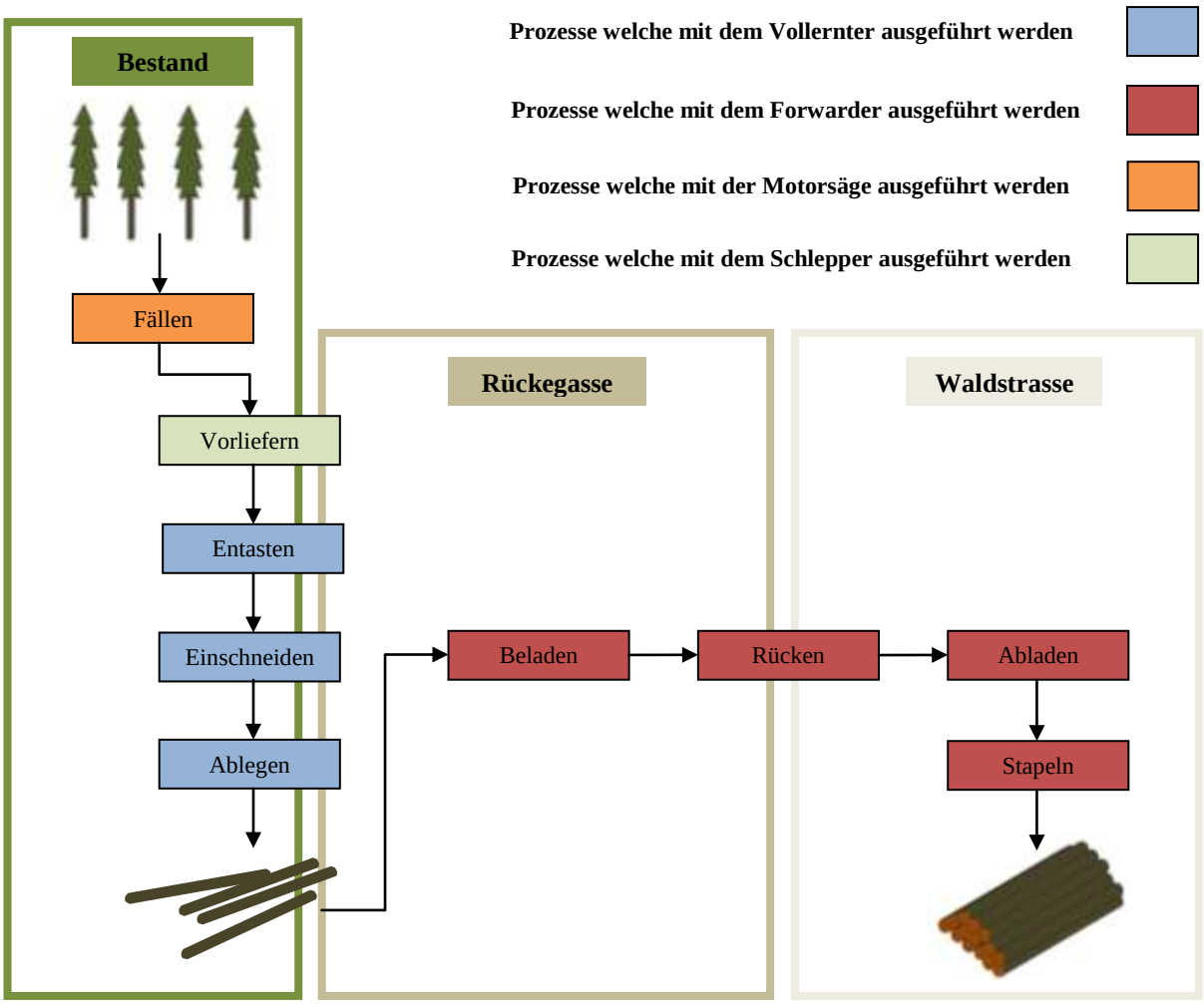


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Holzernteverfahren Vollernter mit Vorliefern: Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Schlepper, Aufarbeiten mit Vollernter, Rücken mit Forwarder (eigener Entwurf nach HEINIMANN 2003).

3.1.3 Annahmen für die Berechnung der Erntekosten

Berechnet wurden die Holzerntekosten mit Hilfe des Holzernteproduktivitätsmodell HeProMo der WSL (ERNI *et al.* 2003). Um die Erntekosten bei den verschiedenen Rückegassenabständen und Verfahren (Vollernter flächendeckend, Vorliefern, Zufällen) zu kalkulieren, mussten allerdings noch einige Anpassungen im Excel vorgenommen werden. Das Modell für die Berechnungen der Erntekosten in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes stammt von AMMANN (2010). Das Ergebnis der Berechnungen sind die Holzerntekosten bei verschiedenen Gassenabständen für die Baumart Fichte.

Das HeProMo beruht auf Daten, welche zum Teil schon vor Jahrzehnten in Zeitstudien bei Praxiseinsätzen von Forstmaschinen erhoben wurden. Aufgrund des technischen Fortschritts, hat die Produktivität der Maschinen in der Zwischenzeit zugenommen. Moderne Harvester sind um etwa 20 % produktiver als die Harvester, welche zur Zeit der Erhebung der Daten, die dem HeProMo zugrunde liegen, eingesetzt wurden. Auch die Motorsägen sind heute wesentlich leistungsfähiger als früher. Hierzu fehlen allerdings genaue Daten (FRUTIG 2011, pers. Mitt.). Für die Berechnungen der Erntekosten in dieser Arbeit wurden deshalb die Zahlen aus dem HeProMo unverändert übernommen, auch wenn sie nicht auf aktuellen Daten beruhen. Entscheidend für die Kalkulationen der Holzerntekosten in dieser Arbeit ist, dass sich die (relativen) Kostendifferenzen zwischen den verschiedenen Holzernteverfahren (beispielsweise motormanuelle Holzernte versus Holzernte mit dem Harvester) im Laufe der Zeit nicht wesentlich verändert haben. Die Erntekosten, beispielsweise für die beiden erwähnten Holzernteverfahren, sind eigentlich tiefer als im HeProMo berechnet, die Differenz der Kosten zwischen den beiden Verfahren sind aber ähnlich geblieben (FRUTIG 2011, pers. Mitt.).

Um die Erntekosten mit dem HeProMo zu kalkulieren, müssen diverse Daten, beispielsweise zum Bestand, zur Feinerschliessung, zu den eingesetzten Maschinen, zum eingesetzten Personal und den jeweiligen Kostensätzen in das Modell eingegeben werden. Nachfolgend werden diese Eingabedaten aufgelistet und es wird beschrieben auf welchen Überlegungen, die Annahmen für diese Eingabedaten beruhen.

So wurde beispielsweise angenommen, dass alle Bäume mit BHD $\leq$ 40 cm in der Reichweite des Harvesters von diesem gefällt und aufgearbeitet werden. Bei Rückegassenabständen von mehr als 20 Metern werden die Bäume ausserhalb der Reichweite des Vollernters motormanuell zugefällt und wenn dies nicht möglich ist (Erklärung siehe oben) motormanuell gefällt und mit einem Schlepper vorgeliefert. Die Aufarbeitung übernimmt jeweils der Vollernter. Bäume mit einem BHD > 40 cm werden immer motormanuell gefällt. Die Aufrüstung erfolgt aber auch in diesem Fall mit dem Vollernter. Die aufgearbeiteten Holzstücke werden mit dem Forwarder zu einem Lagerplatz an einer Waldstrasse gerückt.

Bestand

- Baumart: Fichte (wie bereits erwähnt werden die Kosten und Nutzen eines intakten Waldbodens anhand eines Fichtenbestandes berechnet)
- Fläche: 5 ha
- Geerntete Holzmenge: 500 m^3

Maschinen und Maschinen-Kostensätze

Tabelle 9: Übersicht der eingesetzten Maschinen und deren Kostensätze.

Maschinen	Maschinentyp (gemäss HeProMo)	Kostensätze
Motorsäge		15.- SFr./BStd.[5]
Radharvester (Vollernter)	Standardkategorie mittel[1]	224.- SFr./BStd.[6]
	Standardkategorie gross[2]	314.- SFr./BStd.[7]
Forwarder	mittel (Ladequerschnittsfläche: 4.1 m^2)[3]	119.- SFr./BStd.[8]
Schlepper	andere Schleppertypen[4]	90.- SFr./BStd.[9]

1 Ein Radharvester (Vollernter) der Standardkategorie mittel kann gemäss HeProMo Bäume mit einem BHD ≤ 45 cm verarbeiten.

2 Ein Radharvester (Vollernter) der Standardkategorie gross kann gemäss HeProMo Bäume mit einem BHD ≤ 60 cm verarbeiten.

3 Hier wurde ein Forwarder der Kategorie mittel mit einer Nutzlast von ≤ 10 Tonnen angenommen (gemäss FRUTIG 2012, pers. Mitt.)

4 Da mit dem Schlepper nur Bäume vorgeliefert werden, wurde im HeProMo der Maschinentyp „andere Schleppertypen" gewählt. Es wurde angenommen, dass dies ein Forsttraktor mit einer Leistung von 50 KWh und einer Doppel-Trommel-Winde ist.

5 Kostensatz gemäss FRUTIG 2012 (pers. Mitt.)

6 Gemäss den Maschinentarifen 2012 des Verbandes Forstunternehmer Schweiz (FORSTUNTERNEHMER SCHWEIZ 2012a) ist der Stundensatz für einen Vollernter (inklusive Fahrer und Transportkosten der Maschine), welcher Bäume mit BHD ≤ 40 cm verarbeiten kann, zwischen 305.- und 320.- Fr./Std. (siehe auch Tabelle 38 im Anhang). Für die Kalkulation der Erntekosten mit dem HeProMo müssen die Maschinenkosten und die Kosten des Maschinisten separat eingeben werden, deshalb wurden von dem angenommenen Kostensatz von 310.- Fr./Std. die Kosten für den Maschinisten von 86.- SFr./Std. (Tabelle 10) abgezogen, somit erhält man einen Kostensatz von 224.- SFr./Std. für den Vollernter der Kategorie mittel.

7 Gemäss den Maschinentarifen 2012 des Verbandes Forstunternehmer Schweiz ist der Stundensatz für einen Vollernter (inklusive Fahrer und Transportkosten der Maschine), welcher Bäume mit BHD ≤ 60 cm verarbeiten kann, zwischen 390.- und 405.- Fr./Std. (Tabelle 38). Wenn von dem angenommenen Kostensatz von 400.- Fr./Std. die Kosten für den Maschinisten von 86.- SFr./Std. abgezogen werden, erhält man einen Kostensatz von 314.- SFr./Std. für den Vollernter der Kategorie gross.

8 Der Stundensatz für einen Forwarder (inklusive Fahrer) mit einer Nutzlast von ≤ 10 Tonnen ist gemäss den Maschinentarifen 2012 des Verbandes Forstunternehmer zwischen 200.- und 210.- SFr. (Tabelle 38). Für die Kalkulation der Erntekosten mit dem HeProMo müssen die Maschinenkosten und die Kosten des Maschinisten separat eingeben werden, deshalb wurden von dem angenommenen Kostensatz von 205.- Fr./Std. die Kosten für den Maschinisten von 86.- SFr./Std. abgezogen, somit erhält man einen Kostensatz von 119.- SFr./Std. für den Forwarder.

9 Der Stundensatz für einen Forsttraktor mit einer Leistung von 50 KWh (ohne Fahrer) ist 85.- bis 90.- SFr./Std. (gemäss Maschinentarife 2012 des Verbandes Forstunternehmer Schweiz; Tabelle 38). Es wurde ein Kostensatz von 90.- SFr./Std. angenommen.

Personal und Personal-Kostensätze

Tabelle 10: Eingesetztes Personal und die entsprechenden Kostensätze.

Personal	Kostensätze*
Maschinist	86.- SFr./Std.
Forstwart	78.- SFr./Std.
Waldarbeiter	69.- SFr./Std.

* Empfohlene Regielöhne 2012 des Verbandes Forstunternehmer Schweiz (FORSTUNTERNEHMER 2012b; siehe auch Tabelle 39 im Anhang)

Arbeitszeiten/Pausen

Es wurde eine tägliche Arbeitszeit von 540 Minuten angenommen, wovon 60 Minuten bezahlte Wegzeit und Pausen sind.

Weitere Annahmen (für die Eingaben im HeProMo)

Alle Maschinen

- Kein Umsetzen der Maschinen und auch sonst keine weiteren Aufwändungen
- Risiko, Verwaltung und Gewinn sind 0 %

Motorsäge

- Die Motorsäge wird von einem Forstwart bedient
- Hangneigung des Geländes 0-30 %, keine Hindernisse
- Der Anteil Fällen mit Hanseilzug ist 0 %

Vollernter

- Bäume mit einem BHD ≤ 40 cm werden mit dem Radharvester der Standardkategorie mittel gefällt und aufgearbeitet
- Bäume mit einem BHD zwischen 40 und 60 cm werden mit dem Radharvester der Standardkategorie gross aufgearbeitet

Forwarder

- Die durchschnittliche Länge der mit dem Forwarder transportierten Sortimentsstücke ist 5 m
- Pro Fahrzyklus werden 1.6 Sortimente transportiert
- Es gibt 4 verschieden zu lagernde Sortimente
- Der Anteil krummer Sortimentsstücke ist 10 %
- Der Forwarder fährt von Ladeort im Bestand zum Lagerplatz 100 m auf der Strasse (Lastfahrt vorwiegend eben) und 80 m auf der Rückegasse (Lastfahrt vorwiegend eben); auf der Feinerschliessung gibt es wenige Hindernisse und die Neigung der Feinerschliessungslinien (Rückegassen) ist 10-20 %

- Entscheidend dafür, wieviel Holz an einer einzelnen Rückegasse liegt, ist der Rückegassenabstand; bei grösseren Gassenabständen, verringert sich die Erschliessungslänge (Rückegassenlänge) an der Holz liegt; die Erschliessungslänge kann wie folgt berechnet werden:

  Erschliessungslänge (Rückegassenlänge) = Fläche/Rückegassenabstand

  In der Tabelle 11 sind die Erschliessungslängen, an denen Holz liegt aufgeführt; die Waldfläche beträgt 5 ha (50‘000 m^2); 100 % des Holzes liegt an der Feinerschliessung

Tabelle 11: Erschliessungslängen an denen das Holz liegt in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes.

Rückegassenabstand (m)	Erschliessungslänge an der Holz liegt (m)
20	2’500
30	1’667
40	1’250
50	1’000
60	833

Schlepper

- Die Bäume stehen nicht im Saft und werden nur vorgerückt
- Die Rückebedingungen sind einfach
- Ein Rückegehilfe mit einem Einsatzanteil von 76 bis 100 % wird eingesetzt; beim Rückegehilfen handelt es sich um einen Waldarbeiter
- Die Schlagordnung beim Stammholz mit einer Länge von mehr als zehn Metern ist bei weniger als ¼ der Stücke nicht eingehalten
- Die Anzahl Sortimente ist kleiner vier
- Die mittlere Zuzugentfernung (Vorlieferdistanz) ist abhängig vom Rückegassenabstand (Tabelle 12)

Tabelle 12: Mittlere Vorlieferdistanzen in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes.

Rückegassenabstand (m)	Vorliefern aus Distanz (m)	Mittlere Vorlieferdistanz (m)
20	-	-
30	10-15	12.5
40	10-20	15
50	10-25	17.5
60	10-30	20

Bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern werden keine Bäume vorgeliefert. Bei einem Gassenabstand von 30 Metern ist die Distanz von der Rückegasse bis zur Transportgrenze 15 Meter (Tabelle 8). Die Bäume, welche innerhalb eines Abstandes von 10 Metern zur Rückegasse stehen, befinden sich im Kranbereich des Vollernters und werden von diesem gefällt. Die Bäume mit einer Entfernung von 10 bis 15 Metern von der Rückegasse stehen ausserhalb der Reichweite des Vollernters und müs-

sen deshalb vorgeliefert werden. Im Mittel beträgt die Vorlieferdistanz dieser Bäume somit 12.5 Meter.

Mit dem HeProMo können die Vorlieferkosten für die Distanzbereiche bis 20 Meter, 20 bis 30 Meter, 30 bis 40 Meter und über 40 Meter berechnet werden. Die Vorlieferdistanzen 12,5, 15, 17.5 und 20 Meter sind alle im Distanzbereich bis 20 Meter und das Vorliefern aus diesen verschiedenen Distanzen würde somit gemäss HeProMo gleich viel kosten. Um dennoch differenzierte Vorlieferkosten zu erhalten wurde folgendermassen vorgegangen: Es wurde angenommen, dass die Vorlieferkosten für den Vorlieferdistanz-Bereich bis 20 Meter des Holzernteproduktivitätsmodells HeProMo den Kosten für eine mittlere Vorlieferdistanz von 10 Metern entsprechen. Die Vorlieferkosten für die Distanzen 20 bis 30 Meter und 30 bis 40 Meter sind gemäss HeProMo identisch, es wurde angenommen, dass die Kosten für diese Distanzbereiche den Kosten für eine mittleren Vorlieferdistanz von 30 Metern entsprechen. Die Kosten für den Vorlieferdistanz-Bereich über 40 Meter entsprechen schliesslich den Kosten einer mittleren Vorlieferdistanz von 50 Metern (Tabelle 13).

Tabelle 13: Vorlieferdistanzen.

Vorlieferdistanz-Bereich (m) HeProMo	Mittlere Vorlieferdistanz (m)
bis 20	10
20-30	30
30-40	
über 40	50

Im HeProMo können beispielsweise die Kosten des Vorlieferns für einen Vorlieferdistanz-Bereich von bis 20 Meter berechnet werden. In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass diese Kosten den Vorlieferkosten für eine mittlere Vorlieferdistanz von 10 Metern entsprechen.

Aus den Daten für die Vorlieferkosten für die Distanzen von 10, 30 und 50 Metern konnten mittels Regression die Vorlieferkosten für die Distanzen 12.5, 15, 17.5 und 20 Metern berechnet werden (siehe auch unter 3.1.3: Beispiel 4).

Massentafel

Im HeProMo muss zur Kalkulation der Erntekosten mit dem Vollernter, dem Schlepper und der motormanuellen Holzhauerei der Mittelstamm der zu erntenden Bäume eingeben werden. Für die Berechnung des Rückens mit dem Forwarder muss hingegen der BHD der Bäume eingegeben werden. Tabelle 14 zeigt die verwendete Massentafel für die Umrechnung BHD-Mittelstamm.

Tabelle 14: Tarif für die Umrechnung BHD/Mittelstamm, welcher für die Kalkulationen im HeProMo verwendet wurde (SCHWEIZER 2012).

BHD (cm)	Mittelstamm (Inhalt in m^3)
12	0.15*
14	0.20*
16	0.30
18	0.35
20	0.40
22	0.50
24	0.60
26	0.70
28	0.85
30	1.00
32	1.15
34	1.30
36	1.45
38	1.60
40	1.80
42	2.00
44	2.25
46	2.50
48	2.75
50	3.00
52	3.25
54	3.50
56	3.80
58	4.10
60	4.40

* für die Durchmesser 12 und 14 cm fehlen in der Quelle die Angaben zum Mittelstamm, die entsprechenden Werte wurden geschätzt

3.1.3 Ausgewählte Beispiele der Berechnung der Holzerntekosten

Folgende Beispiele wurden ausgewählt, um die Kalkulation der Erntekosten für die verschiedenen, in dieser Arbeit gewählten, Ernteverfahren zu erklären:

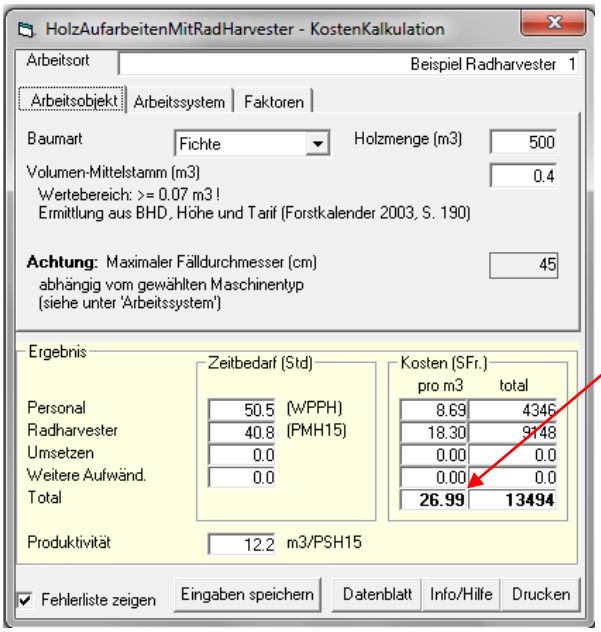
Bsp. 1: Fichten mit BHD 20 cm bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern
Das Verfahren Vollernter flächendeckend wird eingesetzt.
Begründung: Bäume mit BHD ≤ 40 cm werden vom Vollernter gefällt; da die Rückegassen in einem Abstand von 20 Metern angeordnet sind, kann der Vollernter flächendeckend eingesetzt werden

Bsp. 2: Fichten mit BHD 60 cm bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern
Das Verfahren Vollernter mit motormanuellem Fällen kommt zum Einsatz.
Begründung: Bäume mit BHD > 40 müssen motormanuell gefällt werden

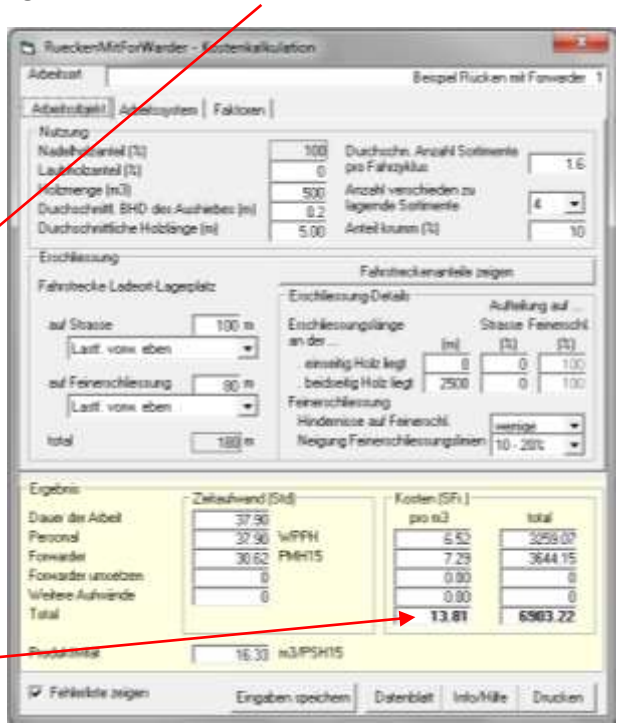
Bsp. 3: Fichten mit BHD 20 cm bei einem Rückegassenabstand von 30 Metern
Das Verfahren Vollernter mit Zufällen wird eingesetzt.
Begründung: Da der Gassenabstand 30 Meter ist, kann der Vollernter nicht flächendeckend eingesetzt werden; die Bäume ausserhalb des Kranbereichs des Vollernters werden zugefällt

Bsp. 4: Fichten mit BHD 20 cm bei einem Rückegassenabstand von 60 Metern
Das Verfahren Vollernter mit Vorliefern wird eingesetzt.
Begründung: Bei einem Gassenabstand von 60 Metern, können die Bäume mit einem BHD von 20 cm in der Zwischenzone nicht mehr zugefällt werden, weil sie zu kurz sind, damit sie der Vollernter noch greifen kann, deshalb müssen sie vorgeliefert werden

Beispiel 1: Erntekosten für Fichten mit BHD 20 cm (Volumen-Mittelstamm 0.4 m^3) bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern:



Die Kosten für das Fällen und Aufarbeiten einer Fichte mit einem BHD von 20 cm (Volumen-Mittelstamm 0.4 m^3) mit dem Harvester betragen gemäss HeProMo 26.99 SFr./m^3.



