TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Technische Universität Dresden

Fakultät für Umweltwissenschaften

Rentabilitätsanalyse unterschiedlicher Feinerschließungsoptionen und ökonomische Simulation verschiedener Befahrungseffekte am Beispiel der Fichte in Sachsen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)
vorgelegt von

Manuel Wächter

geboren am 25. Oktober 1986 in Leinefelde

Gutachter:

Prof. Dr. habil. Jörn Erler
Technische Universität Dresden, Fakultät für Umweltwissenschaften, Professur für Forsttechnik

Prof. Dr. habil. Thomas Purfürst
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für forstliche Verfahrenstechnik

Prof. Dr. habil. Peter Deegen
Technische Universität Dresden, Fakultät für Umweltwissenschaften, Arbeitsfeld Forstliche Ressourcenökonomie

Datum der Verteidigung: 25. Februar 2021

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Rentabilitätsanalyse unterschiedlicher Feinerschließungsoptionen und ökonomische Simulation verschiedener Befahrungseffekte am Beispiel der Fichte in Sachsen“

wird hiermit bestätigt.

. . . . . .

Ort, Datum

. . . . . .

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum zwischen den Jahren 2011 und 2020, zunächst während der Tätigkeit am Lehrstuhl für Forsttechnik der Technischen Universität Dresden, später arbeitete ich berufsbegleitend in meiner Freizeit daran. Die auf die „Tharandter Zeit“ folgenden beruflichen Stationen veränderten immer wieder die eigene Perspektive auf das Thema. So ermöglichten mir die Tätigkeiten in der öffentliche Forstverwaltung sowie die Verwendung im Hausleitungsbereich verschiedener Ministerien sowohl einen praktisch-administrativen als auch eine politischen Blick auf die Waldbewirtschaftung im Freistaat Sachsen mit all den damit in Verbindung stehenden Herausforderungen.

Allen die mir während der Erstellung der vorliegenden Dissertation mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben, möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich Danke sagen. Stellvertretend sei hier mein Doktorvater Prof. Dr. habil. Jörn Erler genannt. Ohne seine Förderung und Unterstützung und ohne sein „Brennen“ für das Thema wäre ein Gelingen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Nur seinem stetigen Nachdruck ist es zu verdanken, dass sie trotz meiner vielen beruflichen Veränderungen überhaupt fertiggestellt wurde.

Meiner Familie danke ich für die Motivation, welche mir über die ein oder andere Krise half. Maria und meinen beiden Kindern Karl Friedrich und Anni Frieda danke ich herzlich für das zahlreiche Entbehren des Ehemannes und Vaters, welches entstand, wenn ich wochenends zurückgezogen in meinem Arbeitszimmer viele der folgenden Seiten verfasste.

Forststadt Tharandt im Herbst des Jahres 2020

Manuel Wächter

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand des Wissens **3**
2.1 Abgrenzung des Themas . . . 3
2.2 Ansätze zur Bewertung forsttechnischer Maßnahmen . . . 4
2.3 Effekte auf den Boden . . . 6
2.3.1 Funktionalitäten von Böden . . . 6
2.3.2 Interaktion zwischen Forstmaschine und Boden . . . 7
2.3.3 Bodenstrukturveränderungen in Folge der Befahrung . . . 8
2.3.4 Bodenschutz im Wald . . . 12
2.3.5 Technische Befahrbarkeit als Sollzustand . . . 15
2.3.6 Erhalt der technischen Befahrbarkeit . . . 16
2.3.7 Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit . . . 33
2.4 Auswirkungen der Befahrung auf die Bestockung . . . 37
2.4.1 Ertragskundliche Effekte . . . 37
2.4.2 Schäden an den verbleibenden Bäumen . . . 38
2.4.3 Effekte auf die Verjüngung . . . 39
2.5 Waldbauliche Effekte . . . 40
2.6 externe Effekte der Holzernte . . . 41
2.6.1 gesellschaftliche Effekte . . . 41
2.6.2 ökologische Effekte . . . 41

3 Methodik **42**
3.1 Das Faustmann-Modell als Forstökonomisches Handlungskalkül . . . 43
3.2 Grundlagenberechnung . . . 46
3.2.1 Simulation der ertragskundlichen Datenbasis . . . 46
3.2.2 Kalkulation der Holzerlöse . . . 49
3.2.3 Systemkostenkalkulation . . . 50
3.2.4 Produktivität der Verfahrensstufen und der Verfahren . . . 67
3.3 Maximierung des Bodenertragswertes . . . 69
3.3.1 Optimale Holzernteverfahren . . . 70
3.3.2 Optimale Sortiervariante . . . 70
3.3.3 Berücksichtigung der Eingriffsstärke . . . 70
3.3.4 Optimierung der Umtriebszeit . . . 71
3.4 Die Annuität als jährliche Bodenrente . . . 71
3.5 Berücksichtigung nichtmonetärer Effekte . . . 72

4 Ergebnisse **75**
4.1 Grundlagenberechnung . . . 75
4.1.1 Ergebnisse der ertragskundlichen Simulation . . . 75
4.1.2 Ergebnisse der Holzerlöskalkulation . . . 76
4.1.3 Ergebnisse der Systemkostenkalkulation . . . 78
4.1.4 Ergebnisse der Produktivitätsmodellanalyse . . . 84
4.2 Ergebnisse der Bodenertragswertmaximierung . . . 89
4.2.1 Optimale Holzernteverfahren . . . 89
4.2.2 Optimale Sortiervariante . . . 104
4.2.3 Berücksichtigung der Eingriffsstärke . . . 106
4.2.4 Optimierung der Umtriebszeit . . . 107
4.3 Harmonisierung der Naturaldaten . . . 108
4.4 Interpretation der numerischen Grundlagen und Simulation weiterer Effekte . 110
4.4.1 Biologische Produktionsfunktion des Bodens . . . 112
4.4.2 Technische Befahrbarkeit der Rückegassen . . . 120
4.4.3 Effekte auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Forstwirtschaft . . . 131
4.4.4 Waldbauliche Effekte des Feinaufschlusses . . . 132
4.5 Simple Betterness Method nach Klemperer . . . 133
4.5.1 Biologische Produktionsfunktion des Bodens . . . 133
4.5.2 Waldbauliche Effekte des Feinaufschlusses . . . 136
4.6 Kombination der Effekte . . . 138
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 142

5 Diskussion **143**
5.1 Methodendiskussion . . . 144
5.1.1 Faustmann-Modell und Grundlagenberechnungen . . . 144
5.1.2 Optimierung . . . 149
5.1.3 Berücksichtigung nichtmonetärer Effekte . . . 150
5.2 Ergebnisdiskussion . . . 150

6 Schlussfolgerung **166**

7 Zusammenfassung **172**

Anhang **IV**
Abbildungen . . . IV
Tabellen . . . VII

Literaturverzeichnis **XIX**

Symbol-, Einheiten- und Abkürzungsverzeichnis **XXXIX**

Abbildungsverzeichnis **XLIII**

Tabellenverzeichnis **XLVI**

Erklärung zur Eröffnung des Promotionsverfahrens **XLVIII**

1 Einleitung

Die Verkehrsfläche im Freistaat Sachsen – alle Flächen für Straßen, Fußwege, Parkplätze usw. – zum Stichtag 31. Dezember 2018 lag bei ca. 81 Tausend Hektar. Die dritte Bundeswaldinventur hat ergeben, dass die Waldfläche Sachsens rund 533 Tausend Hektar beträgt. Wenn Rückegassen ca. 10 bis 20% der Waldfläche einnehmen[1], liegt der absolute Flächenanteil, auf dem die Befahrung der Waldböden konzentriert wird und der damit vornehmlich eine technische Funktion einnimmt, mit ca. 50 bis 100 Tausend Hektar, auf ähnlich hohem Niveau.

Rückegassen sind der Übergang zwischen dem Wald-Wegesystem, welches primär der Holzabfuhr dient, und dem produktiven Holzboden, auf dem die Bäume stehen und Holz wächst. Erst mit dem Aufkommen moderner Holzerntemaschinen, wie Harvester und Forwarder, und durch die Entwicklung des Konzepts der permanenten Rückegasse, also der Konzentration der Befahrung auf baumfreie Streifen und dem damit verbundenen Verbot des flächigen Befahrens, hielt dieses Erschließungsmittel Einzug in die deutsche Forstwirtschaft, denn die Bodenbelastung stieg mit zunehmender Mechanisierung an.

Motorleistung, Maße und Masse der Land- und Forstmaschinen stiegen in den letzten Jahren kontinuierlich an. Um weite Kranreichweiten zu ermöglichen und Hebelwirkungen entgegenzuwirken werden Reifen von Forstmaschinen mit Wasser gefüllt, was die Masse der Maschine und den Bodendruck zusätzlich erhöht. Da Technik immer auch in Interaktion mit der Umwelt steht, sind ökologische Beeinträchtigungen nicht zu vermeiden. Um nicht den gesamten Holzboden unkontrolliert zu beeinträchtigen, werden diese Effekte auf den Rückegassenboden konzentriert.

Bodenstrukturveränderungen beeinflussen nicht nur den Bodenluft- beziehungsweise den Bodenwasserhaushalt und damit den Lebensraum für Tiere und Pflanzen, vielmehr gefährden sie das primäre Ziel des Bodenschutzes auf der Rückegasse: den nachhaltigen Erhalt der forsttechnischen Befahrbarkeit. Das Feinerschließungsmittel „Rückegasse“ kann der Anforderung, die zu erntenden Bäume technologisch erreichbar zu machen, nur gerecht werden, wenn sie durch die Holzerntemaschinen befahren werden kann. Kommt es jedoch zur tiefen Fahrspurbildung, geht diese Funktionalität verloren. Die Waldbilder, die dann entstehen führen oft zum Imageverlust einer ganzen Berufsgruppe und zum grundsätzlichen In-Frage-stellen der Notwendigkeit von Holzerntemaßnahmen als Kerngeschäft der Forstwirtschaft.

[1] vgl. Gaertig et al. (2018)

Zur Eigenart der forstlichen Produktion gehört, dass der Wertverlust selten am Produkt entsteht, sondern vielmehr am Boden und am verbleibenden Bestand. Doch wie hoch ist dieser Wertverlust beziehungsweise wie kann er errechnet oder eingeschätzt werden? Und was kann unternommen werden, um diesen Wertverlust zu minimieren?

Vor allem die Frage nach alternativen Verfahren und deren Vorteile bei der sozialen und ökologischen Bewertung stehen seit langer Zeit im Fokus von Wissenschaft und Praxis. Obgleich eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren entwickelt wurde und auch immer wieder in der Praxis anzutreffen sind, beherrscht das Standardverfahren mit Harvester und Forwarder auf Rückegassen, deren Abstand an der Reichweite eines Standard-Harvesterkranes optimiert wurde, die mitteleuropäische Forstwirtschaft. Als alternative Verfahren – auf Gassen mit weiteren Abständen – sind hauptsächlich quasi-vollmechanisierte Verfahren mit Harvester und Forwarder sowie – zur Bearbeitung der nicht durch den Kran erreichbaren Zwischenzone – mit motormanueller Zufällung und gegebenfalls notwendiger Vorrückung durch Pferd oder Seilschlepper anzutreffen.

Die Frage nach dem „richtigen Gassenabstand“ ist viel diskutiert. Wie die vorliegende Arbeit zeigen wird, beschreiben die öffentlichen Forstbetriebe der Länder ihre Anforderungen an die Bewirtschaftung des Landeswaldes in Richtlinien und Erlassen. Dadurch soll die allgemeine Regelungslücke des Gesetzgebers zum forstlichen Bodenschutz – zumindest für den öffentlichen Wald – geschlossen werden. Zum Teil werden dabei standortdifferenzierte Gassenabstände empfohlen beziehungsweise vorgeschrieben.

Ohne Zweifel werden Verfahren auf weiteren Gassenabstände höhere Kosten verursachen, da zusätzliche Verfahrensschritte notwendig sind, deren ökonomische Effizienz nicht mit der des hochproduktiven Standardverfahrens vergleichbar sind. Diese Kostenunterschiede sind gut untersucht und oft beschrieben. Auch den Leistungen alternativer Verfahren, im Sinne von zusätzlichen positiven Effekten sozialer oder ökologischer Art, wurde seitens der Wissenschaft und Praxis Aufmerksamkeit geschenkt, auch wenn nicht jede Fragestellung klar zu beantworten ist.

Mit der vorliegenden Dissertation soll ein Versuch unternommen werden, durch die Betrachtung der Rentabilität unterschiedlicher Erschließungsalternativen die Frage nach der Optimalität der Feinerschließungsmittel zu beantworten. Schließlich ist der Anteil und die absolute Fläche der Rückegassen an der Gesamtwaldfläche – wie oben dargestellt – alles andere als marginal, und jeder Wissenszuwachs an dieser Stelle kann eine Verbesserung des Bodenschutzes in der Forstwirtschaft – auf großer Fläche – bedeuten.

2 Stand des Wissens

2.1 Abgrenzung des Themas

Um den Wissensstand der Forschung umfassend und erschöpfend darzustellen, ist das Thema so weit wie möglich einzugrenzen. Der Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit umfasst die Ernte von Holz als Kerngeschäft der forstlichen Produktion. Die ökonomischen beziehungsweise betriebswirtschaftlichen Auswirkungen von Holzerntemaßnahmen, im Speziellen die eingesetzte Technik und der verwendete Feinaufschluss, sowie die daraus resultierenden Folgen sollen beschrieben beziehungsweise bewertet werden.

Grundsätzlich können interne von externen Effekten unterschieden werden. Für diese Differenzierung ist es erforderlich, die Systemgrenzen zu bestimmen. In dieser Arbeit ist das zu betrachtende System der besitzende Forstbetrieb. Er stellt gewissermaßen das Wirtschaftssubjekt dar, von dem die Effekte ausgehen. Interne Effekte betreffen ihn selbst, externe wirken nach außen.

Durch die Holzernte kommen sowohl positive als auch negative Effekte zustande. In der Regel generiert ein Forstbetrieb durch die Ernte des Holzes Erlöse. Dabei kann es zu Schäden an Bestand und Boden kommen. Dadurch verursachte interne Kosten, im Sinne von Erlösminderungen oder Folgekosten, senken das Ergebnis des Forstbetriebes.

Externe Effekte entstehen, wenn Handlungen des Forstbetriebes der Gesellschaft Kosten (externe Kosten) verursachen. Sie werden nicht über Märkte erfasst oder bewertet (Wicke 1993). Hierzu zählen zum Beispiel die Einflüsse auf die Erholungsleistung, die Schutzfunktion oder auf die Trinkwasserbereitstellung von Wäldern. Diese Aspekte stehen nicht im Vordergrund der vorliegenden Untersuchung, da die Einflüsse verschiedener Verfahren auf diese Leistungen nur schwer zu quantifizieren und noch schwerer zu monetarisieren sind.

Unter allen forstbetrieblichen Maßnahmen soll die Holzernte Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein. Ein großer Teil der dabei zum Einsatz kommenden Maschinen ist mit Fahrwerken ausgestattet und fährt durch den Bestand über den Waldboden. Es ist demnach zwingend notwendig, die Funktionen des Bodens und die Auswirkungen der Befahrung mit Forstmaschinen zu beschreiben.

Die technische Befahrbarkeit ist zwingende Voraussetzung für eine Holzernte mit Rad- oder Raupen-Fahrzeugen. Sie ist eine feste Größe und hat einen Wert für den Forstbetrieb. Ab wann ist die technische Befahrbarkeit verloren? Was bedeutet ein Verlust der Befahrbarkeit für den Betrieb? Wie kann die technische Befahrbarkeit erhalten beziehungsweise wiederhergestellt werden? Auf diese und auf weitere Fragen werden im Folgenden jeweils eigene Abschnitte näher eingehen.

Auch der verbleibende Bestand wird durch den Einsatz moderner Forsttechnik beeinträchtigt. Diese Beeinträchtigungen können indirekt, zum Beispiel durch die Bodenverdichtung, aber auch direkt, als Fäll- oder Rückeschaden am Holzkörper, auftreten. Welche Auswirkungen die Holzernte auf die Ertragskunde, den Waldbau beziehungsweise die Forstnutzung hat, ist ebenfalls zu klären.

2.2 Ansätze zur Bewertung forsttechnischer Maßnahmen

Zwar liegen methodische Grundlagen zur Beurteilung von Forsttechnik und Holzernteverfahren vor (vgl. Koch 1998; Erler 2000; Pausch 2007; Weiss 2007), doch fallen die Ergebnisse einer Recherche zu den ökonomischen Bewertungen der Auswirkungen forsttechnischen Handelns spärlich aus.

Wehner & Sauter (2005) beschreiben die Notwendigkeit der (Holzernte-)Technikfolgenabschätzung als ganzheitlichen Betrachtung der eingesetzten Technik, deren unmittelbaren beziehungsweise mittelbaren technischen, wirtschaftlichen, gesundheitlichen, ökologischen, humanen, sozialen etc. Folgen und alternativer Verfahren.

Erler (2005) beschreibt modellhaft die „Kosten der Rückegasse“ und vergleicht fünf Verfahren hinsichtlich des erntekostenfreien Erlöses, der Kosten des Gassenaufhiebs, der Bestandesentwertung, des Verlusts an waldbaulicher Freiheit sowie der Bodenentwertung. Er schlussfolgert, dass vollmechanisierte Verfahren in puncto erntekostenfreier Erlös unschlagbar sind. Doch Verfahren auf weiteren Gassenabstand[2] stehen diesem bei umfassenderer Betrachtung in Nichts nach. Er empfiehlt auf Grund der hohen Kosten motormanueller Arbeit die maschinelle Aufarbeitung. Der Tragschlepper punktet in seinen Überlegungen durch weniger Schäden am verbleibenden Bestand, weshalb Kurzholzverfahren zu bevorzugen sind. Der Autor beschreibt positive Effekte größerer Gassenabstände auf die waldbauliche Einflussnahme und die damit verbundene Steigerung des Abtriebswertes modellhaft; die Bodenentwertung durch den Verlust der biologischen Funktionen an Hand eines numerischen Beispiels. (Erler 2005)

[2] Der Rückegassenabstand wird in der vorliegenden Arbeit als Strecke zwischen den Schnittpunkten der (gedachten) Mittellinien zweier benachbarter Rückegassen mit ihrer Orthogonalen definiert.

Faber & Grüll (2007) weisen auf die Opportunitätskosten bei der Holzernte hin, die im Normalfall in Forstbetrieben nicht berücksichtigt werden. Da die Kosten für den Verlust der natürlichen Umwelt nur schwer zu quatifizieren sind, versuchen die Autoren aufzuzeigen, dass die Mehrkosten eines bodenpfleglicheren Verfahrens dazu geeignet sind, den Wert dieser nachhaltigen Sicherung zu bestimmen. Die Preisdifferenz bildet sozusagen die unterste Grenze des Wertes, vorausgesetzt der Markt ist nicht rationiert (Marggraf & Streb 1997). Nach Faber & Grüll (2007) entsteht der monetäre Nutzen dieser Vorsorge erst in der Zukunft. Bei einem Verzicht der Vorsorge entgeht demnach dieser Nutzen, der folglich als Opportunitätskosten in die Entscheidung mit einfließen muss. Auch Hostettler (2003) beschreibt die ökonomische Bedeutung dieser Kosten.

In einer Befragung der Kommunalwaldbetriebe Nordrhein-Westfalens konnte Faber (2007) die Vorsorge-Bereitschaft der Waldbesitzer feststellen. Eine freiwillige Selbstbeschränkung kam vor allem in den Bereichen der Walderschließung beziehungsweise Holzernte zur Anwendung. Demnach schränken die Forstbetriebe ihre Befahrung über die Zertifizierungsvorschriften hinaus ein. Faber (2007) stellte fest, dass 54% der befragten Betriebe die Absicht haben, den Rückegassenabstand von den herkömmlichen 20 m generell auf 40 m zu erweitern. Dabei bestand eine überwiegende Bereitschaft der Kostenübernahme. Außerdem gaben die Kommunen an, das Rückemittel anhand der aktuell herrschenden Bodenbedingungen zu wählen.

Jäger (2012) untersuchte das Kosten-Nutzen-Verhältnis von verschiedenen Gassenabständen in Bezug auf Boden- und Bestandesschutz, indem er die Mehrkosten bodenschonender Holzernteverfahren mit partiellem Befahrungsverzicht den Mindererlösen infolge von befahrungsbedingten Zuwachseinbußen sowie den Boden-, Wurzel- und Bestandesschäden gegenüberstellte (vgl. Frutig et al. 2016).

Schack-Kirchner et al. (2020) beschreiben den Effekt des Rückegassenabstandes auf elf verschiedene Kriterien: befahrene Fläche, Belastung der Rückegassen, Nährstoffakkumulation auf der Rückegasse, Zwischenflächenbelastung durch Holzschleifen, Anreiz zum Verlassen der Rückegasse, Bestandesschäden (Randbäume), Bestandesschäden (Zwischenfläche), waldgesellschaftstypische Bodenvegetation, Biotopvielfalt, Arbeitssicherheit und forstbetriebliche Mechanisierung. Die Autoren stellen dar, dass ein konfliktfreies Optimieren aller Kriterien nicht möglich ist und daher die Wahl des Abstandes eine Abwägung darstellt. Sie verweisen auf multikriterielle Entscheidungstools wie die Nutzwertanalyse, die mittels Gewichtung der Kriterien ein subjektives Element umfassen und damit die Verantwortung der Entscheidungsträger stärken.

Erler et al. (2010) empfehlen, das Risiko nachträglicher Kosten, die aus unpfleglich behandelten Rückegassen resultieren, bei der Herleitung der Holzerntekosten zu berücksichtigen. Eine periodenübergreifende Betrachtungsweise, die kalkulatorische Kosten berücksichtigt, nennt Erler (2009b) konsequent. Er empfiehlt Sanierungskosten, die entstehen, um zerstörte Rückegassen mit wegebaulichen Mitteln wieder

befahrbar zu machen, oder entgangene Erträge durch Wertminderungen auf Grund erwarteter Fäll- oder Rückeschäden mit ins Kalkül zu ziehen.

Um die ökonomischen Auswirkungen einer Vorsorge bei der Holzernte zu quantifizieren, ist es erforderlich die Effekte genau zu beschreiben. In dem folgendem Kapitel werden zunächst die Effekte einer Befahrung auf den Boden beschrieben.

2.3 Effekte auf den Boden

2.3.1 Funktionalitäten von Böden

§ 2 Absatz 2 des Bundesbodenschutzgesetzes definiert die Bodenfunktionen aus Sicht des Bundesgesetzgebers wie folgt:

„Der Boden erfüllt im Sinne dieses Gesetzes

1. natürliche Funktionen als
    a) Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,
    b) Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,
    c) Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers,
2. Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte sowie
3. Nutzungsfunktionen als
    a) Rohstofflagerstätte,
    b) Fläche für Siedlung und Erholung,
    c) Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung,
    d) Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung.“

Lüscher et al. (2010) nennen verschiedene Bodenfunktionen. So ist er vor allem Produktionsgrundlage für die Land- und Forstwirtschaft, indem er als Wuchsort den Pflanzen dient, die sich in ihm verankern und sich u.a. aus ihm ernähren. Darüber hinaus nennen die Autoren die Puffer-, Filter- und Lebensraumfunktion (Destruenten, Mykhorriza usw.).