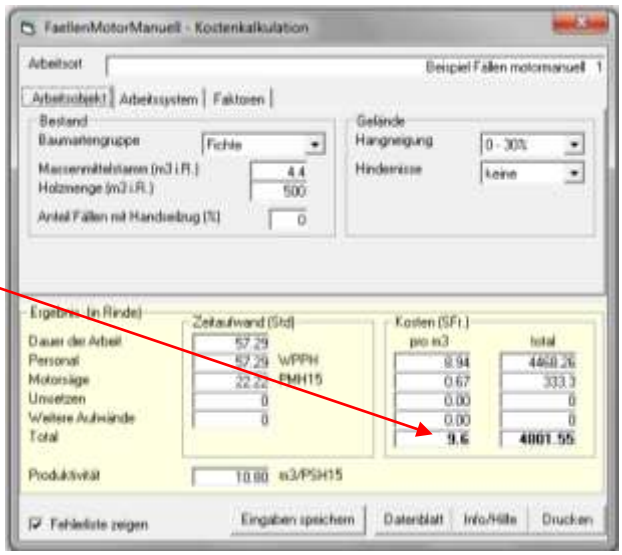
Die Rückekosten für Fichten dieser Dimensionen bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern sind gemäss HeProMo 13.81 SFr./m^3.

Die Erntekosten setzen sich damit aus dem Fällen und Aufarbeiten mit dem Vollernter und dem Rücken mit dem Forwarder zusammen:

$$26.99 \text{ SFr./m}^3 + 13.81 \text{ SFr./m}^3 = \mathbf{40.80 \text{ SFr./m}^3}$$

Beispiel 2: Erntekosten für Fichten mit BHD 60 cm (Volumen-Mittelstamm 4.4 m^3) bei einem Rückegassenabstand von 20 Metern:

Bei den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen kann ein Vollernter nur Bäume bis zu einem BHD von 40 cm fällen. Deshalb muss eine Fichte mit BHD 60 cm mit der Motorsäge gefällt werden. Dies kostet 9.60 SFr./m^3.



Nach dem motormanuellen Fällen wird die Fichte mit dem Vollernter aufgearbeitet, dies kostet 11.31 SFr./m^3. Das Rücken übernimmt der Forwarder was Kosten von 9.81 SFr./m^3 verursacht.

Die Erntekosten sind damit folgende:

$$9.60\ \text{Fr./m}^3 + 11.31\ \text{SFr./m}^3 + 9.81\ \text{SFr./m}^3 = 30.72\ \text{SFr./m}^3 \approx \mathbf{30.70\ SFr./m^3}$$

Beispiel 3: Erntekosten für Fichten mit BHD 20 cm (Volumen-Mittelstamm 0.4 m^3) bei einem Rückegassenabstand von 30 Metern:

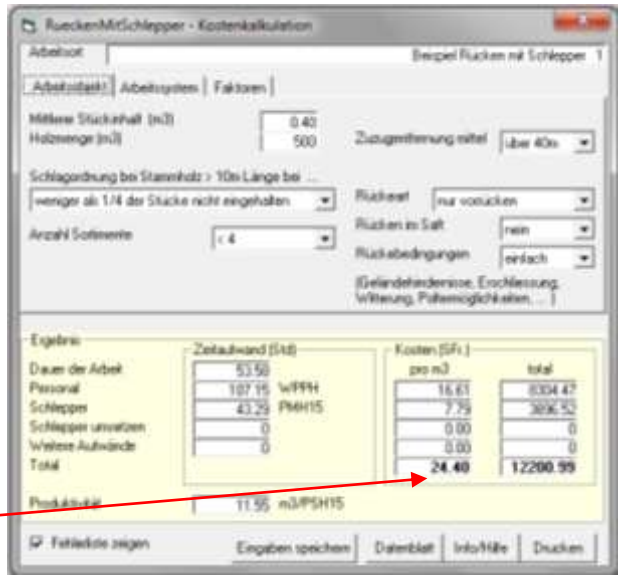
Bei einem Rückegassenabstand > 20 m können nur diejenigen Bäume, die in der Kranreichweite des Vollernters stehen - bei einem Gassenabstand von 30 m sind es 2/3 der Bäume - mit dem Vollernter gefällt werden. Deshalb werden die Kosten für das Aufarbeiten und Fällen, welche sich nach HeProMo auf 26.99 SFr./m^3 belaufen, mit dem Faktor 0.66667 multipliziert. Bäume, die ausserhalb der Reichweite des Vollernters stehen, in diesem Fall also 1/3 der Bäume, müssen mit der Motorsäge gefällt werden. Die Kosten für das motormanuelle Fällen sind gemäss HeProMo 23.88 SFr./m^3. Zum Aufarbeiten muss der Vollernter die zugefällten Bäume mit dem Kran an deren Kronen greifen und in den gegenüberliegenden Bestand schieben, dann dreht der Vollernter das Aggregat um am dickörtigen Ende des Baumes (d. h. am Stammfuss) mit der Aufarbeitung beginnen zu können. Um diesen Mehraufwand zu berücksichtigen werden für diejenigen Bäume, die zugefällt werden, die Aufarbeitungskosten mit einem Faktor von 1.10 multipliziert. In diesem Berechnungsbeispiel werden 1/3 der zu erntenden Bäume zugefällt und aufgearbeitet, deshalb werden die Kosten für das motormanuelle Fällen und Aufarbeiten dieser Bäume mit einem Faktor 0.33333 multipliziert. Das Rücken mit dem Forwarder verursacht Kosten von 12.13 SFr./m^3. Die Erntekosten sind also:

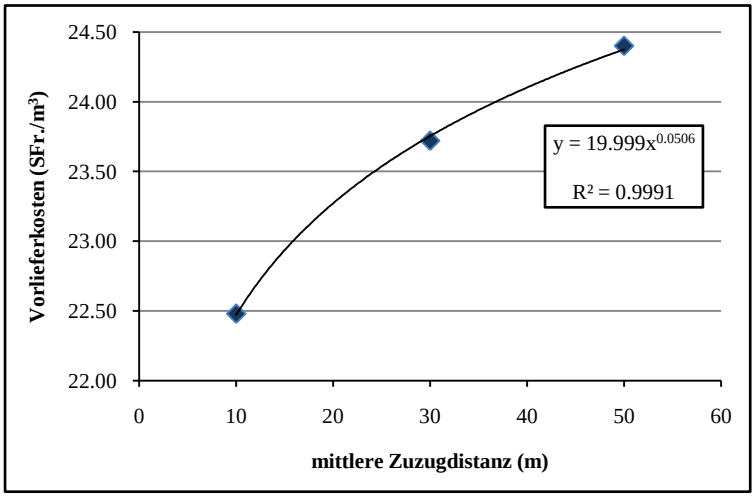
$$26.99\ \text{Fr./m}^3 \cdot 2/3 + (23.88\ \text{SFr./m}^3 + 26.99\ \text{SFr./m}^3 \cdot 1.10) \cdot 1/3 + 12.13\ \text{SFr./m}^3 = 47.98\ \text{SFr./m}^3$$
$$\approx \mathbf{48.00\ SFr./m^3}$$

Beispiel 4: Erntekosten für Fichten mit BHD 20 cm (Volumen-Mittelstamm 0.4 m^3) bei einem Rückegassenabstand von 60 Metern:

Bei einem Gassenabstand von 60 Metern werden 1/3 der Bäume vollmechanisiert geerntet, die Kosten für das Fällen und Aufarbeiten von Fichten mit einem BHD von 20 cm (Volumen-Mittelstamm 0.4 m^3) mit dem Vollernter sind gemäss HeProMo 26.99 SFr./m^3. Diese werden mit dem Faktor 0.33333 multipliziert. 2/3 der Bäume stehen ausserhalb der Reichweite des Vollernter und müssen motormanuell gefällt werden. Beim Vorliefern werden diese Bäume mithilfe der Seilwinde eines Schleppers zur Rückegasse gezogen und dort mit dem Forwarder aufgearbeitet. Die Kosten für das motormanuelle Fällen sind gemäss HeProMo 23.88 SFr./m^3.

Die Kosten für das Vorliefern werden folgendermassen berechnet: Wenn die Rückegassen 60 Meter Abstand voneinander haben, werden von einer Gasse aus jeweils 30 Meter bearbeitet. Davon können 10 Meter mit dem Vollernter geerntet werden. Die Bäume auf der Fläche mit 10-30 Meter Abstand zur Gasse werden vorgeliefert. Die mittlere Vorlieferdistanz ist also 20 Meter (Tabelle 12). Die Kosten für eine solche Distanz können mit dem HeProMo nicht berechnet werden, deshalb mussten diese im Excel kalkuliert werden. Gemäss HeProMo kostet das Vorliefern von Fichten mit BHD 20 cm bei einer mittleren Zuzugentfernung (Vorlieferdistanz) von 10 Metern 22.48 SFr./m^3, für eine mittlere Entfernung von 30 Metern 23.72 SFr./m^3 und für eine Entfernung von 50 Metern 24.40 SFr./m^3.





Aus diesen Daten konnte die exponentielle Funktion $y = 19.999x^{0.0506}$ (siehe Abbildung links) berechnet werden. x ist die mittlere Zuzugentfernung und y sind die Kosten. Mit Hilfe dieser Funktion ist es möglich, die Vorlieferkosten bei einer mittleren Zuzugdistanz von 20 Metern zu kalkulieren: Das Vorliefern kostet in diesem Fall 23.27 SFr./m^3.

Bei den vorgelieferten Bäumen entfallen die Kosten für das Fällen mit dem Vollernter. Um dies zu berücksichtigen werden die Aufarbeitungskosten dieser Bäume mit dem Vollernter von 26.99 SFr./m^3 mit einem Faktor von 0.80 multipliziert. In diesem Berechnungsbeispiel werden also 2/3 der zu erntenden Bäume motormanuell gefällt, vorgeliefert und aufgearbeitet, deshalb werden die Kosten für diese Prozesse mit einem Faktor 0.66667 multipliziert. Das Rücken mit dem Forwarder verursacht Kosten von 10.02 SFr./m^3. Die Erntekosten sind also:

$$26.99\ \text{SFr./m}^3 \cdot 1/3 + (23.88\ \text{SFr./m}^3 + 23.27\ \text{SFr./m}^3 + 26.99\ \text{SFr./m}^3 \cdot 0.80) \cdot 2/3 + 10.02\ \text{SFr./m}^3$$
$$= 64.84\ \text{SFr./m}^3 \approx \mathbf{64.85\ SFr./m^3}$$

3.1.4 Ergebnisse der Holzerntekostenberechnungen

Kommentare zu den Tabellen 15 und 16

Die Tabellen 15 und 16 zeigen die Erntekosten in SFr./m^3 für die Baumart Fichte in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes und des Brusthöhendurchmessers (BHD). Neben den Gesamtkosten sind auch die Kosten für das Aufrüsten (Fällen, Entasten und Einschneiden des Baumes) und die Kosten für das Rücken dargestellt. In der Tabelle 15 sind bei Gassenabständen von mehr als 20 Metern die Erntekosten für das Verfahren Vollernter mit Zufällen aufgeführt und die Tabelle 16 gibt die Kosten für das Verfahren Vollernter mit Vorliefern wieder.

Bei einem Gassenabstand von 20 Metern werden alle Bäume bis zu einem BHD von 40 cm mit dem Vollernter geerntet und aufgearbeitet (Verfahren Vollernter flächendeckend). Bäume mit grösseren Durchmessern werden mit der Motorsäge gefällt (Verfahren Vollernter mit motormanuellem Fällen). Die Erntekosten sind deshalb für den 20 m Gassenabstand in beiden Tabellen identisch weil das gleiche Verfahren zum Einsatz kommt (grau hinterlegte Spalten in den Tabellen 15 und 16). Bei grösseren Gassenabständen werden die Bäume je nach Verfahren zugefällt (Tabelle 15), respektive vorgeliefert (Tabelle 16).

In beiden Tabellen sind jeweils auch die Mehrkosten in SFr./m^3 und in %/m^3 dargestellt, welche bei grösseren Rückegassenabständen im Vergleich zum Gassenabstand von 20 Metern anfallen.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde angenommen, dass der Zieldurchmesser 60 cm beträgt, dass heisst, sobald die Bäume diese Dimensionen erreichen, wird der Bestand geräumt. Deshalb sind in der Tabelle 15 die Erntekosten bis zu diesem Durchmesser aufgeführt. Tabelle 16 gibt die Kosten bis zu einem Durchmesser von 40 cm wieder. Der Grund hierfür liegt darin, dass grössere Bäume nie vorgeliefert werden müssen (Erklärung erfolgt weiter unten).

Mit zunehmendem Rückegassenabstand steigen die Erntekosten an. Dies ist auf die höheren Kosten für das Aufrüsten der Bäume zurückzuführen. Anders als beim 20 m Gassenabstand können nicht mehr alle Bäume mit dem Vollernter gefällt und aufgerüstet werden. Das motormanuelle Zufällen respektive das Vorliefern verursachen einen Mehraufwand, welcher sich in den Kosten wiederspiegelt. Die Rückekosten sinken hingegen bei zunehmendem Gassenabstand (siehe Tabellen 15 und 16). Der Forwarder wird bei grösseren Gassenabständen leistungsfähiger, weil an den einzelnen Gassen mehr Holz liegt, als bei einem engen Abstand der Gassen. Das Holz konzentriert sich (bei einem grösseren Gassenabstand) auf weniger Gassen und somit muss der Forwarder geringere Strecken zurücklegen um die gleiche Menge aus dem Bestand zu einem Lagerplatz zu transportieren. Weil die Kosten fürs Aufrüsten für den grössten Teil der gesamten Erntekosten verantwortlich sind, nehmen Gesamtkosten trotz abnehmenden Rückekosten mit grösseren Gassenabständen zu. Die Unterschiede der Erntekosten bei den verschiedenen Gassenabständen nehmen mit ansteigenden Baumdurchmessern tendenziell etwas ab, für Durchmesser über 40 cm sind die Erntekosten sehr ähnlich.

Tabelle 15: Gesamtkosten und Mehrkosten der Holzernte, wenn das Verfahren Vollernter mit Zufällen (bei Gassenabständen > 20 m) eingesetzt wird.

		Kosten Aufrüsten SFr./m³					Kosten Rücken SFr./m³					Gesamtkosten SFr./m³					Kostendifferenz SFr./m³					Kostendifferenz %/m³				
BHD	**Vol.**	**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**				
cm	**m³**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
12	**0.15**	45.64	60.09	67.32	71.66	74.55	19.61	15.17	13.06	11.77	10.91	65.25	75.26	80.38	83.43	85.46	**0.00**	**10.01**	**15.13**	**18.18**	**20.21**	**0.00**	**15.35**	**23.19**	**27.86**	**30.97**
14	**0.20**	38.50	50.91	57.12	60.84	63.32	17.26	14.08	12.42	11.40	10.65	55.76	64.99	69.54	72.24	73.97	**0.00**	**9.23**	**13.78**	**16.48**	**18.21**	**0.00**	**16.55**	**24.70**	**29.55**	**32.66**
16	**0.30**	31.04	41.18	46.25	49.29	51.32	15.71	13.27	11.91	11.05	10.43	46.75	54.45	58.16	60.34	61.75	**0.00**	**7.70**	**11.41**	**13.59**	**15.00**	**0.00**	**16.47**	**24.41**	**29.08**	**32.09**
18	**0.35**	28.76	38.19	42.90	45.73	47.61	14.62	12.63	11.49	10.74	10.22	43.38	50.82	54.39	56.47	57.83	**0.00**	**7.44**	**11.01**	**13.09**	**14.45**	**0.00**	**17.14**	**25.38**	**30.17**	**33.31**
20	**0.40**	26.99	35.85	40.28	42.94	44.71	13.81	12.13	11.14	10.49	10.02	40.80	47.98	51.42	53.43	54.73	**0.00**	**7.18**	**10.62**	**12.63**	**13.93**	**0.00**	**17.60**	**26.03**	**30.95**	**34.14**
22	**0.50**	24.36	32.37	36.38	38.78	40.38	13.18	11.71	10.84	10.26	9.84	37.54	44.08	47.22	49.04	50.22	**0.00**	**6.54**	**9.68**	**11.50**	**12.68**	**0.00**	**17.43**	**25.78**	**30.64**	**33.79**
24	**0.60**	22.48	29.88	33.58	35.80	37.28	12.68	11.37	10.59	10.06	9.68	35.16	41.25	44.17	45.86	46.96	**0.00**	**6.09**	**9.01**	**10.70**	**11.80**	**0.00**	**17.32**	**25.62**	**30.43**	**33.56**
26	**0.70**	21.05	27.98	31.45	33.53	34.91	12.27	11.08	10.37	9.89	9.54	33.32	39.06	41.82	43.42	44.45	**0.00**	**5.74**	**8.50**	**10.10**	**11.13**	**0.00**	**17.23**	**25.50**	**30.30**	**33.41**
28	**0.85**	19.42	25.82	29.02	30.94	32.22	11.93	10.83	10.18	9.73	9.41	31.35	36.65	39.20	40.67	41.63	**0.00**	**5.30**	**7.85**	**9.32**	**10.28**	**0.00**	**16.91**	**25.04**	**29.73**	**32.79**
30	**1.00**	18.19	24.19	27.18	28.98	30.18	11.64	10.61	10.00	9.59	9.29	29.83	34.80	37.18	38.57	39.47	**0.00**	**4.97**	**7.35**	**8.74**	**9.64**	**0.00**	**16.65**	**24.65**	**29.31**	**32.32**
32	**1.15**	17.22	22.90	25.74	27.44	28.57	11.39	10.42	9.85	9.47	9.19	28.61	33.32	35.59	36.91	37.76	**0.00**	**4.71**	**6.98**	**8.30**	**9.15**	**0.00**	**16.45**	**24.38**	**29.01**	**32.00**
34	**1.30**	16.42	21.84	24.55	26.17	27.25	11.18	10.25	9.72	9.35	9.09	27.60	32.09	34.27	35.52	36.34	**0.00**	**4.49**	**6.67**	**7.92**	**8.74**	**0.00**	**16.26**	**24.15**	**28.70**	**31.68**
36	**1.45**	15.75	20.95	23.55	25.11	26.15	11.00	10.10	9.59	9.25	9.00	26.75	31.05	33.14	34.36	35.15	**0.00**	**4.30**	**6.39**	**7.61**	**8.40**	**0.00**	**16.07**	**23.88**	**28.44**	**31.39**
38	**1.60**	15.18	20.19	22.70	24.20	25.21	10.83	9.97	9.48	9.16	8.92	26.01	30.16	32.18	33.36	34.13	**0.00**	**4.15**	**6.17**	**7.35**	**8.12**	**0.00**	**15.97**	**23.72**	**28.27**	**31.20**
40	**1.80**	14.53	19.33	21.74	23.18	24.14	10.69	9.85	9.38	9.07	8.84	25.22	29.18	31.12	32.25	32.98	**0.00**	**3.96**	**5.90**	**7.03**	**7.76**	**0.00**	**15.72**	**23.38**	**27.87**	**30.76**
42	**2.00**	27.24	27.73	27.98	28.13	28.22	10.56	10.56	10.56	10.56	10.56	37.80	38.29	38.54	38.69	38.78	**0.00**	**0.49**	**0.74**	**0.89**	**0.98**	**0.00**	**1.30**	**1.95**	**2.34**	**2.60**
44	**2.25**	26.14	26.61	26.85	26.99	27.08	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	36.58	37.05	37.29	37.43	37.52	**0.00**	**0.47**	**0.71**	**0.85**	**0.94**	**0.00**	**1.29**	**1.94**	**2.32**	**2.58**
46	**2.50**	25.21	25.67	25.89	26.03	26.12	10.34	10.34	10.34	10.34	10.34	35.55	36.01	36.23	36.37	36.46	**0.00**	**0.46**	**0.68**	**0.82**	**0.91**	**0.00**	**1.28**	**1.92**	**2.31**	**2.56**
48	**2.75**	24.40	24.84	25.06	25.19	25.28	10.24	10.24	10.24	10.24	10.24	34.64	35.08	35.30	35.43	35.52	**0.00**	**0.44**	**0.66**	**0.79**	**0.88**	**0.00**	**1.27**	**1.91**	**2.29**	**2.54**
50	**3.00**	23.70	24.13	24.34	24.47	24.56	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	33.85	34.28	34.49	34.62	34.71	**0.00**	**0.43**	**0.64**	**0.77**	**0.86**	**0.00**	**1.26**	**1.90**	**2.28**	**2.53**
52	**3.25**	23.08	23.50	23.71	23.83	23.91	10.07	10.07	10.07	10.07	10.07	33.15	33.57	33.78	33.90	33.98	**0.00**	**0.42**	**0.63**	**0.75**	**0.83**	**0.00**	**1.26**	**1.89**	**2.26**	**2.51**
54	**3.50**	22.53	22.94	23.14	23.26	23.34	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	32.53	32.94	33.14	33.26	33.34	**0.00**	**0.41**	**0.61**	**0.73**	**0.81**	**0.00**	**1.25**	**1.88**	**2.25**	**2.50**
56	**3.80**	21.93	22.33	22.52	22.64	22.72	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	31.86	32.26	32.45	32.57	32.65	**0.00**	**0.40**	**0.59**	**0.71**	**0.79**	**0.00**	**1.24**	**1.86**	**2.24**	**2.48**
58	**4.10**	21.39	21.78	21.97	22.08	22.16	9.87	9.87	9.87	9.87	9.87	31.26	31.65	31.84	31.95	32.03	**0.00**	**0.39**	**0.58**	**0.69**	**0.77**	**0.00**	**1.23**	**1.85**	**2.22**	**2.47**
60	**4.40**	20.91	21.29	21.48	21.59	21.66	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	30.72	31.10	31.29	31.40	31.47	**0.00**	**0.38**	**0.57**	**0.68**	**0.75**	**0.00**	**1.23**	**1.84**	**2.21**	**2.45**

Tabelle 16: Gesamtkosten und Mehrkosten der Holzernte, wenn das Verfahren Vollernter mit Vorliefern (bei Gassenabständen > 20 m) eingesetzt wird.