Lüscher et al. (2010) sehen die ökologischen Bodenfunktionen durch die Befahrung des Waldbodens gefährdet. Demnach leidet die Bodenfruchtbarkeit durch beeinträchtigte Transportvorgängen im Boden. Die Autoren stellen die These auf, dass die Aufrechterhaltung der Bodenfunktion ein Eigentinteresse des Waldeigentümers ist.

2.3.2 Interaktion zwischen Forstmaschine und Boden

Um die Einflüsse der forstlichen Befahrung auf den Boden zu verstehen sowie die daraus entstehenden Folgen abzuleiten und zu bewerten, sollen die Interaktionen zwischen Forstmaschine und Waldboden zunächst beschrieben werden. Es steht dabei die Frage im Vordergrund, wie die Maschine den Boden beeinflusst und verändert.

Die Gewichtskraft der unbeladenen Maschine ($F_{g\,leer}$) resultiert aus der Maschinenleermasse ($m_{\,leer}$). Hinzu kommt die Nutzmasse ($m_{\,nutz}$), die auch als Kraft wirkt. Je nach Bauart der Maschine wird diese Gewichtskraft ($F_{g\,gesamt}$) mehr oder weniger gleichmäßig über jede Achse und die daran angebrachten Räder (bzw. Laufrollen und Kettengliedern bei Raupenlaufwerken) auf den Boden übertragen. Das Gewicht beziehungsweise die Masse, die über das einzelne Rad lastet, wird als Radlast bezeichnet. Der Druck, der über die Auflagefläche des Reifens auf dem Boden übertragen wird, wird entsprechend Kontaktflächendruck genannt. Dieser ist abhängig von verschiedenen Faktoren. So beeinflussen zum Beispiel die Radlast, der Fülldruck der Reifen, die Aufstandsfläche, die Fahrgeschwindigkeit etc. diesen Kontaktflächendruck. Diese Flächenkraft wird im Boden aufgenommen und entsprechend abgebaut. Dabei kann es zu einer elastischen und auch zu einer plastischen Verformung des Bodens kommen. (Söhne 1952; Sommer 1985; VDI 2007; Geischeder 2011)

Nach Gaertig et al. (2018) bemisst sich ein Umweltschaden, wie zum Beispiel die Bodenverdichtung, nach der Schadenshöhe, welche wiederum aus Eingriffsstärke und Empfindlichkeit resultiert, sowie nach der Schadensdauer, die von der Resilienz des gestörten Systems resultiert. Demnach ist ein Schaden besonders schwerwiegend, wenn ein großer Schaden und eine geringe Resilienz zusammentreffen. Die Autoren leiten daraus ab, dass für eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressource Boden die nutzungsbedingte Einwirkung den Resilienzbereich nicht überschreiten darf.

2.3.3 Bodenstrukturveränderungen in Folge der Befahrung

Adams & Froehlich (1981) beschreiben bereits in den 80er Jahren die negativen Effekte der Bodenverdichtung als Folge der Befahrung mit Maschinen.

Durch die mechanische Belastung in Form des Kontaktflächendruckes vom Rad auf den Boden verringert sich das Porenvolumen beziehungsweise die Porenkontinuität vor allem der Grobporen, was eine geringe Wasserdurchlässigkeit der Fahrspuren zur Folge hat. Demzufolge steigt die Lagerungsdichte und die Gas- und Luftleitfähigkeit lässt nach, was den Bodengas- und Bodenwasserhaushalt und folglich die Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaft beeinflusst und verändert (Greacen & Sands 1980; Hildebrand 1987; Zander et al. 1988; Arnup 1998; Bley 2002; Page-Dumroese et al. 2006; Frey et al. 2009; Lüscher et al. 2010; Beylich et al. 2010; Hartmann et al. 2014; Gaertig et al. 2018).

Nach Lüscher et al. (2010) ist eine solche Verdichtung des Bodens bis zu einer Tiefe von 70 bis 80 cm feststellbar (Messung mittels Sonde über den Eindringwiderstand). In tieferen Bereichen kommt es auf Grund der natürlichen Lagerungsdichte zu keiner Verdichtung des Bodens durch die Befahrung.

Lüscher et al. (2010) beschreiben die Abhängigkeit der Verdichtungsempfindlichkeit des Oberbodens vom Anteil der organischen Substanz. Darüber hinaus nennen sie den Einfluss der Bodenfeuchte und Witterung, der Bodenart und des Skelettgehalts, der Inklination beziehungsweise einer eventuell vorhandenen Wechselfeuchte.

Auf die Verdichtung des Bodens folgt die Vernässung und der damit verbundene Sauerstoffmangel, was größeren Oberflächenabfluss beziehungsweise Erosion zur Folge haben kann (Adams & Froehlich 1981; Zander et al. 1988; Lüscher et al. 2010).

Die verringerte Leitfähigkeit des Bodens führt durch Oxidations- und Reduktionsprozesse zu optischen Merkmalen am Profil. So zeigen Mangankonkretionen und Fahl-Rot-Färbungen schwache Vernässung des Bodens. Starke Vernässungen können durch diffuse Rostflecken beziehungsweise blaugraue Färbungen diagnostiziert werden (Lüscher et al. 2010). Auch Gaertig et al. (2000b) nennen die Rostflecken und Bleichzonen als Folge von Belüftungsschwierigkeiten. Die Autoren entwickelten einen Dreieckschlüssel, der die genannten Redoxymorphiemerkmale sowie die Gefügeform nutzt, um den Verformungsschaden zu beurteilen. Dieser wird durch die Belüftungsmängel auf Grund der Strukturstörungen des Bodens beschrieben. Die messbare Größe ist demnach das Kohlendioxid CO_2.

Neben dem Kontaktflächendruck führt auch der Antriebsschlupf zu einer Schädigung des Bodens durch Verformung (Bley 2002). Einflussparameter auf den Schlupf sind nach Bley (2002) vor allem die Radlast, die Reifendimension und -bauart, das Profil und der Reifeninnendruck.

Lüscher et al. (2010) entwickelten eine Kategorisierung der visuellen Befahrungsspuren anhand der sichtbaren Veränderungen des Bodens, die als Hilfsmittel dem Management des Bodenschutzes dienen sollen und drei Typen unterscheiden:

- Spurtyp I

  → Pressung der organischen Auflage
  → Abdruck des Reifenprofils
  → Spurtiefe kleiner als 10 cm

- Spurtyp II

  → plastische Verformung des Oberbodens
  → teilweise seitliche Aufwölbung der Spurränder
  → Spur meist kleiner als 10 cm im Oberboden

- Spurtyp III

  → Spur größer als 10 cm, deutlich in den Unterboden reichend
  → deutliche Aufwölbung durch Bodenfliessen

Abbildung 1 zeigt diese Typisierung. Gaertig et al. (2018) nennt diese eine „gute Diskussionsgrundlage“, um dem Ziel, einem länderübergreifenden Konsens zu Bodenschutzzielen bei der Holzernte, näher zu kommen.

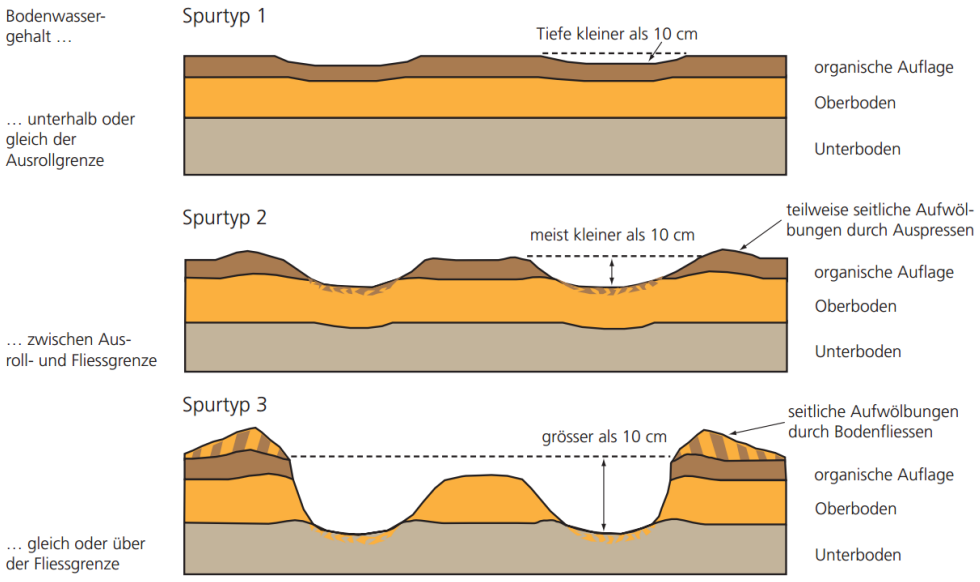


Abb. 1: *Visuelle Typisierung der Spurtypen nach* Lüscher et al. *(aus* Lüscher et al. *2010)*

Borchert et al. (2013) beschreiben, dass die elastische Verformung beim Spurtyp 1 keine beziehungsweise kaum Einschränkungen der Bodenfunktionen nach sich zieht.

Nach den Autoren entsteht der Spurtyp 2 bei feuchtem Boden durch die sogenannte „Sackungsverdichtung“. Es ist eine plastische Verformung, die in Form von deutlichen Eintiefungen erkennbar ist und durch das verringerte Porenvolumen die Belüftung und Drainage stört. Tiefe Spurgleise entstehen, wenn die Maschinen bei sehr hohem Wassergehalt tiefer einsinken und es zur visko-plastischen Verformung, dem „Grundbruch“, kommt, indem das Bodenmaterial seitlich aus der Spur gedrückt wird. Die Autoren beschreiben, dass das Einsinken häufig erst dann endet, wenn die Maschine mit der Bodenwanne aufsitzt. In der Folge der visko-plastischen Verformung verliert der Boden seine Durchlässigkeit, wodurch das Wasser in den Fahrspuren nicht mehr versickern kann. (Borchert et al. 2013)

Matthies et al. (1995) weisen darauf hin, dass sich jede befahrungsbedingte Belastung auf die Bodenstruktur auswirkt. Darüber hinaus beschreiben die Autoren, dass dauerhafte Einschränkungen der ökologischen Bodenfunktionen von der Gas- und Wasserleitfähigkeit sowie von der Tiefe der Strukturveränderung abhängig sind. Meyer et al. (2011) sprechen von einem ökologischen Bodenschaden, wenn der Unterboden von der Belastung durch die Befahrung betroffen ist.

Erler et al. (2010) fassen die „Verdichtung des Bodens“ sowie das „seitliche Auspressen des Bodenmaterials“ als Ursachen für die Fahrspurbildung zusammen. Ihrer Meinung nach steigt die Wahrscheinlichkeit der Fahrspurbildung mit der Zunahme des Bodenwassergehaltes und der Abnahme der Korngröße. Sie nennen auch den Einfluss von Radlast und Kontaktflächendruck sowie die negativen Wirkungen der dynamischen Kräfte, wie Scherkräfte, Schlupf und Stampfen, auf die Bodenstruktur.

Die Zunahme der Lagerungsdichte, die Abnahme des Porenraumes und der Porenkontinuität sowie die Verringerung der Gas- und Luftleitfähigkeit können unter dem Begriff der befahrungsbedingten Bodenstrukturveränderungen zusammengefasst werden (Gaertig et al. 2018).

Wehner (2005b) beschreibt den Vorteil der kombinierten Messung von Spannungen und Bewegungen im Bodenkörper, da die dynamischen Drücke auf Grund von Hebelwirkungen am Maschinensystem um ein vielfaches höher liegen als der berechnete Kontaktflächendruck.

> „Diese Methode ermöglicht die Darstellung dynamischer Spannungsentwicklungen im Bodenkörper während der Befahrung.“
>
> (Wehner 2005b, S. 332)

Wehner (2005b) konnte damit dynamische Spannungen messen, die bis zu fünfmal höher lagen als der berechnete Kontaktflächendruck.

Riggert (2015) beschreibt in seiner Dissertation das Zusammenwirken von Bodenstabilität, welche von internen Faktoren abhängig ist, und Belastungsintensität (als Summe der bodenexternen Faktoren). Er entwickelt daraus ein Modell zur Beurteilung der Bodenverdichtung.

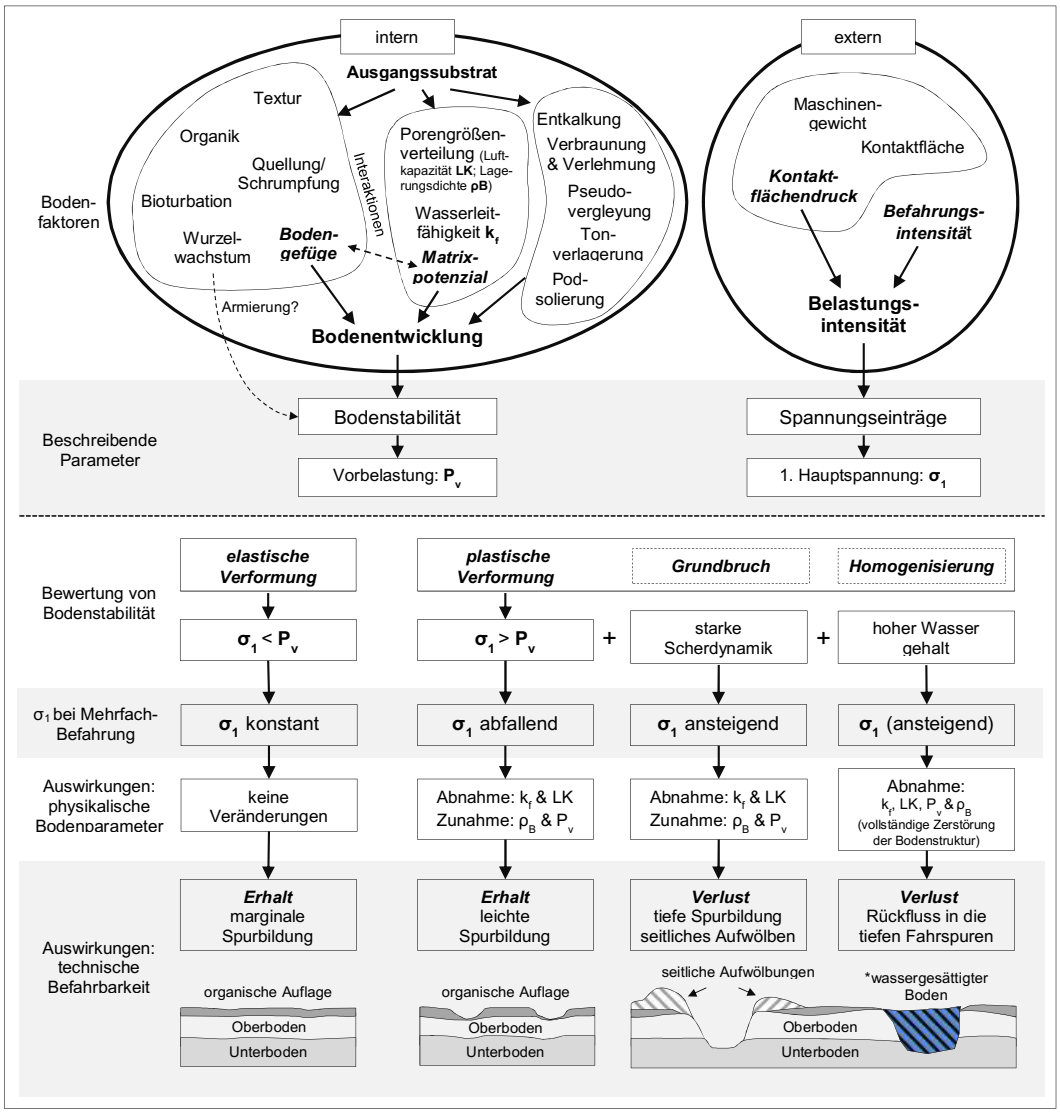


Abb. 2: *Modell zur Beurteilung der Bodenverdichtung nach* Riggert *(aus* Riggert *2015)*

Die Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung des Modells nach Riggert (2015), welches die Auswirkungen auf die physikalischen Bodenparameter (gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf), Luftkapazität (LK), Vorbelastung (Pv) und Lagerungsdichte (ρB)) und die technische Befahrbarkeit in Abhängigkeit der internen und externen Bodenausgangsfaktoren und ihre beschriebenen Parameter Vorbelastung (Pv), Scherwiderstand (τ) und 1. Hauptspannung (σ1) beschreibt.

> „Demnach sind die Vorbelastung (Pv) und der Scherwiderstand (τ) geeignete Bodenstabilitätsparameter. Die Belastungsintensität wird am besten durch 1. Hauptspannung ($\sigma 1$) erfasst, die die zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseintrags senkrecht wirkende Spannung im Boden darstellt. Die Bewertung von Vorbelastung (Pv) und 1. Hauptspannung ($\sigma 1$) klassifiziert elastische und plastische Bodenverformung, wohingegen das Verhältnis von Scherwiderstand (τ) und 1. Hauptspannung ($\sigma 1$) Aussagen zu weiteren Verformungsprozessen macht (Horn & Fleige 2003; Riggert 2015).“
>
> (Gaertig et al. 2018, S. 10)

Im „RÜWOLA“-Projekt[3] wurde unter anderen mit dem oben dargestellten Ansatz nach Riggert (2015) geprüft, welchen Spannungseinträgen Böden bei der Befahrung mit verschiedenen Maschinen ausgesetzt sind, wie der Maschineneinsatz die Bodenstruktur verändert und inwieweit der Erhalt der technischen Befahrbarkeit – im Besonderen durch den Einsatz von Bändern, Spezialfahrzeugen oder leichten Maschinen – zu erwarten ist (Gaertig et al. 2018).

Eine signifikante Beeinträchtigung der Bodenstruktur zeigte sich im Projekt bereits nach der ersten Überfahrt, der drohende Verlust der Befahrbarkeit nach der fünften Befahrung mit dem Forwarder (Riggert 2015; Riggert et al. 2016, 2017; Gaertig et al. 2018).

Sündermann & Röhe (2014) führen aus, dass auf Nassstandorten die Höhe des Wasserspiegels im Boden entscheidend für die Tragfähigkeit ist.

2.3.4 Bodenschutz im Wald

Das Bundesbodenschutzgesetz weist nur eine geringe Bedeutung für die Waldwirtschaft auf, denn der Vorsorge- und Gefahrenabwehraspekt tritt auf Grund von § 17 „Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ Absatz 2 hinter den Regelungen der Waldgesetze der Länder zurück (Wagner 2008; Gaertig et al. 2018).

Das Umweltschadensgesetz ist für die Waldbewirtschaftung nicht einschlägig, da die in der Anlage 1 genannten beruflichen Tätigkeiten diese nicht einschließen (Wagner 2008).

§ 18 Absatz 1 Satz 1 des Sächsischen Waldgesetzes (SächsWaldG) fordert unter der Überschrift „Pflegliche Bewirtschaftung des Waldes“ insbesondere den Erhalt oder die Verbesserung des Waldbodens und der Bodenfruchtbarkeit. Brockmann & Sann (2008) nennen in ihrem Kommentar zu dieser Norm beispielhaft die Vermeidung von

[3] Die Abkürzung RÜWOLA steht für „Rückegassen als Feinerschließungssysteme im Wald – Optimierung durch natürliche Regeneration und technische Maßnahmen unter Berücksichtigung der Belange von Naturschutz und Landschaftsplanung“.

Bodenverdichtung, die Vermeidung von Bodenverunreinigungen und den Schutz vor Erosion und Aushagerung als Ziele des forstlichen Bodenschutzes. Sie messen dem Waldboden, als Produktionsgrundlage der Forstwirtschaft, auf Grund der Nicht-Reproduzierbarkeit beziehungsweise der Nicht-Austauschbarkeit eine existenzielle Bedeutung zu. Ferner stellt das Waldgesetz im Absatz 2 den Bezug zur individuellen Leistungsfähigkeit des Waldbesitzers her (§ 18 Absatz 2 SächsWaldG). Brockmann & Sann (2008) kommen daher zu dem Schluss, dass an die unterschiedlichen Waldbesitzarten (Waldeigentumsarten) unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. Auf die besondere Allgemeinwohlverpflichtung des öffentlichen Waldes sei an dieser Stelle verwiesen (§ 46 Absatz 1 in Verbindung mit § 45 Absatz 1 Satz 1 SächsWaldG).

Vor fast vierzig Jahren haben Adams & Froehlich (1981) bereits das Erschließen der Waldbestände mit permanenten Rückegassen als vielversprechenden Ansatz des Bodenschutzes bezeichnet. Die Autoren beschreiben, dass das Nutzen von ausgewiesenen Rückegassen die Verdichtung auf einen überschaubaren Teil des Waldbodens beschränkt. Diese Technik hat sich als konzeptioneller Bodenschutz in der Forstwirtschaft Deutschlands etabliert und ist äußerst wirksam bei der Vermeidung von Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen abseits der Feinerschließung (Schack-Kirchner et al. 2020). Die Forstbetriebe sind heute nach gesetzlichen Vorgaben, nach den Maßgaben der Zertifizierungssysteme und auch im eigenen Interesse dazu verpflichtet (Mühlhaus & Weis 2010).

> „Rückegassen sind einfache, bestockungs- und hindernisfreie Bestandesschneisen in traktorbefahrbarem Gelände, die normalerweise ohne bauliche Maßnahmen angelegt werden können.“
>
> (Wüthrich 1992, S. 16)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die deutschen Bewirtschaftungsstandards von PEFC und FSC sich kaum voneinander unterscheiden:

> „Der Rückegassenabstand beträgt grundsätzlich mindestens 20 m. Bei verdichtungsempfindlichen Böden werden größere Abstände angestrebt [...] .“
>
> (PEFC 2014, S. 5)

> „Der Forstbetrieb strebt an, nicht mehr als 10% der bewirtschafteten Holzbodenfläche als Rückegasse zu befahren.“
>
> (FSC 2018, S. 29)

In beiden Zertifizierungssystemen ist ein größerer Rückegassenabstand lediglich als Soll-Bestimmung für verdichtungsempfindliche beziehungsweise für alle Standorte aufgeführt.

Nur die Zertifizierung nach Naturland fordert generell einen Abstand von 40 m:

> „Für eine waldschonende Holzernte und -bringung ist die Anlage eines dauerhaft festgelegten Rückegassensystems erforderlich. Dabei ist der Rückegassenabstand an der langfristigen Waldbehandlung auszurichten und unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse so zu wählen, dass nicht mehr als 10% des Waldbodens (Rückegassenabstand 40 m) befahren werden."
>
> (Naturland 2014, S. 6)

Dass über das tolerierbare Ausmaß an Bodenstrukturveränderungen zwischen den Ländern unterschiedliche Sichtweisen herrschen, konnte eine Umfrage der TU München bei den Landesforstverwaltungen im Jahr 2007 zeigen. So stand für die eine Gruppe die technische Befahrbarkeit der Rückegasse im Vordergrund – Bodenstrukturveränderungen dürften diese nicht beeinträchtigen, werden aber ansonsten auf der Gasse toleriert. Dem gegenüber stand die Gruppe derjenigen, die auch auf der Rückegasse die Bodenstrukturveränderungen auf das unvermeidliche Maß reduzieren wollen, um die biologische Produktionsfunktion weitestgehend zu erhalten. (Borchert 2008)

Der Auftrag der Forstchefkonferenz zum Einsetzen einer Arbeitsgruppe „Bodenschutz" beim Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF) im Jahr 2008, die im November 2009 Ergebnisse in Form einer Strategie zur Vermeidung von Bodenschäden vorlegte, zeigt den heutigen Stellenwert des Themas (Forbrig et al. 2010b).