		Kosten Aufrüsten SFr./m³					Kosten Rücken SFr./m³					Gesamtkosten SFr./m³					Kostendifferenz SFr./m³					Kostendifferenz %/m³				
BHD	**Vol.**	**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**				
cm	**m³**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
12	**0.2**	45.64	71.38	84.47	92.46	97.89	19.61	15.17	13.06	11.77	10.91	65.25	86.55	97.53	104.2	108.8	**0.00**	**21.30**	**32.28**	**38.98**	**43.55**	**0.00**	**32.64**	**49.47**	**59.75**	**66.74**
14	**0.2**	38.50	59.45	70.10	76.59	81.00	17.26	14.08	12.42	11.40	10.65	55.76	73.53	82.52	87.99	91.65	**0.00**	**17.77**	**26.76**	**32.23**	**35.89**	**0.00**	**31.87**	**47.98**	**57.80**	**64.36**
16	**0.3**	31.04	47.22	55.44	60.45	63.84	15.71	13.27	11.91	11.05	10.43	46.75	60.49	67.35	71.50	74.27	**0.00**	**13.74**	**20.60**	**24.75**	**27.52**	**0.00**	**29.39**	**44.06**	**52.94**	**58.87**
18	**0.4**	28.76	43.55	51.06	55.64	58.74	14.62	12.63	11.49	10.74	10.22	43.38	56.18	62.55	66.38	68.96	**0.00**	**12.80**	**19.17**	**23.00**	**25.58**	**0.00**	**29.51**	**44.20**	**53.03**	**58.98**
20	**0.4**	26.99	40.73	47.70	51.95	54.83	13.81	12.13	11.14	10.49	10.02	40.80	52.86	58.84	62.44	64.85	**0.00**	**12.06**	**18.04**	**21.64**	**24.05**	**0.00**	**29.55**	**44.21**	**53.04**	**58.94**
22	**0.5**	24.36	36.58	42.78	46.56	49.12	13.18	11.71	10.84	10.26	9.84	37.54	48.29	53.62	56.82	58.96	**0.00**	**10.75**	**16.08**	**19.28**	**21.42**	**0.00**	**28.63**	**42.83**	**51.36**	**57.05**
24	**0.6**	22.48	33.65	39.32	42.78	45.12	12.68	11.37	10.59	10.06	9.68	35.16	45.02	49.91	52.84	54.80	**0.00**	**9.86**	**14.75**	**17.68**	**19.64**	**0.00**	**28.05**	**41.96**	**50.28**	**55.85**
26	**0.7**	21.05	31.45	36.73	39.94	42.12	12.27	11.08	10.37	9.89	9.54	33.32	42.53	47.10	49.83	51.66	**0.00**	**9.21**	**13.78**	**16.51**	**18.34**	**0.00**	**27.64**	**41.35**	**49.56**	**55.05**
28	**0.9**	19.42	28.98	33.83	36.78	38.78	11.93	10.83	10.18	9.73	9.41	31.35	39.81	44.01	46.51	48.19	**0.00**	**8.46**	**12.66**	**15.16**	**16.84**	**0.00**	**26.98**	**40.37**	**48.36**	**53.72**
30	**1.0**	18.19	27.13	31.67	34.43	36.30	11.64	10.61	10.00	9.59	9.29	29.83	37.74	41.67	44.02	45.59	**0.00**	**7.91**	**11.84**	**14.19**	**15.76**	**0.00**	**26.52**	**39.69**	**47.58**	**52.85**
32	**1.2**	17.22	25.69	29.98	32.60	34.37	11.39	10.42	9.85	9.47	9.19	28.61	36.11	39.83	42.07	43.56	**0.00**	**7.50**	**11.22**	**13.46**	**14.95**	**0.00**	**26.21**	**39.23**	**47.05**	**52.27**
34	**1.3**	16.42	24.51	28.62	31.12	32.82	11.18	10.25	9.72	9.35	9.09	27.60	34.76	38.34	40.47	41.91	**0.00**	**7.16**	**10.74**	**12.87**	**14.31**	**0.00**	**25.95**	**38.91**	**46.64**	**51.83**
36	**1.5**	15.75	23.54	27.49	29.89	31.52	11.00	10.10	9.59	9.25	9.00	26.75	33.64	37.08	39.14	40.52	**0.00**	**6.89**	**10.33**	**12.39**	**13.77**	**0.00**	**25.74**	**38.60**	**46.33**	**51.49**
38	**1.6**	15.18	22.71	26.53	28.86	30.43	10.83	9.97	9.48	9.16	8.92	26.01	32.68	36.01	38.02	39.35	**0.00**	**6.67**	**10.00**	**12.01**	**13.34**	**0.00**	**25.64**	**38.44**	**46.16**	**51.30**
40	**1.8**	14.53	21.77	25.45	27.68	29.20	10.69	9.85	9.38	9.07	8.84	25.22	31.62	34.83	36.75	38.04	**0.00**	**6.40**	**9.61**	**11.53**	**12.82**	**0.00**	**25.38**	**38.09**	**45.73**	**50.83**

Zufällen und Vorliefern

Bei grösseren Rückegassenabständen müssen die Bäume (je nach Grösse) in der Zwischenzone ausserhalb der Reichweite des Vollernters vorgeliefert werden, weil das Zufällen nicht mehr möglich ist. Auch bei grossen Bestandesdichten, also in jungen Beständen, müssen die Bäume vorgeliefert werden, weil das Zufällen nicht möglich ist. Für die weiteren Berechnungen wurden nur die Baumhöhe und der Rückegassenabstand als Kriterien genommen, ob ein Baum vorgeliefert werden muss oder nicht.

Die bei der Durchforstung anfallenden Fichten mit einem BHD von 12 cm eines, für die Berechnungen in dieser Arbeit gewählten Bestandes mit Bonität 28, haben gemäss Ertragstafel der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (BADOUX 1968) eine mittlere Höhe von 10.5 Metern (Tabelle 17).

Tabelle 17: Mittelhöhen der bei den Durchforstungen zu erntenden Bäume eines Fichtenbestandes mit Bonität 28 (BADOUX 1968, verändert).

BHD (cm, gerundet)	Mittelhöhe (m)
12	10.5
14	13*
16	16.2
18	18.5*
20	21.4
22	24*
24	26.6

* die Mittelhöhen, der bei der Durchforstung anfallenden Bäume der Durchmesser 14, 18 und 22 cm sind in der Ertragstafel für die Bonität 28 nicht angegeben und wurden geschätzt

Bei einem Gassenabstand von 30 Metern beträgt die Distanz von der Rückegasse bis zur Transportgrenze 15 Meter. Die Bäume, die innerhalb eines Abstandes von 10 Metern von der Gasse stehen, liegen in der Reichweite des Vollernters. Die Bäume mit einer Distanz von 10 bis 15 Metern von der Gasse werden zugefällt. Bei einer Baumhöhe von etwa 10 Metern ist dies kein Problem. Liegen nun die Gassen aber 40 Meter weit auseinander, müssen die Bäume aus einer Distanz (von der Gasse) von 10 bis 20 Meter zugefällt werden (Tabelle 18). Bei einer Baumhöhe von ca. 10 Meter ist dies aber für Bäume, die in der Nähe der Transportgrenze (in 20 Meter Distanz von der Gasse) stehen, knapp nicht möglich. Auch wenn diese Bäume in Richtung Rückegasse zugefällt werden, kann der Vollernter sie nicht mehr mit seinem Kran greifen (inbesondere wenn noch berücksichtigt wird, dass der Vollernter den Baum nicht zuoberst an der Krone sondern ein wenig darunter greifen muss, weil sonst die Krone abbricht).

Tabelle 18: Distanzen aus denen bei verschiedenen Rückegassenabständen zugefällt respektive vorgeliefert werden muss sowie die für das Zufällen notwendigen Mindestgrössen von Bäumen nahe an der Transprotgrenze.

Rückegassenabstand (m)	Zufällen resp. Vorliefern aus Distanz (m)	Für das Zufällen notwendige Mindestgrösse eines Baumes an der Transportgrenze (m)
20	-	-
30	10 bis 15	> 5
40	10 bis 20	> 10
50	10 bis 25	> 15
60	10 bis 30	> 20

Neben dem beschriebenen Fall müssen auch Bäume mit Durchmessern von 12, 14 und 16 cm bei einem Gassenabstand von 50 Metern sowie die Bäume mit Durchmessern von 12, 14, 16, 18, 20 und 22 cm bei einem Gassenabstand von 60 Metern teilweise (je nach Distanz des Baumes zur Rückegasse) vorgeliefert werden (vergleiche dazu die Tabellen 17 und 18), da das Zufällen nicht möglich ist, weil die Bäume zu kurz sind, damit sie der Vollernter von der Rückegasse aus erreichen kann.

In der Tabelle 19 sind nochmals die Erntekosten aufgeführt. Die auf der linken Tabellenseite aufgeführten Zahlen sind die Erntekosten für das Verfahren Vollernter mit Zufällen (bei Gassenabständen > 20 m). Bei Bäumen kleiner Dimensionen ist das Zufällen, wie oben erwähnt, nicht immer möglich (rote Zahlen in der Tabelle) und das Verfahren Vollernter mit Vorliefern muss eingesetzt werden. Deshalb werden auf der rechten Seite der Tabelle auch die Erntekosten für das Verfahren Vollernter mit Vorliefern (bei Gassenabständen > 20 m) für die Bäume mit den oben genannten Durchmessern wiedergegeben.

Tabelle 19: Erntekosten in Abhängigkeit von Ernteverfahren, Rückegassenabstand und BHD für die Baumart Fichte (Zahlen sind gerundet).

Ernteverfahren Vollernter mit Zufällen							**Ernteverfahren** Vollernter mit Vorliefern				
Holzerntekosten (SFr./m³)							**Holzerntekosten (SFr./m³)**				
Rückegassenabstand (m)					**BHD (cm)**	**Vol. (m³)**	**Rückegassenabstand (m)**				
20	**30**	**40**	**50**	**60**			**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
65.25	75.25	80.40	83.45	85.45	**12**	**0.15**			97.55	104.25	108.80
55.75	65.00	69.55	72.25	73.95	**14**	**0.20**				88.00	91.65
46.75	54.45	58.15	60.35	61.75	**16**	**0.30**				71.50	74.25
43.40	50.80	54.40	56.45	57.85	**18**	**0.35**					68.95
40.80	48.00	51.40	53.45	54.75	**20**	**0.40**					64.85
37.55	44.10	47.20	49.05	50.20	**22**	**0.50**					58.95
35.15	41.25	44.15	45.85	46.95	**24**	**0.60**					
33.30	39.05	41.80	43.40	44.45	**26**	**0.70**					
31.35	36.65	39.20	40.65	41.65	**28**	**0.85**					
29.85	34.80	37.20	38.55	39.45	**30**	**1.00**					
28.60	33.30	35.60	36.90	37.75	**32**	**1.15**					
27.60	32.10	34.25	35.50	36.35	**34**	**1.30**					
26.75	31.05	33.15	34.35	35.15	**36**	**1.45**					
26.00	30.15	32.20	33.35	34.15	**38**	**1.60**					
25.20	29.20	31.10	32.25	33.00	**40**	**1.80**					
37.80	38.30	38.55	38.70	38.80	**42**	**2.00**					
36.60	37.05	37.30	37.45	37.50	**44**	**2.25**					
35.55	36.00	36.25	36.35	36.45	**46**	**2.50**					
34.65	35.10	35.30	35.45	35.50	**48**	**2.75**					
33.85	34.30	34.50	34.60	34.70	**50**	**3.00**					
33.15	33.55	33.80	33.90	34.00	**52**	**3.25**					
32.55	32.95	33.15	33.25	33.35	**54**	**3.50**					
31.85	32.25	32.45	32.55	32.65	**56**	**3.80**					
31.25	31.65	31.85	31.95	32.05	**58**	**4.10**					
30.70	31.10	31.30	31.40	31.45	**60**	**4.40**					

Die Abbildung 10 zeigt die Erntekosten bei verschiedenen Rückegassenabständen und Baumdurchmessern. Dabei wurden angenommen, dass alle Bäume mit einem Durchmesser von 12 cm bei einem Gassenabstand 40 Metern, alle Bäume mit Durchmessern von 12, 14 und 16 cm bei einem Gassenabstand von 50 Metern sowie alle Bäume mit Durchmessern von 12, 14, 16, 18, 20 und 22 cm bei einem Gassenabstand von 60 Metern vorgeliefert werden. Diese Annahme gilt auch für alle weiteren Berechnungen und Darstellungen der Holzerntekosten.

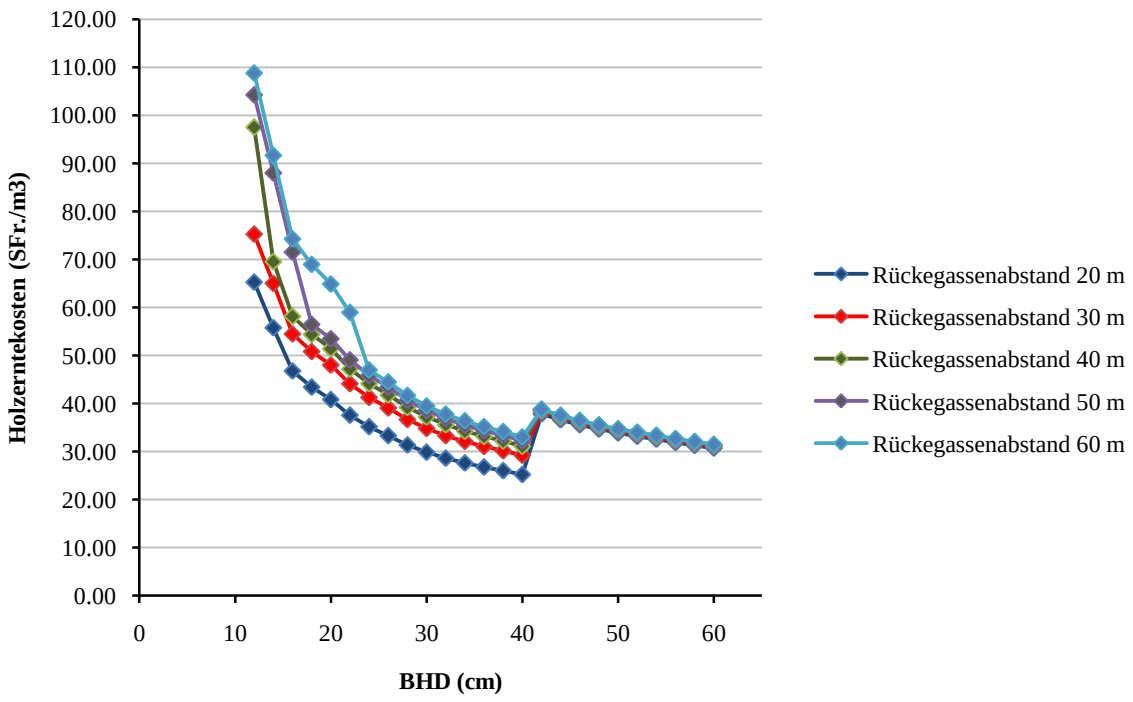


Abbildung 10: Holzerntekosten bei verschiedenen Rückegassenabständen in Abhängigkeit des Durchmessers.

Erntekosten über die gesamte Umtriebszeit

Während einer gesamten Umtriebszeit eines Waldbestandes, fallen von den verschiedenen Baumdimensionen unterschiedliche Holzmengen an. Um die durchschnittlichen Erntekosten für eine Umtriebszeit zu berechnen, müssen die Anteile der verschiedenen Holzdimensionen am gesamten Hiebsanfall mit den Erntekosten der entsprechenden Holzdimensionen multipliziert werden. Für die Berechnung wurde ein Fichtenbestand mit einer Bonität 28 (Oberhöhe im Alter 50 beträgt 28 Meter) angenommen. Diese Bonität entspricht in etwa der Leistung von (durchschnittlichen) Fichtenbeständen im Schweizerischen Mittelland (AMMANN 2011, pers. Mitt.). Bei dieser Bonität erreichen die Bäume (den ebenfalls angenommenen) Zieldurchmesser von 60 cm im Alter 110. Tabelle 20 gibt einen Überblick über den Hiebsanfall und die Dimensionen des anfallenden Holzes in den verschiedenen Altersstufen. Die Daten zum Vorrat, zur Gesamtwuchsleistung und zum Hiebsanfall stammen von der Ertragstafel für Fichte der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (BADOUX 1968).

Tabelle 20: Holzanfall eines Fichtenbestandes mit Bonität 28 (BADOUX 1968, verändert).

	Verbleibender Bestand		Ausscheidender Bestand			
Alter (Jahre)	**Vorrat (m^3/ha)**	**Gesamt-wuchsleistung (m^3/ha)**	**BHD (cm, gerun-det)**	**Mittelstamm (m^3)**	**Hiebsanfall (m^3/ha)**	**Anteil am gesamten Hiebsanfall (%)**
10					12*	
20	58	70				
30	213	288	12	0.1	63	3.46
40	365	534	16	0.2	94	5.16
50	490	777	20	0.3	118	6.48
60	597	1‘007	24	0.5	123	6.75
70	671	1‘215	30	0.8	134	7.35
80	724	1‘398	34	1.2	130	7.14
90	766	1‘560	40	1.8	120	6.59
100	801	1‘705	42	2	110	6.04
110	825	1‘834	50	3	105	5.76
			60	4	825	45.28

* Während des Alters von 10 bis 20 Jahre fallen 12 m^3/ha bei der Pflege an. In der Ertragstafel fehlen die Daten über den BHD und den Mittelstamm der Bäume dieses Alters. Dies spielt aber keine Rolle, da angenommen wurde, dass dieses Holz nicht genutzt, sondern im Wald liegen bleibt.

Die prozentualen Anteile der verschiedenen BHD-Klassen am Hiebsanfall sind in der Tabelle 20 aufgeführt. So sind die Bäume bei der Räumung 60 cm dick und der Anteil, der bei der Räumung anfallenden Holzmenge am gesamten Hiebsanfall ist 45.28 %. Diese Zahl wird nun mit den Erntekosten für Bäume mit einem Durchmesser von 60 cm multipliziert. Auch die prozentualen Anteile der Bäume mit einem anderen Durchmesser am Hiebsanfall müssen mit den jeweiligen Erntekosten multipliziert werden. Die bei den verschiedenen Baumdurchmessern erhaltenen Ergebnisse werden summiert und man erhält die Erntekosten für eine gesamte Umtriebszeit in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes (Tabelle 21).

Tabelle 21: Durchschnittliche Erntekosten für einen Fichtenbestand über eine gesamte Umtriebszeit von 110 Jahren. Auch die Mehrkosten für Gassenabstände > 20 m sind aufgeführt (Zahlen sind gerundet).

Erntekosten für gesamte Umtriebszeit			
Rückegassen-abstand (m)	**Holzerntekosten (SFr./m^3)**	**Mehrkosten (SFr./m^3)**	**Mehrkosten (%/m^3)**
20	33.60	0.00	0.00
30	36.40	2.80	8.33
40	38.35	4.75	14.14
50	39.85	6.25	18.60
60	41.20	7.60	22.61

In der Abbildung 11 sind die Holzerntekosten aus Tabelle 21 grafisch dargestellt.

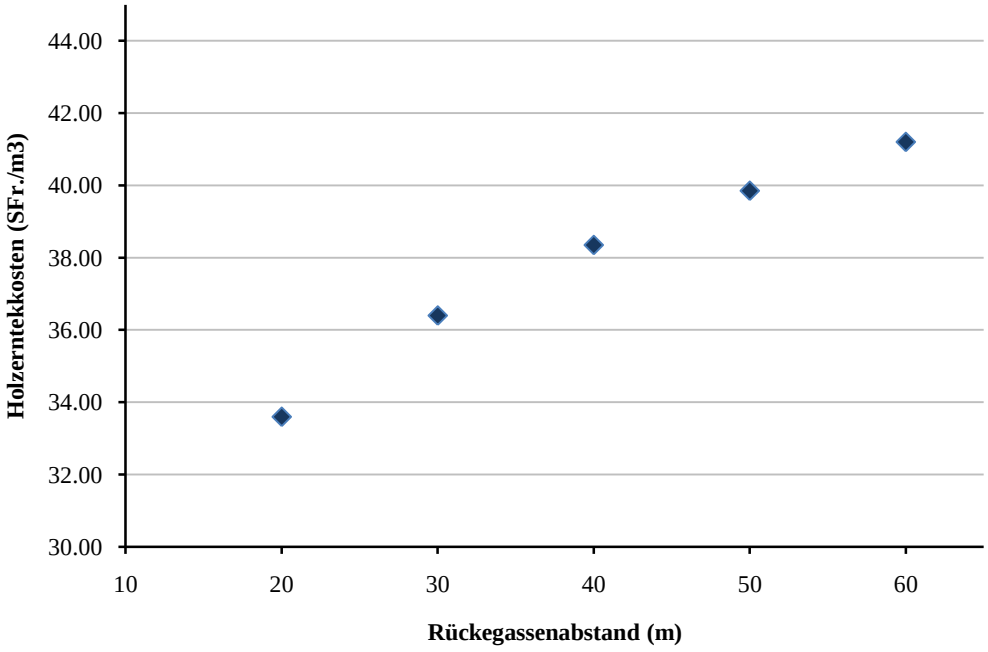


Abbildung 11: Holzerntekosten über eine gesamte Umtriebszeit in Abhängigkeit des Gassenabstandes.

3.1.5 Diskussion der Holzerntekosten

Wie aus den Tabellen 15 und 16 ersichtlich wird, hängen die Holzerntekosten vom BHD, vom Rückegassenabstand und vom eingesetztem Ernteverfahren ab und sind zum Teil sehr unterschiedlich. Ein Vergleich der Ernteverfahren Vollernter mit Zufällen und Vollernter mit Vorliefern zeigt, dass das Verfahren mit dem Zufällen kostengünstiger ist als jenes, bei dem die Bäume vorgeliefert werden. Die Kosten für das Verfahren mit dem Vorliefern sind je nach Gassenabstand und BHD zwischen 8 und 28 % höher als jene für das Verfahren mit Zufällen. Vergleichbare Differenzen zwischen den Kosten für die beiden erwähnten Verfahren gibt auch WAGNER (2011) an: Die Kosten für das Verfahren Vollernter mit Vorliefern sind je nach BHD und dem Anteil der Bäume, welche zugefällt respektive vorgeliefert werden muss, zwischen 12 und 30 % höher als für das Verfahren Vollernter mit Zufällen.

Insbesondere bei kleinen Durchmessern und grossen Gassenabständen sind die Erntekosten für das Verfahren Vollernter mit Vorliefern mit teilweise mehr als 100 SFr./m^3 sehr hoch. Bei Bäumen grösserer Dimensionen und wenn die Rückegassen nicht allzu weit auseinander liegen sind die Differenzen zwischen den beiden erwähnten Verfahren nicht mehr so gross. Allerdings kommt in diesen Fällen, wie bereits oben erklärt, meist das Verfahren Vollernter mit Zufällen zur Anwendung. Auch bei diesem Verfahren sind die höchsten Erntekosten bei grossen Gassenabständen und kleinen Baumdurchmessern zu finden. So kostet die Ernte einer Fichte mit einem Durchmesser von 12 cm bei einem Rückegassenabstand von 60 Metern über 85 SFr./m^3. Bei einem 60 cm dicken Baum sind es bei gleichem Gassenabstand etwas mehr als 30 SFr./m^3. Die Erntekosten pro Kubikmeter nehmen also mit zunehmendem BHD ab (Abbildung 10). Allerdings steigen von BHD 40 auf 42 cm die Erntekosten wieder an, um anschliessend wieder zu sinken. Der Grund hierfür liegt darin, dass Bäume bis BHD 40 cm mit dem Vollernter gefällt werden. Grössere Bäume werden gemäss den getroffenen Annahmen mit der Motorsäge gefällt, was etwas teurer ist und sich auch in den Erntekosten wiederspiegelt.

Die Erntekosten steigen mit zunehmendem Rückegassenabstand an, was auf höhere Kosten für das Aufrüsten der Bäume zurückgeführt werden kann. Allerdings ist der Anstieg der Erntekosten mit grösser werdendem Gassenabstand nicht linear, sondern verläuft unterproportional, was in der Abbildungen 11 gut ersichtlich wird (Kurve und keine Gerade). So sind bei einem Gassenabstand von 30 Metern die Erntekosten im Vergleich mit dem 20 Meter Gassenabstand um 2.80 SFr./m^3 oder etwa 8 % höher. Bei einem 40 Meter Abstand der Gassen sind die Mehrkosten der Holzernte 4.75 SFr./m^3 oder rund 14 % höher als beim Gassenabstand von 20 Metern (Tabelle 21).

Damit liegen die berechneten Mehrkosten aufgrund von grösseren Rückegassenabständen unter den Werten, welche in der Literatur gefunden werden. So sind nach BECKER (1997) die Erntekosten bei einem 40 Meter Rückegassenabstand um 25-35 % höher als bei einem 20 Meter-Abstand. BORT *et al.* (1993) fanden für die Durchforstung eines überwiegend aus Nadelholz bestehenden, 20- bis 45-jährige Bestandes in ebenen Lagen bei einem Rückegassenabstand von 30 Metern bei dem die Bäume aus der Zwischenzonen motormanuell zugefällt wurden und mit dem Vollertner aufgearbeitet wurden um 25 % und bei einem 40-Meter Gassenabstand bei dem die Bäume aus der Zwischenzone an die Gassen vorgeliefert und anschliessend mit dem Vollernter aufgearbeitet wurden sogar um 70 % erhöhte Erntekosten im Vergleich zu einem Gassenabstand von 20 Metern wo die Bäume vollmechanisiert mit dem Vollernter gefällt wurden. Gerückt wurden die Bäume bei allen Gassenabständen mit Hilfe eines Forwarders. Anderen Angaben zu Folge belaufen sich die Mehrkosten für das manuelle Zufällen und gegebenenfalls dem Seilvorliefern aus den Flächen, welche bei einem Rückegassenabstand von 40 Metern nicht mit dem Vollernterkran erreicht werden, auf ca. 5.- Euro je Festmeter für schwaches und mittelstarkes Holz (LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2004).

3.2 Mindererlöse infolge befahrungsbedingten Zuwachseinbussen

Bodenveränderungen durch Befahren können sich negativ auf die Holzproduktion auswirken. Wegen der erschwerten Durchwurzelung des verdichteten Bodens, der geringeren Sauerstoff- und Nährstoffversorgung der Wurzeln und der Staunässe werden durch das Befahren die Wuchsbedingungen der Bäume verschlechtert und auch die, durch das Befahren beschädigten Baumwurzeln beeinträchtigen das Baumwachstum. Die dadurch versursachten Zuwachsverluste bringen auch finanzielle Einbussen mit sich.

3.2.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch Zuwachseinbussen

Um die Auswirkungen der Zuwachseinbussen infolge des Bodenbefahrens auf die Holzproduktion und die Erlöse zu berechnen, wurde ein Modell entwickelt. Als Grundlage dienten die Daten zur Gesamtwuchsleistung in der Ertragstafel für die Fichte der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (BADOUX 1968). Für die verschiedenen Berechnungen mit dem Modell wurde, gleich wie im Kapitel 3.1, ein Fichtenbestand der Bonität 28 gewählt (Tabelle 22). Weiter wurde angenommen, dass die erste Durchforstung im Alter 20 stattfindet und dass der Bestand geräumt wird, sobald die Bäume einen BHD von 60 cm erreichen. Ein solcher Fichtenbestand ist zu diesem Zeitpunkt 110 Jahre alt.

Tabelle 22: Gesamtwuchsleistung eines Fichtenbestandes der Bonität 28 (BADOUX 1968).

Alter (Jahre)	Gesamtleistung an Derbholz (m^3/ha)
20	70
30	288
40	534
50	777
60	1‘007
70	1‘215
80	1‘398
90	1‘560
100	1‘705
110	1‘834
120	1‘952

Ausgewählte Varianten

Wie in Kapitel 2.3 aufgezeigt sind die Folgen des Befahrens von Waldböden auf das Wachstum der Bäume je nach Ausmass der Bodenbeeinträchtigung und der Wurzelschäden, aber auch je nach Bodenart sehr unterschiedlich. In vielen Studien fand man auf den, durch Befahren verdichteten Böden ein geringeres Baumwachstum als auf nicht beeinträchtigen Böden. Andere Untersuchungen stellten hingegen keinen Zuwachsrückgang der Bäume auf verdichtetem Boden fest und in einigen Studien fand man gar ein besseres Wachstum der Bäume auf diesen Böden. Auch die Untersuchungen des Wachstums der Randbäume entlang von Rückegassen brachten unterschiedliche Resultate zu Tage. Den Ergebnissen mehrerer Studien zufolge weisen diese Bäume ein verstärktes Wachstum auf. In anderen Studien fand man hingegen einen, aufgrund von Wurzel- und Bodenschäden, (zumindest

kurzfristig) geringeren Zuwachs bei den Randbäumen. Langfristige Untersuchungen, zum Beispiel solche über eine gesamte Umtriebszeit eines Waldbestandes, zum Wachstum von Randbäumen sowie zum Zuwachs von Bäumen auf verdichteten Böden fehlen allerdings.

Da die Auswirkungen der befahrungsbedingten Bodenbeeinträchtigung auf das Baumwachstum so unterschiedlich sind, wurden mit dem Modell verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Zuwachsverlusten berechnet. Damit soll aufgezeigt werden, welche Folgen für die Holzproduktion entstehen und in welchen Grössenordnungen sich die Mindererlöse durch Zuwachsminderungen als Folge von befahrungsbedingten Bodenveränderungen bewegen. Folgende Varianten wurden gewählt:

- Variante 1: Der Boden wird nicht befahren und ist auch in der Vergangenheit nicht befahren worden, so dass keine Zuwachsminderungen auftreten.
- Variante 2: Boden- und Wurzelschäden haben für die Randbäumen entlang von Rückegassen negative Folgen. Allerdings können diese Bäume an den Gassenrändern von besseren Lichtbedingungen profitieren. Es wurde deshalb angenommen, dass die Randbäume den Produktionsausfall der bestockungsfreien Fläche (über die gesamte Umtriebszeit betrachtet) zur Hälfte ausgleichen können.
- Variante 3: Boden- und Wurzelschäden verursachen an Randbäumen entlang von Rückegassen Schäden. Bei dieser Variante wurde angenommen, dass die Randbäume so beeinträchtigt werden, dass sie nicht von den besseren Lichtbedingungen profitieren. Die Randbäume können deshalb den Produktionsausfall der bestockungsfeien Fläche gar nicht ausgleichen.
- Variante 4: Gleich wie Variante 2, aber zusätzlich zu den aktuell benutzten Rückegassen ist der Waldboden auf weiteren 20 % der Waldfläche durch früheres Befahren beeinträchtigt. Auf dieser Fläche kommt es während der gesamten Umtriebszeit zu Zuwachseinbussen von durchschnittlich 10 % im Vergleich zu den nicht beeinträchtigen Flächen.
- Variante 5: Gleich wie Variante 4, ausser dass der Boden auf den, durch früheres Befahren betroffenen Fläche von 20 % so stark beeinträchtig wurde, dass auf dieser Fläche Zuwachseinbussen von 30 % zu verzeichnen sind.
- Variante 6: Gleich wie Variante 2, aber zusätzlich zu den heutigen Rückegassen wurden früher 50 % der Walfläche befahren. Auf der so befahrenen Fläche kommt es zu einer Abnahme des Zuwachses von 10 %.
- Variante 7: Gleich wie Variante 6, wobei Zuwachsminderungen von 30 % auf den durch früheres Befahren verdichteten Flächen auftreten.

Begründung für die Variantenwahl

Die Variante 1, bei der es zu keinen Zuwachseinbussen kommt, dient als Referenzvariante, mit denen die anderen Varianten, deren Zuwachseinbussen und die Folgen, die sich daraus für die Holzproduktion und die finanziellen Erträge ergeben, verglichen werden können.

Für die Bäume entlang von Rückegassen können gemäss der Literatur zwei verschiedene Effekte festgestellt werden. Einerseits profitieren die Randbäume respektive die Bäume in einem Randstreifen

von drei bis vier Meter Breite entlang der bestockungsfreien Gassen von mehr Licht und Raum. Andererseits können Wurzelschäden und Bodenverdichtung das Baumwachstum beeinträchtigen.

In den Varianten 2 und 4 bis 7 wurde angenommen, dass die Bäume entlang der Gassen zunächst etwas unter der Zuwachsminderung durch Boden- und Wurzelschäden leiden, diesen Verlust aber mit der Zeit wettmachen können, so dass sie in der Lage sind, den Produktionsausfall der bestockungsfreien Gassen (über die gesamte Umtriebszeit betrachtet) zur Hälfte auszugleichen. In der Varianten 3 hingegen wurde die Annahme getroffen, dass die Randbäume durch die Bodenverdichtung und Wurzelverletzungen so beeinträchtigt sind, dass sie nicht von den besseren Lichtbedingungen profitieren können. Der Produktionsausfall der Gassen wird deshalb nicht durch einen verstärkten Zuwachs der Randbäume kompensiert.

Rückegassennetze gehen beispielsweise bei der Waldverjüngung oft verloren und in der Folge werden neue Gassen angelegt. Teilweise oder vollständig neue Gassen müssen auch dann eingerichtet werden, wenn die alten Gassen durch Befahren bei nasser Witterung in einem so schlechten Zustand sind, dass sie nicht mehr benutzt werden können, weil die technische Befahrbarkeit nicht mehr gegeben ist. Zum Teil werden Waldflächen, etwa nach Sturmereignissen, ungeplant befahren. Das Anlegen von immer neuen Gassen sowie das planlose Befahren des Waldes führt dazu, dass ein, mit der Zeit immer grösser werdender Anteil des Waldbodens, beeinträchtigt wird. Dies ist insofern problematisch, da die durch das Befahren verursachten, langfristig wirksamen Bodenveränderungen die Bodenfunktionen nachhaltig beeinträchtigen.

In den Varianten 4 und 5 wurden die Holzproduktion und die Erlöse eines Fichtenbestandes berechnet, bei dem zusätzlich zu den aktuell benutzen Rückegassen, der Boden auf weiteren 20 % der Waldfläche durch früheres Befahren verdichtet wurde. In den Varianten 6 und 7 ist der Boden gar auf weiteren 50 % der Fläche beeinträchtigt.

Das Ausmass der Bodenbeeinträchtigung auf diesen, von früherem Befahren betroffenen Flächen ist, selbst wenn überall die gleichen Maschinen eingesetzt wurden und das Befahren bei den gleichen Witterungsbedingungen stattgefunden hat, aufgrund der oft kleinräumigen Heterogenität des Waldbodens verschieden. Da das Baumwachstum auf verdichtetem Boden je nach Ausmass der Bodenbeeinträchtigung aber auch je nach Bodentyp und Baumart zum Teil sehr unterschiedlich ist, wird auch der Zuwachsverlust nicht auf der ganzen, durch das Befahren in Mitleidenschaft gezogenen Fläche identisch sein, sondern es wird Teilflächen geben, auf welchen der Boden nur wenig beeinträchtigt wurde, so dass nur geringe Zuwachsverluste auftreten. Auf anderen Teilflächen wurde der Boden hingegen so stark in Mitleidenschaft gezogen, dass grosse Zuwachseinbussen auftreten. Um dies zu berücksichtigen wurden Durchschnittswerte für die Zuwachseinbussen über die gesamte, durch früheres Befahren betroffene Fläche angenommen.

Für die Varianten 4 und 6 wird ein Zuwachsminderung von durchschnittlich 10 % und für die Varianten 5 und 7 eine Zuwachsminderung von durchschnittlich 30 % auf der zusätzlich von früherem Befahren beeinträchtigten Boden angenommen. Eine solch starker Zuwachsrückgang von 30 % dürfte beispielsweise auf feinkörnigen (Ton-) Böden bei starker Verdichtung und Beeinträchtigung (entsprechend einem Spurtyp 3) vorkommen.

Bei allen Varianten wird angenommen, dass die erwähnten Zuwachseinbussen über die gesamte Umtriebszeit von 110 Jahren konstant bleiben. Wahrscheinlich ist die Zuwachsminderung auf den, von Befahren betroffenen Flächen, in den ersten Jahren gross und wird mit der Zeit abnehmen, so dass sich das Wachstum der Bäume auf diesen Flächen jenem der Bäume auf intakten Boden angleicht, darauf deuten auch die Resultate in einigen Studien hin (Kapitel 2.3). Langfristige Untersuchungen hierzu fehlen allerdings. Wie im Kapitel 2 aufgezeigt wird, können die Zuwachseinbussen recht beträchtlich

sein, so fand man in einigen Studien, dass die Bäume auf dem verdichteten Boden ein um bis zu mehr als 60 % geringeren Volumenzuwachs hatten. Um zu Berücksichtigen, dass es aber keine Studien gibt, welche das Wachstum eines Bestandes auf verdichtetem Boden während einer ganzen Umtriebszeit untersuchten und in der Annahme, dass sich die Zuwachsverluste mit der Zeit etwas abschwächen, wurden in den Berechnungen keine solchen Extremwerte verwendet, dafür wurden die in den Varianten gewählten Zuwachsverluste von 10 und 30 % über die gesamte Umtriebszeit konstant gehalten. In Wirklichkeit wären die Verluste am Anfang vielleicht etwas höher und am Ende der Umtriebszeit geringer. Die Tabelle 23 gibt einen Überblick über die gewählten Varianten.

Tabelle 23: Überblick über die gewählten Varianten.

Variante	Anteil der Gasse auf welcher der Produktionsverlust nicht durch das Wachstum der Randbäume ausgeglichen wird (%)	Durch früheres Befahren beeinträchtige Fläche (%)*	Zuwachsverlust auf der von früherem Befahren betroffenen Fläche (%)
1	0	0	0
2	50	0	0
3	100	0	0
4	50	20	10
5	50	20	30
6	50	50	10
7	50	50	30

* zusätzlich zu den “aktuellen” Gassen

Zur Berechnung der Erlöse, respektive der finanziellen Einbussen bei verschiedenen Varianten müssen die, bei den verschiedenen Varianten produzierten Holzmengen mit den entsprechenden Holzpreisen multipliziert werden. Dabei wurde ein durchschnittlicher Holzpreis (über alle Sortimente) für das Mittelland gewählt. Mit Hilfe der Verkaufspreise für die einzelnen Sortimente sowie der entsprechenden Mengenangaben, welche aus der forstlichen Betriebsabrechnung (BAR) der Forstbetriebe des Schweizerischen Mittellandes von 2010 stammen (Tabelle 40), wurde ein durchschnittlicher Holzpreis über alle Sortimente (Stamm-, Industrie und Energieholz) von 90 SFr./m^3 berechnet (siehe Anhang C).

3.2.2 Ergebnisse: Mindererlöse durch Zuwachseinbussen

Im Modell wurden die Zuwachsminderungen jeweils auf die Gesamtwuchsleistung umgerechnet. Tabelle 24 zeigt die bei den unterschiedlichen Varianten produzierte Holzmasse (Gesamtwuchsleistung) über die gesamte Umtriebszeit von 110 Jahren. Allerdings kann nicht die gesamte produzierte Holzmenge genutzt werden. In der Ertragstafel wird die Gesamtwuchsleistung der Fichte in Stammderbholz mit Rinde (Stämme mit einem Durchmesser von mehr als 7 cm mit Rinde) angegeben. Von diesen Derbholzmassen wurden gemäss den Angaben in der Ertragstafel 10 % abgezogen, um zu berücksichtigen, dass Teile der Baumkronen und der Rinde bei der Holznutzung im Wald liegen bleiben und nicht genutzt werden können und damit auch nicht in den Verkauf gelangen (Umrechnung Stehend- in Liegendmass). Beispielsweise wird bei einer Umtriebszeit von 110 Jahren für einen Fichtenbestand mit Bonität 28 die Gesamtleistung an Derbholz von 1‘834 m^3 Holz pro Hektare 10 % abgezogen. Somit gelangen 1‘650.6 m^3 Holz pro Hektare in den Verkauf.

Tabelle 24: Produzierte Holzmassen (Stehend- und Liegendmass) bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Produzierte Holzmenge m^3/ha					Verkaufte Holzmenge m^3/ha				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	1'834.0	1'834.0	1'834.0	1'834.0	1'834.0	1'650.6	1'650.6	1'650.6	1'650.6	1'650.6
2	1'650.6	1'711.7	1'742.3	1'760.6	1'772.9	1'485.5	1'540.6	1'568.1	1'584.6	1'595.6
3	1'467.2	1'589.5	1'650.6	1'687.3	1'711.7	1'320.5	1'430.5	1'485.5	1'518.6	1'540.6
4	1'613.9	1'675.1	1'705.6	1'724.0	1'736.2	1'452.5	1'507.5	1'535.1	1'551.6	1'562.6
5	1'540.6	1'601.7	1'632.3	1'650.6	1'662.8	1'386.5	1'441.5	1'469.0	1'485.5	1'496.5
6	1'558.9	1'620.0	1'650.6	1'668.9	1'681.2	1'403.0	1'458.0	1'485.5	1'502.0	1'513.1
7	1'375.5	1'436.6	1'467.2	1'485.5	1'497.8	1'238.0	1'293.0	1'320.5	1'337.0	1'348.0

In der Tabelle 25 werden die Produktionsverluste der Verschiedenen Varianten im Vergleich zur Variante 1 aufgezeigt.

Tabelle 25: Produktionseinbussen bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Minderproduktion m^3/ha					Minderproduktion %/ha				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	183.4	122.3	91.7	73.4	61.1	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3
3	366.8	244.5	183.4	146.7	122.3	20.0	13.3	10.0	8.0	6.7
4	220.1	158.9	128.4	110.0	97.8	12.0	8.7	7.0	6.0	5.3
5	293.4	232.3	201.7	183.4	171.2	16.0	12.7	11.0	10.0	9.3
6	275.1	214.0	183.4	165.1	152.8	15.0	11.7	10.0	9.0	8.3
7	458.5	397.4	366.8	348.5	336.2	25.0	21.7	20.0	19.0	18.3

Die bei den verschiedenen Varianten produzierte Holzmasse (m^3/ha) über die gesamte Umtriebszeit wurde mit dem Durchschnitts-Holzpreis von 90 SFr./m^3 (siehe Anhang C) multipliziert. Damit erhält man den (Brutto-) Erlös pro Hektar einer ganzen Umtriebszeit. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Erlöse bei den verschiedenen Varianten und Rückegassenabständen kann der Erlös auch auf SFr./m^3 umgerechnet werden. Dazu wird der Erlös der verschiedenen Varianten durch die produzierte Holzmenge der Variante 1 (bei der keine Zuwachsverluste auftreten) dividiert (Tabelle 26).

Tabelle 26: Erlöse bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Erlös SFr./ha					Erlös SFr./m^3				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	148'554.00	148'554.00	148'554.00	148'554.00	148'554.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
2	133'698.60	138'650.40	141'126.30	142'611.84	143'602.20	81.00	84.00	85.50	86.40	87.00
3	118'843.20	128'746.80	133'698.60	136'669.68	138'650.40	72.00	78.00	81.00	82.80	84.00
4	130'727.52	135'679.32	138'155.22	139'640.76	140'631.12	79.20	82.20	83.70	84.60	85.20
5	124'785.36	129'737.16	132'213.06	133'698.60	134'688.96	75.60	78.60	80.10	81.00	81.60
6	126'270.90	131'222.70	133'698.60	135'184.14	136'174.50	76.50	79.50	81.00	81.90	82.50
7	111'415.50	116'367.30	118'843.20	120'328.74	121'319.10	67.50	70.50	72.00	72.90	73.50

Die Mindererlöse bei den verschiedenen Varianten, also die Differenz zur Variante 1, bei der der Boden nicht beeinträchtigt wird, zeigt die Tabelle 27 und ist auch in Abbildung 12 dargestellt.

Tabelle 27: Mindererlöse bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Mindererlös SFr./ha					Mindererlös SFr./m^3				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14'855.40	9'903.60	7'427.70	5'942.16	4'951.80	9.00	6.00	4.50	3.60	3.00
3	29'710.80	19'807.20	14'855.40	11'884.32	9'903.60	18.00	12.00	9.00	7.20	6.00
4	17'826.48	12'874.68	10'398.78	8'913.24	7'922.88	10.80	7.80	6.30	5.40	4.80
5	23'768.64	18'816.84	16'340.94	14'855.40	13'865.04	14.40	11.40	9.90	9.00	8.40
6	22'283.10	17'331.30	14'855.40	13'369.86	12'379.50	13.50	10.50	9.00	8.10	7.50
7	37'138.50	32'186.70	29'710.80	28'225.26	27'234.90	22.50	19.50	18.00	17.10	16.50

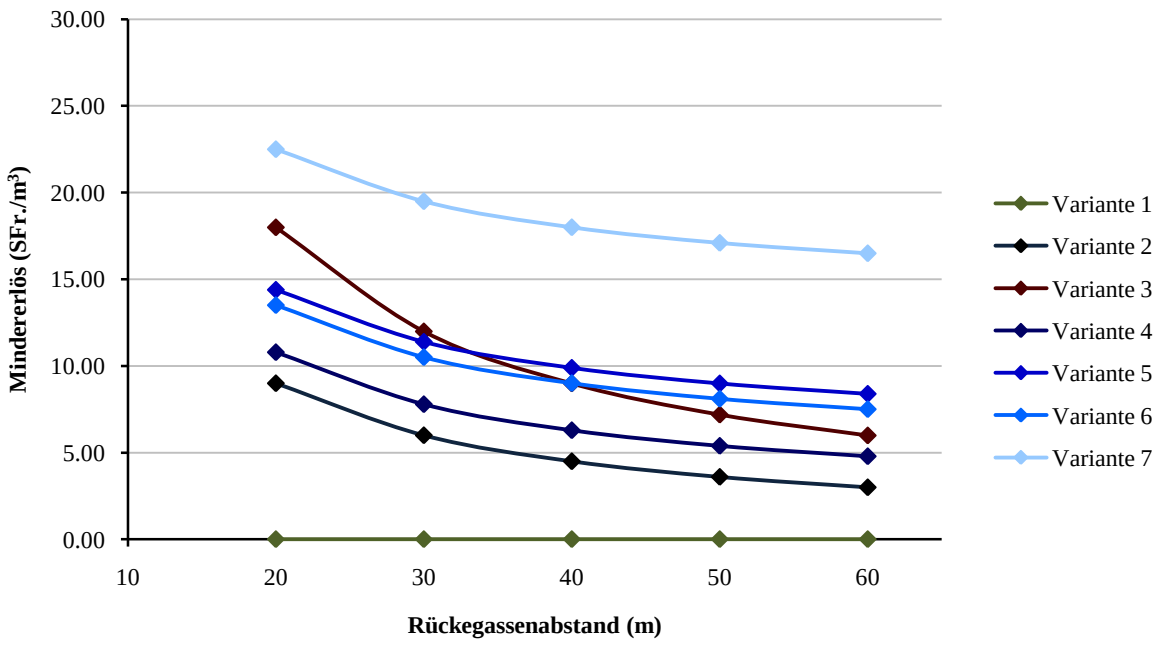


Abbildung 12: Mindererlöse der verschiedenen Varianten in Abhängigkeit des Rückegassenabstandes.

3.2.3 Diskussion zu den Mindererlösen durch Zuwachseinbussen

Die Wuchsleistung an Derbholz eines Fichtenbestandes der Bonität 28 über eine Umtriebszeit von 110 Jahren beträgt 1‘834 m^3 Holz pro Hektare. Bei der Variante 1 wird diese maximal mögliche Holzmenge produziert. Mit zunehmender Beeinträchtigung des Bodens durch Befahrung sinkt der Zuwachs und somit auch die Wuchsleistung des im Modell verwendeten Fichtenbestandes immer mehr. Die Minderproduktion im Vergleich zur Variante 1 beläuft sich auf bis zu mehr als 450 m^3 oder 25 % pro Hektare (Variante 7). Mit zunehmendem Gassenabstand nimmt die Minderproduktion bei allen Varianten ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei grösser werdendem Abstand der Gassen, eine immer geringerer Teil der Waldfläche dem Befahren durch Forstmaschinen ausgesetzt ist. Die mit den Zuwachsverlust verbundenen Einbussen in der produzierten Holzmenge hat auch finanzielle Auswirkungen. Bei einem Verkaufspreis von 90 SFr./m^3 hat das, bei Variante 1 über die gesamte Umtriebszeit produzierte Holz einen Wert von 148‘554.00 SFr./ha. Die Mindererlöse sind je nach Variante und Gassenabstand recht beträchtlich. Über eine gesamte Umtriebszeit von 110 Jahren sind die Erlöse, je nach Variante, zwischen 5‘000 und über 37‘000 SFr. pro Hektare geringer, als wenn der Boden nicht geschädigt und beeinträchtigt wird. Mit zunehmenden Gassenabständen wird ein immer kleinerer Anteil der Fläche vom Befahren betroffen sein und die Mindererlöse nehmen ab.