Die Verwaltungen beziehungsweise die öffentlichen Forstbetriebe der Länder regeln den Bodenschutz sowie den Einsatz der Forsttechnik in Erlassen, Richtlinien oder Handlungsanweisungen. Gaertig et al. (2018) untersuchten die Vorgaben und Festlegungen von 13 Ländern anhand von sechs Kriterien. Die Autoren kamen im Allgemeinen zu dem Schluss, dass die „*Spannweite* [...] *von einer nahezu regelungsfreien Forstwirtschaft* [...] *bis hin zu detaillierten Bodenschutzrichtlinien, die standortsspezifisch differenzieren, Maschinenstandards definieren, Feinerschließungsdichten vorgeben und max. Fahrspurtiefen angeben*", reicht (Gaertig et al. 2018, S. 13 f.). Die sächsische Befahrungsrichtlinie[4] zählt darunter – im Speziellen mit folgenden Kriterien:

Integration alter Fahrspuren:	„vorhandenes Gassensystem prüfen, ggf. anpassen"
Gassenabstand:	20 m bzw. 40 m
Gassenbreite:	4 m
zulässige Fahrspurtiefe:	keine Angaben
Standortsdifferenzierung:	ja, sehr differenziert
Maschinenstandards:	ja, werden definiert

[4] Richtlinie **„Holzerntetechnologien – Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen"** (Sachsenforst 2006)

Darüber hinaus basiert die Bodenschutzstrategie des Freistaats Sachsen auf einer von der forstlichen Standortskartierung abgeleiteten Gefährdungskarte. Eine solche Grundlage ist auch in den Richtlinien der Länder Baden-Württemberg, Brandenburg und Niedersachsen zu finden. (Gaertig et al. 2018)

Nur fünf der dreizehn untersuchten Richtlinien wiesen Angaben zur zulässigen Fahrspurtiefe auf, wobei der Wertebereich von 15 bis 60 cm reicht (Gaertig et al. 2018). Lüscher et al. (2010) nennt für die Schweiz landesweit-definierte maximal zulässige Fahrspurtiefen in Höhe von 10 cm.

2.3.5 Technische Befahrbarkeit als Sollzustand

Zwischen den Ländern herrscht Konsens nur darüber, dass ein flächiges Befahren und ein Verlassen der für die Befahrung vorgesehenen 3,5 bis 4 m breiten Rückegassen nicht erlaubt ist (Erler & Güldner 2002; Gaertig et al. 2018).

Durch eine handelsübliche Kranreichweite von 10 m ergeben sich im vollmechanisierten Verfahren Gassenabstände von 20 m, wodurch sich kostengünstige und optimierte Standardverfahren anbieten (Erler & Güldner 2002; Frutig et al. 2016). Die biologische Funktion des Rückegassenbodens tritt in den Hintergrund (Erler & Güldner 2002; Erler et al. 2010). Vossbrink & Horn (2005) empfehlen, die befahrene Fläche durch die Anlage und den Erhalt eines permanenten Gassennetzes zu minimieren, um dadurch die für die Holzproduktion verbleibende ungestörte Fläche weitgehend zu erhalten. Auch Gaertig et al. (2018) stellen fest, dass mit dem Konzept der permanenten Feinerschließung die Bodenstrukturveränderungen auf einen Teil der Waldfläche konzentriert werden und damit der Verlust der ökologischen Bodenfunktionen toleriert wird. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei dem Konzept der permanenten Gasse nunmehr ausschließlich der Erhalt der technischen Befahrbarkeit im Fokus des örtlichen Wirtschafters steht (Erler & Güldner 2002; Erler et al. 2010; Gaertig et al. 2018). Demzufolge sind Überlastungen zu vermeiden und instabile Gassen auszubauen (Erler & Güldner 2002). Erler et al. (2010) weisen darauf hin, dass tiefe Fahrspuren zur kritischen Bewertungen des forstlichen Handelns durch Waldbesucher oder in Hanglagen zu Erosionen führen können und auch aus diesen Gründen zu vermeiden sind.

An dieser Stelle muss nach der Definition der technischen Befahrbarkeit gefragt werden. Hehn (2004) sieht die forstliche Befahrbarkeit einer Rückegasse dann gegeben, wenn die Befahrung mit forstlichen Spezialmaschinen weder „durchbrochene“ Stellen noch Fahrgleise verursacht. Letztere vernässen, was in der Folge zum Tragfähigkeitsverlust der Gasse beziehungsweise zum Aufsetzen oder Hängenbleiben der Maschine führt.

Gaertig et al. (2018) sprechen von einem Sollzustand, bei dem die bodenmechanische Tragfähigkeit nicht durch die Wirkungen der Maschinenlasten verloren geht. Die Autoren empfehlen, Eintiefungen durch die Holzerntemaschinen zu vermeiden und sicherzustellen, dass der Boden austrocknen kann, um bei der nächsten Befahrung tragfähig zu sein. Die Ergebnisse im Projekt „RÜWOLA“ zeigen, dass bei einer Wasserspannung um Feldkapazität der Verlust der technischen Befahrbarkeit droht (Riggert 2015; Riggert et al. 2016, 2017; Gaertig et al. 2018).

Erler et al. (2010) führen den Begriff der „forsttechnischen Befahrbarkeit“ ein. Ihrer Meinung nach schließt dieser Begriff sowohl die technischen Anforderungen (dauerhafte Befahrbarkeit) als auch die gesellschaftlichen Ansprüche an das Waldbild (Ästehtik) ein. Bezugnehmend zum letzteren Anspruch nennen die Autoren die Vermeidung von Fahrspuren und Erosion als angestrebtes Ziel.

2.3.6 Erhalt der technischen Befahrbarkeit

Nach Gaertig et al. (2018) liegt der Fokus bei der Diskussion zu Kriterien der bodenschonenden Holzernte auf dem Erhalt der technischen Befahrbarkeit permanenter Rückegassen. Die Autoren kategorisieren die Parameter, welche das Ausmaß von Bodenschäden durch die Befahrung der Waldböden bestimmen, in vier Kategorien:

1. Bodenparameter,
2. Feinerschließung,
3. Maschinenparameter sowie
4. Organisation des Forstmaschineneinsatzes.

Zum Erhalt der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, die sich nach Hehn (2004) in vier Gruppen einteilen lassen: fahrzeugtechnische, organisatorische, erschließungstechnische sowie baulich-technische Maßnahmen. Fasst man die letztgenannten zwei Gruppen gedanklich zusammen, wird deutlich, dass sich der Einfluss des Wirtschafters auf die oben genannten Kategorien 2. bis 4. beschränkt, die in öffentlichen Forstbetrieben durch Richtlinien festgelegt und geregelt werden (Gaertig et al. 2018).

Das Bodenschutzkonzept der Niedersächsischen Landesforsten leitet aus der Zielsetzung „Nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressource Boden“ eine dreigliedrige Strategie mit unterschiedlichen Lösungsansätzen für eine bodenschonende Holzernte ab: organisatorische, technische sowie waldbauliche Maßnahmen (NLF 2017). Letztere können in der oben genannten Systematik den organisatorischen Maßnahmen zugeordnet werden.

Die strukturierte Herangehensweise zur Einteilung der zur Verfügung stehenden Maßnahmen nach Hehn (2004) wird an dieser Stelle übernommen und um zwei Kategorien ergänzt. Der Abschnitt „Fachpolitische Maßnahmen“ beinhalten Vorschläge, die durch Politik und Verbände umgesetzt werden können. Maßnahmen die auf Betriebsebene im Bereich der Planung und Steuerung umzusetzen sind, werden im gleichnamigen Abschnitt zusammengefasst.

Bevor im Folgenden die einzelnen Alternativen näher beleuchtet werden, sollen zunächst die zusammenfassenden „eisernen Regeln“ der von der Forstchefkonferenz beauftragten AG Boden des KWF (nach Forbrig et al. 2010b) abgebildet werden.

„Eiserne Regeln“ zur Verbesserung des Bodenschutzes

(zitiert aus Forbrig et al. 2010b, S. 5):

1. „Eine flächige Befahrung ist grundsätzlich zu unterlassen. Außerhalb befestigter Wege dürfen Maschinen grundsätzlich nur auf Rückegassen fahren. Holzernteverfahren, Erschließungsmittel und Erschließungsdichte sind an die standörtlichen Gegebenheiten anzupassen.“

2. „Das Feinerschließungsnetz ist unabhängig vom aktuellen Waldbestand zu optimieren, permanent anzulegen und zu dokumentieren.“

3. „Bei Befahrung der Rückegassen ist darauf zu achten, dass die forsttechnische Befahrbarkeit erhalten bleibt. Das bedeutet, dass
   - → Tragfähigkeit und Traktion des Bodens dauerhaft erhalten bleiben,
   - → drohender Erosion und Pfützenbildung vorgebeugt wird (Vermeidung von Bodenabtrag bzw. Rillenerosion) und
   - → unakzeptable Veränderungen des Waldbildes vermieden werden („Waldästhetik“).“

4. „Die Kosten vorsorglicher Maßnahmen sowie das Risiko einer notwendigen Sanierung sind bei der Gesamtbewertung und Auftragsvergabe jeder forstlichen Maßnahme in vollem Umfang zu berücksichtigen.“

5. „Organisatorische Maßnahmen in den Forstbetrieben und bei der Holzernte bieten das größte Potenzial zur Verbesserung des Bodenschutzes. Organisatorische Maßnahmen, die vorsorglich auf den Rückegassen dem Erhalt der forsttechnischen Befahrbarkeit dienen, sind bereits vor der Befahrung zu planen und durchzuführen beziehungsweise mit den Auftragnehmern zu vereinbaren.“

6. „Es gibt zahlreiche maschinentechnische Möglichkeiten zur Verbesserung des Bodenschutzes. Auch für technische und maschinentechnische Maßnahmen gilt, dass sie bereits vor der Befahrung zu planen und zu realisieren beziehungsweise mit den Auftragnehmern zu vereinbaren sind.“

2.3.6.1 Fachpolitische Maßnahmen

Die Literatur schlägt eine Unternehmerdatenbank als einen bundesweiten Maschinenpool vor, um das Zugangsproblem zu zum Teil regional nicht verfügbarer Spezialtechnik zu lösen. Diese laufend aktualisierte Datenbank sollte die Leistungsprofile und Zertifizierungen der Unternehmer umfassen und dadurch Markttransparenz schaffen. (Wehner et al. 2010; Küthe et al. 2010)

ForstBW (2012a) empfiehlt das Etablieren von „Beratern“, die den Wissenstransfer und den Erfahrungsaustausch mit der Praxis vor Ort gewährleisten, sowie das Initialisieren von Praxisversuchen, um das große, vielversprechende Verbesserungspotential, zum Beispiel hinsichtlich der Optimierung des Bändereinsatzes, zu nutzen. Dass eine solche Forschung der Länder üblich ist, zeigt das Praxisprojekt im Forstbezirk Leipzig des Staatsbetriebes Sachsenforst. Hier wurden marktverfügbare Bänder auf besonders befahrungssensiblen Standorten erprobt (Heubaum & Padberg 2014).

2.3.6.2 Maßnahmen der Betriebsplanung und -steuerung

Küthe et al. (2010) erläutern, dass Haushaltsflexibilität und Liquiditätsspielraum in staatlichen und körperschaftlichen Forstbetrieben helfen kann, Bodenschäden zu vermeiden, indem Holzerntemaßnahmen zur Unzeit auf Grund von engen Soll-Vorgaben der jährlichen Haushalte vermieden werden. Ähnliche Effekte können durch vorsorgende Holzverkaufsvertragsgestaltung erzielt werden, indem ausreichend zeitliche und räumliche Flexibilität vereinbart wird beziehungsweise entsprechende Vorsorge in der Lagerhaltung getroffen wird (Küthe et al. 2010).

Die standortgerechte Baumartenwahl, die Förderung von Mischbaumarten und die nachhaltige Humusbewirtschaftung sowie die Waldkalkung sind vorsorgende „waldbauliche“ Maßnahmen. Einerseits haben Sie einen positiven Einfluss auf das Regenerationspotential eines Standortes. Andererseits helfen sie – neben der Entwicklung standortangepasster Einzelbaumstabilität sowie forstsanitärer Prophylaxe – die Stabilität der Bestände zu erhöhen und Zwangsnutzungen zu vermeiden, die schwere Bodenschäden verursachen können. (NLF 2017)

Die Forsteinrichtung sollte um Aspekte der forsttechnischen Durchführung erweitert werden und thematische Karten für das Revier und für den ganzen Forstbetrieb als Grundlage für ein koordiniertes Hiebsmanagement zur Verfügung stellen (Küthe et al. 2010).

Die Eingriffsstärke und das Durchforstungsintervall bestimmen maßgeblich die Erntemenge je Hieb und können als „waldbauliche“ Maßnahme zur Bodenschonung beitragen (NLF 2017).

Mehrjährige Verträge mit einem zuverlässigen Arbeitsvolumen als Grundstock bieten für beide Seiten Planungssicherheit (Küthe et al. 2010). Dass das Vergaberecht Rahmenverträge zulässt und eine mehrjährige Vertragsgestaltung auch für die Holzernte mit unwägbaren Sanitärholzanteilen praktikabel durchzuführen ist, konnte der Verfasser während seiner praktischen Dienstzeit für den Forstbezirk Bärenfels im Freistaat Sachsen unter Beweis stellen (Wächter 2016).

Küthe et al. (2010) nennen Prozess- und Qualitätsmanagement als wichtige Instrumente des Bodenschutzes. Diesbezüglich stellt der Einsatz zertifizierter Unternehmer einen Lösungsansatz dar (NLF 2017), da diese eine hohe Fachkompetenz garantieren (Küthe et al. 2010). Innerbetriebliche Holzernteaudits sind wichtige Maßnahmen der Prozess- und Qualitätssteuerung. Im Staatswald des Freistaats Sachsen wird dieses Instrument seit einiger Zeit erfolgreich angewendet (SMUL 2018).

Wehner et al. (2010) beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Spezialisierungsgrad der eingesetzten Technik und der notwendigen Qualität der Maschinenführer. Die Autoren sehen in der Aus- und Fortbildung der Fahrer ein großes Potential beim Schutz der Ressource Boden. Auch Küthe et al. (2010) betont sowohl für die Forstbetriebe als auch für die Forstunternehmerschaft den hohen Stellenwert einer kontinuierlichen Personalqualifizierung.

2.3.6.3 Organisatorische Maßnahmen

Alle Maßnahmen, die im Zuge der Planung und Organisation der Holzernte getroffen werden, bis hin zu der Entscheidung, das Arbeiten zeitweise zu unterbrechen, zählen zu den organisatorischen Maßnahmen (Hehn 2004). Im Folgenden sollen die organisatorischen Maßnahmen zum Erhalt der technischen Befahrbarkeit in drei Gruppen gegliedert werden: „Planung und Hiebsvorbereitung“, „Vergabe und Auftrag“ sowie „Vollzug und Qualitätsmanagement“.

Planung und Hiebsvorbereitung
Die Befahrungsempfindlichkeit der Waldböden in die Planung der Maßnahme einzubeziehen wird von Lüscher et al. (2010) gefordert. Sie soll als Grundlage bei der Maschinen- und Verfahrenswahl sowie bei der Terminplanung dienen.

Grüll (2011) beschreibt, dass das Variationspotential bei der Verfahrenswahl von der Praxis meist nicht ausreichend genutzt wird. Er entwickelte eine standortzentriertes, forsttechnisches Entscheidungssystem, welches die Waldstandorte sowohl nach deren technischen Befahrbarkeit als auch nach dem ökologischen Wert kategorisiert. Anhand dieser Klassifizierung sowie der technischen Eignung alternativer Verfahren wird eine Entscheidungsempfehlung für „standortsgerechte“ Holzernteverfahren gegeben.

Zur Bestimmung des natürlichen Bodenwertes zieht der Autor das nährkraft- und feuchteabhängige Ertragspotential des Standortes heran und teilt die Standorte in fünf „Produktionsfunktionsklassen“, für die jeweils ein maximal zulässiges Flächenbefahrungsprozent beziehungsweise ein bestimmter Mindestgassenabstand empfohlen wird. Die technische Befahrungseignung wird unmittelbar aus der mittleren Feuchtestufe der Standortsformengruppe abgeleitet und einer von fünf Befahrbarkeitsklassen zugeordnet. Im Rahmen eines Pilotprojektes wurde das Entscheidungsmodell im Landesforstbetrieb Brandeburg eingeführt. (Grüll 2011)

Analog zum Ertragspotential können auch andere Bodenfunktionen, wie zum Beispiel die Lebensraumfunktion, für die Ermittlung der Wertigkeit herangezogen werden (Grüll 2014).

Küthe et al. (2010) empfiehlt die Hiebsblockbildung, um eine schrotschussartige Verteilung der Hiebsflächen über das gesamte Revier und damit verbundene lange Rüstzeiten und damit im Zusammenhang stehende Bodenschäden zu vermeiden.

Die Bodenfeuchte unterliegt saisonalen Schwankungen (Borchert et al. 2013). Erler (2009b) beschreibt, dass im Moment der Verfahrenswahl durch den Revierleiter die Witterung und Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Maßnahme unbekannt sind. Da das zur Anwendung kommende Verfahren mit der Erstellung der Leistungsbeschreibung festzulegen ist, kommt der Wahl des richtigen Zeitpunktes eine wichtige Bedeutung zu. Das Ausnutzen von Trockenheit und Frost als Perioden, in denen der Boden eine höhere Tragfähigkeit und somit eine geringere Sensibilität aufweist, wird zur Abarbeitung der Hiebsmaßnahmen auf sensiblen Standorten empfohlen (Erler et al. 2010; Borchert et al. 2013; Sündermann et al. 2013; NLF 2017). Auch Gaertig et al. (2018) raten, die Spätsommerphase mit hoher Bodentrockenheit verstärkt zu nutzen. Gegebenenfalls kann auch durch das zeitliche Entkoppeln der Verfahrensschritte eine Verbesserung beim Bodenschutz erreicht werden (ForstBW 2012a).

Ferner kann die rechtzeitige Bestandesvorbereitung sowie ein Flächenpool für gleichartige Holzerntemaßnahmen innerhalb des Hiebsblockes Flexibilität beim Unternehmereinsatz ermöglichen (Küthe et al. 2010). Dies kann wiederum helfen, Bodenschäden zu vermeiden, indem bei nasser Witterung auf unsensiblere Standorte ausgewichen wird (NLF 2017). Auch Borchert et al. (2013) empfehlen das Vorhalten von Ausweichflächen, weisen aber daraufhin, dass dies in größeren Forstbetrieben einfacher realisiert werden kann als in den meisten Privatwäldern. Die Autoren empfehlen dem „Kleinprivatwald“, sich in Forstbetriebsgemeinschaften zu organisieren. Küthe et al. (2010) empfehlen, gleichartige Holzerntemaßnahmen sowie Ausweicharbeiten revierbeziehungsweise betriebsübergreifend in Planungskarten und Übersichten zusammenzustellen, um einen regionalen Informationsaustausch zu ermöglichen.

Vergabe und Auftrag

Küthe et al. (2010) empfehlen ein koordiniertes Hiebsmanagement, bei dem gleichartige Holzerntemaßnahmen gebündelt werden und mit einheitlicher, optimaler Systemtechnik bearbeitet werden.

Wehner et al. (2010) unterstreichen die Notwendigkeit gut ausgebildeter Einsatzleiter, die den aktuellen Stand des Wissens in Bezug auf Verfahren, Technik, Kosten und Nutzen kennen und im Sinne des Bodenschutzes einsetzen können.

Der Arbeitsauftrag und das damit verbundene schriftliche Festhalten von verbindlichen Regelungen zum Bodenschutz wird als organistorische Maßnahme ebenso empfohlen. So kann festgelegt werden, ab wann (Bodenfeuchte oder Spurtyp) die Befahrung einzustellen ist, welche besondere Maschinenausstattung, zum Beispiel Bogiebänder, einzusetzen ist oder auf welche Flächen ausgewichen werden kann. Darüber hinaus sollte das Arbeitsergebnis festgelegt, regelmäßig kontrolliert und abgenommen werden. (Lüscher et al. 2010; Borchert et al. 2013; NLF 2017)

Küthe et al. (2010) und Borchert et al. (2013) empfehlen wirksame Sanktionsmechanismen bei unternehmerischen Fehlverhalten hinsichtlich der Bodenschonung wie der drohende Ausschluss bei künftigen Aufträgen oder das Umlegen von Instandsetzungskosten auf den Schadverursacher. Hingegen sollte der Einsatz von besonders bodenschonender Technik auch entsprechend honoriert werden (Wehner et al. 2010; Küthe et al. 2010).

Vollzug und Qualitätsmanagement

Adams & Froehlich (1981) empfehlen, die Befahrung von der Feuchte des Bodens abhängig zu machen. Übersteigt die Bodenfeuchte den günstigen Bereich, ist das Fahren auf der Fläche einzustellen. Matthies et al. (1995) beschreiben dabei die Notwendigkeit, dass die Maschinenführer den Bodenfeuchtezustand erkennen und auf diesen reagieren können, um weitestgehend Schäden zu vermeiden.

Lüscher et al. (2010) wird konkreter und fordert, das Rücken bei zu hoher Bodenfeuchte (z.B. bei wechselnder Witterung) zu unterbrechen beziehungsweise Maßnahmen einzuleiten, um den Kontaktflächendruck zu vermindern. Dies ist möglich, indem mit reduziertem Lastgewicht oder mit kleinerer Maschine gerückt wird. Beides hat Auswirkungen auf die Produktivität (und somit auf die Kosten), aber auch auf die Befahrungsfrequenz (Wehner et al. 2010).

Gaertig et al. (2018) beschreiben die Notwendigkeit, den Maschineneinsatz sowie die Zuladung an die gegebene Bodenstabilität und Tragfähigkeit anzupassen, um die technische Befahrbarkeit zu erhalten. Wehner et al. (2010) führen aus, dass hier Softwaretools und Gewichtsüberwachungssysteme helfen können. Die Bodengefährdung, die Erschließungsdichte sowie die Holzerntemenge sind dabei bestimmende Größen.

Auch die Niedersächsischen Landesforsten betonen in ihrem Merkblatt, dass der Auswahl der Maschinen und Verfahren eine Bedeutung beizumessen ist (NLF 2017).