3.3 Mindererlöse infolge befahrungsbedingter Fäulnis

Beim Befahren des Waldbodens mit Forstmaschinen sind stets auch Baumwurzeln den Belastungen der Maschinen ausgesetzt und können beschädigt werden. Wird das Befahren auf den Rückegassen konzentriert, so sind es die Wurzeln der Randbäume entlang der Gassen, bei welchen die Gefahr besteht, dass sie verletzt werden. Wurzelverletzungen führen nicht nur Zuwachseinbussen der betroffenen Bäume, sondern haben auch noch weitere Folgen. Über Wundstellen können Fäuleerreger in den Baum eindringen und Fäule verursachen. Die Fäule breitet sich dann von den Wurzeln nach oben bis in den Stamm aus. Fäulebefall führt zu Qualitätsminderungen im Holz und damit zu Wertverlusten. Mittels eines Modells werden diese Wertverluste berechnet.

3.3.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch befahrungsbedingte Fäulnis

Als Grundlage für die Kalkulation der Mindererlöse, welche sich durch den Fäulebefall infolge der Wurzelverletzungen der Gassenrandbäume beim Befahren von Forstmaschinen ergeben, wurde wiederum die Ertragstafel für einen Fichtenbestand der Bonität 28 verwendet (BADOUX 1968). Im Alter 20 findet die (mechanisierte) Erstdurchforstung statt, bei welcher erstmals die Gefahr besteht, dass die Wurzeln der Gassenrandbäume verletzt werden. Der Bestand wird im Alter 110 geräumt.

Die Fichte hat ein tellerförmiges Wurzelsystem, wobei sich die Hauptwurzelmasse in den humosen, oberen Bodenschichten befindet. Die Reichweite der Seitenwurzeln von Fichten kann durchaus zehn Meter übersteigen (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002). Nach FRIES (1975) sind die Wurzeln eines Baumes mit einem Durchmesser von 25 cm in zwei Meter Entfernung vom Stamm durchschnittlich 2 cm dick. Bei grösseren Bäumen sind auch in grösserer Entfernung noch Wurzeln solcher Dimensionen zu finden.

Werden Feinwurzeln beschädigt, hat dies meist keine weitere Folgen. Bei der Verletzung von Wurzeln mit einem Durchmesser von mehr als 2 cm besteht hingegen eine grosse Gefahr von Pilzbefall (MENG 1978). Aufgrund der seitlichen Reichweiten der Fichtenwurzeln sind auch im Gassenbereich Wurzeln mit einem Durchmesser von mehr als 2 cm zu finden. Ein Grossteil dieser Wurzeln befindet sich nahe an der Bodenoberfläche. Deshalb werden beim Befahren der Rückegassen mit Forstmaschinen häufig Wurzeln verletzt. Der Anteil der Bäume deren Wurzeln (>2cm) verletzt werden, ist abhängig von der Grösse des Baumes, dem Abstand zwischen Baum und Rückegasse sowie der Spurtiefe. Mit zunehmender Tiefe der Fahrspuren steigt der Anteil von Bäumen, welche mindestens einen Wurzelschaden erlitten haben, an (FRIES 1975).

Für die Modellierung der Mindererlöse infolge Fäule wurde angenommen, dass Bäume mit einem Abstand von bis zu vier Metern vom Rand der Rückegassen durch Fäulebefall infolge des Befahrens betroffen sein können, weil ihre Wurzeln (mit mehr als 2 cm Durchmesser) bis in den Gassenbereich reichen. Weiter wurde - basierend auf Studienresultaten (Kapitel 2.5.1) - angenommen, dass bei jeder Durchforstung (bei der immer auch die Gassen befahren werden) die Wurzeln von 40 % dieser Bäume verletzt werden. Wenn zehn Jahre später die Gassen erneut befahren werden, werden wiederum die Wurzeln von 40 % der Bäume verletzt, allerdings sind dann auch Bäume betroffen, deren Wurzeln bereits beim ersten Befahren in Mitleidenschaft gezogen worden sind, aber auch Wurzeln bisher noch unverletzter Bäume werden beschädigt. Gemäss BADOUX (1968) stehen in einem Fichtenbestand der Bonität 28 im Alter 20 beispielsweise 3‘014 Bäume pro Hektare (Tabelle 28). Werden die Wurzeln von 40 % dieser Bäume verletzt, so sind dies 1‘206 Bäume. Im Alter 20 bis 30 (für die Berechnung wurde das Alter 30 angenommen) werden bei einer Durchforstung 1‘340 oder 44.5 % aller Bäume

entnommen. Der prozentuale Anteil der verletzten Bäume im ausscheidenenden Bestand dürfte gleich wie im Bestand vor der Durchforstung sein, dass heisst 40 % der entnommenen Bäume sind verletzt. Damit werden also 536 verletzte Bäume gefällt. Im Alter 30 stehen im Bestand 1‘674 Bäume, davon sind bereits 670 Bäume (1‘206 - 536) verletzt. In diesem Alter findet die oben erwähnte Durchforstung statt, bei welcher die Gassen wieder befahren werden, so dass erneut Baumwurzeln verwundet werden. Werden wiederum 40 % aller Bäume verletzt, so sind dies 402 bisher unverletzte Bäume sowie 268 Bäume, deren Wurzeln bereits bei der ersten Durchforstung in Mitleidenschaft gezogen wurden. Insgesamt weisen nun bereits 1‘072 Bäume (670 + 402) Verletzungen an den Wurzeln auf.

Tabelle 28: Anzahl Bäume im verbleibenden und im ausscheidenden Bestand (BADOUX 1968, verändert).

	Verbleibender Bestand	**Ausscheidender Bestand***
Alter (Jahre)	**Stammzahl (n)**	**Stammzahl (n)**
20	3‘014	1‘340
30	1‘674	601
40	1‘073	340
50	733	202
60	531	130
70	401	89
80	312	62
90	250	45
100	205	35
110	170	170

* für die Berechnung in dieser Arbeit wurde angenommen, dass die gemäss Ertragstafel im Alter 20 bis 30 durchgeführte Durchforstung im Alter 30 durchgeführt wird, dass heisst die 1340 Bäume (ausscheidender Bestand) werden im Alter 30 geerntet; die 601 Bäume, welche gemäss Ertragstafel im Alter 30 bis 40 ausscheiden, werden im Alter 40 geerntet usw.

Der Anteil der Wunden, bei denen Fäuleerreger nachgewiesen werden, steigt mit der Zeit an, da nicht alle frischen Wunden unmittelbar, sondern zum Teil erst ein paar Jahre später infiziert werden. Allerdings werden auch dann nicht alle verletzten Wurzeln von Fäulepilzen infiziert sein. In der Literatur gibt es verschiedene Angaben bezüglich dem Anteil der Wunden, welcher von Fäulen befallen wird (Kapitel 2.5.2). Für diese Arbeit wurde angenommen, dass 60 % aller Wurzelverletzungen von Fäulepilzen infiziert werden. Ausgehend vom Ort der Verletzung breitet sich die Fäule nach oben bis in den Stamm aus. Die in mehreren Studien gefundene (vertikale) Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule beträgt zwischen 10 und 20 cm pro Jahr, wobei das Wachstum der Fäule mit der Zeit nachlässt. Für die Kalkulationen in dieser Arbeit wird eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 12 cm pro Jahr angenommen.

Da durch das Befahren Wurzeln im Gassenbereich verletzt werden, kann es je nach Distanz zum Stamm einige Zeit dauern bis sich die Fäule bis in den Stamm ausgebreitet hat. Im Modell wurde angenommen, dass im Durchschnitt 10 Jahre nachdem die Wurzeln verletzt und infiziert worden sind, erstmals Fäule im Stamm festgestellt werden kann.

Im Stamm breitet sich die Fäule nicht nur nach oben sondern auch radial nach aussen aus. Über diese seitliche Ausbreitung der Fäule gibt es nur wenige Literaturangaben (Kapitel 2.5.2). Die Berechnung beruht auf einer radialen Ausbreitung der Fäule am Stammfuss von 5 mm pro Jahr. Um zu berechnen, welches Volumen die Fäule bei der Nutzung des Baumes einnimmt ist, wurde vereinfachend angenommen, dass die Fäule im Baumstamm eine kegelförmige Form annimmt. In Wirklichkeit folgt die Fäule im unteren Teil der Stammform und weiter oben ist sie kegelförmig (SEIFERT 2007).

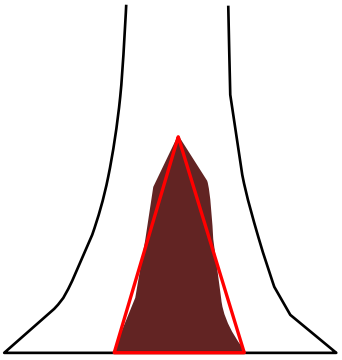


Abbildung 13: Fäulekörper innerhalb eines Baumstammes (braun); für die Berechnung der Wertverluste wurde angenommen, dass die Fäule kegelförmig ist (rot).

Um das von Fäule befallene Holzvolumen zu bestimmen, wurde deshalb die Formel zur Berechnung des Volumens eines Kreiskegels verwendet:

$$V = \pi/3 \cdot r^2 \cdot h$$

r: Radius des Fäulekörpers
h: Höhe des Fäulekörpers

Das Fäulevolumen pro Baum wurde mit der Anzahl fäulebefallener Bäume pro Hektare multipliziert. Somit konnte das Fäulevolumen pro Hektare ermittelt werden. Da bisher noch nicht berücksichtigt wird, dass vom Fäulebefall durch Befahren nicht alle Bäume, sondern nur die Bäume entlang der Rückegassen betroffen sind, wurde das Fäulevolumen mit dem Anteil der Fläche, auf der die Bäume mit Fäulebefall stehen, multipliziert.

Mehreren Studien zufolge korreliert die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fäule mit dem Durchmesserzuwachs (Kapitel 2.5.2). Wenn nun der Zuwachs der Bäume auf verdichtetem Boden geringer ist, dürfte sich in diesen Bäumen also auch die Fäule etwas weniger schnell ausbreiten. Deshalb berücksichtig das Modell die Zuwachsverluste infolge des Befahren, welche im Kapitel 3.2 berechnet wurden. Bei der unter 3.2 vorgestellten Variante 1, bei der der Boden nicht befahren wird, werden auch keine Bäume verletzt und somit entsteht keine Fäule welche auf das Befahren zurückgeführt werden kann. Bei den Varianten 2 bis 7 wurde, wie erwähnt angenommen, dass jeweils 40 % der Bäume bei der Durchforstung verletzt werden.

Von Fäule befallenes Holz wird verfärbt und zersetzt. Mit zunehmendem Zersetzungsgrad nimmt die Qualität des Holzes immer mehr ab. Verfärbtes Rotholz ohne strukturelle Holzveränderung (nagelfest) kann noch als Stammholz verkauft werden, faules Holz, bei dem die Holzstruktur deutlich angegriffen ist (nicht mehr nagelfest), kann höchstens noch als Industrie- oder Energieholz verwendet werden (SCHÜTZ 2003). Für die Kalkulation in dieser Arbeit wurde angenommen, dass fäulebefallenes Holz einen, um durchschnittlich 40 % geringeren Wert hat, als nicht von Fäule befallenes Holz. Diese Annahme basiert auf dem Vergleich von Rundholzpreisen für verschiedene Holzqualitäten (siehe Anhang C, Tabelle 43).

3.3.2 Ergebnisse: Mindererlöse durch befahrungsbedingte Fäulnis

In der Tabelle 29 wird das Faulholz-Volumen (m^3/ha) bei den verschiedenen Varianten und Rückegassenabständen sowie der Anteil des Faulholzes an gesamten produzierten Holzmenge aufgeführt. Bei den Varianten handelt es sich um die unter 3.2 vorgestellten Varianten. Da beispielsweise der Holzzuwachs bei der Variante 7 im Vergleich zur Variante 2 geringer ist, wird bei der Variante 7 auch weniger Holz von Fäule befallen.

Tabelle 29: Faulholz und Anteil des Faulholzes an der gesamten produzierten Holzmenge bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Faulholz m^3/ha					**Anteil Faulholz an total produzierter Holzmenge %**				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	94.7	63.2	47.4	37.9	31.6	5.7	3.7	2.7	2.2	1.8
3	75.8	50.5	37.9	30.3	25.3	5.2	3.2	2.3	1.8	1.5
4	92.6	61.8	46.4	37.1	30.9	5.7	3.7	2.7	2.2	1.8
5	88.4	59.1	44.4	35.5	29.6	5.7	3.7	2.7	2.2	1.8
6	89.5	59.8	44.9	35.9	29.9	5.7	3.7	2.7	2.2	1.8
7	78.9	53.0	39.9	32.0	26.7	5.7	3.7	2.7	2.2	1.8

In Tabelle 30 sind die Wertverluste in SFr./ha, welche auf Qualitätseinbussen durch fäulebefallenes Holz zurückzuführen sind, aufgeführt. Werden die Wertverluste in SFr./ha durch die produzierte Holzmenge (m^3/ha) dividiert, erhält man die Wertverluste wegen Fäule pro Kubikmeter produziertes Holz.

Tabelle 30: Mindererlöse durch Fäule bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Mindererlös SFr./ha					**Mindererlös SFr./m^3**				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3'069.46	2'046.31	1'534.73	1'227.78	1'023.15	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64
3	2'455.57	1'637.04	1'227.78	982.23	818.52	1.86	1.14	0.83	0.65	0.53
4	3'001.25	2'002.46	1'502.42	1'202.20	1'001.98	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64
5	2'864.83	1'914.76	1'437.80	1'151.05	959.65	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64
6	2'898.93	1'936.68	1'453.95	1'163.84	970.23	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64
7	2'557.88	1'717.43	1'292.40	1'035.94	864.39	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64

3.3.3 Diskussion zu den Mindererlösen durch befahrungsbedingte Fäule

Die Wertverluste durch rotfaules Holz über die gesamte Umtriebszeit von 110 Jahren sind je nach Variante und Rückegassenabstand zwischen etwa 800 und 3‘000 SFr./ha (ausser bei der Variante 1, bei der keine Befahrung stattfindet) Mit zunehmendem Rückegassenabständen nimmt die Anzahl der Bäume, deren Wurzeln durch das Befahren der Gassen mit Forstmaschinen verletzt werden und bei welchen sich dann eine Fäule entwickelt, ab. Dementsprechend sind die Wertverluste durch Fäule, welche auf Wurzelverletzungen zurückgeführt werden kann, bei grossen Gassenabständen geringer als wenn die Gassen nahe beieinander liegen. Im Modell wurde, wie bereits erwähnt, auch die unter 3.2 berechneten Zuwachseinbussen berücksichtigt. Wenn der Zuwachs geringer ist, kann auch weniger Holz von Fäule befallen werden. Deshalb ist die Menge Faulholz in Variante 7 kleiner als in Variante 6 und dementsprechend fallen auch die Wertverluste geringer aus.

In Tabelle 30 sind auch die Wertverluste pro Kubikmeter aufgeführt. Sie liegen je nach Variante und Gassenabstand zwischen 0.00 und 3.60 SFr./m^3. Der Grund dafür, dass bei den Varianten 2 und 4 bis 7 die gleichen Werte resultierten, liegt darin, da bei all diesen Varianten jeweils die gleichen Anteile am gesamten produzierten Holz Fäule aufweisen (Tabelle 29). Bei Variante 2 wird zwar mehr Holz produziert als bei Variante 7, gleichzeitig ist aber bei Variante 2 auch mehr Holz von Fäule befallen als bei Variante 7, so dass die Anteile des Faulholzes gleich bleiben.

3.4 Mindererlöse infolge Verletzung des Holzkörpers bei der Holzernte

Neben den im Kapitel 3.3 beschriebenen Wurzelverletzungen als Folge des Befahrens von Waldboden mit Forstmaschinen gibt es bei der Holzernte noch weitere Ernteschäden. Sowohl beim Fällen wie auch beim Vorliefern der Bäume wird ein gewisser Anteil der verbleibenden Bäume beispielsweise an den Wurzelanläufen und an den Stämmen verletzt. Wie Wurzelverletzungen können auch oberirdische Wunden durch Fäuleerreger infiziert werden, was wiederum zu holzqualitätsbedingten Mindererlösen führt, welche in diesem Kapitel berechnet werden.

Da diese erntebedingten Bestandesschäden nicht auf das Befahren des Bodens zurückzuführen sind, wurden deren Folgekosten separat von denen, welche durch befahrungsbedingte Wurzelverletzungen entstehen (Kapitel 3.3), berechnet.

3.4.1 Annahmen für die Berechnung der Mindererlöse durch Ernteschäden

Als Grundlage für die Kalkulation der Mindererlöse, welche sich durch den Fäulebefall infolge der Baumverletzungen durch die Holzernte (ausser Befahren) ergeben, dienten einerseits die Ergebnisse zur Holzproduktion bei den in Kapitel 3.2 gewählten Varianten sowie die Daten aus der Ertragstafel zu Fichtenbeständen der Bonität 28.

Gemäss der in der Literatur gefundenen Resultat ist das Schadensprozent, also der Anteil der verbleibenden Bäume die bei der Holzernte verletzt werden, von verschiedenen Faktoren wie etwa dem Rückegassenabstand und dem eingesetzten Holzernteverfahren abhängig. Bei der vollmechanisierten Holzernte liegt die in Studien häufig genannte Schadenhäufigkeit zwischen etwa 5 und 15 % wobei Bäume entlang von Rückegassen häufiger verletzt werden, als solche abseits der Gassen. Für die Berechnungen der Wertverluste des Holzes durch Fäulebefall als Folge der erntebedingten Bestandesschäden wurde deshalb angenommen, dass innerhalb eines zwei Meter breiten Streifens entlang der Rückegassen bei jeder Durchforstung 20 % der verbleibenden Bäume oberflächlich verletzt werden. Ausserhalb dieser Randstreifen wurde für einen Gassenabstand von 20 Metern, bei welchem der Vollernter flächendeckend eingesetzt werden kann, angenommen, dass bei jeder Durchforstung 10 % aller verbleibenden Bäume verletzt werden.

Bei grösseren Gassenabständen kommen zusätzlich die Verfahren mit Zufällen respektive mit Vorliefern zum Einsatz. Bei diesen Verfahren ist im Allgemeinen mit höheren Schadensprozenten zu rechnen, als beim flächendeckenden Einsatz des Vollernters, wo die Bäume vom Fällen bis zum Ablegen der Sortimentsstücke gut kontrolliert werden können (Kapitel 2.5.1). Deshalb wurde ein Anstieg des Schadensprozentes mit zunehmendem Gassenabstand angenommen: Bei einem Gassenabstand von 20 Metern beträgt das Schadensprozent 10, bei einem Gassenabstand von 30 Metern 12.5, bei 40 Meter 15, bei 50 Meter 17.5 % und bei einem Abstand von 60 Metern zwischen den Gassen ist das Schadensprozent doppelt so hoch wie beim Gassenabstand von 20 Metern, dass heisst 20 % aller Bäume werden verletzt.

Weiter wurde - basierend auf Literaturangaben (Kapitel 2.5.2) - angenommen, dass sich in 60 % aller Bäume, welche bei der Holzernte verletzt werden Fäulnis entwickelt. Wie schon im Kapitel 3.3 wurde angenommen, dass sich die Fäule vertikal mit einer Geschwindigkeit von 12 cm pro Jahr ausbreitet. Mit zunehmender Ausbreitung folgt die Fäule der Stammform, vereinfachend wurde wieder angenommen, dass das von Fäule befallene Holz die Form eines Kegels annimmt und sich radial mit einer Geschwindigkeit von 5 mm pro Jahr ausbreitet. Für die Berechnung der Wertverluste wurde angenommen, dass fäulebefallenes Holz beim Verkauf einen um 40 % geringeren Wert erzielt, als nicht von Fäule befallenes Holz (siehe Anhang C).

3.4.2 Ergebnisse: Mindererlöse infolge Holzernteschäden

Tabelle 31 gibt die Masse des von Fäule befallenen Holzes und dessen Anteil an der total produzierten Holzmenge wieder.

Tabelle 31: Faulholz als Folge von Ernteschäden und Anteil des Faulholzes an der gesamten produzierten Holzmenge bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Faulholz m^3/ha					Anteil Faulholz an total produzierter Holzmenge %				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	119.7	131.5	147.6	164.8	182.0	7.3	7.7	8.5	9.4	10.3
3	100.8	118.9	138.2	157.3	175.7	6.9	7.5	8.4	9.3	10.3
4	117.0	128.6	144.5	161.4	178.3	7.3	7.7	8.5	9.4	10.3
5	111.7	123.0	138.3	154.5	170.7	7.3	7.7	8.5	9.4	10.3
6	113.0	124.4	139.8	156.2	172.6	7.3	7.7	8.5	9.4	10.3
7	99.7	110.3	124.3	139.1	153.8	7.3	7.7	8.5	9.4	10.3

Die holzqualitätsbedingten Mindererlöse wegen Fäule in SFr. pro Hektare und umgerechnet auf den Kubikmeter produziertes Holz werden in Tabelle 32 ersichtlich.

Tabelle 32: Mindererlöse durch Fäule bei den verschiedenen Varianten und bei unterschiedlichen Gassenabständen.

	Mindererlös SFr./ha					Mindererlös SFr./m^3				
	Rückegassenabstand [m]					Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3'877.37	4'259.14	4'782.65	5'340.15	5'897.44	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
3	3'267.29	3'852.42	4'477.61	5'096.12	5'694.08	2.47	2.69	3.01	3.36	3.70
4	3'791.20	4'167.87	4'681.97	5'228.90	5'775.42	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
5	3'618.88	3'985.34	4'480.59	5'006.39	5'531.39	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
6	3'661.96	4'030.97	4'530.93	5'062.02	5'592.40	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
7	3'231.14	3'574.64	4'027.50	4'505.75	4'982.32	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70

3.4.3 Diskussion zu den Mindererlösen infolge Holzernteschäden

Die Wertverluste durch fäulebefallenes Holz als Folge von bei der Holzernte auftretenden Bestandesschäden sind je nach Variante zwischen etwa 3‘200 und 5‘900 SFr./ha. Bei der Variante 1, welche als Referenzvariante dient, werden keine Bäume verletzt und dementsprechend gibt es keine finanziellen Einbussen durch Fäule. Die Wertverluste pro Hektare unterscheiden sich bei den verschiedenen Varianten, da jeweils unterschiedlich viel Holz von Fäule befallen ist. Da aber der Anteil des Faulholzes an der total produzierten Holzmenge bei den Varianten 2, 4, 5, 6 und 7 gleich ist (bei der Variante 7 ist sowohl die Faulholzmenge kleiner als auch die total produzierte Holzmenge kleiner als bei Variante 2

und deshalb ist der Anteil der Faulholzmenge an der total produzierten Holzmenge gleich), resultieren für diese Varianten die gleichen Mindererlöse pro Kubikmeter. Bei der Variante 3 ist der Faulholzanteil etwas geringer und dementsprechend sind auch die finanziellen Einbussen pro Kubikmeter niedriger. Umgerechnet auf den Kubikmeter Holz machen die Wertverluste zwischen etwa 2.50 und 3.70 SFr. aus. Mit grösserem Gassenabstand steigt das Schadensprozent an und damit auch die Faulholzmenge an. Somit nehmen den Wertverluste bei allen Varianten mit zunehmendem Gassenabstand zu.