Erler et al. (2010) führen an, die Belastung auf den Waldboden durch die Fahrroutenbildung oder das Vermeiden unnötiger Überfahrten zu senken. Ein Befahrungsmanagement im Sinne einer Steuerung der Anzahl und des Gewichts der Überfahrten sowie der kontinuierlichen Messung der Spurtiefen als Kontrollgröße kann hierbei helfen (NLF 2017). Ziesak (1999) entwickelte ein computergestütztes Informationssystem, welches auf Grundlage von Standorts- und Maschineninformationen eine Aussage für den während der Befahrung tolerierbaren Wassergehalt formuliert.

Wehner et al. (2010) gehen hier noch weiter und fordern ein soft- und hardwaregestütztes Befahrungsmanagementsystem. Zum Leistungsspektrum sollen die Kontrolle, Einhaltung und Optimierung der Fahrbewegung genauso gehören wie die Zustandserfassung der Gasse. Eine Voraussetzung für ein solches System ist ein funktionierendes Echtzeit-Positionierungssystem mit einer Genauigkeit von weniger als 0,5 m. Eine an die Tragfähigkeit des Bodens angepasste Zuladung ist anzustreben, wobei eine Ladungsbeschränkung immer auch eine Leistungsminderung mit gleichzeitiger Lastfahrtenerhöhung zur Folge hat. (Wehner et al. 2010)

Lüscher et al. (2010) empfehlen zur Minimierung des Schlupfes und der dadurch verursachten Spurbildung Lastfahrten nur hangabwärts durchzuführen. Bergauffahrten sind möglichst nur leer durchzuführen.

ForstBW (2012a) empfiehlt das systematische Räumen der Gasse, indem das Holz komplett und nicht sortenweise gerückt wird.

Hamberger (1999) beschreibt die Notwendigkeit der Präsenz vor Ort, um zu kontrollieren beziehungsweise um durchzusetzen, dass die Rückegassen nicht verlassen werden. Er empfiehlt den Einsatz von GPS-Geräten zur Dokumentation und Überwachung des Maschineneinsatzes.

2.3.6.4 Fahrzeugtechnische Maßnahmen

Zu den fahrzeugtechnischen Maßnahmen werden größere Reifen, Breitreifen, variabler Reifendruck, Verwendung von Ketten beziehungsweise Bändern, variable Achsen mit erhöhter Achsenanzahl sowie stufenloser Antrieb und lastschaltbare Getriebe gezählt (Hehn 2004). Wehner et al. (2010) weisen auf die damit einhergehenden zusätzlichen (Investitions-)Kosten hin, die zunächst vom Unternehmer getragen und folglich auf den Auftraggeber umgelegt werden.

Reifen und Fülldruck
Die Literatur fordert seit langer Zeit den Einsatz von Niederdruck-Breitreifen im Forsteinsatz (Adams & Froehlich 1981; Nipkow 1983; Zander et al. 1988; Benthaus & Matthies 1993; Matthies et al. 1995; Borchert & Metan 2008; Borchert et al. 2013). Diese vermindern den Kontaktflächendruck, reduzieren den Schlupf und senken den Kraftstoffverbrauch bei gleicher Zugkraft. Bley (2002) konnte bei 1,2 bar deutlich höhere Zugkräfte als bei 3,0 bar feststellen. Durch Reduzieren des Reifenfülldrucks kann es jedoch zu Quetschungen der Reifenflanke (höherer Reifenverschleiß) oder zum Durchdrehen des Reifens auf der Felge kommen (Borchert & Metan 2008; Lüscher et al. 2010; Wehner et al. 2010). Vor allem auf hartem Untergrund, wie auf der Forststraße zeigt sich der sogenannte „Flankeneffekt“ (Jacke & Ebel 2006). Borchert & Metan (2008) empfehlen, den Reifendruck an die überwiegend vorherrschenden Untergrund-Bedingungen anzupassen.

Die Forschung erkannte bereits 1995 die bodenpflegliche Wirkung von Verstellanlagen, die eine optimale Anpassung des Reifeninnendrucks an den Fahrbetrieb erlauben (Matthies et al. 1995; Bley 2002; Lüscher et al. 2010). Nach Bley (2002) lässt sich der Reifeninnendruck mit einer solchen Anlage in weniger als zehn Minuten an die Geländegegebenheiten anpassen. Eine solche vollautomatische Reifeninnendruck-Verstellanlage kostet zwischen 10.000 und 20.000 Euro (Wehner et al. 2010). Solche Anlagen sind jedoch, anders als in der Landwirtschaft, in der Forstwirtschaft – bis auf Prototypen – kaum im Einsatz (Weise 2008; Borchert et al. 2013).

Haas et al. (2015) fanden heraus, dass sehr breite Reifen (940 mm) am Forwarder besser zum Erhalt der Befahrbarkeit beitragen können als Eco-Track-Universalbänder. Als Kriterium diente dabei die Fahrspurtiefe, die fotogrammetrisch aufgenommen wurde. Außerdem führen die Autoren als Vorteil der „Superbreitreifen“ im Vergleich zu Bändern an, dass einerseits Montage- und Demontagezeiten wegfallen und andererseits Kosten und Gewicht eingespart werden. Nachteilig sind deren hohe Anschaffungskosten sowie die mit der Breite verbundenen Einschränkungen im öffentlichen Straßenverkehr (Weise 2008).

Niederquerschnittsreifen können bei korrekter Anwendung eine gleichmäßigere Druckverteilung ermöglichen (Jacke & Ebel 2006). Auch die konsequente Verwendung von Reifen in Radialbauart kann die Bodenbelastung reduzieren – bisher dominieren aber aus Gründen der Robustheit solche in Diagonalbauweise (Weise 2008).

Die Erhöhung der Reifendurchmesser könnte sich ebenso günstig auswirken, ist aber zumindest bei Bogieachsen limitiert (Weise 2008).

Traktion

Einige Autoren nennen die bodenschonenden Effekte durch den Einsatz von Bogiebändern (Wippermann 2000; Richter 2008; Lüscher et al. 2010; Wehner et al. 2010; Erler et al. 2010; ForstBW 2012a; Borchert et al. 2013; Riggert 2015; Riggert et al. 2016, 2017; Gaertig et al. 2018). Dies sind Bänder aus Stahllegierungen oder Kunststoffen (tlw. auch mit Hartgummi bestückt), die auf beide Räder einer Bogieachse gezogen werden. Durch die stark vergrößerte Kontaktfläche reduzieren sie einerseits den Bodendruck („Softbänder“, „tragende Bänder“) und erhöhen andererseits die Traktion (Wippermann 2000; Richter 2008; Lüscher et al. 2010). Eibenstein (2011) und Eibenstein et al. (2012) weisen darauf-hin, dass Bogie-Bänder das Gewicht von Maschine und Ladung hauptsächlich über die wenigen unter den Rädern belasteten Platten auf den Boden übertragen und nicht gleichmäßig über alle auf den Boden aufliegenden im Zwischenradbereich (Heubaum & Padberg 2014).

Wippermann (2000) kalkulierte die zusätzlichen Kosten durch den Einsatz von Bogiebändern auf 1,54 DM/Fm. Die Kosten sind abhängig von der Einsatzdauer im Jahr, der Häufigkeit der Montage/Demontage, der zu bestückenden Achsenzahl der Maschine sowie der Reinigung beziehungsweise Instandsetzung der Forstwege. Darüber hinaus erhöhen sich die Fahrzeugmasse und die damit verbundenen Treibstoffkosten. Wehner et al. (2010) beziffern die Steigerung des Treistoffverbrauchs auf bis zu 30%. Außerdem müssen die Gefahr der Wurzelverletzungen an Gassenrandbäumen und die Schäden am Hauptwegenetz als Nachteile genannt werden (Lüscher et al. 2010; Wehner et al. 2010). Richter (2008) schätzt den Anteil der Maschinen, die zumindest teilweise mit Bogiebändern fahren, in Deutschland auf 30% bei Harvestern beziehungsweise auf 50% bei Forwardern. Für die De- beziehungsweise Montage benötigen geübte Arbeiter zwischen 15 und 45 min (Richter 2008). Auch Richter (2008) nennt die Schädigung der Forstwege durch das Befahren mit Bändern.

Neben der Radlast ist der Schlupf hauptverantwortlich für die Spurbildung, indem Oberbodenmaterial abgeschert und die Spur sozusagen ausgefräst wird (Wehner et al. 2010). Wehner et al. (2010) beschreiben, dass es bereits im Optimalbereich des Schlupfes (40 bis 80%; da hier die größte Traktion aufgebracht wird) zu einer Gleisbildung kommt. Sie empfehlen daher die Einführung von Schlupfbegrenzungssystemen. Solche Systeme werden bereits in gewöhnlichen PKWs zur Traktionsunterstützung eingesetzt. Auch Traktionshilfswinden sollen den Schlupf reduzieren (Lüscher et al. 2010; Wehner et al. 2010; ForstBW 2012a). Die Seilwinde ist hierbei mit dem Radantrieb synchronisiert und dient als unterstützender Antrieb. Wehner et al. (2010) nennen für diese Zusatzausstattung eine Maschinenpreissteigerung von 15 bis 20%.

Fahrwerk und Gewicht

Borchert et al. (2013) schreiben Raupenfahrwerken eine erheblich bessere Lastverteilung zu. Die größere Aufstandsfläche von Raupenfahrwerken führt zur Absenkung des Bodendrucks und folglich zu geringeren Strukturveränderungen im Boden. Auch Weise & Graupner (2006), Erler et al. (2010) und Gaertig et al. (2018) schildern die Risikominderung durch den Einsatz solcher Fahrwerke. Im Vergleich zur Befahrung mit Radfahrwerken sind höhere Wasser- und Luftleitfähigkeiten im Boden messbar (Uhl et al. 2003).

Sündermann et al. (2013) konnten durch Fallstudien aufzeigen, dass die Einsatzgrenze von Forstmaschinen mit Raupenfahrwerken bei einem Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt der Befahrung von 0 bis ca. 30 cm liegen. Auch Forwarder mit einem geringen Eigengewicht konnten in diesem Bereich nicht bodenschonend eingesetzt werden. In dem Bereich zwischen 30 und 60 cm traten nur ausnahmsweise Bodenschäden auf; im Bereich ab 60 cm unter Flur konnte uneingeschränkte Bodenschonung gewährleistet werden. (Sündermann et al. 2013)

Lüscher et al. (2010) verweisen auf punktuell hohe Bodendrücke auf Grund des nur teilweise bestehenden Kontaktes zwischen Gleiskette und Boden. Die Autoren nennen die nachteiligen Scherkräfte bei Richtungsänderungen und das generell hohe Risiko für Wurzelverletzungen an den Gassenrändern. Ohrner et al. (2003), Borchert et al. (2008) und Borchert et al. (2013) stufen den Raupenharvester aus bodenkundlicher Sicht als eindeutig bodenschonender ein. Auch sie gehen auf die nachteiligen Effekte im Hinsicht der Wurzeln ein und führen den Radharvester als wurzelschonender auf. Kettenlaufwerken mit elastischen Kunstoffplatten (Felastec-Laufwerke) wird eine besondere Wurzelschonung attestiert (Kremer et al. 2005; Uhl et al. 2005).

Sündermann & Röhe (2014) sowie Gaertig et al. (2018) verweisen auf die höheren Systemkosten auf Grund hoher Maschinen-, Transport- und Umsetzungskosten.

Raupen- und Schreitfahrwerken weisen zwar eine hohe Bodenpfleglichkeit auf, doch die langsamere Fortbewegungsgeschwindigkeit erhöht die Kosten der Rückung (Wehner et al. 2010; Sündermann & Röhe 2014).

Matthies et al. (1995) haben in umfangreichen Untersuchungen festgestellt, dass der spezifische Bodendruck der Forstmaschine die ausschlaggebende Kenngröße für Strukturveränderungen am Boden ist. 50 kPa stellte sich hierbei als Schwellenwert heraus (bei mittleren Wassergehalt). Daher empfehlen die Autoren den Einsatz von Forstmaschinen mit einem spezifischen Bodendruck von weniger als 50 kPa. Auch Erler et al. (2010) verweisen auf Fahrzeuge mit niedrigen Kontaktflächendrücken.

Borchert et al. (2013) führen aus, dass die Lastverteilung durch die Erhöhung der Aufstandsfläche, zum Beispiel durch größere Räder oder eine größere Anzahl von Rädern, optimiert werden kann. Diesbezüglich stellen sie fest, dass die meisten Harvester Sechs-Rad-Maschinen und fast alle in Deutschland eingesetzten Forwarder Acht-Rad-Maschinen sind. Wehner et al. (2010) sehen hier noch Entwicklungsspielraum. So entwickelte zum Beispiel der Forstmaschinenhersteller Ponsse einen 10-Radforwarder.

Da der Harvester die Rückegasse nur einmal, langsam befährt und dazu leichter ist als der Tragschlepper, schlussfolgert Richter (2008), dass die Schäden am Waldboden eher durch den Forwarder verursacht werden. Auch Erler & Güldner (2002) und Hauptvogel (2004) kommen auf Grund der hohen Masse und Geschwindigkeit des Forwarders zu diesem Schluss. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen Uhl et al. (2003), Kremer et al. (2003) sowie Ohrner et al. (2003)[5]. Sie beschreiben ihren Versuch, bei dem der dominierende Effekt des Rad-Forwarders zum Verlust der bodenschonenden Effekte des Raupenfahrwerks führte (vgl. Borchert et al. 2008).

Als fahrzeugtechnische Maßnahme zählt auch das „Downsizing“, also der Einsatz kleinerer Maschinen, was in Bezug auf schädliche Bodenstrukturveränderungen Vorteile und in Bezug auf Produktivität und Kosten Nachteile mit sich bringt (Neef 2011; Kietz et al. 2017; Gaertig et al. 2018). Sündermann & Röhe (2014) stellte auf befahrungsempfindlichen Nassstandorten Nordostdeutschlands fest, dass „*der vergleichsweise leichte, mit Bändern ausgestattete Kleinforwarder „TERRI 34“ den Anforderungen an eine bodenschonende Rückung am besten gerecht*“ wird (Sündermann & Röhe 2014, S. 38). Schreiber (2012) verweist auf den Zusammenhang zwischen der Ladekapazität des Forwarders und der Anzahl notwendiger Überfahrten.

Auch in der Leichtbauweise beziehungsweise in der Massenverteilung an der Maschine (Gegengewichte, Verzicht auf Wasserfüllungen in den Reifen, kürzere Auslegerreichweite) wird Potential im Sinne des Bodenschutzes gesehen (Wehner et al. 2010).

Ein Bewertungsschema zur Bodenbelastung von Forstmaschinen anhand von fahrzeugspezifischen Größen wurde von Weise (2002) entwickelt. Für Radfahrwerke werden die Reifendimensionen (Durchmesser und Breite), der Reifeninnendruck, die Antriebsart, eine eventuelle Wasserbefüllung und die Radlast zur Bewertung herangezogen. Die Antriebsart, der Fahrwerksaufbau, der Typ der Laufbänder, die Bauart der Bodenplatten, die Steghöhe, die Aufstandsfläche, die Anzahl der Laufrollen sowie das Verhältnis der Kettengliedlänge zum Abstand der Laufrollen determinieren die Bodenbelastung, welche von einem Raupenfahrwerk ausgeht. (Weise 2002)

[5] Bei diesen drei Artikel handelt es sich dem Anschein nach um dieselbe Untersuchung.

2.3.6.5 Erschließungstechnische Maßnahmen

Hehn (2004) nennt die gestrecke Gassenführung, ausreichend große Kurvenradien sowie den Verzicht auf Einmündungen der Gassen untereinander als erschließungstechnische Maßnahmen.

Lüscher et al. (2010) weisen auf die systematisch anzulegende Feinerschließung hin, die bestehende Fahrlinien integrieren muss. Dabei sollen die Rückegassen detailliert für sogenannte „Feinerschließungseinheiten“ geplant werden. Diese Planung setzt sich von einer groben Hiebsflächenplanung insofern ab, dass natürliche oder künstliche Hindernisse, wie Felspartien, Gewässer, Waldränder etc. die Feinerschließungsfläche begrenzen. Als Grundlage einer Fahrlinienplanung nennen die Autoren neben der topografischen Karte die Standorts- und Bodenkarte.

Auch Mühlhaus & Weis (2010) empfehlen als Vorplanung ein Variantenstudium auf der Karte, bevor die Rückegasse mittels Kompass und Marschzahl eingemessen wird. Der Rückegassenabstand muss an betrieblichen Zielen und Vorgaben sowie den zur Verfügung stehenden Verfahren ausgerichtet werden (Mühlhaus & Weis 2010).

Des Weiteren kann die eigentümerübergreifende Planung und Anlage der Rückegassen als erschließungstechnische Maßnahme (v.a. im Kleinprivatwald) empfohlen werden (Lüscher et al. 2010; Borchert et al. 2013).

Gaertig et al. (2018) empfehlen, das permanente Feinerschließungssystem an der Befahrungsempfindlichkeit und dem Regenerationspotential des Bodens sowie an dem Bewirtschaftungsziel auszurichten und eher weitere Gassenabstände zu wählen. Die Autoren betonen die Notwendigkeit, bei der Neuanlage von Feinerschließungssystemen vorhandene Fahrspuren konsequent zu integrieren, auch wenn es dabei zu leichter Über- oder Untererschließung kommt, um zusätzliche Verdichtungen zu vermeiden.

Auch bei Kalamitäten ist die Feinerschließung sorgfältig zu planen oder muss präzise wieder aufgefunden werden. Dabei können alte Kartenwerke, sichtbare Fahrspuren, die Waldbodenvegetation (Bodenstrukturveränderungen beeinflussen die Zusammensetzung) und die Gefügemorphologie helfen. (Trumpa & Gaertig 2008; Gaertig & Green 2009; Lüscher et al. 2010; Mühlhaus & Weis 2010; Weltecke & Gaertig 2011; Gaertig et al. 2018; Schack-Kirchner et al. 2020)

Der Dokumentation der Feinerschließung muss sowohl im Gelände (welche hier als dauerhafte Kennzeichnung der Rückegassen immer wieder erneuert werden muss) als auch in der Karte eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden (Lüscher et al. 2010; Mühlhaus & Weis 2010; NLF 2017; Schack-Kirchner et al. 2020). Mühlhaus & Weis (2010) nennen neben der Markierung der Gassenrandbäume auch die Markierung durch Verpflockung am Gasseneingang oder auf dem Verlauf und betonen die Möglichkeiten und Grenzen der RFID-Technologie („Radio Frequency Identification

Technologie“). Ein wirtschaftlicher Weg der reproduzierbaren Rückegassendokumentation wird nur über „Global Navigation Satellit Systems“ möglich sein.

Erler & Hauptvogel (2004) untersuchten den Einfluss von zwei Varianten des Standardverfahrens mit Harvester und Forwarder unter Verwendung temporärer Gassen auf den Zeitverbrauch, die Produktivität und folglich die Kosten. In der ersten Variante wurde der Abstand der permanenten Rückegassen auf 40 m erweitert. Das Befahren mit dem Forwarder beschränkt sich auf diese Erschließung. In den Zwischenfeldern wird auf einer temporären Gasse die Befahrung mittels Harvester zugelassen. In der zweiten Variante wurde der Abstand der permanenten Befahrungslinien auf 60 m erweitert und die Befahrung des Zwischenbereiches mit dem Harvester auf zwei temporären Gassen zugelassen. In beiden Varianten konnten Erler & Hauptvogel (2004) kaum Schäden am verbleibenden Bestand feststellen, die auf das geänderte Verfahren zurückzuführen sind. Sie stellten fest, dass die Produktivität des Harvesters mit zunehmenden Abstand der permanenten Gassen abnimmt. Die Produktivität des Forwarders nahm auf Grund der besseren Auslastung zu, konnte jedoch die Gesamtproduktivität nicht merklich beeinflussen. Die Holzerntekosten lagen in der 40 m-Variante um 15 bis 20% und in der 60 m-Variante um 40 bis 50% über den Kosten des Standardverfahrens. Die Flächeninanspruchnahme in Bezug auf die Forwarderbefahrung sank durch die Varianten auf 10% und ca. 7% (wurde also um 50% und 66% reduziert). Unter der Prämisse, dass die Harvesterüberfahrt auf den temporären Gassen als ökologisch verträglich angesehen wird, kann – den Autoren nach – die 40 m-Variante auf Grund der guten Ökoeffizienz als sinnvolle Alternative angesehen werden. (Erler & Hauptvogel 2004)

Nach Schack-Kirchner et al. (2020) können unterschiedliche Gassenabstände auch durch die individuelle Gewichtung der folgenden Kriterien begründet werden: mit 10% im 40 m-Gassensystem ist die Flächeninanspruchnahme nur halb so groß als im 20 m-System, die Beeinträchtigung der forsttechnischen Befahrbarkeit ist auf Grund der proportionalen Erhöhung der Zahl der Überfahrten hier jedoch eher zu erwarten; mit zunehmenden Gassenabstand konzentrieren sich die Nährstoffe zunehmend auf der Gasse und der Anreiz die Gasse zu verlassen steigt; schleifendes Vorrücken schädigt den Oberboden. Mit der Erweiterung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m und der damit einhergehenden Verringerung des Mechanisierungsgrades steigen die Kosten der Holzernte (Sündermann & Röhe 2014).

Sündermann & Röhe (2014) weisen daraufhin, dass die Erweiterung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m zwar die Flächeninanspruchnahme verringert, doch die Häufigkeit der Überfahrten erhöht, wodurch schnell schwere Bodenstrukturveränderungen entstehen können. Auch andere Autoren nennen die Überfahrhäufigkeit als entscheidende Größe für die Bodenschonung, die es mit verschiedenen Maßnahmen zu verringern gilt (Wehner 2005b; Hehn & Sauter 2005).

2.3.6.6 Baulich-technische Maßnahmen

In der Literatur wird als baulich-technische Maßnahme zum Erhalt der Befahrbarkeit an erster Stelle die Reisigmatte mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Darüber hinaus werden das Mulchen der Rückegasse, das Abschieben des Mittelsteges, das Einebnen der Fahrspuren, die Entwässerung von Nassstellen, die Querung von Entwässerungseinrichtungen, die Befestigung der Rückegasseneinfahrten sowie die punktuelle Befestigung von Problemstellen den baulich-technischen Maßnahmen zugeordnet (Hehn 2004; ForstBW 2012a, b; Fründ & Gaertig 2017; NLF 2017).

Die folgenden Abschnitte sollen die genannten Maßnahmen beschreiben und Rahmenbedingungen sowie Erfahrungswerte bezüglich der Kosten nennen. Alle Maßnahmen ab einer Fahrspurtiefe von mehr als 40 cm und Maßnahmen die sich auf mehr als 10% der Rückegassenlänge erstrecken werden als Sanierungsmaßnahmen behandelt (ForstBW 2012b). Den Maßnahmen zur Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit (Sanierung) wird ein eigener Abschnitt gewidmet (siehe Seite 33).