4 Vergleich von Kosten und Nutzen intakter Waldböden

Die in Kapitel 3 modellhaft über eine gesamte Umtriebszeit berechneten Mindererlöse infolge der mechanischen Überbelastung des Walbodens bei der Waldbewirtschaftung sowie der Verminderung der Holzqualität infolge Fäulebefall durch Bestandesschäden sind in Tabelle 33 zum Vergleich nebeneinander dargestellt.

Tabelle 33: Mindererlöse wegen Zuwachsrückgang und Fäule, als Folge von Boden- und Bestandesschäden.

	Mindererlöse durch Zuwachseinbussen SFr./m³ (aus Kapitel 3.2)					**Mindererlöse durch befahrungsbedingten Fäulebefall der Gassenrandbäume SFr./m³** (aus Kapitel 3.3)					**Mindererlöse durch Fäulebefall infolge Bestandesschäden SFr./m³** (aus Kapitel 3.4)				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	9.00	6.00	4.50	3.60	3.00	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
3	18.00	12.00	9.00	7.20	6.00	1.86	1.14	0.83	0.65	0.53	2.47	2.69	3.01	3.36	3.70
4	10.80	7.80	6.30	5.40	4.80	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
5	14.40	11.40	9.90	9.00	8.40	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
6	13.50	10.50	9.00	8.10	7.50	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70
7	22.50	19.50	18.00	17.10	16.50	2.07	1.33	0.98	0.77	0.64	2.61	2.76	3.05	3.37	3.70

In der Tabelle 34 sind die Ertragseinbussen wegen der Belastung des Waldbodens beim Befahren mit Forstmaschinen aufgeführt. Diese setzten sich aus den Erlöseinbussen, welche sich durch den geringeren Zuwachs der Bäume auf verdichteten Böden ergeben (Kapitel 3.2) und den Wertverlusten durch die Qualitätseinbussen des Holzes der Bäume, deren Wurzeln beim Befahren beschädigt und als Folge davon durch Fäule befallen wurden (Kapitel 3.3), zusammen.

Tabelle 34: Mindererlöse infolge des Befahrens des Waldbodens, gerechnet über eine Umtriebszeit von 110 Jahren.

	Mindererlös SFr./ha					**Mindererlös SFr./m³**				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	17'924.86	11'949.91	8'962.43	7'169.94	5'974.95	11.07	7.33	5.48	4.37	3.64
3	32'166.37	21'444.24	16'083.18	12'866.55	10'722.12	19.86	13.14	9.83	7.85	6.53
4	20'827.73	14'877.14	11'901.20	10'115.44	8'924.86	12.87	9.13	7.28	6.17	5.44
5	26'633.47	20'731.60	17'778.74	16'006.45	14'824.69	16.47	12.73	10.88	9.77	9.04
6	25'182.03	19'267.98	16'309.35	14'533.70	13'349.73	15.57	11.83	9.98	8.87	8.14
7	39'696.38	33'904.13	31'003.20	29'261.20	28'099.29	24.57	20.83	18.98	17.87	17.14

Diese Mindererlöse sind also die finanziellen Konsequenzen der Überbelastung des Bodens und der Baumwurzeln bei der Befahrung des Waldbodens mit Forstmaschinen. Bei einem nicht durch das Befahren beeinträchtigten Boden können diese finanziellen Einbussen verhindert werden. Wird auf das Befahren des Bodens teilweise verzichtet, sind also die Gassen in Abständen von beispielsweise 60 Metern angeordnet, so ist ein geringerer Teil der Bäume von befahrungsbedingten Zuwachseinbussen und Fäulnis betroffen, was sich in den geringeren Mindererlösen bei grösseren Gassenabständen widerspiegelt.

Allerdings nehmen bei grösseren Gassenabständen die Bestandesschäden zu. Die Wertverluste des Holzes, welches durch erntebedingte Baumverletzungen von Fäule befallen und entwertet ist, wurden in Kapitel 3.4 ebenfalls modellhaft kalkuliert. Deshalb müssen den, in der Tabelle 34 aufgeführten, befahrungsbedingten finanziellen Einbussen die Wertverluste durch erntebedingte Bestandesschäden hinzugerechnet werden. Die Tabelle 35 zeigt die Mindererlöse im Vergleich zu einem nicht beeinträchtigten Bestand.

Tabelle 35: Mindererlöse infolge des Befahrens und der Bestandeschäden, gerechnet über eine Umtriebszeit von 110 Jahren.

	Mindererlös SFr./ha					**Mindererlös SFr./m^3**				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	21'802.23	16'209.05	13'745.08	12'510.09	11'872.39	13.68	10.09	8.53	7.74	7.34
3	35'433.66	25'296.66	20'560.79	17'962.67	16'416.20	22.33	15.83	12.84	11.21	10.23
4	24'618.93	19'045.01	16'583.17	15'344.34	14'700.28	15.48	11.89	10.33	9.54	9.14
5	30'252.35	24'716.94	22'259.33	21'012.84	20'356.08	19.08	15.49	13.93	13.14	12.74
6	28'843.99	23'298.95	20'840.28	19'595.72	18'942.13	18.18	14.59	13.03	12.24	11.84
7	42'927.52	37'478.77	35'030.7	33'766.95	33'081.61	27.18	23.59	22.03	21.24	20.84

Werden die Mindererlöse von den Erlösen der Variante 1 (unbeeinflusster Bestand ohne Boden- und Ernteschäden) abgezogen, so erhält man die in Tabelle 36 aufgeführten Erlöse.

Tabelle 36: Erlöse bei den verschiedenen Varianten und Gasssenabständen.

	Erlös SFr./ha					**Erlös SFr./m^3**				
	Rückegassenabstand [m]					**Rückegassenabstand [m]**				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
1	148'554.00	148'554.00	148'554.00	148'554.00	148'554.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
2	126'751.77	132'344.95	134'808.92	136'043.91	136'681.61	76.32	79.91	81.47	82.26	82.66
3	113'120.34	123'257.34	127'993.21	130'591.33	132'137.80	67.67	74.17	77.16	78.79	79.77
4	123'935.07	129'508.99	131'970.83	133'209.66	133'853.72	74.52	78.11	79.67	80.46	80.86
5	118'301.65	123'837.06	126'294.67	127'541.16	128'197.92	70.92	74.51	76.07	76.86	77.26
6	119'710.01	125'255.05	127'702.72	128'958.28	129'611.87	71.82	75.41	76.97	77.76	78.16
7	105'626.48	111'075.23	113'523.30	114'787.05	115'472.39	62.82	66.41	67.97	68.76	69.16

Die Holzerntekosten sind vom Rückegassenabstand abhängig. Bei grösseren Gassenabständen sind die Kosten höher. Werden nun diese, in Kapitel 3.1 berechneten Holzerntekosten (Tabelle 21) von den Holzerlösen (Tabelle 36) abgezogen, so erhält man die erntekostenfreien Erlöse (Tabelle 37 und Abbildung 14). Für die Variante 1 wurden keine erntekostenfreie Erlöse berechnet, da bei dieser Variante der Wald nicht befahren wird.

Tabelle 37: Erntekostenfreier Erlös bei den verschiedenen Varianten in Abhängigkeit des Gassenabstandes.

	Erntekostenfreier Erlös SFr./m^3				
	Rückegassenabstand [m]				
Variante	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
2	42.70	43.50	43.10	42.40	41.46
3	34.05	37.76	38.79	38.93	38.57
4	40.90	41.70	41.30	40.60	39.66
5	37.30	38.10	37.70	37.00	36.06
6	38.20	39.00	38.60	37.90	36.96
7	29.20	30.00	29.60	28.90	27.96

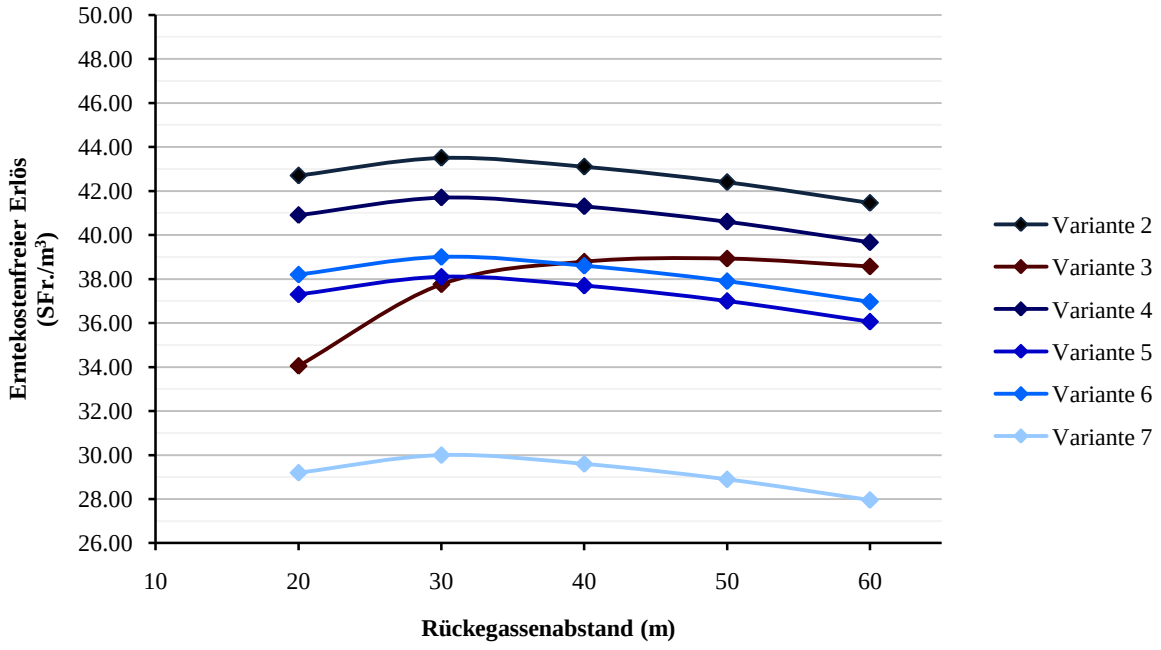


Abbildung 14: Erntekostenfreier Erlös bei den verschiedenen Varianten in Abhängigkeit des Gassenabstandes.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methoden

Um die finanziellen Folgen der Befahrens des Waldbodens sowie die Erntekosten bei verschiedenen Gassenabständen zu berechnen, wurden Modelle entwickelt. Modelle sind immer vereinfachende Abbildungen der Realität. Dies trifft im Besonderen auf die verwendeten Modelle zur Berechnung der Mindererlöse wegen Zuwachseinbussen sowie der Wertverluste durch Fäulnis zu, denn diese Modelle basieren auf vielen Annahmen. Wenn immer möglich, wurde versucht diese Annahmen auf Literaturangaben abzustützen. Allerdings gibt es in vielen Themenbereichen, wie etwa den Wachstumseinbussen von Bäumen auf verdichtetem Boden, immer noch grosse Wissenslücken oder die in wissenschaftlichen Studien gefundenen Ergebnisse unterscheiden sich stark und sind teilweise auch widersprüchlich. Um dies zu berücksichtigen, wurden beispielsweise für die Modellierung der Produktionseinbussen und der damit verbundenen finanziellen Einbussen als Folge des Befahrens eher konservative Werte für die Zuwachsminderungen angenommen und keine Extremwerte verwendet, wie sie vereinzelt in Studien gefunden werden können. Der grösste Teil der erwähnten Studien wurde an Nadelholzbeständen durchgeführt. Zu Laubholzbeständen existieren nur wenige Untersuchungen. Zudem können mit dem HeProMo die Kosten für die Ernte des Laubholzes mit dem Vollernter nicht kalkuliert werden. Deshalb wurde die Berechnung der Kosten (Mehrkosten der bodenschonenden Holzernte mit partiellem Befahrungsverzicht) und Nutzen (verhinderte Einbussen durch Zuwachsverluste und holzqualitätsbedingten Wertminderungen) eines intakten Bodens am Beispiel eines Fichtenbestandes durchgeführt. Die Fichte wurde gewählt, da sie die häufigste und für die Forstwirtschaft wichtigste Baumart ist.

Für die Berechnung der finanziellen Folgen des Bodenbefahrens sowie der Ernteschäden wurden aktuelle Holzpreise verwendet. Ändern sich die Holzpreise, so hat dies einen entscheidenden Einfluss auf die mit den Modellen berechneten (erntekostenfreien) Erlöse. Bei einem höheren Holzpreis wären beispielsweise die Mindererlöse infolge des Befahrens und der Ernteschäden höher und bei einem niedrigeren Holzpreis tiefer. Lohnt sich je nach Variante beim aktuellen Holzpreis ein Gassenabstand von mehr als 20 Metern nicht nur aus Sicht des Boden- und Bestandesschutzes sondern auch aus ökonomischen Gründen, so ist dies bei einem tieferen Holzpreis bei einer rein ökonomischen Betrachtungsweise vielleicht nicht mehr der Fall. Ein kleinerer Gassenabstand wäre dann die logische, aber falsche Schlussfolgerung, denn der Boden würde bei geringeren Gassenabständen auf einem grösseren Flächenanteil langfristig beeinträchtigt.

Mit den verwendeten Modellen kann nur ein Teil der finanziellen Einbussen als Folge der Überbelastung und Verdichtung des Waldbodens durch Holzerntemaschinen berechnet werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, kann das Befahren des Waldbodens noch weitere Folgen haben. So kann ein Boden beim Einsatz von Forstmaschinen durchaus so stark verdichtet und in seinen Funktionen beeinträchtigt werden, dass die Naturverjüngung teilweise oder vollständig ausfällt. Wurzelverletzungen und Fäulebefall führen dazu, dass die betroffenen Bäume an Stabilität verlieren und anfälliger auf Sturmereignisse sind. Windwurf und Borkenkäferbefall können zu Zwangsnutzungen führen, bei welchen neben Wertverlusten auch höhere Erntekosten anfallen. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde, dass der Wald ein wichtiger Trinkwasserlieferant ist und dass das Trinkwasser durch das Verdichten des Bodens mit Holzerntemaschinen negativ beeinflusst werden kann, was letztlich wieder finanzielle Konsequenzen hat, auch wenn die Trinkwasserbildung durch den Wald heute meist nicht abgegolten wird. Bei der Berücksichtigung all dieser Folgen würde der Nutzen eines intakten Waldbodens höher sein als in dieser Arbeit berechnet.

Aufgrund der erwähnten Einschränkungen erhebt diese Arbeit nicht den Anspruch darauf, dass die berechneten Mindererlöse als Folge der mechanischen Überbelastung des Waldbodens bei der Waldbewirtschaftung respektive die Mehrkosten einer bodenschonenden Holzernte tatsächlich der Realität entsprechen, sondern Ziel war es vielmehr aufzuzeigen, in welchen Grössenordnungen sich diese Mindererlöse und Mehrkosten bewegen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die mechanischen Belastung des Bodens und der Baumwurzeln bei der Waldbewirtschaftung kann sich auf den Zuwachs sowie die Holzqualität der Bäume auswirken. Zuwachsverluste und die geringere Qualität des, als Folge der Wurzelverletzungen, von Fäule befallenen Holzes, wirken sich auf den finanziellen Ertrag aus. Je nach Variante, dass heisst je nach Ausmass der Bodenschäden und je nach Gassenabstand sind die modellhaft für einen Fichtenbestand der Bonität 28 über eine Umtriebszeit von 110 Jahren berechneten Mindererlöse unterschiedlich hoch. Bei der, in der Variante 3 angenommenen, starken Beeinträchtigung des Bodens unter den Rückegassen, wie sie etwa bei der Befahrung eines verdichtungsempfindlichen, feinkörnigen Bodens bei ungünstigen Bedingungen (grosse Bodenfeuchte) auftreten dürfte, sind die Mindererlöse je nach Gassenabstand zwischen rund 10‘000 und 30‘000 SFr./ha respektive zwischen etwa 6 und 20 SFr./m^3 (Tabelle 34). Im Vergleich dazu sind die Mindererlöse bei der Variante 2, bei welcher der Boden weniger stark beeinträchtigt wird, respektive bei der der Boden weniger verdichtungsempfindlich ist (grobkörniger Boden), mit 6‘000 bis 18‘000 SFr./ha respektive 3.60 bis 11 SFr./m^3 deutlich niedriger. Bei den Varianten 4 bis 7 wurde der Boden zusätzlich zu den aktuell benutzten Rückegassen auf weiteren Teilflächen beeinträchtigt, was zu Zuwachsrückgängen auf einem grösseren Teil der Waldfläche und in der Folge zu höheren finanziellen Einbussen führt.

Bei allen Varianten nehmen die Mindererlöse bei grösseren Gassenabständen ab, da die Grösse der Fläche, auf der der Boden durch das Befahren beeinträchtigt wird, abnimmt. Damit sinken die, durch befahrungsbedingte Zuwachseinbussen verursachten Mindereinnahmen. Wenn das Befahren nur auf einem geringen Teil des Waldbodens stattfindet, werden auch weniger Bäume durch das Befahren mit Forstmaschinen verursachte Wurzelverletzungen erleiden und damit wird auch die von Fäule befallene Holzmenge gering bleiben, was sich in kleineren Wertverlusten bei grösseren Gassenabständen wiederspiegelt (Tabellen 30 und 33).

Die befahrungsbedingten Mindererlöse können also verringert werden, in dem die Gassen in grösseren Abständen angelegt werden, so dass nur ein kleiner Teil der Waldbodens den Belastungen durch die Forstmaschinen ausgesetzt wird. Bei solchen Gassenabständen kann allerdings der Vollernter, wie im Kapitel 3 aufgezeigt, nicht mehr flächendeckend eingesetzt werden, so dass zusätzlich andere Ernteverfahren eingesetzt werden müssen. Dadurch nimmt die Schadenhäufigkeit am verbleibenden Bestand zu, es werden also bei der Durchforstung mehr Bäume verletzt. Die Anzahl der von Fäule befallenen Bäume steigt. Die Fäule vermindert die Holzqualität, wodurch Wertverluste in Kauf genommen werden müssen (Tabellen 32 und 33). Diese Wertverluste sind aber meist deutlich geringer als die Mindererlöse als Folge der Zuwachseinbussen (Tabelle 33).

Die in Tabelle 34 gezeigten, finanziellen Verluste setzten sich aus den befahrungsbedingten Mindererlöse und den Wertverlusten, welche auf Bestandesschäden bei der Holzernte zurückgeführt werden können (Tabelle 32), zusammen. Die Unterschiede zwischen den Gassenabständen sind etwas geringer, als bei den befahrungsbedingten Erlöseinbussen allein, da bei grösseren Gassenabständen höhere Bestandesschäden und damit höhere Wertverluste resultieren. Weil aber die Zuwachseinbussen für den grössten Teil der Mindererlöse verantwortlich sind, ändert sich am Ergebnis in der Hinsicht, dass sich die Erlöseinbussen bei einem grösseren Abstand verringern, nichts.

Tabelle 37 und Abbildung 14 zeigen, dass die erntekostenfreien Erlöse (bei denen die finanziellen Einbussen als Folge der Beeinträchtigung des Bodens und des Bestandes durch den Einsatz von Forstmaschinen bei der Waldbewirtschaftung mit eingerechnet sind) je nach Variante, also je nach Befahrungsempfindlichkeit, bei unterschiedlichen Gassenabständen am höchsten sind. Bei der Variante 2 ist der erntekostenfreie Erlös mit 43.50 SFr./m^3 zum Beispiel bei einem Gassenabstand von 30

Metern am höchsten. Aber auch bei einem Gassenabstand von 40 Metern ist der Erlös mit 43.10 SFr./m^3 noch höher als mit 42.70 SFr./m^3 beim 20 Meter-Gassenabstand. Allerdings sind die Differenzen zwischen den Erlösen bei den verschiedenen Gassenabständen bei der Variante 2 mit maximal etwa 2 SFr./m^3 recht gering. Bei der Variante 3, bei der der Boden unter den Rückegassen so stark verdichtet wurde, so dass der Zuwachs der Randbäume entlang der Gassen im Vergleich zur Variante 2, deutlich zurückgeht ist der erntekostenfreie Erlös am höchsten bei einem Gassenabstand von 50 Metern. Das heisst, bei grösseren Zuwachsverlusten der Randbäume entlang von Rückegassen verschiebt sich der höchste erntekostenfreie Erlös zu grösseren Gassenabständen.

Wenn der Boden zusätzlich zu den aktuell benutzten Rückegassen auf weiteren Teilen der Fläche durch früheres Befahren beeinträchtig ist, hat dies ebenfalls Konsequenzen für die Erlöse. Der Gassenabstand, bei welchem die höchsten Erlöse erzielt werden, bleibt identisch mit der Variante, bei der keine zusätzlichen Flächen durch früheres Befahren in Mitleidenschaft gezogen werden, was sich hingegen ändert ist die Höhe des Erlöses (Vergleiche Varianten 2 und 4 bis 7 in Abbildung 14).

5.3 Empfehlungen für eine bodenschonende Waldbewirtschaftung

Aus ökonomischer Sicht machen, je nach Befahrungsempfindlichkeit eines Bodens, unterschiedliche Gassenabstände Sinn. Ist der Boden verdichtungsempfindlich und wird das Wachstum der Bäume durch die Bodenverdichtung stark negativ beeinflusst, so wird der (langfristige) finanzielle Ertrag bei Gassenabständen von etwa 50 Metern am höchsten sein. Bei befahrungsunempfindlichen Böden ist der erntekostenfreie Erlös grösser bei nahe zusammenliegenden Rückegassen, ein engerer Gassenabstand schneidet also aus ökonomischer Sicht besser ab.

Wichtig ist neben einem den Bodenverhältnissen angepassten Gassenabstand auch, dass das Befahren auf die Rückegassen beschränkt bleibt. Denn die Beeinträchtigung des Bodens auf zusätzlichen Flächen abseits der Gassen kann ebenfalls recht grosse finanzielle Mindererträge mit sich bringen, ohne dass dabei die Holzerntekosten wesentlich gesenkt werden können. Deshalb ist es empfehlenswert die Rückegassen dauerhaft zu markieren, so dass sie jederzeit, auch nach Extremereignissen wie Sturmschäden, wieder auffindbar sind.

Die in dieser Arbeit gefundenen Resultate bestätigen damit den Ansatz vieler Forstverwaltungen, bei verdichtungsempfindlichen Böden einen grösseren Gassenabstand zu empfehlen als bei unempfindlichen Böden. So empfiehlt beispielsweise die Richtlinie zur Feinerschliessung von Waldbeständen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2004) bei der Neuanlage von Rückegassen auf Standorten mit geringer Befahrungsempfindlichkeit einen Gassenabstand von 20 Meter und auf befahrungsempfindlichen Standorten einen Gassenabstand von 40 Metern. Zu den gleichen Schlüssen kommt eine Richtlinie des Freistaates Sachsen (STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2006) welche je nach Standort Gassenabstände von ≥ 20 Meter (geringe Befahrungsempfindlichkeit) respektive ≥ 40 Meter (grosse Befahrungsempfindlichkeit) empfiehlt. In Bayern wurde für die Staatsforstbetriebe, unabhängig des Standorts, ein einheitlicher Gassenabstand von 30 Metern festgelegt (BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2007). Im Kanton Aargau wird bei einer geringen Verdichtungsempfindlichkeit ein Gassenabstand von 30 Metern oder mehr und bei Standorten mit einer hohen Verdichtungsempfindlichkeit ein Gassenabstand von 50 Metern oder mehr empfohlen (KANTON AARGAU, ABTEILUNG WALD 2011).