Schutz der Gasse durch eine Reisigauflage
Die Literatur nennt die drucksenkende Wirkung armierender Schichten wie der Reisigauflage, wodurch Auswirkungen der Befahrung auf die Bodenstruktur verringert werden und vorhandene Fahrspuren stabilisiert werden können. Darüber hinaus schützt die Reisigauflage den Oberboden vor dem Aufreißen durch die Traktionskräfte. (Matthies et al. 1995; Eliasson & Wasterlund 2007; Jacke et al. 2008; Lüscher et al. 2010; Erler et al. 2010; Wehner et al. 2010; ForstBW 2012b)

Vossbrink & Horn (2005) stellten in ihrer Untersuchung zur Bodenspannung fest, dass die dabei realisierbare Reisigmatte nicht ausreichte, um die Bodenbelastung auf ein bodenphysikalisch verträgliches Maß zu reduzieren.

Andere Autoren nennen verschiedene Nachteile der Reisigmatte. So beschränkt sie sich auf Nadelholzbestände, in denen ausreichend Kronenmaterial anfällt, und ist demzufolge erst ab einer bestimmten Eingriffsstärke nutzbar (Wehner et al. 2010). Nach aktuellem Stand des Wissen werden ca. 10 bis 15 kg/m^2 Reisig benötigt um eine gute Reduktion des Bodendruckes zu erzielen (Jacke et al. 2008; Labelle et al. 2015). Schäffer et al. (1991) nennen als Grenze für eine Bodenpfleglichkeit eine Mächtigkeit von mindestens 25 cm (konsolidierter Zustand nach Befahrung). Die Wirkung von Astteppichen aus Laubholz ist denen aus Nadelholz unterlegen (Lüscher et al. 2010; Labelle et al. 2015). ForstBW (2012b) nennt geringen Reisiganfall als Einsatzgrenzen, da ein Transport von Reisig nicht sinnvoll ist. In diesem Fall empfehlen Schäffer et al. (1991) die Vergrößerung des Rückegassenabstandes in Betracht zu ziehen. Die Autoren weisen darauf hin, dass den höheren Aufarbeitungskosten eine hohe Bodenpfleglichkeit gegenüberstehen kann.

Erler et al. (2010) und Wehner et al. (2010) mutmaßen, dass die Reisigmatte mittelfristig die Feuchtigkeit auf der Gasse erhöht und somit die befahrungsempfindliche Phase verlängert. Dietrich (2011) greift diese Fragestellung auf und kommt in seiner Untersuchung zu einem anderen Schluss. Er fasst zusammen, dass eine Reisigauflage zu keiner Erhöhung der Bodenfeuchte führt. Dietrich (2011) schließt somit einen negativen Einfluss und die damit einhergehende Einschränkung der Befahrbarkeit durch die Reisigauflage aus. Auch Borchert et al. (2013) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass nach Niederschlagsereignissen der Wassergehalt zunächst stark anstieg und ebenso schnell wieder zurück ging. Im Inneren des Bestandes und im Rückegassenboden unter der Reisigauflage sank der Wassergehalt bis zum nächsten Niederschlag kontinuierlich, hingegen dieser auf Rückegassen ohne Reisig kaum weiter sank. Borchert et al. (2013) schließen daraus auf eine deutliche Beeinträchtigung der Wurzel-Wasseraufnahme auf der Gasse ohne Reisigauflage.

Durch die Konzentration des biologischen Materials auf der Gasse kommt es außerdem zu einer Nährstoffverlagerung, die jedoch keine Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe für die Waldbäume hat (Hehn 2004; Wehner et al. 2010; Borchert et al. 2013, 2015; Stutz et al. 2015).

Als Vorteil nennt Hehn (2004) die einfache Anwendbarkeit im Holzernteverfahren und die daraus resultierenden geringen Kosten. Dem widerspricht ForstBW (2012b), da hier der (nachträgliche) Einbau mit dem Rückekran während der Rückung vorgeschlagen wird. Laut dieser Quelle entstehen dadurch Kosten in Höhe von 0,50 bis 1,00 Euro/lfdm. Die Maßnahme ist ebenso zur Sanierung geeignet (ForstBW 2012b).

Einbau eines Knüppeldammes

Hehn (2004) nennt den Knüppeldamm als Weiterentwicklung der Reisigmatte und bezeichnet die fixierte Bauweise mit Spangen oder flexiblen Gittern als den „echten“ Knüppeldamm. Der Autor beschreibt die Vorteile dieses Bauwerks in der überwiegenden Verwendung von natürlichen Materialien sowie in der Dauerhaftigkeit und Belastbarkeit. Als Nachteile werden die hohen Kosten genannt, da der Bau eines Knüppeldammes einerseits Erfahrung und Zeit benötigt und andererseits die Holzausbeute mindert (Hehn 2004; Wehner et al. 2010; Forbrig et al. 2010a).

Fründ & Gaertig (2017) weisen auf den Unterschied zur Reisigauflage in Bezug auf die mechanischen Eigenschaft des Derbolzes hin und vermuten die Notwendigkeit einer größeren Holzmenge, um den gleichen Effekt zu erzielen. Die Autoren verweisen ferner auf das Fehlen von systematischen Untersuchungen zum Nutzen und der Wirksamkeit des Knüppeldammes.

Nach Borchert et al. (2013) eignen sich Knüppeldämme nur, um kurze Problemstellen zu überwinden, da sie nur material- und zeitaufwendig herzustellen sind.

Mulchen der Rückegasse
ForstBW (2012b) beschreibt das Mulchen der Rückegasse wie folgt: Jede der beiden Fahrspuren wird zunächst vorwärts befahren, um die Stöcke und das Reisig zu zerkleinern. Danach wird durch eine Rückwärtsfahrt das Material nochmals zerkleinert und die Fahrspur nivelliert. Dieses Vorgehen kann bei Bedarf wiederholt werden, um ein einheitliches Planum zu erzeugen. ForstBW (2012b) nennt Steine im Oberboden und Wasser in den Fahrspuren als Einsatzgrenzen. Diese Maßnahme kann demnach nur bei trockener Witterung durchgeführt werden. Diese Maßnahme eignet sich ebenso zur Sanierung (ForstBW 2012b). Nach ForstBW (2012b) verursacht sie Kosten in Höhe von 0,20 bis 0,66 Euro/lfdm.

Abschieben des Mittelsteges
Als zeitnahe Beseitigung von 30 bis 40 cm tiefen Spuren nennt ForstBW (2012b) das Abschieben des Mittelsteges. Hierbei wird mittels Heckpolterschild des Rückefahrzeuges, Bagger oder Kompaktraupenlader das trockene Erdmaterial des Mittelsteges jeweils nach rechts und links in die Fahrspuren geschoben. Stöcke und Reisig auf der Gasse limitieren diese Maßnahme (ForstBW 2012b). Außerdem wird eingeräumt, dass durch diese Maßnahme beinahe nur ein „kosmetischer“ Effekt erreicht wird, da die Randaufwölbungen der Fahrspur verbleiben und dadurch das Wasser nicht abgeleitet wird (ForstBW 2012b). Diese Maßnahme verursacht nach ForstBW (2012b) Kosten in Höhe von 0,20 Euro/lfdm.

Einebnen der Fahrspuren
Erler et al. (2010) prognostizieren, unter der Voraussetzung einer mehrjährigen Ruhezeit, eine tragfähige Oberfläche durch das Einebnen der Fahrspuren. ForstBW (2012b) beschreibt das Einebnen der Fahrspuren durch einen Bagger (5 t bis 10 t) oder einen Kompaktraupenlader (2 t bis 4 t). Die Seitenwülste und der Mittelsteg werden mit dem anstehenden Material „egalisiert“. Große Wurzelstöcke oder nicht befahrbare Rückegassen limitieren ein solches Vorgehen. ForstBW (2012b) bewertet diese Maßnahme mit 1 bis 2 Euro/lfdm als kostengünstige Sanierung.

Auch die Verbesserung des Erscheinungsbildes für Waldbesucher wird mit dem Mulchen der Gasse, dem Abschieben des Mittelsteges beziehungsweise mit dem Einebnen der Fahrspuren erzielt (Fründ & Gaertig 2017).

Entwässerung von Nassstellen
Erler et al. (2010) nennen die Anlage von Querableitern, um eine dauerhaften Vernässung zu verhindern. Auch ForstBW (2012b) nennt drei verschiedene Maßnahmen um vernässte Bereiche der Rückegasse trocken zu legen. Hier wird empfohlen, seitlich der Rückegasse Versickerungsmulden anzulegen, die mit den Fahrspuren durch einen Entwässerungsgraben verbunden werden. ForstBW (2012b) empfiehlt je nach Geländesituation und dem Auftreten von zu rodenden Stöcken Bagger der 5 t bis 10 t-Klasse. Reicht die Inklination des Geländes aus, kann auf eine Versickerungsmulde verzichtet werden, indem Querabschläge zur Talseite gezogen werden. Je nach Arbeitsaufwand und verfügbaren Mitteln kann dies entweder mit dem Polterschild oder dem Holzgreifer der Rückemaschine oder mit einem Bagger realisiert werden (ForstBW 2012b). ForstBW (2012b) empfiehlt dieses Vorgehen bei einzelnen Nassstellen auf einer sonst stabilen Rückegasse.

Querung von Entwässerungseinrichtungen
Tiefe Gräben mit hoher Böschung, die die Rückegasse in Querrichtung schneiden, empfielt ForstBW (2012b) nicht zu verdolen. Als Grund wird der enorme Pflegeaufwand angeführt. Vielmehr soll der Graben vor der ersten Querung mit Stammabschnitten ausgelegt werden, die nach der letzten wieder zu räumen sind. Somit kann die Funktion der Entwässerungsgräben, die häufig an den Einmündungen der Gassen an den Waldstraßen auftreten, langfristig sichergestellt werden (ForstBW 2012b).

Befestigung der Rückegasseneinfahrt
Das Befestigen der Rückegasseneinfahrt dient vornehmlich der Stabilisierung des stark beanspruchten Einmündungsbereiches der Gassen. Darüber hinaus verhindert es den Erdaustrag und folglich starke Verschmutzungen des Holzabfuhrweges, was wiederum zu dessen Erhalt beiträgt. Nach ForstBW (2012b) entstehen für das Auskoffern des Einfahrtbereiches mit einem Bagger auf 8 m Breite am Knotenpunkt beziehungsweise 4 m Breite in der Gasse, auf einer Länge von 5 bis 15 m und einer Tiefe ca. 40 cm sowie für den Einbau von Grobschlag Kosten in Höhe von ca. 500 Euro pro Einfahrt.

Punktuelle Befestigung von Problemstellen
ForstBW (2012b) beschreibt diese Maßnahme für die punktuelle Verbesserung der Tragfähigkeit bei kleinflächigen Störungen. Auch hier werden die nicht tragenden Bodenschichten des zu sanierenden Bereiches mit einem Bagger ausgehoben. Je nachdem, ob vor Ort anstehendes Material eingebaut wird oder Material angekauft und antransportiert werden muss, werden hier Kosten in Höhe von 4 Euro/lfdm beziehungsweise 14 Euro/lfdm genannt. Für den Fall des Antransportes von Fremdmaterial ist das Problem zu lösen, wie dieser ohne zusätzliche Befahrungsschäden vollzogen werden kann (Fründ & Gaertig 2017).

2.3.7 Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit

Ein verdichteter beziehungsweise strukturgestörter Boden benötigt zur Regeneration Energie durch Bodenlebewesen oder bodenpysikalische Prozesse (Quellung/ Schrumpfung, Austrockunung, Kryoklastik) (Hildebrand 1987; Schäffer 2005; Goutal et al. 2012; Gaertig et al. 2018). Er erholt sich auf natürlichen Wege nur sehr langsam. Die Angaben in der Literatur reichen von einigen Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten (Zander et al. 1988; Schäffer 2005; Ebeling et al. 2016, 2017). Zum Beispiel konnten Benthaus & Matthies (1993) sechs Jahre nach einer Befahrung keine nennenswerte Regeneration des Bodens unter den Fahrspuren feststellen. Ähnliche Ergebnisse beschreiben von Wilpert & Schäffer (2006). Die Autoren konnten nach 18 Jahren im Oberboden eines Lehmstandortes Gasdiffussionskoeffizienten und Wurzeldichten feststellen, die mit den Werten einer Kontrollfläche vergleichbar waren. Im Unterboden waren die Wurzeldichten auch 24 Jahre nach der Befahrung noch signifikant niedriger. Kremer (2008) zeigt mit seiner Literaturstudie zum Regenerationsvermögen befahrungsbedingter Strukturveränderungen die Schwierigkeiten, die Erholungszeiträume veränderter Bodenstrukturen einzuschätzen. Grundsätzlich haben „einfach verdichtete“ Böden bessere Regenerationschancen als solche des Spurtyps 3 (vgl. Abbildung 1, S. 9), wenn auch die weitgehende Regeneration ein langwieriger Prozess ist (Kremer 2008).

Der Oberboden regeneriert durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse beziehungsweise auf Grund der Kryoklastik und Bioturbation in einem überschaubaren Zeitraum. Der einmal verdichtete Unterboden verfügt über kein sehr großes Erholungspotential und bleibt dadurch auf lange Zeit verdichtet. Dadurch neigt der Boden zur Vernässung oder Erosion (Adams & Froehlich 1981; Rab 2004; Lüscher et al. 2010; Meyer et al. 2011).

Gaertig et al. (2000a) beschreibt für die Auflockerung stark verdichteter Oberböden eine Abbruchlockerung mit einem speziellen Anbaugerät (MM100). Die Autoren sehen in diesem intensiven Verfahren jedoch nur die letzte Rettung stark verdichteter Böden, um sie überhaupt wieder als Lebensraum verfügbar zu machen. Auch andere Autoren schließen eine mechanische Lockerung in Form einer Bodenbearbeitung, wie wir sie aus der Landwirtschaft kennen, im Wald aus (Meyer et al. 2011).

Ebeling et al. (2016) untersuchten im Rahmen des RÜWOLA-Projekts die Bodenstrukturveränderungen auf Rückegassen in drei Regionen Niedersachsens über einen Zeitraum von 40 Jahren in Form einer unechten Zeitreihe. Um das Regenerationspotenzial zu qualifizieren wurden der pH-Wert des Oberbodens und die Humusform (zur Beurteilung des biologischen Potentials) sowie der Tongehalt (zur Beurteilung der physikalischen Potentials) herangezogen. Auf Standorten mit hohen pH-Werten, hoher Bioturbation und hohen Tongehalten regeneriert der Boden nach 20 bis 30 Jahren. Auf sauren, sandigen Standorten mit niedriger Bioturbation waren auch 40 Jahre nach der

letzten Befahrung noch signifikante Unterschiede in der Gasdurchlässigkeit nachweisbar (Ebeling et al. 2017; Gaertig et al. 2018).

Wie wir wissen, hängt die technische Befahrbarkeit von den Eigenschaften des Untergrundes (also des Bodens) ab, die unter Umständen durch eine frühere Befahrung verschlechtert wurden. Ist die technische Befahrbarkeit erst einmal verloren, muss die Befahrbarkeit wiederhergestellt werden, um eine Holzernte mit fahrenden Maschinen weiterhin zu ermöglichen.

Steigerung der natürlichen Regeneration durch Kalkung
Seit dem Jahr 1986 wurden im Freistaat Sachsen rund 400 Tausend ha Wald gekalkt. Neben der Kompensation der Säurealtlasten des Bodens sowie aktueller Säureeinträge zielt die Bodenschutzkalkung auch auf die Verbesserung der Lebensbedingungen für Bodenlebewesen und Baumwurzeln und somit auf die Verbesserung der Vitalität der Waldbestände.

Fründ & Gaertig (2017) beschreiben zur Steigerung der biologischen Aktivität die Ausbringung von kohlensaurem Kalk auf der Rückegasse. Sie erwarten durch die Einstellung des optimalen pH-Wertes die Steigerung der natürlichen Regeneration der Gasse, insbesondere durch die Gefügestabilisierung durch zweiwertige Kationen, die Verbesserung der Porenverteilung und Porenkontinuität und der damit einhergehenden Regulierung des Bodenwasser- und Bodengashaushalts. Die Autoren empfehlen, die Kalkmenge an einem für Regenwürmer günstigen Ziel-pH von 5 bis 5,3 auszurichten und den Kalk vor der Befahrung auszubringen, da durch diese eine gewisse Einarbeitung erfolgen kann, die Kalkgabe mit einer Bodenperforation zu verbinden oder den Kalk durch Fräsen oder Schlitzen oberflächlich einzuarbeiten, um auch tiefere Horizonte zu erreichen. Die Autoren schlagen vor, gemahlene, magnesiumreiche Düngekalke (kohlensaure Kalke) mit einer hohen Depotwirkung – wie bei der Bodenschutzkalkung von immissionsgeschädigten Wäldern – zu verwenden, und weisen darauf hin, dass naturschutzrechtliche Restriktionen dem Einsatz entgegenstehen können. Sie nennen eine Kostenschätzung in Höhe von ca. 150 Euro/ha. (Fründ & Gaertig 2017)

Steigerung der natürlichen Regeneration durch Bepflanzung
Ein biologischer Ansatz stellt die Regeneration der Rückegasse mit Vorwaldbaumarten dar. Diese Methoden können die Auswirkungen der Befahrungen rückgängig machen, ohne mechanisch in den Boden einzugreifen (Lüscher et al. 2008). Inwiefern die beschriebenen Methoden die technische Befahrbarkeit wiederherstellen können, bleibt offen. Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Forschungen auf diesem Gebiet gegeben, um die Potentiale der biologischen Verfahren aufzuzeigen.

Meyer et al. (2011, 2014) stellten durch die Bepflanzung der Rückegassen mit Schwarzerlen und dem gleichzeitigen Einbringen von Humus eine Verbesserung der

Lagerungsdichte fest. Die Bewurzelung der Erlen wirkte sich maßgeblich auf das Grobporenvolumen aus und trägt damit zur Durchlüftung des Bodens und die damit verbundene Reaktivierung der Bodenflora und -fauna bei. Sie konnten damit bestätigen, dass das Wachstum von Baumwurzeln nach der Verdichtung erheblich zur Wiederherstellung der Bodenstruktur beitragen kann. Nach den Autoren sinkt damit die Gefahr einer Vernässung der Rückegasse deutlich.

Nach Fründ & Gaertig (2017) zielt die Anpflanzung von Gehölzen auf der Rückegasse auf die Regeneration der Wurzelraumfunktion, den Erosionsschutz, die Senkung der Verdichtungsempfindlichkeit bei Wiederbefahrung und die Steigerung der Biodiversität. Ferner kann damit eine zusätzliche Wertschöpfung durch eine energetische Nutzung des dabei entstehenden Holzes erzielt werden, die nach Fründ & Gaertig (2017) bisher aber noch nicht erprobt ist. Die Autoren weisen auf den hohen Lichtbedarf der regenerierenden Gehölze hin und schließen daraus, dass der Einsatz auf Sturmwurf- oder Kahlschlagsflächen begrenzt ist. Ferner benennen sie diesbezüglich Probleme durch Schäden des Schalenwildes.

Nach Fründ & Gaertig (2017) fördert jede Art der Bepflanzung die biologische Regeneration von Rückegassen. Sie nennen in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit des Einbringens krautiger Pflanzen, so zum Beispiel die Begrünung der Rückegassen mit einer Schattenrasenmischung.

Haas et al. (2017) konnten durch die Gräser *Juncus effusus* und *Carex brizoides* keine direkte Verbesserungen des Gashaushaltes und der Lagerungsdichte der Böden messen. Trotzdem nehmen die Autoren an, dass durch die Bildung von Wurzelporen nach dem Absterben der Pflanzen beziehungsweise nach der Freigabe dieser Poren ein Beitrag zur Belüftung verdichteter Böden geleistet wird.

Steigerung der natürlichen Regeneration durch Regenwürmer

Fründ & Gaertig (2017) beschreiben das Einbringen von Regenwürmern als „Grobporen-Erzeuger“ zur Verbesserung der Belüftung, der Durchwurzelbarkeit, der Streuzersetzung und Bioturbation sowie zur Erhöhung der Infiltration. Da es sehr wahrscheinlich ist, dass – zumindest auf Standorten mit günstigem pH-Wertbereich (größer 4) – Regenwürmer selbstständig innerhalb weniger Jahre in den Rückegassenboden einwandern können, ist das kostenintensive Einbringen nicht zu rechtfertigen (Fründ & Gaertig 2017).

Nivellierung eingefahrener Gleise

Um ein einheitliches Niveau der Gasse herzustellen wird vornehmlich nach der Holzerntephase, solange der Boden noch genügend Plastizität aufweist, die Gasse mittels eines Schildes am Schlepper oder einer Fräse planiert (Hehn 2004). In anderen Fällen wird dazu ein Bagger verwendet.

Erhöhung der Tragfähigkeit von Rückegassen mit Branntkalk
Brand & Priemer (1959) beschreiben in den späten 1950er Jahren den Forst- und Wirtschaftswegebau mit Kalk als Bauelement. So war es in dieser Zeit notwendig, möglichst viele Wälder mit den geringen zur Verfügung stehenden Mitteln zu erschließen. Bei diesem Verfahren wird zunächst Kalk in den Boden eingemischt und anschließend verdichtet, um eine Tragschicht herzustellen. Bei der Wirkungsweise des Kalks im Boden unterscheiden die Autoren zwei Vorgänge: die Umwandlung der Bodenstruktur sowie die Hydraulische Verfestigung. Indem der Kalk mit Tonmineralen reagiert, verändern sich durch Ionenaustausch-Vorgänge die Quellungs-Schwindungs-Eigenschaften des Bodens. Die Tonminerale werden ausgetrocknet und die Struktur des Bodens wird körnig-sandiger. Brand & Priemer (1959) beschreiben eine Verstärkung der Effekte durch die Verwendung von Feinkalken, welche erst im Boden löschen und dabei viel größere Wassermengen verbrauchen sowie Wärme abgeben, welche wiederum den Wasserentzug durch Verdunstung steigert. Die Hydraulische Verfestigung entsteht durch Reaktion vorhandener Tonminerale und Kieselsäuren mit dem CaO oder MgO des Kalkes. Diese Hydraule-Faktoren können auch künstlich in Form von Hydraulischen Kalken, Trass oder Hochofenschlacke in den Boden eingebracht werden. Fraglich ist, ob eine solche Methode auf der Rückegasse anwendbar ist, denn schließlich ist auch dieser Bereich des Waldbodens bewurzelt.

Fründ & Gaertig (2017) bestätigt, dass die Kalkstabilisierung von Böden im Tiefbau etablierte Praxis ist, verweist aber bei der Anwendung im Forst auf den großen Aufwand bei flächiger Anwendung und auf bodenökologische Bedenken wegen der pH-Wirkung. Die Autoren nennen auch das Aufbringen von Holzasche, welches ähnliche Wirkungen erzielt (Fründ & Gaertig 2017).

Auch Hehn (2004) beschreiben eine solche Stabilisierung in Einzelfällen und nennen die Nachteile in Form von zusätzlichen Fahrtbewegungen für Materialtransport und -einbringung sowie die enormen Kosten für den Kalk (Weißfeinkalk ca. 50 Euro/t, Kalk/Zement ca. 135 Euro/t).