5.4 Schlusswort

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die Mindererlöse bei einer Beeinträchtigung des Waldbodens durch den Einsatz von Forstmaschinen sowie die Mehrkosten einer bodenschonenden Holzernte ökonomisch zu quantifizieren. Es zeigte sich, dass sich ein, den Bodenverhältnissen angepasster Rückegassenabstand langfristig auszahlt.

Insbesondere zu den, in dieser Arbeit nicht berücksichtigen Folgen der mechanischen Überbelastung des Waldbodens (Folgen der Bodenverdichtung für die Verjüngung und die Anfälligkeit der Bäume auf Windwurf und Borkenkäferbefall) wären weitere Arbeiten zu begrüssen. Dazu könnten die entwickelten Modelle erweitert werden.

Dank

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt haben, herzlich bedanken.

Dr. Peter Rotach danke ich für die Betreuung und die grosse Freiheit, welche er mir bei der Erarbeitung dieser Arbeit gegeben hat.

Dr. Peter Ammann, der den Anstoss für diese Arbeit gegeben hat, danke ich für die vielen hilfreichen Hinweise und Anmerkungen.

Dr. Peter Lüscher, Dr. Oliver Thees und Fritz Frutig danke ich für die kompetente und sehr hilfreiche Beratung.

Hilfreiche Anmerkungen stammen auch von Dr. Renato Lemm und Dr. Anton Bürgi. Auch Ihnen sei gedankt.

Urs Gsell, Förster und Leiter des Forstbetriebs Muhen-Hirschthal-Holziken, danke ich, dass er sich Zeit nahm, mir seine Überlegungen zum Bodenschutz darzulegen und mir bei einer Führung durch „seinen“ Wald zeigte, wie eine bodenschonende Waldbewirtschaftung in der Praxis aussehen kann.

Abschliessend möchte ich meinen Eltern danken, die mich während meines Studiums immer unterstützt haben.

Literaturverzeichnis

ADAMS, P.W. & FROEHLICH, H.A. 1981: Compaction of forest soils. Pacific Northwest Extension Publication PNW-217. 13 p.

AKAY, A.E. ; YILMAZ, M. & TONGUC, F. 2006: Impact of mechanized harvesting machines on forest ecosystem: residual stand damage. Journal of Applied Sciences, 6: 2414-2419.

AMMANN, P. 2010: Interner Bericht im Rahmen des Bodenschutzprojektes. Kanton Aargau, Abteilung Wald.

AMMANN, P. 2011: Persönliche Mitteilung. Dezember 2011.

ARNUP, R.W. 1998: The extent, effects and management of forestry-related soil disturbance, with reference to implications for the Clay Belt: a literature review. OMNR, Northeast Science & Technology. TR-037. 30 p.

ARES, A. ; TERRY, T.A. ; MILLER, R.E. ; ANDERSON, H.W. & FLAMING, B.L. 2005: Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-fir growth. Soil Science of America Journal, 69: 1822-1832.

ATHANASSIADIS, D. 1997: Residual stand damage following cut-to-length harvesting operations with a farm tractor in two conifer stands. Silva Fennica, 31: 461-467.

BACHER-WINTERHALTER, M. 2004: Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzerntesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes. Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. 228 S.

BADOUX, E. 1968: Ertragstafeln für Fichte. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen.

BAFU 2011: Waldpolitik 2020. 21 S.

BALLARD, T.M. 2000: Impacts of forest management on northern forest soils. Forest Ecology and Management, 133: 37-42.

BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2007: Nachhaltigkeitsbericht 2007. 160 S.

BAZZIGHER, G. 1973: Wundfäule in Fichtenwaldungen mit alten Schälschäden. European Journal of Forest Pathology, 3: 71-82.

BECKER, G. 1997: Naturverträgliche Nutzung des Waldes. Naturverträgliche und rationelle Rohholzbereitstellung. DLG Verlag Frankfurt (Main). Schriftenreihe des Dachverbandes der wissenschaftlichen Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e. V. Bund 27: 76-84.

BENDZ-HELLGREN, M. & STENLID, J. 1995: Long-term reduction in the diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. Forest Ecology and Management, 74: 239-243.

BENDZ-HELLGREN, M. & STENLID, J. 1997: Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. Canadian Journal of Forest Resarch, 27: 1519-1524.

BETTINGER, P. & KELLOGG, L.D. 1993: Residual stand damage from cut-to-length thinning of second-growth timber in the Cascade Range of western Oregon. Forest Products Journal, 43: 59-64.

BORCHERT, H. 2008: Bodenschutz bei der Holzernte. LWF aktuell, 67: 3-4.

BORCHERT, H. ; BLASCHKE, M. & METAN, M. 2008: Wurzelverletzungen unter Raupe und Rad. LWF aktuell 67: 16-18.

BORT, U. ; MAHLER, G. & PFEIL, C. 1993: Mechanisierte Holzernte. Wechselwirkungen von Erschliessungsdichte, Pfleglichkeit und Betriebserfolg. Forsttechnische Informationen, 11/1993: 121-124.

BOWERING, M ; LEMAY, V. & MARSHALL, P. 2006: Effects of forest roads on the growth of adjacent lodgepole pine trees. Canadian Journal of Forest Research, 36: 919-929.

BRAIS, S. 2001: Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. Soil Science Society of America Journal, 65: 1263-1271.

BREDBERG, C.J. & WÄSTERLUND, I. 1983: Wurzel- und Bodenschäden durch Fahrzeuge. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 102: 86-98.

BUTIN, H. 1989: Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Diagnose – Biologie – Bekämpfung. 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage. 216 S.

BUTORA, A. & SCHWAGER, G. 1986: Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Bericht Nr. 288. 51 S.

CHEATLE, R.J. 1991: Tree growth on a compacted oxisol. Soil & Tillage Research, 19: 331-344.

CLAYTON, J.L. ; KELLOGG, G. & FORRESTER, N. 1987: Soil disturbance-tree growth relations in central Idaho clearcuts. USDA Forest Service, Intermountain Research Station. Research Note INT-372. 6 p.

COCHRAN, P.H. & BROCK, T. 1985: Soil compaction and initial height growth of planted ponderosa pine. USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Research Note PNW-434. 4 p.

CORNS, I.G.W. 1988: Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. Canadian Journal of Forest Research, 18: 75-84.

DICKERSON, B.P. 1976: Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. Soil Science Society of America Journal, 40: 965-966.

DVORÁK, J 2006: Baumschäden nach dem Einsatz von Harvestern mittlerer Leistungsstärke. Forsttechnische Informationen 1+2/2006: 5-7.

EGLI, S. & BRUNNER, I. 2005: Mykorrhiza. Eine faszinierende Lebensgemeinschaft im Wald. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Merkblatt für die Praxis Nr. 35, 2. Auflage. 8 S.

EL ATTA, H. A. & HAYES, A. J. 1987: Decay in Norway spruce caused by *Stereum sanguinolentum* Alb. & Schw. Ex Fr. Developing from extraction wounds. Forestry, 60: 101-111.

ERNI, V. ; LEMM, R. ; FRUTIG, F. ; BREITENSTEIN, M. ; RIECHSTEINER, D. ; OSWALD, K. & THEES, O. 2003: HeProMo - Produktivitätsmodelle für Holzerntearbeiten. Windows-Software. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

FICKLIN, R.L. ; DWYER, J.P. ; CUTTER, B.E. & DRAPER, T. 1997: Residual tree damage during selection cuts using two skidding systems in the Missouri Ozarks. In: PALLARDY, S.G. ; CECICH, R.A. ;

GARRETT, H.G. & JOHNSON, P.S. (eds.): Proceedings of the 11th Central Hardwood Forest Conference; Columbia, MO; March 23-26, 1997. General Technical Report NC-188. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station: 36-46.

FJELD, D. & GRANHUS, A. 1998: Injuries after selection harvesting in multi-stored spruce stands – the influence of operating systems and harvest intensity. Journal of Forest Engineering, 9: 33-40.

FORSTUNTERNEHMER SCHWEIZ 2012a: Maschinentarif 2012. 3 S.
http://www.fus-efs.ch/startseite/infos/tarife/

FORSTUNTERNEHMER SCHWEIZ 2012b: Regielöhne 2012. 1 S.
http://www.fus-efs.ch/startseite/infos/tarife/

FREY, B. 2010: Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 161: 498-503.

FREY, B. ; KREMER, J. ; RÜDT, A. ; SCIACCA, S. ; MATTHIES, D. & LÜSCHER, P. 2009: Compaction of forest soil with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. European Journal of Soil Biology, 45: 312-320.

FRIES, J. 1975: Ökologische Aspekte der mechanisierten Durchforstung. Der Forst- und Holzwirt, 30: 315-320.

FROEHLICH, H.A. 1979: Soil compaction from logging equipment: Effects on growth of young ponderosa pine. Journal of Soil and Water Conservation, 34: 276-278.

FROEHLICH, R.C. ; COWLING, E.B. ; COLLICOTT, L.V. & DELL, T.R. 1977: Fomes annosus reduces height and diameter growth of planted slash pine. Forest Science, 23: 299-306.

FROEHLICH, H.A. & MCNABB, D.H. 1984: Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests. In: STONE, E.L. (Ed.): Forest soils and treatment impacts. Proceedings of sixth North American forest soils conference. University of Tennessee, Knoxwille. June 1983: 159-192.

FROEHLICH, H.A. ; MILES, D.W.R. & ROBBINS, R.W. 1985: Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. Soil Science Society of America Journal, 49: 1015-1017.

FROEHLICH, H.A. ; MILES, D.W.R. & ROBBINS, R.W. 1986: Growth of young *Pinus ponderosa* and *Pinus contorta* on compacted soil in central Washington. Forest Ecology and Management, 15: 285-294.

FRUTIG, F. 2011: Persönliche Mitteilung. Dezember 2011.

FRUTIG, F. 2012: Persönliche Mitteilung. Januar 2012.

GOMEZ, A. ; POWERS, R.F. ; SINGER, M.J. & HORWATH, W.R. 2002: Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in Californias's Sierra Nevada. Soil Science Society of America Journal, 66: 1334-1343.

GREACEN, E.L. & SANDS, R. 1980: Compaction of forest soil. A review. Australian Journal of Soil Research, 18: 163-189.

GRIGAL, D.F. 2000: Effects of extensive forest management on soil productivity. Forest Ecology and Management, 138: 167-185.

HAMBERGER, J. 2003: Wie Mechanisierung und Umweltvorsorge die Forstwirtschaft veränderten. LWF aktuell 39: 33-66.

HAN, H.S. & KELLOGG, L.D. 2000: Damage characteristics in young Douglas-fir stands from commercial thinning with four timber harvesting systems. Western Journal of Applied Forestry, 15: 27-33.

HAUCK, B. 2001: Aspekte des Bodenschutzes bei der Entwicklung, beim Kauf und dem Einsatz von Forstmaschinen. Forsttechnische Informationen 4/2001: 41-46.

HATCHELL, G.E. 1981: Site preparation and fertilizer increase pine growth on soils compacted in logging. Southern Journal of Applied Forestry, 5: 79-83.

HATCHELL, G.E. ; RALSTON, C.W. & FOIL, R.R. 1970: Soil disturbance in logging. Effects on soil characteristics and growth of loblolly pine in the Atlantic coastal plain. Journal of Forestry, 68: 772-775.

HEINIMANN, H.R. 2003: Forstliche Verfahrenstechnik I. Grundzüge und Rahmenbedingungen technischer Produktionssysteme. Vorlesungsunterlagen. Professur für forstliches Ingenieurwesen, ETH Zürich.

HELMS, J.A. & HIPKIN C. 1986: Effects of soil compaction on tree volume in a California ponderosa pine plantation. Western Journal of Applied Forestry, 1: 121-124.

HENINGER, R. ; SCOTT, W. ; DOBKOWSKI, A. ; MILLER, R. ; ANDERSON, H. & DUKE, S. 2002: Soil disturbance and 10-year growth response of coast Douglas-fir on nontilled and tilled skid trails in the Oregon Cascades. Canadian Journal of Forest Research, 32: 233-246.

HEITZMAN, E. & GRELL, A.G. 2002: Residual tree damage along forwarder trails from cut-to-length thinning in Maine spruce stands. Northern Journal of Applied Forestry, 19: 161-167.

HILDEBRAND, E.E. 1983a: Mechanisierte Holzernte und Bodenstruktur. Allgemeine Forstzeitschrift, 42: 1131-1132, 1141-1143.

HILDEBRAND, E.E. 1983b: Der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 102: 111-125.

HILDEBRAND, E.E. 2003: Bodenbelüftung und Durchwurzelung. FVA-Kolloquium Befahrung von Waldböden, Technikfolgenabschätzung und Erschliessungssysteme am 8./9. 7. 2003. 5 S.

HILSCHER, A. 1964: Ertragsminderung durch Rotfäule an Fichtenbeständen. Ein Beitrag zur betriebswirtschaftlichen Beurteilung der Folgen von Rotwildschälung. Forstarchiv, 35: 5-14.

HORN, R. ; VOSSBRINK, J. ; PETH, S. & BECKER, S. 2007: Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. Forest Ecology and Management, 248: 56-63.

ISOMÄKI, A. 1986: Effects of line corridors on the development of edge trees. Folia Forestalia, 678. 30 p. (in Finnisch mit englischer Zusammenfassung).

ISOMÄKI, A. & KALLIO, T. 1974: Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of spruce (*Picea abies*). Acta Forestalia Fennica, 136: 1-25.

ISOMÄKI, A. & NIEMISTÖ, P. 1990: Effect of strip roads on the growth and yield of young spruce stands in southern Finland. Folia Forestalia, 756. 36 p. (in Finnisch mit englischer Zusammenfassung).

JANSSON, K.J. & WÄSTERLUND, I. 1999: Effect of traffic by lightweight forest machinery on the growth of young *Picea abies* trees. Scandinavian Journal of Forest Research, 14: 581-588.

JÄGHAGEN, K. & LAGESON, H. 1996: Timber quality after thinning from above and below in stands of *Pinus sylvestris*. Scandinavian Journal of Forest Research, 11: 336-342.

KANTON AARGAU, ABTEILUNG WALD 2011: Empfehlungen für den Bodenschutz im Wald. 11 S.

KOCH, J. & THONGJIEM, N. 1989: Wound and rot damage in Norway spruce following mechanical thinning. Opera Botanica, 100: 153-162.

KORTEN, S. 2004: Holzernteschäden an Fichten-Buchen-Verjüngung – Ausmass, Verteilung, Prognose und Bewertungsansätze. Dissertation Technische Universität München. 177 S.

KOZLOWSKI, T.T. 1969: Tree physiology and forest pests. Journal of Forestry, 67: 118-123.

KOZLOWSKI, T.T. 1999: Soil compaction and growth of woody plants. Scandinavian Journal of Forest Research, 14: 596-619.

KRAMER, H. 1958: Wegebreite und Zuwachs im angrenzenden Bestand. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 129: 121-134.

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. Forsttechnische Informationen 1+2/1999: 13-16.

KREMER, J. ; WOLF, B. ; MATTHIES, D. & BORCHERT, H. 2010: Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). LWF Merkblatt 22. 4 S.

KUENNEN, L. ; EDSON, G. & TOLLE, T.V. 1979: Soil compaction due to timber harvest activities. USDA Forest Service, Northern Region. Soil, Air and Water Notes 79: 1-5.

KUTSCHERA, L. & LICHTENEGGER, E. 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. 6. Band der Wurzelatlas-Reihe. Leopold Stocker Verlag Graz: 154-164.

LACEY, S.T. & RYAN, P.J. 2000: Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. Forest Ecology and Management, 138: 321-333.

LAGESON, H. 1997: Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. Journal of Forest Engineering, 8: 7-14.

LANDBECK, H. 1965: Wegebreite und Randwirkung bei der Kiefer. Archiv für Forstwesen, 14: 41-59.

LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2004: Richtlinie Feinerschliessung. 27 S.

LIMBECK-LILIENAU, B. 2003: Residual stand damage caused by mechanized harvesting systems. In: Proceedings of the Austro 2003 meeting: “High tech forest operations for mountainous terrain”. 5-9 october 2003, Schlaegl, Austria. 11 p.

LOCKABY, B.G. & VIDRINE, C.G. 1984: Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. Southern Journal of Applied Forestry, 8: 109-112.

LÖFFLER H. 1975: Zur Ausbreitung der Wundfäule in der Fichte. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 94: 175-183.

LÜSCHER, P. ; SCIACCA, S. & THEES, O. 2008: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. Vorgehen und Lösungsansätze zum Schutz der Bodenfruchtbarkeit. LWF akuell, 67: 19-21.

LÜSCHER, P. ; FRUTIG, F. ; SCIACCA, S. ; SPJEVAK, S. & THEES, O. 2009a: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Merkblatt für die Praxis Nr. 45. 12 S.

LÜSCHER, P. ; BORER, F. & BLASER, P. 2009b: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: THEES, O. & LEMM, R. (Hrsg.): Management zukunftsfähige Waldnutzung. Beiträge aus einem Forschungsprogramm für die Schweizer Waldwirtschaft. Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 261-270.

MÄKINEN, H. ; ISOMÄKI, A. & HONGITO, T. 2006: Effect of half-systematic and systematic thinning on the increment of Scots pine and Norway spruce in Finland. Forestry, 79: 103-121.

MÄKINEN, H. ; HALLAKSELA, A.M. & ISOMÄKI, A. 2007: Increment and decay in Norway spruce and Scots pine after artificial logging damage. Canadian Journal of Forest Research, 37: 2130-2141.

MCNEEL, J.F. & BALLARD, T.M. 1992: Analysis of site stand impacts from thinning with a harvester-forwarder system. Journal of Forest Engineering, 4: 23-29.

MENG, W. 1978: Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmass und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Band 53. 159 S.

MILLER R.E. ; SCOTT, W. & HAZARD, J.W. 1996: Soil compaction and conifer growth after tractor yarding at three coastal Washington locations. Canadian Journal of Forest Research, 26: 225-236.

MOEHRING, D.M & RAWLS, I.W. 1970: Detrimental effects of wet weather logging. Journal of Forestry, 68: 166-167.

MORAT, J. ; FORBRIG, A. & GRAUPNER, J. 1998: Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der BRD. KWF-Bericht Nr. 25. 109 S.

MURPHY, G. 1983: *Pinus radiata* survival, growth and form four years after planting off and on skid-trails. New Zealand Journal of Forestry, 28: 184-193.

MURPHY, G. ; FIRTH, J.G. & SKINNER, M.F. 1997: Soil disturbance effects on *Pinus radiata* growth during the first 11 years. New Zealand Forestry, 47: 27-30.

MURPHY, G. ; FIRTH, J.G. & SKINNER, M.F. 2004: Long-term impacts of forest harvesting related soil disturbance on log product yields and economic potential in New Zealand forest. Silva Fennica, 38: 279-289.

NEMESTOTHY, N. 2009: Boden unter Druck – sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? BWF-Praxisinformation 19: 9-13.

PARKER, A.K. & JOHNSON, A.L.S. 1960: Decay associated with logging injury to spruce and balsam in the Prince George region of British Columbia. The forestry chronicle, 36: 30-45.

PERRY, T.O. 1964: Soil compaction and loblolly pine growth. Tree Planters' Notes, 67: 9.

PFISTER, R.D. 1969: Effect of roads on growth of western white pine plantations in northern Idaho. USDA Forest Service. Research Paper INT-65. 8 p.

SAUTER, U.H. & BUSMANN, C. 1994: Bestandesschäden bei der Durchforstung von Fichtenbeständen mit Kranvollerntern unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rückegassenabstände. Forsttechnische Informationen, 12: 137-141.

SCHACK-KIRCHNER H. 2010: 30 Jahre Forschung zur Bodenverformung durch Forstmaschinen in Deutschland. Rückblick und Perspektiven. Forsttechnische Informationen 9+10/2010: 4-6.

SCHACK-KIRCHNER, H. ; FENNER, P.T. & HILDEBRAND, E.E. 2007: Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest. Soil Use and Management, 23: 286-293.

SCHÄFFER, J. ; GAERTIG, T. & VON WILPERT, K. 2002: Bodenschäden durch Befahrung. Poster. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Freiburg.

SCHÜTZ, J.P. 2003: Waldbau I. Die Prinzipien der Waldnutzung und der Waldbehandlung. Skript zur Vorlesung. Professur für Waldbau, ETH Zürich.

SCHÖNHAR, S. 1975: Untersuchungen über den Befall rückegeschädigter Fichten durch Wundfäulepilze. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 146: 72-75.

SCHÖNHAR, S. 1979: Über den Befall beim Holzrücken verwundeter Fichtenwurzeln durch Rotfäulepilze. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 150: 76-78.

SCHWEIZER, S. 2012: Schweizerischer Forstkalender 2012. Verlag Huber Frauenfeld: 190.

SEABLOM, T.J. & REED, D.D. 2005: Assessment of factors contributing to residual tree damage from mechanized harvesting in northern hardwoods. Northern Journal of Applied Forestry, 22: 124-131.

SEIFERT, T. 2007: Simulation der Ausbreitung von Rotfäule im Fichtenstamm in Wechselwirkung mit dem Baumwachstum. Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 21.-23. Mai 2007: 29-42.

SHEPPERD, W.D. 1993: The effect of harvesting activities on soil compaction, root damage, and suckering in Colorado aspen. Western Journal of Applied Forestry, 8: 62-66.

SKINNER, M.F. & BOWEN, G.D. 1974: The penetration of soil by mycelial strands of ectomycorrhizal fungi. Soil Biology and Biochemistry, 6: 57-61.

SLAMKA, M. & RADOCHA M. 2010: Results of harvesters and forwarders operations in Slovakian forests. Lesnícky časopis – Forestry Journal, 56: 1-15.

SMITH, R.B. & WASS, E.F. 1979: Tree growth on and adjacent to contour skidroads in the subalpine zone, southeastern British Columbia. Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre. BC-R-2. 26 p.

SPELLMANN, H. & NAGEL, J. 2000: Feinerschliessung in Nadelbaumbeständen aus waldwachstumskundlicher Sicht. Forst und Holz, 55: 446-451.

SPJEVAK, S. & THEES, O. 2009: Konzeptionelle Überlegungen zum Management des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte. In: THEES, O. & LEMM, R. (Hrsg.): Management zukunftsfähige Waldnutzung. Beiträge aus einem Forschungsprogramm für die Schweizer Waldwirtschaft. Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 271-291.

STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2006: Holzerntetechnologien. Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen. 44 S.

STEMPSKI, W. ; GRODECKI, J. & WUDARCZYK, M. 2010: Effects of strip roads on the growth and development of neighbouring trees. Sylwan, 154: 259-266 (in Polnisch mit englischer Zusammenfassung).

STRATMANN, H. 1986: Bestandesfeinerschliessung, Zuwachs, Risiko. Forst und Holz, 41: 204-207.

THOMPSON, S.R. ; UTZIG, G.F. & CURRAN, M.P. 1990: Growth of juvenile Engelmann spruce on skidroads (ESSFc, Nelson Forest Region). British Columbia Ministry of Forests, Nelson, B.C. Research Summary No. 001. 2 p.

USG 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983. SR 814.01. Schweizerische Eidgenossenschaft. 44 S.

VBBo 1998: Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1. Juli 1998. SR 814.12. Schweizerische Eidgenossenschaft. 12 S.

VEPRASKAS, M.J. 1988: Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils. Soil Science Society of America Journal, 52: 1117-1121.

VON AUFSESS, H. 1978: Beobachtungen über die Auswirkung moderner Durchforstungsverfahren auf die Entstehung von Wundfäulen in jungen Fichtenbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 97: 141-156.

VOORHEES, W.B. & SHARRATT, B.S. 1997: Soil compaction amelioration by freezing and thawing: a review. USDA Agric. Research Station, Draft Paper.

VORA, R.S. 1988: Potential soil compaction forty years after logging in northeastern California. The Great Basin Naturalist, 48: 117-120.

WAGNER 2011: Stücksätze Harvesteraufarbeitung. Tabelle.

WALDWIRTSCHAFT SCHWEIZ 2012: Forstliche Betriebsabrechnung Waldbewirtschaftung Periode 2010 Betriebe Mittelland.

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. (in Swedisch mit englischer Zusammenfassung.

WÄSTERLUND, I. 1985: Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. Forest Ecology and Management, 11: 171-189.

WÄSTERLUND, I. 1988: Damages and growth effects after selective mechanical cleaning. Scandinavian Journal of Forest Research, 3: 259-272.

WERT, S. & THOMAS, B.R. 1981: Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. Soil Science Society of America Journal, 45: 629-632.

WHITNEY, R.D. 1991: Quality of eastern white pine 10 years after damage by logging. The Forestry Chronicle, 67: 23-26.

WILLIAMSON, J.R. & NEILSEN, W.A. 2000: The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. Canadian Journal of Forest Research, 30: 1196-1205.

YILMAZ, E. ; MAKINECI, E. & DEMIR, M. 2010: Skid road effects on annual ring widths and diameter increment of fir (*Abies bornmulleriana* Mattf.) trees. Transportation Research, 15: 350-355.

Anhang

A Glossar

BHD: Siehe Brusthöhendurchmesser

Bogiebänder: Raupenartige Bänder, welche über die Räder der Tandemachsen von Forstmaschinen aufgezogen werden; es gibt Bänder, welche die Steigfähigkeit der Maschinen verbessern und tragende Bänder, welche einer bodenschonenderen Befahrung dienen

Bonität: Mass für die Standortsgüte in der Forstwirtschaft; die Bonität entspricht der Höhe der 100 stärksten Bäume je Hektare (Oberhöhe) von gleichaltrigen, einschichtigen Beständen im Alter 50

Brusthöhendurchmesser, BHD: Durchmesser eines Baumes auf 1.3 Meter Höhe

Derbholz: Volumen von Stamm und Ästen (mit Rinde) mit einem Durchmesser > 7 cm

Erntekostenfreier Erlös: Erlös abzüglich der Erntekosten

Feinerschliessung: Netz aus Maschinenwegen, Rückegassen und Seillinien (ohne Waldstrassen)

Forwarder: Tragerückeschlepper mit Kran; Fahrzeug mit welchem das Holz gerückt wird

Gesamtwuchsleistung: Entspricht der Summe des Vorrats in einem bestimmten Alter und allen bis zu diesem Alter durchgeführten Nutzungen

Harvester: Siehe Vollernter

Kernfäule: Fäule welche sich, ausgehend von den Baumwurzeln, im Stamm nach oben ausbreitet.

Kontaktflächendruck: Druck pro Auflagefläche

Oberboden: Oberste humushaltige Bodenhorizonte inklusive der organischen Auflage

Räumung: Vollständiges Entfernen des Altbestandes

Rücken: Transport des Holzes von den Rückegassen bis zum Lagerplatz an der Waldstrasse

Rückegasse: Unbefestigte, bestockungsfreie Linie ohne bauliche Massnahmen, auf welchen sich Forstmaschinen bewegen

Rückegassenabstand: Entfernung von Gassenmitte zu Gassenmitte

Stammderbholz: Stammvolumen mit einem Durchmesser > 7 cm (mit Rinde)

Transportgrenze: Zone innerhalb eines Bestandes, die am weitesten von einer Erschliessung entfernt ist

Umtriebszeit: Zeitraum zwischen Begründung und Räumung eines Bestandes

Unterboden: Alle Minderalbodenhorizonte ohne den humosen A-Horizont

Vollernter, Harvester: Maschine mit der Bäume vollmechanisiert gefällt, entastet und zu Sortimenten zugeschnitten werden können

Vorliefern, Vorrücken: Rücken des Holzes vom Bestand bis an die Rückegasse

Waldstrasse: Lastwagenbefahrbarer Weg, dient der Basiserschliessung von Wäldern

Wundfäule: Fäule, welche durch an oberirdisch entstandenen Wundstellen eindringende Fäulniserreger verursacht wird

Zufällen: Motormanuelles Fällen eines Baumes in Richtung der nächsten Rückegasse

B Maschinen- und Personaltarife für die Berechnung der Holzerntekosten

Tabelle 38: Verwendete Maschinentarife zur Berechnung der Holzerntekosten (FORSTUNTERNEHMER SCHWEIZ 2012a).

Maschinentarif 2012 (ohne MWSt)

Rückefahrzeuge und Schlepper

Stundenansätze (ohne Fahrer, aber inkl. Funk-Fernsteuerung)			
Typ	Leistung	Forstausrüstung komplett mit Winde	Fr./h
Forsttraktor	50 KWh	Doppel-Trommel-Winde 6 t	85 - 90
	60 KWh	Doppel-Trommel-Winde 8 t	95 - 100
Spezialrückeschlepper	60 KWh	Doppel-Trommel-Winde 8 t Rückezange	105 - 110 15 - 25

Forwarder

Stundenansätze (inklusive Fahrer, aber ohne Transportkosten der Maschine)		
	Nutzlast	Fr./h
Forwarder	≤ 8 t ≤ 10 t ≤ 12 t	195 - 205 200 - 210 205 - 215

Prozessoren

Stundenansätze (inklusive Fahrer und Transportkosten der Maschine)		
	Verarbeitungsdimension	Fr./h
Vollernter	≤ 25 cm ≤ 40 cm ≤ 60 cm > 60 cm	255 - 270 305 - 320 390 - 405 470 - 490
Baggerprozessor	60 cm	245 - 270

Holzernte am Hang

	Fr./h
Windensicherung für Forwarder / Harvester	50 - 80

Kostenannahme für Tarif 2012

Lohnkosten Maschinenfürer (gemäss Regietarif FUS) Fr. 86.00	**Gebühren und Versicherungen** • Gebühren (Kontrollschild) Fr. 100 • Haftplicht Fr. 290 • Vollkasko 2.8 % (in % aufgrund Anschaffungspreis) • Feuer und Elemetarschaden in Vollkasko integriert
Betriebsstoffe • Diesel Fr. 1.80/l • Motorenöl (Durchschnittswert) Fr. 6.50/l • Hydrauliköl (Bioöl) Fr. 8.50/l	
Verzinsung Fremdkapital 6 %	

MT Ansätze 2012.doc 20.11.11

Tabelle 39: Verwendete Löhne zur Berechnung der Holzerntekosten (FORSTUNTERNEHMER SCHWEIZ 2012b).

Regielöhne 2012 (exklusive MWSt)

Empfohlene Durchschnittswerte nach Qualifikations- und Funktionsstufe

Qualifikation/Funktion	Regieansätze VSFU Fr./h
Betriebsleiter	117
Förster / Betriebsleiter Stv.	108
Vorarbeiter	94
Maschinist / Spezialist	86
Forstwart*	78*
Waldarbeiter	69
Lehrling	45

**) die Unternehmer sind aufgefordert, tatsächlich diesen Tarif zu verrechnen*

Travaux en régie 2012 (TVA exclue)

Moyennes recommandées selon la qualification et la fonction

Qualification/fonction	Tarif de régie ASEFOR Fr./h
Chef d'entreprise	117
Forestier / Chef d'entrepr. adj.	108
Chef d'équipe	94
Machiniste / Spécialiste	86
Forestier-bûcheron*	78*
Bûcheron sans formation	69
Apprenti	45

**) les entrepreneurs sont invités à appliquer effectivement ce tarif*

Tariffe 2012 (IVA esclusa)

Valori medi consigliati secondo la qualifica e la funzione

Qualifica/funzione	Tariffe ASIF Fr./h
Capo di azienda	117
Forestale / Capo di azienda suppl.	108
Caposquadra	94
Machinista / Specialista	86
Selvicoltore*	78*
Boscaiolo	69
Apprendista	45

**) le imprese sono tenute, a tutti gli effetti, ad applicare la tariffa*

RL Ansätze 2012.doc 20.11.11

C Holzpreise für die Berechnung der Holzerlöse

Für die Berechnung des finanziellen Ertrags durch den Holzverkauf wurden die Verkaufsmengen und Holzpreise aus der forstlichen Betriebsabrechnung der Forstbetriebe des Mittellandes für das Jahr 2010 verwendet (Tabelle 40). Dabei wurden nur die Daten aus der Liegendnutzung gebraucht. Einen durchschnittlichen Nadelholzpreises erhält man, in dem die Anteile des Nadelholzes an den Holzverkaufsmengen berechnet werden. Schliesslich kann ein gemittelter Nadelholzpreis (90 SFr./m^3) berechnet werden (Tabelle 41). Der Verwendung eines solchen durchschnittlichen Holzverkaufspreises liegt die Annahme zugrunde, dass die Daten in Tabelle 40 aus einer genügend grosse Anzahl von Forstbetrieben stammt, so dass der Anteil der einzelnen Sortimente an der gesamten, verkauften Holzmenge einigermassen gleich dem Anteil der Sortimente ist, wie sie bei einem Waldbestand während einer ganzen Umtriebszeit anfallen.

Tabelle 40: Betriebsabrechnung Waldbewirtschaftung der Forstbetriebe des Mittellandes (WALDWIRTSCHAFT SCHWEIZ 2012).

Betrieb: TBN-2010-MTO - TBN 2010 Mittelland definitiv (64) — **Waldbewirtschaftung** — Periode: 2010

Betriebsteil/e: - - Kein BT

Prod. Waldfläche : 35349.48 ha

Kostenträger: Alle Kostenträger der Waldbewirtschaftung

Periode: 01.01.2010 bis 31.12.2010

	Nutzung inkl. Lagerränderung		Liegendnutzung				Stehendnutzung		Lager - veränderung
			Liegendverkauf		Eigenverbrauch				
Struktur der Holzverkäufe	m3	%	m3	Fr./m3	m3	Fr./m3	m3	Fr./m3	m3
Nadelstammholz	127'794.69	40	127'379.61	104	79.51	63	348.38	27	-12.81
Laubstammholz	27'360.71	9	27'126.94	92	10.00	120	170.25	20	53.52
Stammholzgesamt	**155'155.40**	**49**	**154'506.55**	**102**	**89.51**	**70**	**518.63**	**24**	**40.71**
Nadelindustrieholz	25'872.45	8	23'110.02	51	2.40	60	1'976.99	3	783.04
Laubindustrieholz	15'532.01	5	15'342.17	51	153.00	20	327.54	7	-290.70
Industrieholz gesamt	**41'404.46**	**13**	**38'452.19**	**51**	**155.40**	**20**	**2'304.53**	**4**	**492.34**
Nadelenergie-Stück- und Langhol	1'976.65	1	1'530.99	48	365.36	48	61.90	14	18.40
Nadelenergieholz-Hackschnitzel	18'542.35	6	7'868.43	56	10'902.87	48	163.00		-391.95
Laubenergie-Stück- und Langholz	45'778.03	14	37'000.81	66	6'860.16	62	1'212.08	11	704.98
Laubenergieholz-Hackschnitzel	53'290.71	17	15'576.26	70	32'418.86	50	1'132.79	5	4'162.80
Energieholz gesamt	**119'687.74**	**38**	**61'976.49**	**66**	**50'647.26**	**61**	**2'569.77**	**8**	**4'484.23**
übr. Nadelholzsortimente	121.04	0	114.04	48	7.00	50			
übr. Laubholzsortimente	191.14	0	88.14	4	103.00	45			
übrige Sortimente gesamt	**312.18**	**0**	**202.18**	**29**	**110.00**	**47**			
Total	**318'459.78**	**100**	**256'137.41**	**85**	**50'902.18**	**61**	**5'383.00**	**7**	**5'027.28**

Nadelholzanteil 55% Laubholzanteil 45%

Kennziffern der verschiedenen Tätigkeiten	Kosten		Zeiteinsatz		Liegendverkäufe		Stehendverkäufe	
	Fr./ha	%	Std Total	Std/ha	Fr./m3 netto	Std/m3	Fr./m3	Std/m3
Strassenunterhalt	93.83	9	13'795	0.39	10.48	0.04	10.48	0.04
Verbauungsunterhalt	0.68	0	230	0.01	0.08	0.00	0.08	0.00
Unterhalt	**94.52**	**9**	**14'024**	**0.40**	**10.56**	**0.04**	**10.56**	**0.04**
Bestandesbegründung	24.29	2	8'138	0.23	2.71	0.03	2.71	0.03
Jungwaldpflege	110.54	10	62'415	1.77	12.35	0.20	12.35	0.20
Forstschutz	5.86	1	2'778	0.08	0.65	0.01	0.65	0.01
Wildschadenverhütung	11.50	1	5'097	0.14	1.28	0.02	1.28	0.02
Schlagräumung und Schlagpflege	17.62	2	7'041	0.20	1.97	0.02	1.97	0.02
Anzeichnen	13.34	1	6'404	0.18	1.49	0.02	1.49	0.02
Aufsicht 1. PS	7.15	1	2'010	0.06	0.80	0.01	0.80	0.01
1. Produktionsstufe	**190.31**	**18**	**93'882**	**2.68**	**21.28**	**0.30**	**21.28**	**0.30**
Holzernte	501.31	48	150'615	4.26	56.97	0.48		
Transport zum Lagerort	1.00	0	204	0.01	0.11	0.00		
Holzschutz	3.92	0	377	0.01	0.45	0.00		
Transport ab Lagerort	6.15	1	367	0.01	0.70	0.00		
Aufsicht 2. PS	16.95	2	6'085	0.17	1.89	0.02	1.89	0.02
2. Produktionsstufe	**529.33**	**50**	**157'648**	**4.46**	**60.12**	**0.51**	**1.89**	**0.02**
Aktivitäten für Natur	10.61	1	3'725	0.11	1.19	0.01	1.19	0.01
Aktivitäten für Erholung	30.12	3	10'452	0.30	3.36	0.03	3.36	0.03
Aktivitäten für Schutz	10.57	1	1'296	0.04	1.18	0.00	1.18	0.00
Übrige Tätigkeiten	25.78	2	6'419	0.18	2.88	0.02	2.88	0.02
Übrige Tätigkeiten	**77.08**	**7**	**21'893**	**0.62**	**8.61**	**0.07**	**8.61**	**0.07**
Verwaltungstätigkeiten	161.78	15	6'394	0.18	18.07	0.02	18.07	0.02
Verwaltungstätigkeiten	**161.78**	**15**	**6'394**	**0.18**	**18.07**	**0.02**	**18.07**	**0.02**
Total	**1'053.01**	**100**	**293'842**	**8.31**	**118.62**	**0.94**	**60.39**	**0.45**

Erfolg in Waldbewirtschaftung		Liegendnutzung	Stehendverkäufe
	Fr./ha	Fr./m3	Fr./m3
Holzerlös netto	697.04	79.08	7.44
Beiträge	169.94	18.98	18.98
übrige Erlöse	52.66	5.88	5.88
Gesamterlöse	919.64	103.95	32.30
Gesamtkosten	1'053.01	118.62	60.39
Gesamterfolg	-133.37	-14.67	-28.09

Verhältnis der Aufwandsarten	
Personalkosten	51%
Fahrzeuge, Maschinen, Werkzeuge	6%
Material und Handelswaren	5%
Unternehmerleistungen	24%
Leistungen Gemeinde oder Revier	4%
Übrige Kosten	2%
Kalkulatorische Kosten	8%
Verbrauch eigener Waldprodukte	0%

10.01.2012 10:40:13 — Kostensatz basiert auf: Berechnete Ist-Sätze — V. 2.1.1 - 1 / 1

Tabelle 41: Berechnung des für die Modellierung verwendeten durchschnittlichen Nadelholzpreises.

	Liegendnutzung					
	Liegendverkauf		Eigenverbrauch		Total Liegendnutzung	
Struktur der Holzverkäufe	m^3	$Fr./m^3$	m^3	$Fr./m^3$	m^3	$Fr./m^3$
Nadelstammholz	127'379.61	104	79.51	63	127'459.12	104
Laubstammholz	27'126.94	92	10.00	120	27'136.94	92
Stammholz gesamt	**154'506.55**	**102**	**89.51**	**70**	**154'596.06**	**102**
Nadelindustrieholz	23'110.02	51	2.40	60	23'112.42	51
Laubindustrieholz	15'342.17	51	153.00	20	15'495.17	51
Industrieholz gesamt	**38'452.19**	**51**	**155.40**	**20**	**38'607.59**	**51**
Nadelenergie-Stück- und Langholz	1'530.99	48	365.36	48	1'896.35	48
Nadelenergieholz-Hackschnitzel	7'868.43	56	10'902.87	48	18'771.30	51
Laubenergie-Stück- und Langholz	37'000.81	66	6'860.16	62	43'860.97	65
Laubenergieholz-Hackschnitzel	15'576.26	70	32'418.86	50	47'995.12	56
Energieholz gesamt	**61'976.49**	**65**	**50'547.25**	**51**	**112'523.74**	**59**
übrige Nadelholzsortimente	114.04	48	7.00	50	121.04	48
übrige Laubholzsortimente	88.14	4	103.00	46	191.14	27
übrige Sortimente gesamt	**202.18**	**29**	**110.00**	**47**	**312.18**	**35**
Total	**255'137.41**	**85**	**50'902.16**	**51**	**306'039.57**	**79**
Total Nadelholz	**160'003.09**	**93**	**11'357.14**	**48**	**171'360.23**	**90**

Für die Berechnung der Wertverluste infolge des geringeren Holzerlöses beim Verkauf des von Fäule befallenem Holz wurde angenommen, dass dieses Holz die Qualität D hat (Tabelle 42). In der Annahme, dass nicht von Fäule befallenes Holz einen Holzpreis hat, welcher einem Durchschnitt der Holzpreise für die verschiedenen Qualitäten entspricht, hat Faulholz einen etwa um 40 % geringeren Wert (Tabelle 43). Für die Berechnungen wurden die Holzpreise für Fichte Trämel verwendet.

Tabelle 42: Rundholzpreise für die Berechnung der Holzpreises von Fäule befallenes Holz (www.waldsg.ch).

Rundholzpreise Stand Okt. 2011

Empfehlung der Waldwirtschaftsverbände

St. Gallen & Liechtenstein / Thurgau / Schaffhausen
Glarus / Appenzell AR/AI / Zürich

(gemäss den Beschlüssen der Vorstände im Oktober 2011)

alle Preise in Fr. / FMO, ab Waldstrasse

Das FSC-Label soll auf der Massliste und in der Rechnung nur erscheinen, wenn ein Zuschlag gewährt wird.
Empfohlener Zuschlag Fr. 3.- pro FMO für alles Nutzholz.

Fichte

Sortiment	Klasse	⌀	AB	B	C	D
Trämel	1 b	15-19		70	55	60
(L1)	2 a	20-24		105	80	60
	2 b	25-29		115	90	60
	3	30-39	160	115	95	60
	4	40-49	190	115	95	60
	5	50-59	210	115	85	60
	6+	60+	220	115	85	60
Langholz +	3	30-39		115	95	60
Mittellangh.	4	40-49		115	95	60
(L3 + L2)	5	50-59		115	85	60
	6+	60 +		115	85	60

Tanne:	10 bis 15 Franken tiefer	(gegenüber Fichte)
Douglasie:	mindestens Fr. 40-60.- höher	(gegenüber Fichte)

Wesentliche Preisänderungen werden über die Webseiten www.waldsg.ch oder www.zuerlwald.ch bekannt gegeben.

Föhre

Sortiment	Klasse	⌀	A	B	C	D
(L1+L2)	2a	20-24		70	60	60
	2b	25-29		70	60	60
	3 a	30-34	180	80	70	60
	3 b	35-39	180	90	70	60
	4	40-49	220	130	70	60
	5+	50+	240	150	70	60

Lärche

Sortiment	Klasse	⌀	A	B	C	D
Trämel	2 a	20-24		90	70	70
(L1, L2,L3)	2 b	25-29		160	130	70
	3a	30-34		190	140	70
	3b	35-39	300	190	140	70
	4	40-49	350	250	150	70
	5 +	50+	400	300	150	70

Buche

Klasse	⌀	A	B	C	D
3 a	30-34			60	60
3 b	35-39			60	60
4	40-49	150	100	65	60
5	50-59	190	110	70	60
6 +	60+	220	120	75	60

Eiche

Klasse	⌀	A	B	C	D
3a	30-34			65	65
3b	35-39		150	80	65
4	40-49	440	240	100	65
5	50-59	540	310	110	65
6+	60+	660	390	120	65

Ahorn

Klasse	⌀	A	B	C	D
2b	25-29				50
3	30-39		70	60	50
4	40-49	230	100	60	50
5	50-59	300	140	60	50
6+	60+	350	180	60	50

Linde

Klasse	⌀	A	B	C	D
3a	30-34		70	60	50
3b	35-39		90	60	50
4	40-49	230	110	70	50
5	50-59	300	140	80	50
6+	60+	350	170	90	50

Esche

Klasse	⌀	A	B	C	D
3a	30-34		70	60	50
3b	35-39		90	60	50
4	40-49	230	110	70	50
5	50-59	300	140	80	50
6+	60+	350	170	90	50

Kirsche

Klasse	⌀	A	B	C	D
2b	25-29				50
3	30-39		200	60	50
4	40-49	500	300	60	50
5	50-59	620	380	70	50
6+	60+	800	450	70	50

Ulme / Birnbaum

Klasse	⌀	A	B	C	D
3	30-39		150	70	50
4	40-49	260	200	100	50
5	50-59	300	240	150	50
6+	60+	360	280	150	50

Birke / Erle / Akazie / Hagebuche

Klasse	⌀	A	B	C	D
3	30-39		60	50	50
4	40-49	140	70	50	50
5	50-59	150	80	50	50
6+	60+	160	90	50	50

Allgemeine Bestimmungen

- Bei der **Aushaltung des Langholzes** soll die tolerierte **Maximallänge von 22 m** (plus Zumass) eingehalten werden (Transport).
- Die Preise gelten für **gesunde, frische Normalnutzungen**. Bei wesentlichen Änderungen der Marktlage bleiben Preisanpassungen vorbehalten.
- Alle **Preise** verstehen sich in **Fr. / FMO** und ab mit Lastwagen befahrbarer Strasse (40 Tonnen). **Lagerung** im Lastwagenkran-Einsatzbereich.
- Zuschläge für **Entrindung** sind mit Fr. 12.- / FMO zu verrechnen. Entrindung nur nach Absprache mit dem Käufer.
- In **Wiese** gelagertes Rundholz: Für vermehrte Umtriebe kann bis zu Fr. 10.- / FMO in Abzug gebracht werden.
- Für Holz, das im Einvernehmen mit dem Käufer gegen Nutzholzborkenkäferbefall **gespritzt** wurde, wird ein Zuschlag von Fr. 3.- pro FMO berechnet. Einsätze für Einzellose können nach Aufwand berechnet werden.

Tabelle 43: Differenz zwischen Preis für Faulholz und Preis für nicht von Fäule befallenem Holz.

Fichte								
Sortiment	**Klasse**	**ø**	**AB**	**B**	**C**	**D**	**Durchschnitt aus AB, B, C, D**	**Differenz Durch-schnitt zu D (%)**
Trämel	1 b	15-19		70	55	60	61.7	2.70
(L1)	2 a	20-24		105	80	60	81.7	26.53
	2 b	25-29		115	90	60	88.3	32.08
	3	30-39	160	115	95	60	107.5	44.19
	4	40-49	190	115	95	60	115.0	47.83
	5	50-59	210	115	85	60	117.5	48.94
	6+	60+	220	115	85	60	120.0	50.00
							98.8	**39.28**