Befestigung der Rückegasse mit Schotter oder Kies
Der Einbau von groben, standortsfremden Materialien ist nach Hehn (2004) nicht nur kostenintensiv (Transport- und Einbaukosten), sondern führt auch zum „schleichenden“ Ausbau der Rückegassen zu Maschinenwegen, da durch den „Baustellenverkehr“ die Schäden an der Gasse vergrößert werden.

Hehn (2004) nennt die Befestigung und Verdolung der Rückegasseneinmündung als eine sinnvolle und notwendige Maßnahme. Sie stabilisiert den am meisten in Anspruch genommenen Teil der Gasse, überbrückt den Weggraben und gleicht den Höhenunterschied zwischen Gasse und Waldstraße aus. Außerdem kennzeichnet die Befestigung die Einmündung indirekt, was die Wiederauffindbarkeit der Rückegasse erleichtert.

2.4 Auswirkungen der Befahrung auf die Bestockung

2.4.1 Ertragskundliche Effekte

Dass Bäume den Rückegassenboden kaum erschließen können, zeigen übliche Vitalitätsparameter des Kronenraumes (Gaertig et al. 2018). So deuten Feinreisig und Blattverlust auf die geminderte Baumgesundheit durch die Strukturveränderungen in Folge der Befahrung hin (Hetsch et al. 1990; Gaertig et al. 2002, 2018).

Bereits in den 1980er Jahren konnten Wachstumsverlusten bei Nadelbaumarten (zumindest teilweise) auf die Bodenstrukturveränderungen durch das Befahren mit schweren Forstmaschinen zurückgeführt werden (Adams & Froehlich 1981; Froehlich & McNabb 1983). So berichten Adams & Froehlich (1981) von einem Rückgang des Zuwachses von 5 bis 15% auf verdichteten Standorten.

Auch Bredberg & Wästerlund (1983) beschreiben, dass Rindenverletzungen an gröberen Wurzeln durch Befahrung häufig sind und zu Zuwachsverlusten bis zu 12% führen können.

Einen Zusammenhang zwischen strukturellen Bodeneigenschaften und Bestandeswachstum konnte Uhl (2008) feststellen. Der Autor weist daraufhin, dass bei unsachgemäßen Maschineneinsatz die Bodenstruktur langfristig negativ beeinflusst wird und dadurch Zuwachsverluste eintreten können.

Jäger (2012) hat in seiner Literaturstudie unterschiedliche Aussagen zum ertragskundlichen Einfluss der Rückegasse gefunden. So stellten vier seiner acht Quellen fest, dass es langfristig zu keinen Produktionseinbußen durch die Fahrlinien kommt. Vier andere Studien beschreiben geringere Flächenleistungen durch den Feinaufschluss. In einigen Fällen waren die Gassenrandbäume in der Lage, durch stärkeres Wachstum die Flächenverluste zumindest in Teilen auszugleichen.

Ähnlich wie bei den ertragskundlichen Einbußen kommt die Literatur auch bei den Wachstumsverlusten einzelner Bäume durch die Bodenverdichtung infolge von flächiger Befahrung zu unterschiedlichen Ergebnissen (Jäger 2012). Einige Untersuchungen stellten keine Unterschiede des Baumwachstums bezüglich der Bodenverdichtung fest. Bei grobkörnigen Substraten war sogar ein positiver Effekt sichtbar, der durch die verbesserte Speicherfähigkeit des Bodens begründet wurde. Jäger (2012) arbeitete Wachstumsverluste durch Bodenverdichtungen aus mehr als 15 Quellen heraus.

Des Weiteren fasste Jäger (2012) zusammen, dass in fünf von sieben Studien Wachstumsverluste nach Durchforstungen an den Fahrspurrändern festgestellt wurden.

Kremer & Matthies (1997) konnten 6 bis 35 Jahre nach Durchforstungen beziehungsweise Bodenstrukturveränderungen keine Zuwachsverluste (durch jahrringanalytische Methoden) an den Gassenrandbäumen feststellen, obwohl die bodenphysikalische Beeinflussung deutlich nachweisbar war. So lag eine erhöhte Trockendichte, eine beeinträchtigte Porenkontinuität sowie eine stark verminderte Leitfähigkeit vor. Die Autoren beschreiben, dass eventuelle Zuwachsverluste durch bessere Umgebungsbedingungen (mehr Lichtgenuß, weniger unterirdische Konkurrenz) aufgehoben wurden. Sie konnten sogar einen umgekehrten Effekt aufzeigen, der jedoch statistisch nicht abzusichern war. So wiesen die Spurrandbäume höhere Zuwächse als ihre Nachbarn im Bestandesblock auf. Auch im Hinblick auf die Stabilität konnten die Autoren keine Verluste oder Verringerungen durch die Befahrung verzeichnen. Bei den durchgeführten Wurzelgrabungen wurde weder eine Abnahme der Wurzelmasse, noch Degenerationen der unterirdischen Pflanzenteile festgestellt (Kremer & Matthies 1997; Kremer 1999). Die geschilderte Ergebnisse kamen durchweg auf durchschnittlich bis gut versorgten Standorten zustande.

Auch Borchert et al. (2013) schildern die Schwierigkeit, Zuwachseinbußen allein Bodenstrukturveränderungen durch Forstmaschinen zuzurechnen, und teilen die Annahme, dass die Beeinträchtigung des Bodenwasser- und Bodenlufthaushaltes teilweise durch den Genuss von mehr Licht am Gassenrand kompensiert wird.

Andere Untersuchungen zum Einfluss der Befahrung auf die unterirdischen Pflanzenteile stellten einen Rückgang der Feinwurzeldichte fest (Gaertig et al. 2000a, 2001; Eppinger et al. 2002). Dies ist auf Belüftungsprobleme des Oberbodens zurückzuführen (Gaertig et al. 2000a, b, 2001). Gaertig et al. (2000a) spricht in diesem Zusammenhang von einer „Diffussionsbarriere“ als Synonym für den verdichteten Oberboden. Nach Gaertig et al. (2001) ist dies eine (Teil-)Ursache bei der Komplexkrankheit des Eichensterbens. Auch Eppinger et al. (2002) verweist auf einen negativen Einfluss auf die untersuchten Buchen, quantifiziert ihn jedoch nicht.

Schack-Kirchner et al. (2020) sehen hinsichtlich der Frage, inwiefern der Boden der Rückegassen für die Wasser- und Nährstoffaufnahme genutzt werden und welchen Einfluss die Rückegasse dadurch auf das Wachstum und die Stabilität des Bestandes hat, weiteren Forschungsbedarf.

2.4.2 Schäden an den verbleibenden Bäumen

Bredberg & Wästerlund (1983) beschreiben, dass Schäden am Boden und Bestand zu erheblichen Zuwachsverlusten und finanziellen Ertragseinbußen – zum Beispiel auf Grund von Qualitätsminderungen im Schaft durch Pilzbefall und Fäule – führen können.

Weise & Graupner (2006) beschreiben, dass vor allem bei flach wurzelnden Baumarten (wie bei der Fichte) Wurzelschäden beim Einsatz von Raupenfahrwerken unvermeidbar sind. Durch Schälschäden oder Abrisse besteht die Gefahr der Pilzinfektion und anschließender Fäulnis. (Weise & Graupner 2006)

Ohrner et al. (2003) und Borchert et al. (2008) konnten mit ihren Untersuchungen zeigen, dass sich hinsichtlich der Häufigkeit von Wurzelverletzungen Rad- und Raupenharvester kaum unterscheiden. Sie stellten jedoch in der Schadschwere Unterschiede fest: So verursachte der Radharvester überwiegend Rindenabhub, das Raupenfahrwerk hingegen verletzte den Holzkörper massiv beziehungsweise scherte die Hauptwurzeln ab. Die Autoren stellten fest, dass bei Folgebefahrung mit einem Radforwarder die Schäden noch einmal wesentlich vergrößert wurden. In der Folge der Wurzelverletzungen entstand Rotfäule, was den Erlös entsprechend minderte. (Borchert et al. 2008)

Nill et al. (2011) stellten in ihrer Untersuchung ein außerordentlich problematisch hohes Ausmaß von befahrungsbedingten Rindenschäden fest und weisen auf die damit verbundenen Wertverluste und Minderausbeuten sowie auf die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen hin, um die baumartenspezifischen ertragsrelevanten Konsequenzen zu quantifizieren beziehungsweise monetär zu bewerten.

Schätzungen zufolge haben alle Bäume innerhalb eines Meters von der Gasse einen auf Grund vorhandener Fäule reduzierten Wert um 50% (Fries 1975, zitiert in Jäger 2012).

Im Rahmen einer umfassenden Technikfolgenabschätzung wird verschiedentlich empfohlen, das Risiko nicht hinzunehmender Beschädigungen am verbleibenden Bestand und an der Verjüngung in die Beurteilung von Holzernteverfahren einzubeziehen (Bacher-Winterhalter & Sauter 2005; Pausch 2007).

Schack-Kirchner et al. (2020) beschreiben, dass bei der Wahl des Rückegassenabstandes nicht nur Aspekte des Bodenschutz berücksichtigt werden, sondern beispielsweise auch die Pfleglichkeit gegenüber dem verbleibenden Bestand in die Überlegungen einbezogen werden. Die Autoren nennen sowohl das steigende Ausmaß von Rinden- und Wurzelverletzungen der Gassenrandbäume als auch die Verletzungen an Rinde und Wurzelanläufen. Beide sind abhängig vom Gassenabstand (Bacher-Winterhalter & Sauter 2005; Schack-Kirchner et al. 2020).

2.4.3 Effekte auf die Verjüngung

Adams & Froehlich (1981) beschreiben den Zusammenhang zwischen Bodenverdichtung und Abnahme des Höhenwachstums von Sämlingen.

Cochran & Brock (1985) stellten den negativen Einfluss der Bodenverdichtung auf das frühe Höhenwachstum von gepflanzten Kiefern fest.

Hildebrand (1983) untersuchte strukturveränderte, befahrene Lößlehme und stellte fest, dass die Keimbett-Funktion des Bodens ab einer Lagerungsdichte von 1,25 g/cm^3 nahezu aussetzt.

Die Trockendichte bei der Untersuchung von Kremer & Matthies (1997) lag weit unter dem von Hildebrand (1983) genannten Grenzwert. Sie konnten keine Wachstumseinschränkungen der Pflanzung feststellen. Auch die Naturverjüngung zeigte keine Wachstumsunterschiede in Bezug zu den Referenzbereichen (Kremer & Matthies 1997; Kremer 1999).

2.5 Waldbauliche Effekte

Einige Autoren beschreiben eine nicht akzeptable Einschränkung des notwendigen waldbaulichen Handlungsspielraumes oder sogar den Verlust von waldbaulicher Gestaltungsfreiheit bei der Anwendung von engen Gassenabständen, wie zum Beispiel 20 m (Erler & Güldner 2002; Wolter 2013).

Nach Erler (2009a) zwingt die Einengung des Waldbaus auf 16 m breite Streifen zwischen den Rückegassen den Wirtschafter zu Entscheidungen, die bei breiteren Blöcken anders ausgefallen wären.

Wächter & Erler (2012) vermuten, dass die Feinerschließung mit Rückegassen den örtlichen Wirtschafter in seiner Entscheidung einschränkt, da nunmehr nicht mehr die gesamte Holzbodenfläche für waldbauliches Handeln verfügbar sei. So könnten einerseits keine Bäume auf der Rückegasse stehen und andererseits eigneten sich auch Gassenrandbäume nicht als Wertträger bei der Positivauslese, da deren Prädisposition für Ernteschäden zu groß wäre. Dadurch müsste die gleiche Anzahl von Bäumen auf einer deutlich kleineren Fläche „ausgelesen“ werden, wodurch der optimale Abstand unterschritten oder die Anzahl der Auslesebäume reduziert werden müsste. Dieser Effekt nehme mit abnehmendem Rückegassenabstand zu. (Wächter & Erler 2012)

Wehner (2005a) erklärt die Notwendigkeit einer umfassenden Technikfolgenabschätzung, die auch die Auswirkungen der Holzerntemaßnahmen auf den verbleibenden Bestand einbeziehen muss. Er führt aus, dass Schäden am Stamm auch zum frühzeitigen Ausfall von wichtigen Individuen der Bestandesstruktur führen können, was wiederum die Stabilität der Bestände beeinträchtigen kann.

2.6 externe Effekte der Holzernte

Externe Effekte entstehen, indem Wirtschaftssubjekte andere negativ beeinflussen. Diese „Nebenwirkungen der Produktion“ werden nicht über den Markt erfasst oder bewertet, berühren Dritte in ihrer Wohlfahrt beziehungsweise in ihrem Konsumverhalten und verursachen der Gesellschaft Kosten (externe Kosten). Diese tauchen weder im betrieblichen Rechnungswesen noch in den privaten oder öffentlichen Haushalten auf. (Wicke 1993)

2.6.1 gesellschaftliche Effekte

Neben den Effekten für den Waldbesucher wirkt die Holzernte direkt auf den im Wald arbeitenden Menschen.

Verschiedentlich wird empfohlen, die Ausbildung tiefer Fahrspuren aus waldästhetischen Gründen zu vermeiden, da sie auf Erholungssuchende abstoßend wirkt, Anlass für Kritik an der Forstwirtschaft gibt und letztlich die gesellschaftliche Akzeptanz der Waldbewirtschaftung in Frage stellt (Erler 2009a; Erler et al. 2010; Borchert et al. 2013).

Das In-Frage-stellen der nachhaltigen Forstwirtschaft durch den Waldbesucher beim Anblick befahrener Walderschließung resultiert nach Wehner & Sauter (2005) aus der – aus Sicht des Erholungssuchenden auftretenden – Diskrepanz zwischen dem positiv erlebtem und teilweise verklärtem Naturraum „Wald“, der in vielfältiger Art und Weise von der Gesellschaft zur Erholung genutzt wird, und der forstlichen Produktion mit großen, lauten Holzerntemaschinen durch den Waldbewirtschafter.

Die Arbeit des Forstwirts ist gefährlich und belastend. Schack-Kirchner et al. (2020) beschreiben die Notwendigkeit motormanueller Arbeit bei weiten Rückegassenabständen und den erhöhenden Einfluss auf die Gefährdung und die Belastung der Waldarbeiter. Der Grad der Belastung und Gefährdung ist dadurch indirekt abhängig vom Rückegassenabstand.

2.6.2 ökologische Effekte

Schack-Kirchner et al. (2020) nennen hier Veränderungen der Biodiversität. So kann beobachtet werden. dass sich die Bodenvegetation auf der Rückegassenfläche auf Grund der veränderten Feuchteverhältnisse verändert oder durch Spurbildung Biotope, wie zum Beispiel Laichablagegewässer der Gelbbauchunke, entstehen.

3 Methodik

Der sachgerechten Auswahl der Holzernteverfahren kommt in der modernen Forstwirtschaft Mitteleuropas eine besondere Bedeutung zu. Denn Forsttechnik muss nicht nur die waldbaulichen Ziele des örtlichen Wirtschafters umsetzen, sondern dabei auch den Boden sowie den verbleibenden Bestand schonen und darüber hinaus auch einen Beitrag zur gesellschaftlichen Akzeptanz der Waldbewirtschaftung leisten. Der Feinerschließung – als Bindeglied zwischen der Erschließung der Wälder mit ganzjährig LKW-befahrbaren Wegen und den Waldbeständen – kommt hierbei eine zentrale Bedeutung zu. Sie beeinflusst das Portfolio möglicher Holzernteverfahren, ermöglicht die forsttechnische Befahrbarkeit der Waldbestände und ist Aushängeschild für eine ordnungsgemäße Forstwirtschaft, sofern Spurbildung und Grundbrüche vermieden werden.

Der Rückegassenabstand beeinflusst maßgeblich die Verfahrensgestaltung und somit auch die Holzerntekosten. Da die Kranreichweite der standardmäßig zur Anwendung kommenden Maschinen begrenzt ist, sind bei weiteren Gassenabständen zusätzliche Arbeiten zu verrichten. Dies führt zu größeren Verfahrenskosten, wodurch die Betriebsergebnisse der Forstbetriebe sinken. Den Rückegassen wird aber auch eine Rückwirkung auf die Produktionsfunktion des Bodens unterstellt. Dies fand sogar Eingang in die sächsische Befahrungsrichtlinie, wie später noch gezeigt wird. Wie schwer die Quantifizierung solcher Effekte ist, wurde bereits dargelegt. Ferner kommt es immer wieder zu Beobachtungen, dass die Konzentration der Befahrung auf permanente Gassen zu Beeinträchtigungen beziehungsweise Schädigungen der Befahrbarkeit und/oder öffentlichen Akzeptanz führen. Darüber hinaus wird auch eine Auswirkung der Rückegasse auf den waldbaulichen Erfolg vermutet.

In der vorliegenden Arbeit soll ein Modell herangezogen werden, das es ermöglicht, die unterschiedlichen Erschließungsalternativen ökonomisch und auf Basis theoretisch hergeleiteter Verfahrenskosten miteinander zu vergleichen. Darauf aufbauend soll ein Weg aufgezeigt werden, wie verschiedene Arbeitsverfahren und Nutzungsregime für unterschiedliche Feinerschließungssysteme bewertet werden können.

Da das Modell eine numerische Datengrundlage voraussetzt, ist zunächst eine Simulation der naturalen und monetären Bestandesentwicklung erforderlich. Da nicht alle theoretisch möglichen Holzernteverfahren untersucht werden können, sollen nur praxisübliche Optionen einbezogen werden. Ferner muss zur ökonomischen Optimierung eine weitere Verfahrensauswahl auf Basis der Kosten folgen. Hierfür ist eine Quantifizierung

von Maschinenkosten und Produktivitäten erforderlich. Danach schließt eine stufenweise „Optimierung“ des Nutzungsregimes (Sortierung, Eingriffsstärke, Umtriebszeit) an, sodass im Ergebnis eine Bewertung anhand der unterschiedlichen Rentabilitäten möglich wird.

In einem nächsten Schritt soll das Modell um Effekte erweitert werden, die Mehrkosten alternativer Verfahren kompensieren können. Es wird ein Weg aufgezeigt, wie neben Ertragsverlusten und der Schädigung der technischen Befahrbarkeit auch die gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen und waldbauliche Vorteile in das Modell integrierbar sind. Da diese Effekte teilweise nur schwer quantitativ beziehungsweise monetär determiniert werden können, soll in einem dritten Schritt die „Simple Betterness Method“ (Klemperer 1996) angewendet werden. Hierbei handelt es sich um ein entscheidungsunterstützendes Verfahren, das auf dem Opportunitätskostenansatz aufbaut.

Die strikte theoretische Vorgehensweise bringt den Vorteil der gedanklichen Distanz mit sich, mit der sich eingefahrene Denkschemata auflösen und in einen größeren Modellzusammenhang stellen lassen. Die verwendeten Zahlen veranschaulichen die Methode und eignen sich, grundlegende Zusammenhänge beispielhaft aufzuzeigen.

3.1 Das Faustmann-Modell als Forstökonomisches Handlungskalkül

Die Forschungsfrage erfordert ein ökonomisches Modell, welches in der Lage ist, sowohl Verfahrensoptionen ökonomisch vergleichbar zu machen, als auch weitere Effekte der Holzernte abzubilden.

Zunächst ist es notwendig, die Kosten und Erlöse des Systems zu beschreiben. Bei der Holzernte fallen in aller Regel Holzerntekosten und Erlöse aus dem Verkauf des Holzes an. Vereinfacht kann eine Holzerntemaßnahme wie folgt dargestellt werden:

$$DB\ I = E - K_{HE} \tag{1}$$

Der Deckungsbeitrag I ($DB\ I$; „holzerntekostenfreier Erlös“) ergibt sich demnach aus der Differenz zwischen den Holzerlösen E und den Kosten K_{HE}, die zur Ernte des Holzes notwendig sind. Sowohl die Erlöse auf der einen wie auch die Kosten auf der anderen Seite bestehen aus einer Preis- und einer Mengenkomponente. Die Mengen ergeben sich aus der durchzuführenden Maßnahme. Die Preise entstehen auf Märkten. Um die Preise annähernd zu bestimmen, können sie kalkuliert, geschätzt oder durch Untersuchungen erhoben werden.

Zur Maximierung des Deckungsbeitrages kann im Forstbetrieb an verschiedenen „Stellschrauben gedreht“ werden. Die Forstbetriebe werden immer bestrebt sein, das geerntete Holz bestmöglich am Holzmarkt zu verkaufen, um die Erlöse zu maximieren. Auf der anderen Seite sind sie zudem bestrebt, die Kosten für die Ernte des Holzes auf ein mögliches Maß zu minimieren. Natürlich kann auch die Menge der Holzernte erhöht werden, sofern die Grenzen der Nachhaltigkeit dabei nicht überschritten werden. In den folgenden Betrachtungen wird diese Einflussmöglichkeit jedoch ausgeblendet, da davon ausgegangen wird, dass die Maßnahme und somit die zu entnehmende Holzmenge von der waldbaulichen Zielstellung für den Bestand und nicht von kurzfristigen monetären Interessen bestimmt wird.

Eine statische Betrachtungsweise ist nur dann sinnvoll, wenn alle Zahlungsströme unmittelbar und im zeitlichen Zusammenhang zueinander anfallen. Existieren Unregelmäßigkeiten in den Zahlungen oder wirkt der erzielte Nutzen über den Zeitpunkt der Kostenverursachung hinaus, muss eine dynamische Investitionsrechnung durchgeführt werden (Deegen et al. 2000). Nach Deegen et al. (2000) ist das gebräuchlichste forstwirtschaftliche Investitionsmodell das nach Martin Faustmann benannte Modell. Es gilt international als allgemein anerkannt (Samuelson 1976; Viitala 2006; Deegen et al. 2011) sowie am meisten zitiert und findet auch unter reinen Ökonomen erhebliche Beachtung (Deegen 2000). Folgende Formel beschreibt das Modell (nach Faustmann 1849):

$$C_{0_\infty} = \frac{z_{Bbg.}q^T + \sum_{t=1}^{T-1} z_{Wpfl.t}q^{T-t} + z_{EN}}{q^T - 1} \Rightarrow max. \tag{2}$$

wobei

C_{0_∞} der Bodenertragswert (Kapitalwert) einer endlosen Waldwirtschaft,

$z_{Bbg.}q^T$ die auf die Umtriebszeit T prolongierten Begründungskosten,

$\sum_{t=1}^{T-1} z_{Wpfl.}q^{T-t}$ die summierten und auf den Zeitpunkt T prolongierten Deckungsbeiträge aus den Vornutzungen und

z_{EN} der Deckungsbeitrag aus der Endnutzung zum Zeitpunkt T sind.

Das Zeichen q steht für die Summe aus 1 und dem Zinssatz i. Alle drei Terme werden in der Faustmann‘schen Formel addiert und daraufhin diskontiert. Da dieses Modell von einer ewigen Waldwirtschaft ausgeht, muss der Nenner um eins subtrahiert werden. Die ausführliche „Mechanik“ der Faustmannschen Formel sowie die Herleitung und Erläuterung der einzelnen im Folgenden dargestellten Modellannahmen kann bei Deegen (2000) nachgelesen werden.

Dem Modell liegen folgende Annahmen zu Grunde (aus Deegen 2000, S. 94):

1. Es existiert ein vollkommener Kapitalmarkt.
2. Alle gegenwärtigen und zukünftigen Preise einer Wirtschaft sind konstant und bekannt.
3. Waldboden stellt ein frei handelbares Marktgut dar. Er kann jederzeit und zu beliebiger Menge zum Marktpreis gekauft, verkauft beziehungsweise gepachtet oder verpachtet werden.

C_{0_∞} der Formel 2 beschreibt den Barwert einer ewigen Waldwirtschaft, der in der Forstökonomie „Bodenertragswert“ genannt wird. Er bezieht sich jedoch immer auf den Zeitpunkt $t = 0$, d.h. auf den Beginn eines Umtriebes. Entscheidungen zu einem anderen Zeitpunkt, also während eines Umtriebes sind aber keine Seltenheit. Um zu diesem Zeitpunkt eine Entscheidung bezüglich einer anstehenden Investition zu treffen oder den Wert eines Bestandes zu berechnen, wird häufig der sogenannte „Kapitalhaltungswert“ (dieser Begriff stammt aus dem Englischen: „capital holding value“) genutzt. Dieses Modell berücksichtigt nur die noch erwarteten Zahlungsströme. Gemäß der „sunken cost theory“ werden bereits geflossene Zahlungen, unabhängig von ihrer Richtung, bei der Entscheidung nicht berücksichtigt. Sie werden als „versunken“ und dadurch nicht mehr änderbar akzeptiert. Einzig die zukünftigen Zahlungen werden für eine Entscheidung herangezogen, denn diese sind durch die Entscheidung beeinflussbar.

Die folgende Formel beschreibt das Modell des Kapitalhaltungswertes (Deegen et al. 2000) am Beispiel der Investitionsentscheidung zwischen verschiedenen Waldpflegeregimen:

$$BEW_{a\,j} = \sum_{t-a}^{T-a} \frac{(E_{Wpfl.t} - A_{Wpfl.t})}{q^t - a} + \frac{P_{B_T}}{q^T - a} \Rightarrow max.; j = 1, ..., k \tag{3}$$

wobei

E die Einzahlungen,

A die Auszahlungen,

a das jetzige Alter des Waldbestandes,

P_B den Bodenpreis,

T die Umtriebszeit und

t das Alter des Waldbestandes zum Zeitpunkt einer Maßnahme beschreibt.

Das Formelzeichen j beschreibt die Waldpflegeregime mit der Anzahl k.

Deegen et al. (2000) beschreiben in ihrem Artikel „Zur finanziellen Analyse der Waldpflegeentscheidungen . . . “, dass große Abhängigkeiten zwischen den Teilprozessen der Waldpflege bestehen und daher die Optimierung der Bestandesbegründung und -pflege sowie der Umtriebzeit synchron erfolgen müsste. Die Autoren zeigen, dass die analytische Lösung eines Problems nur mit durchgängig differenzierbaren Gleichungen möglich ist. Diese Voraussetzung ist bei Eingriffen der Waldpflege jedoch nicht gegeben (Johannsson & Löfgren 1985). Nach Deegen et al. (2000) besteht die Lösung dieses Problems in einem numerischen Vorgehen. Dem Autor nach erwiesen sich Simulationen als sehr hilfreich. Dieser methodische Ansatz soll für die Grundlagenberechnungen aufgegriffen werden.

3.2 Grundlagenberechnung

3.2.1 Simulation der ertragskundlichen Datenbasis

Um die notwendigen Ein- und Auszahlungen berechenbar zu machen, ist eine ertragskundliche Datenbasis erforderlich. Möhring & Rüping (2006) nennen in ihrer Untersuchung die Notwendigkeit baumartenspezifischer naturaler Produktionsmodelle. Hierfür kommen laut den Autoren entweder konventionelle Ertragstafeln oder moderne dynamische Wuchsmodelle in Frage. Bestandessimulatoren wie „SILVA“ oder „BWinPro“ ermöglichen eine hohe Flexibilität, weisen aber bei langfristigen Betrachtungen nicht zu unterschätzende Nachteile auf. Die vorliegende Arbeit verwendet den Waldwachstumssimulator „BWinPro 7.7.05“ der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Aus Sicht des Autors hat dieser Simulator Vorteile gegenüber dem Programm „BWinPro-S“. So ist es zum Beispiel sehr einfach möglich, fünfjährige Verjüngungen anzulegen. Auch die Benutzeroberfläche ist übersichtlich und schlicht gehalten, was das Arbeiten mit vielen verschiedenen Simulationsgängen sehr erleichtert.

An dieser Stelle ist der Hinweis angebracht, dass sich die vorliegende Arbeit bei der Beantwortung der Forschungsfrage auf die Baumart Fichte beschränkt. Im Folgenden wird der Ablauf der ertragskundlichen Simulation beschrieben.

Erzeugung des Bestandes
Zunächst wird im Waldwachstumssimulator ein neuer „Bestand“ mit einer Flächengröße von 0,2 ha angelegt und eine fünfjährige Fichtenverjüngung hinzugefügt. Die Abbildung 3 zeigt das dafür vorgesehene Eingabefenster im Programm. Die Pflanzenzahl pro Hektar ist über den „Deckungsgrad %“ steuerbar. 63,8% entsprechen dabei exakt 2000 Pflanzen/ha. Über das Feld „Bonität“ kann Einfluss auf die absolute Oberhöhenbonität des simulierten Bestandes genommen werden. Hier soll ein sehr wüchsiger Bestand mit

Abb. 3: *Eingabefenster „Bäume hinzufügen“ in BWinPro 7.7*

einer Oberhöhe im Alter 100 Jahre von 35 m simuliert werden. Der Bestand entspricht dann einer DGZ-Bonität von 13 $\mathrm{Vfm\,ha^{-1}\,Jahr^{-1}}$ (nach der Ertragstafel von Wenk, Römisch und Gerold, 1984, mittleres Bonitätssystem). Die Abbildung 4 zeigt die Bestandesansicht der generierten, fünfjährigen Fichtenkultur.

Anlage der Rückegassen

In Folge wird ein 25jähriges Wachstum simuliert. Daraufhin wird im Alter 30 Jahre die Rückegassenanlage durchgeführt. Der Nutzer wählt dabei den Abstand der Rückegassen und deren Breite. Im vorliegenden Versuch wurden alle 20 m 4 m breite Rückegassen angelegt (siehe Abbildung 5).

Pflege des Bestandes

Nach einem zehnjährigen Wachstum wird die erste Durchforstung durchgeführt. Im Fenster „Simulationseinstellungen“ wird dazu folgende Konfiguration vorgenommen: Als Durchforstungstyp wird die Auslesedurchforstung gewählt. Die Maßnahme soll mit mäßiger Intensität vorgenommen werden. Das entspricht einer Grundflächenhaltung von ungefähr 1,0. Das Durchforstungsvolumen wird pro Eingriff auf 60 Efm begrenzt.

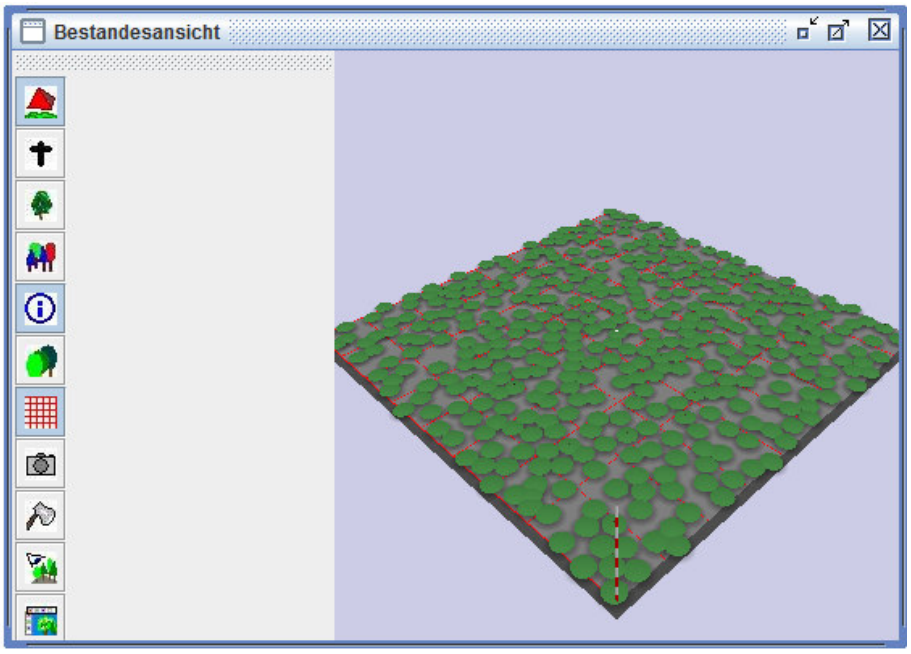


Abb. 4: *Bestandesansicht der fünfjährigen Verjüngung in BWinPro 7.7*

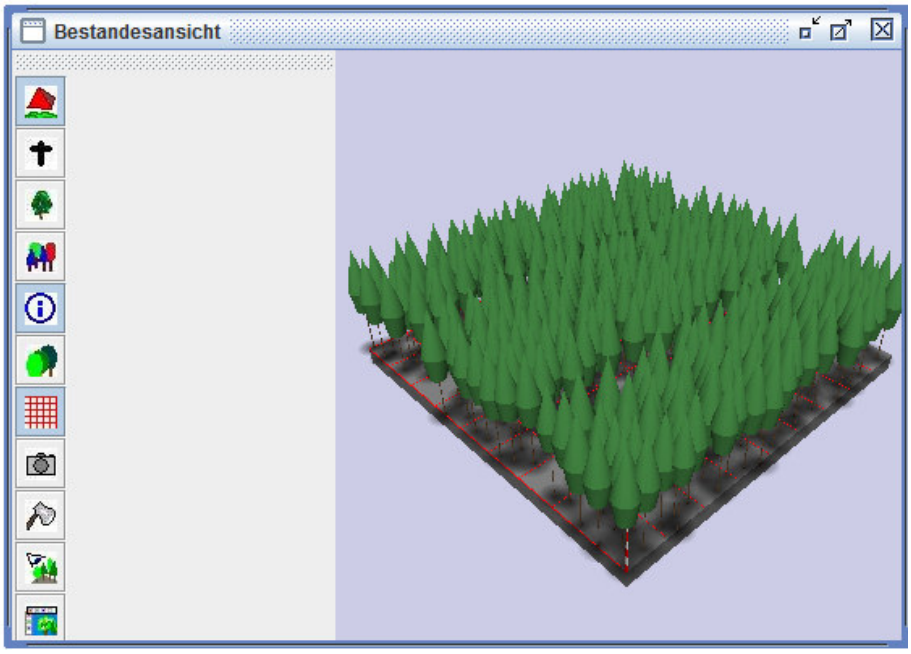


Abb. 5: *Bestandesansicht des 30jährigen Bestandes mit Feinaufschluss in BWinPro 7.7*

In der Folge wird der Übersicht halber alle zehn Jahre eine Maßnahme nach den oben geschilderten Parametern durchgeführt. Die Simulation der Bestandespflege endet im Alter von 110 Jahren.

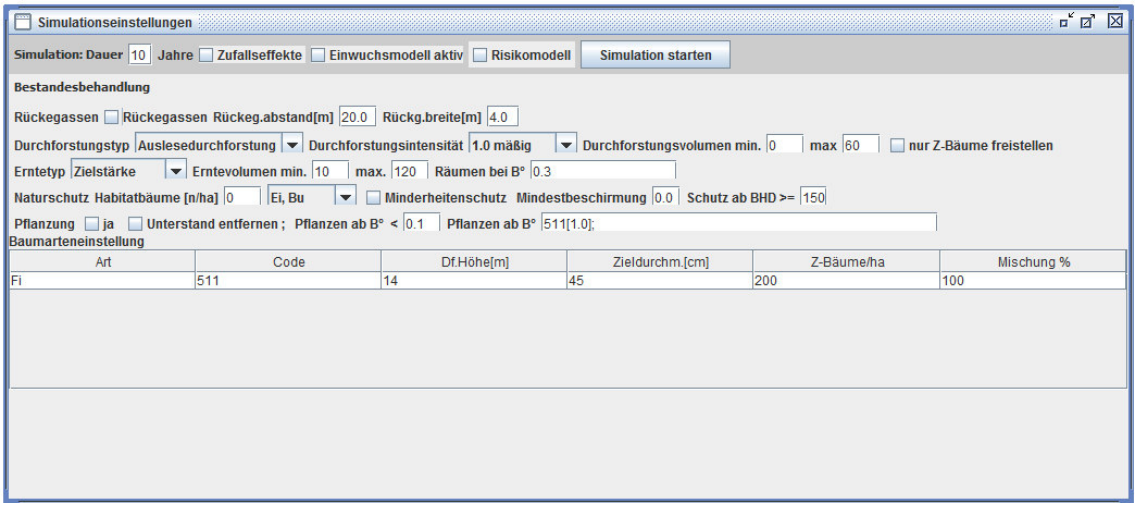


Abb. 6: *Eingabefenster „Simulationseinstellungen“ in BWinPro 7.7*

Abtrieb des Bestandes
Um einen Abtriebswert zu erzeugen, muss der Bestand im Alter 120 Jahre geerntet werden. Zur Vereinfachung wird an dieser Stelle der Kahlschlag gewählt. Die dazu notwendigen Einstellungen können ebenso im Fenster „Simulationseinstellungen“ (siehe Abbildung 6) vorgenommen werden. Es ist dabei zu beachten, dass der Zieldurchmesser und die Z-Baumanzahl/ha auf „0“ gesetzt wird, da der Kahlschlag sonst vom Programm nicht durchgeführt wird.

3.2.2 Kalkulation der Holzerlöse

Holzerlöse entstehen aus dem Produkt von Menge und Preis. Da an den Rohstoff Holz verschiedene Anforderungen bezüglich Dimension und Qualität gestellt werden, wird das geerntete Rohholz verschiedenen Sortimenten zugeordnet. Eine solche Sortierung muss ebenso Bestandteil der vorliegenden Untersuchung sein.

Sortierungssimualtion
Die Anwendung von konventionellen Bestandessortentafeln ist auf Grund deren Ungenauigkeiten, aber auch durch veränderte Aushaltungskriterien und neue Sorten nahezu unmöglich geworden (Kaiser 2001). Möhring & Rüping (2006) nennen als allgemeine Datengrundlage die Waldbewertungsrichtlinien oder für individuelle Berechnungen das Kalkulationsprogramm „HOLZERNTE“. Das Programm „BWinPro 7.7“ beinhaltet ein Sortierungsmodul, welches in der vorliegenden Arbeit genutzt werden soll. Die Abbildung 7 zeigt das Fenster „Sorting Dialog“, welches dazu dient, die Sortierungsparameter festzulegen. Die begrenzenden Parameter in Bezug auf die Dimensionen

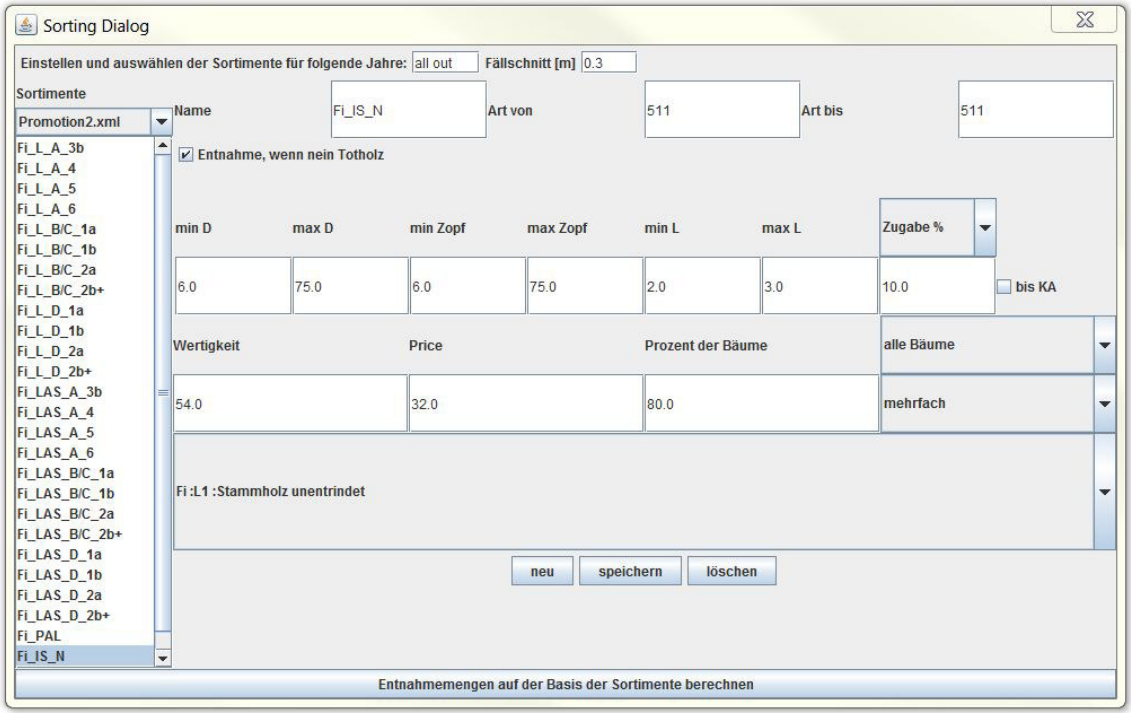


Abb. 7: *Eingabefenster „Sorting Dialog“ zur Eingabe der Sortimente in BWinPro 7.7*

sowie Verkaufszugaben werden dort eingegeben. Außerdem werden die Wertigkeit (sie bestimmt die Prioritäten bei der Sortierung) und der Preis festgesetzt. Unter „Prozent der Bäume“ besteht die Möglichkeit, den Anteil des Sortiments am gesamten Hieb zu schätzen. Die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Sortierungseinstellungen sind in der Tabelle 20 im Anhang zusammengefasst.

3.2.3 Systemkostenkalkulation

Holzerntekosten sind durch das Produkt aus der Menge des eingeschlagenen Holzes mit dem spezifischen Holzerntepreis abbildbar. Letzter kann als Quotient aus den Systemkosten und der technischen Arbeitsproduktivität beschrieben werden. Beide Größen sind mit folgender Methode herzuleiten.

Hauptfunktionen der Holzernte und Einteilung der Verfahren
Für die Holzernte stehen dem Praktiker grundsätzlich eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren zur Verfügung. Diese Verfahren setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. So beschreibt Erler (2000), dass die Holzernte in das Fertigen und das Transportieren der Sortimente gegliedert wird (Hauptfunktionen der Holzernte).

Dem **Fertigen** ordnet Erler (2000) sechs verschiedene Schritte zu:

1. Fällen 2. Entasten 3. Ausformen 4. Entrinden 5. Spalten 6. Hacken

Die Fertigungsschritte 4 und 5 werden im Folgenden keine Berücksichtigung finden, da sie in der Rundholzproduktion der deutschen Forstwirtschaftsbetriebe keine bedeutende Rolle spielen. Dem Spalten kommt in der Brennholzproduktion zwar eine große Bedeutung zu, jedoch bleibt dieser Fertigungsschritt bei den Rentabilitätsbetrachtungen der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt.

Erler (2000) teilt ferner den Vorgang des **Holztransportes** in zwei Schritte:

1. **Vorrücken**
   Transport des Holzes vom Fällort (Standort des Baumes) bis zur Rückegasse

2. **Rücken**
   Transport des Holzes von der Rückegasse bis zum Lagerort am Waldweg

Jedes Holzernteverfahren soll im Folgenden demnach immer aus den Fertigungsschritten 1 bis 3 oder 1 und 6 sowie aus den beiden Transportschritten bestehen. Die Reihenfolge unter den Fertigungsschritten ist immer die gleiche von Schritt 1 bis 3 beziehungsweise 1 und 6. Das Vorrücken kann je nach Verfahren zwischen verschiedenen anderen Fertigungsschritten stattfinden.

Grundsätzlich werden je nach Fertigungszustand während des Rückens (im engeren Sinne) fünf **Verfahrensgruppen** unterschieden (Erler 2000):

Ganzbaumverfahren: Bei diesen Verfahren wird die gesamte Pflanze mitsamt der Wurzel entnommen. Diese Verfahren kommen auf Grund des Aufwandes und der schwerwiegenden ökologischen Folgen in der deutschen Praxis nicht vor.

Vollbaumverfahren: Diese Verfahren unterscheidet sich von dem Vorgenannten an der Baumwurzel, die hier im Bestand verbleibt. Das heißt, im Waldbestand wird nur der Fällschnitt erledigt. Um den Nährstoffentzug, der durch den Entzug der Krone nicht unerheblich ist, zu minimieren, kann auch ein Zopfen im Bestand vorgenommen werden.

Rohschaftverfahren: Wenn das Entasten im Bestand oder auf der Rückegasse vorgenommen wird und die dadurch entstandenen Rohschäfte zum Lagerort transportiert werden, wird von Rohschaftverfahren gesprochen.

Sortimentverfahren: Werden auch die Trennschnitte vor der Rückung im Bestand oder auf der Rückegasse vorgenommen, wird von Sortimentverfahren gesprochen.

Hackschnitzelverfahren: Diese Verfahren stellen eine Besonderheit dar: Zunächst wird der Baum im Bestand gefällt und anschließend bis zur Rückegasse vorgerückt. Der Hacker befindet sich auf dieser und hackt den „Vollbaum“ an dieser Stelle. Schließlich werden die Hackschnitzel aus dem Bestand zum Lagerort oder zum direkten Umschlagen an die Waldstraße gefahren. Kuptz et al. (2015) beschreiben für den Freistaat Bayern, dass das häufigste Ausgangsmaterial Waldrestholz ist und dass das Hacken heute üblicherweise vom übrigen Holzernteprozess entkoppelt ist. In der Waldhackschnitzelbereitstellung kommen demnach Standardverfahren und -maschinen zum Einsatz. Das Hacken findet auf der Forststraße statt, nachdem das Hackholz (Waldrestholz) aus dem Bestand gerückt und an der Forststraße gepoltert wurde. Der Autor der vorliegenden Arbeit hat in der sächsischen Forstwirtschaft gleiche Erfahrungen gemacht. Vor allem nach flächigen Kalamitäten und bei der Umwandlung von Interimsbestockung kann die Nutzung des Waldrestholzes beobachtet werden, wenn für die anschließende Wiederaufforstung eine Flächenräumung notwendig ist. Folgt man der Definition der Verfahrensgruppen nach Erler (2000), liegt hier strenggenommen ein Sortimentverfahren vor, da das Hackgut als Sortiment gerückt und erst später auf der Waldstraße gehackt wird.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf Vollbaum-, Rohschaft- und Sortimentverfahren. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Systeme zur Herstellung und zum Transport von Hackschnitzeln nicht eingegangen.

Außerdem soll folgende Modifikation dieser Nomenklatur gelten: Rohschaftverfahren werden „Langholzverfahren“ genannt. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass entweder komplette Rohschäfte, sogenannte „Klammerstämme“ (noch aneinanderhängende Sortimente, die zusammen länger als 6 m sind) oder bereits eingeschnittene Langholzsortimente gerückt werden. Die Sortimentverfahren, d.h. solche Verfahren bei denen Kurzholzsortimente im Bestand oder auf der Gasse produziert und als solches transportiert werden, heißen im Folgenden „Kurzholzverfahren“.

Gliederung der Holzernteverfahren in Verfahrensstufen

Zur Berechnung der Holzerntekosten wird zunächst jedes in Frage kommende Holzernteverfahren in seine Verfahrensstufen zerlegt. Diese Verfahrensstufen sind in sich abgeschlossene, wiederkehrende Zyklen eines jeden Verfahrens. Sie werden begrenzt durch sogenannte „Puffer“, d.h. das Holz wird an dieser Stelle der Holzernte abgelegt und wartet auf die nächste Verfahrensstufe. An dieser „Trennstelle“ kann auch eine andere Option im Hinblick auf die nächste Verfahrensstufe gewählt werden.

Eine Verfahrensstufe besteht immer aus einem Mensch-Tier-System, einem Mensch-Gerät-System oder einem Mensch-Maschine-System. Sie umfasst eine oder mehrere Holzernteschritte (Teilfunktionen der Holzernte – siehe Seite 50).

Das Zerlegen eines Verfahrens in Verfahrensstufen verdeutlicht die Abbildung 8[6]. Als Beispiel ist hier ein vollmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Harvester und Forwarder dargestellt.

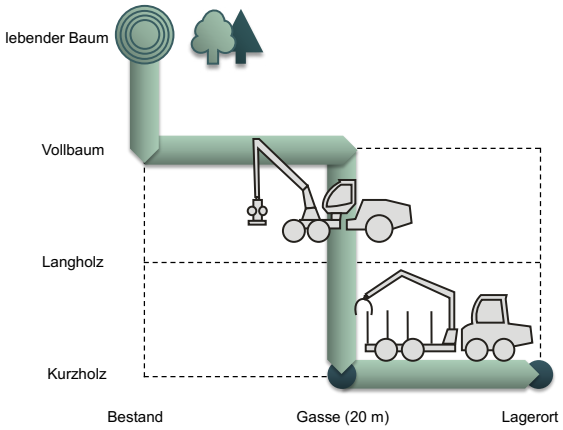


Abb. 8: *Vollmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Harvester und Forwarder*

Die Bestandteile (Verfahrensstufen) dieses Verfahrens zeigt die Abbildung 9. Es besteht demnach aus den (Mensch-Maschine-)Systemen „Harvester“ und „Forwarder“. Die einzelnen Verfahrensstufen dienen im Folgenden zur Berechnung der Holzerntekosten.

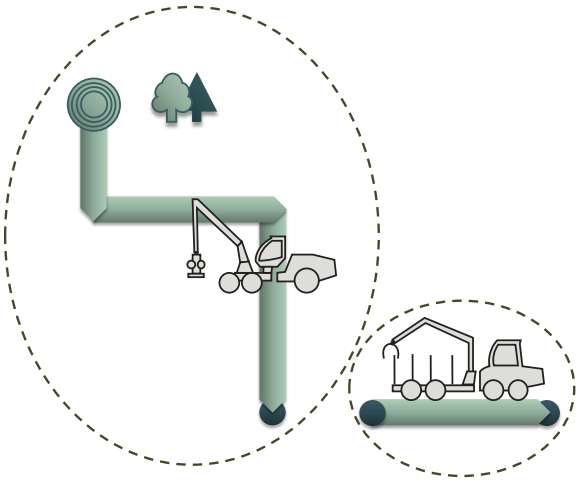


Abb. 9: *Verfahrensstufen des vollmechanisierten Kurzholzverfahrens mit Harvester und Forwarder*

[6] In der vorliegenden Arbeit wird das sogenannte „Funktiogramm“ genutzt. Diese Art der grafischen Darstellung von Holzernteverfahren geht auf Erler & Weiss (2003) zurück und wird vom KWF empfohlen und verwendet. Es ist in Erler (2009a) und Erler & Dög (2009) ausführlich beschrieben.

Zunächst ist es notwendig, die System(-Stunden)kosten (oft auch als Maschinengesamtkosten bezeichnet) eines jeden Systems zu bestimmen. Darauf folgt die Schätzung der Produktivität jeder einzelnen Verfahrensstufe.

Holzerntesysteme für die Fertigung der Sortimente
Die Abbildung 10 zeigt die verschiedenen Maschinen, die zur Fertigung des Holzes zur Verfügung stehen.

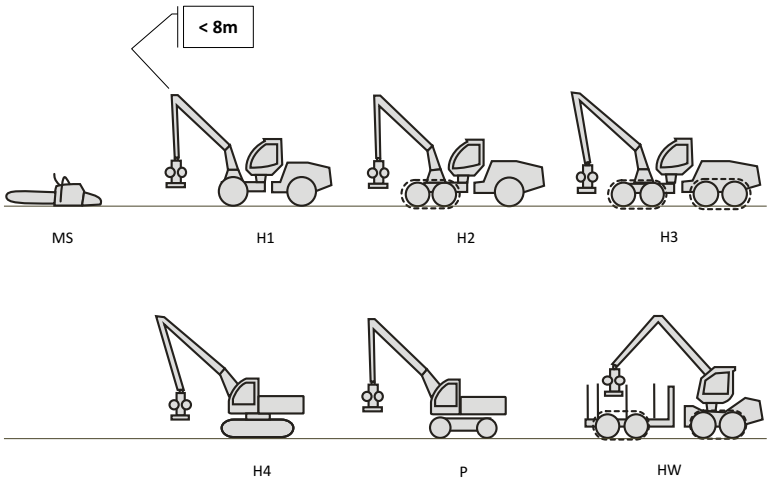


Abb. 10: *Übersicht der Geräte und Maschinen zur Fertigung der Sortimente*

Als kleinste Maschine kann die Motorsäge (MS) zum Einsatz kommen. Die Piktogramme H1 bis H3 veranschaulichen die drei Klassen der handelsüblichen Radharvester. Diese Einteilung geht auf das KWF zurück[7].

Die Klassifizierung des KWF teilt die Vollernter nach deren Motorenleistung ein und ordnet den Klassen optimale Einsatzbereiche (Fälldurchmesser) zu.

Die Klasse I (symbolisiert durch das Piktogramm H1) repräsentiert die Maschinen mit einer Motorleistung bis 70 kW. Der optimale Fälldurchmesser dieser Maschinen liegt bei ca. 15 cm (Morat et al. 1998). In der Praxis findet man solche Maschinen immer seltener. Ein Harvester dieser Klasse ist beispielsweise der Sampo 1046 Pro des finnischen Herstellers Sampo Resenlew. Ein Merkmal der kleinen Harvester ist die kurze Kranreichweite von 6 bis 8 m. Für einen vollmechanisierten, effizienten Einsatz dieser Maschinen sind Gassenabstände von 12 bis 16 m notwendig, was der wesentliche Grund dafür ist, dass diese Harvester in der Praxis kaum mehr anzutreffen sind (Denninger 2002; Borchert & Kremer 2007).

[7] Diese Klassifizierung wurde mittlerweile vom KWF angepasst. Seit 2016 liegt der Gebrauchswertprüfung folgende Klassen zu Grunde: I: bis 140 kW, II: 140 bis 180 kW sowie III: mehr als 180 kW.

Vollernter mit einer Motorleistung zwischen 70 kW und 140 kW, deren optimaler Einsatzbereich bei einem Fälldurchmesser von ca. 20 cm liegt, werden zur Harvesterklasse II zusammengefasst (H2 in Abbildung 10). Ein typischer Vertreter ist zum Beispiel der John Deere 1070E. Maschinen dieser Klasse haben für gewöhnlich eine Kranreichweite von 10 m.

Größere Harvester (Fälldurchmesser optimal bei ca. 30 cm) bilden die Klasse III (Piktogramm H3). Als Beispiel dient der John Deere 1270 IT4. Die Reichweite der Maschinen dieser Klasse hinsichtlich ihres Kranes beträgt mindestens 10 m.

Das Piktogramm H4 veranschaulicht schwere Harvester mit Raupenantrieb. Maschinen wie der Königstiger T30 der Firma IMPEX Forstmaschinen GmbH, ein Raupenharvester der 35 t-Klasse, eignen sich im besonderen für die Ernte des stärkeren Holzes.

Als Besonderheiten sollen auch die Prozessoren in diesem Kontext Erwähnung finden (P). Sie unterscheiden sich insoweit von den oben genannten Harvestern, dass sie ausschließlich zum Entasten beziehungsweise Einschneiden des Holzes Verwendung finden. Das Fällen des Baumes im Bestand wird von diesen Maschinen nicht vorgenommen. Sie arbeiten das bereits gerückte Holz von einem befestigten Weg aus auf.

Eine weitere Besonderheit sind die sogenannten Harwarder (HW). Ein Vertreter dieser Maschinengruppe ist der BuffaloDual des finnischen Forstmaschinenherstellers Ponsse. Diese Maschinen sind sozusagen die „wahren Vollernter“, da sie nicht nur die Fertigung, sondern auch den Transport des Holzes übernehmen. Diese Maschinen nehmen demzufolge eine Sonderstellung zwischen den Fertigungsmaschinen (Harvestern und Prozessoren) und den Transportmaschinen ein.

Systeme zur Vorrückung und Rückung des Holzes

Die Abbildungen 11 bis 13 zeigen die nutzbaren Systeme zum Vorrücken beziehungsweise Rücken des Holzes.

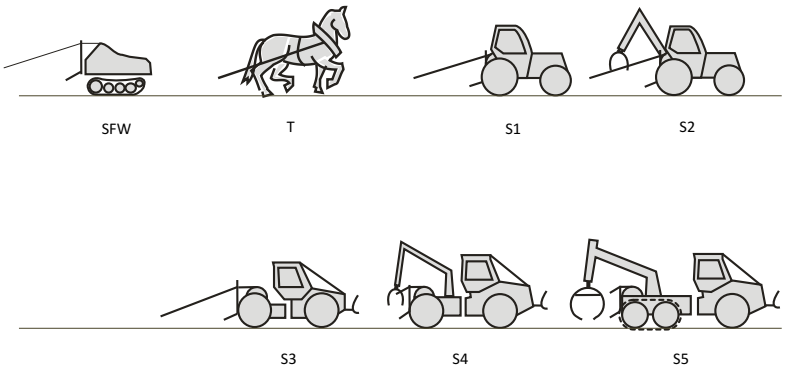


Abb. 11: *Übersicht der Tiere und Maschinen zur schleifenden/ schreitend schleifenden Vorrückung bzw. zur fahrend schleifenden/ fahrend schleif-tragenden Rückung des Holzes*

Zwei der in Abbildung 11 dargestellten Systeme eignen sich ausschließlich zum Vorrücken: SFW steht hier stellvertretend für alle selbstfahrenden Seilwinden, die meist auf kleinen Raupenfahrzeugen aufgebaut sind. Ein bekannter Vertreter dieser Gruppe ist die „Fäll- und Rückeraupe Moritz Fr50“ des allgäuer Maschinenbauers Pfanzelt. Das Piktogramm T steht symbolisch für alle tierischen Systeme zur Vorrückung des Holzes. In der vorliegenden Arbeit soll nur dem Pferd Beachtung geschenkt werden. Andere Tiere (Ochsen, Wasserbüffel, Elefanten u.a.) spielen derzeit in Deutschland keine Rolle und bleiben daher unberücksichtigt.

Die Piktogramme S1 bis S5 stehen für die Seil- und Kranschlepper. S1 stellt die einfachste Form dar. Es handelt sich um achsschenkel-gelenkte, meist aus der Landwirtschaft stammende Schlepper mit Rückeschild und Seilwinde (S1; z.B. Steyr M9100 Forst). Die Modelle des oberfränkischen Herstellers Kotschenreuther fallen zum Beispiel in die Kategorie S2. Sie haben zusätzlich zur Forstausrüstung einen Holzladekran.

Forstspezialtraktoren mit Rahmenknick-Lenkung werden in der Abbildung 11 durch das Piktogramm S3 dargestellt. John Deere hat noch zwei Maschinen dieser Kategorie im Produktportfolio: der 540H und der 640H. Ist eine solche Maschine zusätzlich mit einem Kran ausgerüstet, wird von einem Kranschlepper gesprochen (S4). Der deutsche Hersteller HSM bietet zum Beispiel das Modell 805 an. Davon sollen in der vorliegenden Arbeit schwere Schlepper, die mit einem starken Kran ausgerüstet sind, unterschieden werden (S5). Maschinen wie der 904Z 6WD von HSM eignen sich insbesondere für das Rücken von starkem Laub- und Nadelholz.

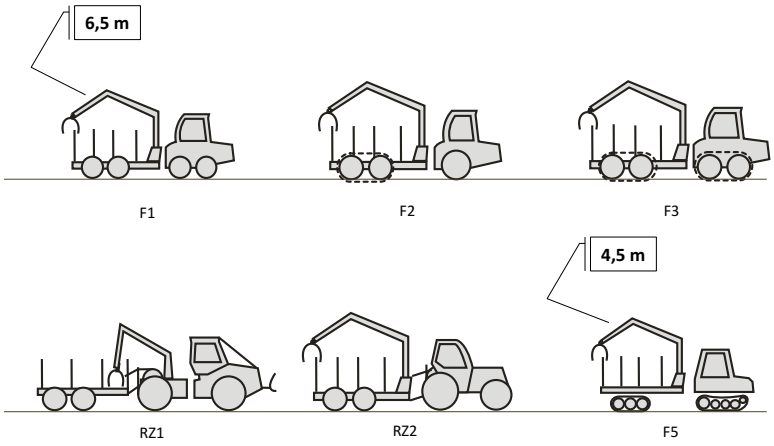


Abb. 12: *Übersicht der Maschinen zur fahrend tragenden Rückung des Holzes*

Die Abbildung 12 zeigt die zur Verfügung stehenden Kurzholzrückefahrzeuge. Dabei sind die Forwarder (F) von den Rückezügen (RZ) zu unterscheiden, bei denen an ein Zugfahrzeug (meist Tranktoren – RZ2 – oder forstliche Spezialschlepper – RZ1) ein Rückeanhänger mit oder ohne eigenen Kran angehängt wird. In letzterem Fall verfügt die Zugmaschine über einen Kran (RZ1).

Das KWF teilt die Forwarder anhand ihres Gesamtgewichtes ein[8]. Die Klasse I (F1) bilden Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht bis 18 t. Der Timberjack 678 „Mini Bruunett“ fiel in diese Kategorie. Die letzte Maschine dieses Typs wurde 1993 ausgeliefert und ist heute über 25 Jahre alt. Diese Kategorie spielt, wie auch die Harvesterklasse I, keine bedeutende Rolle mehr. Die mittlere Klasse (II) umfasst die Tragschlepper mit einem Gesamtgewicht zwischen 18 und 24 t (F2). Ein oft angetroffener Vertreter dieser Klasse ist der John Deere 810 D. Schwerere Maschinen, wie der John Deere 1210 E, zählen zur Klasse III und sind in Abbildung 12 als F3 bezeichnet. Einige Forwarder verfügen über Kettenfahrwerke. Ein Klein-Forwarder mit Raupenfahrwerk (F5) ist zum Beispiel der „Schwede“ Terri 34.

Über die genannten Rückemittel hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Spezialmaschinen. Als Vertreter können hier der Gleiskettenrückezug oder der Klemmbankschlepper genannt werden. Da der Gleiskettenrückezug gegenwärtig in Deutschland keine tragende Rolle spielt, wird dieser im Weiteren nicht berücksichtigt. Die meisten Forwarder können ihren Rungenkorb gegen eine Klemmbank austauschen, sodass der Forwarder dann gewissemaßen ein Klemmbankschlepper wird und Langholz rücken kann. Auf eine separate Betrachtung der Klemmbankschlepper wird daher verzichtet. Darüber hinaus gewinnen die seit vielen Jahren bekannten Seilkransysteme ständig an Bedeutung.

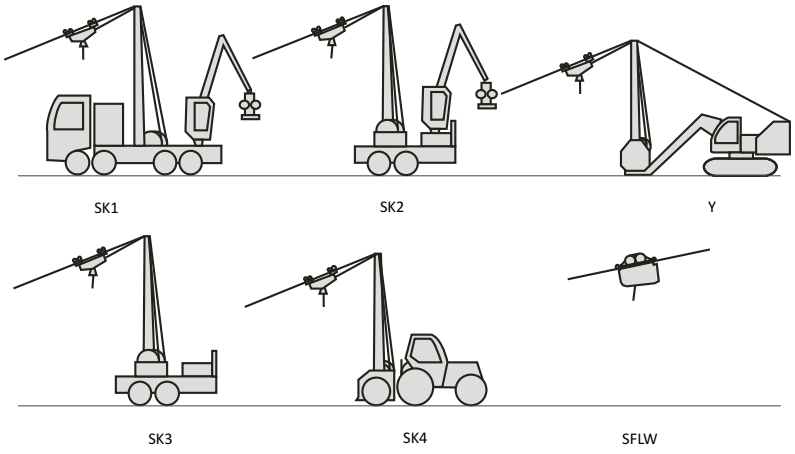


Abb. 13: *Übersicht der Maschinen zur schwebend schleif-tragenden/ schwebend tragenden Rückung des Holzes*

Die Abbildung 13 zeigt drei Seilkransysteme. Seilkräne wurden für die nicht befahrbaren steilen Lagen im Gebirge entwickelt. In letzter Zeit finden diese Maschinen auch in nicht oder schlecht befahrbaren ebenen Lagen Anwendung (Sündermann et al. 2013).

Grundsätzlich können stationäre Anlagen von mobilen Anlagen unterschieden werden. Letztere haben die Eigenschaft, dass die Winden und ein Endmast auf einem

[8] Auch diese Klassifizierung wurde vom KWF mittlerweile angepasst: Klasse I: weniger als 10 t Nutzlast, Klasse II: 10 bis weniger als 14 t Nutzlast sowie Klasse III: ab 14 t Nutzlast.

Trägerfahrzeug montiert sind. Die stationären Anlagen bestehen aus einem Tragseil, welches meist zwischen zwei Bäumen gespannt wird. Die eigentliche Arbeit wird von einer zusätzlichen Winde übernommen, welche meist als Schlittenwinde bergseitig positioniert wird. Diese Systeme kommen sowohl in Zwei- als auch in Drei-Seil-Ausführung zur Anwendung. Da diese Systeme gegenwärtig keine Rolle in den ebenen Lagen spielen, werden sie im Folgenden nicht näher beleuchtet.

Das Piktogramm SK1 zeigt einen Seilkranaufbau auf einem Lastkraftwagen. Die meisten dieser Maschinen verfügen außerdem über einen Kran mit Prozessor und werden als „Gebirgsharvester“ bezeichnet. Kleinere Seilkransysteme sind entweder auf einem Hänger installiert (SK2/SK3) oder an der Dreipunktaufhängung eines Schleppers angebracht (SK4). Von der deutschsprachigen Praxis werden Seilkräne mit künstlichem Endmast, der an einem Baggerarm angebracht ist und am Fahrzeug abgespannt wird, als „Yarder“ bezeichnet (Y). Der Vorteil besteht im Verzicht auf natürliche Anker- und Abspannbäume.

Seilkransysteme müssen in der Ebene in der Regel mindestens drei Seile aufweisen: Trag-, Zug- und Rückholseil. Alternativ kommen auch Zwei-Seil-Systeme mit selbstfahrenden Laufwagen (SFLW; z.B. Woodliner der Fa. Conrad) im Flachland zum Einsatz. Die Produktivität solcher Systeme bei schwachem Holz und kurzen Rückedistanzen kommt dem Niveau kleiner bis mittlerer konventioneller Seilgeräte gleich (Daxner 1998; Daxner & Stampfer 1998; Frutig et al. 2007).

Berechnung der Systemkosten

Die beschriebenen Systeme, die zur Bewältigung bestimmter Verfahrensstufen in der Holzernte zur Verfügung stehen, stellen jeweils die Einheit dar, für die im Folgenden die Kosten je Zeiteinheit (Systemkosten als zeitbezogene Kosten) berechnet werden sollen. Eine detaillierte Vorgehensweise beschreiben Dreeke et al. (2013). Die Autoren beziehen sich auf die Kalkulation im Unternehmen. Dem Unternehmer stehen meist detailliertere Informationen zur Verfügung, die entweder durch eine entsprechende Buchführung schnell verfügbar sind oder anhand der oft langjährigen Erfahrungen geschätzt werden. Die Unternehmerkalkulation nach Dreeke et al. (2013) soll an ausgewählten und explizit genannten Stellen die folgende Methodik sinnvoll unterstützen. Da aber diese Vorgehensweise unternehmerische Erfahrungswerte voraussetzt, die für diese Arbeit weder zur Verfügung stehen noch dem geforderten Abstraktion entsprechen, eignet sie sich für die vorliegende Untersuchung nicht. Grundlage für die folgenden Ausführungen ist daher das Merkblatt Nr.17/2013 des Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF), welches eine Modellkalkulation zur Bestimmung der Holzerntekosten im Voraus beschreibt (KWF 2013).

Das einzelne Holzerntesystem verursacht neben den Kosten für Gerät, Tier oder Maschine vor allem Kosten für das bedienende Personal. Das KWF (2013) unterscheidet entsprechend Sachkosten von Personalkosten. Diese logische Gliederung soll

auch für die vorliegenden Arbeit übernommen werden. Sowohl das KWF (2013) als auch Dreeke et al. (2013) nennen darüber hinaus die Unternehmerkosten, die zwar je nach Betrieb unterschiedlich hoch zu Buche schlagen, aber dennoch in der folgenden Methodik Berücksichtigung finden sollen und anteilig den Systemen zugeschlagen werden. Die Systemkosten bestehen demzufolge aus der Summe der Sachkosten, der Lohnkosten und der (anteiligen) Unternehmerkosten:

$$K_{System} = K_{Sach} + K_{Lohn} + K_{aUntern} \tag{4}$$

Sachkosten des Mensch-Motorsägen-Systems
Die Sachkosten einer Motorsäge können wie folgt abgebildet werden: Der Tarifvertrag „TV-L-Forst“ regelt die Motorsägenentschädigung für die in der Holzernte beschäftigten Waldarbeiter. Bei der Holzernte wird dem Waldarbeiter die Benutzung der eigenen Motorsäge und Ausrüstung mit 46% des gültigen Stundensatzes entschädigt. Es wird dabei unterstellt, dass die Motorsäge ca. 27,5 Minuten pro Holzerntestunde läuft. Der durch den Tarifvertrag festgesetzte Stundensatz beträgt zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Dissertation 5,11 Euro/Gesamtlaufstunde. Der Tarifvertrag regelt ferner, dass das Werkzeug grundsätzlich vom Arbeitgeber gestellt wird. Er nennt für den anderen Fall einen Betrag je Einsatzstunde in der Holzernte in Höhe von 0,13 Euro.

In der vorliegenden Arbeit sollen die Regelungen des Tarifvertrages „TV-L-Forst“ entsprechend Anwendung finden. Das bedeutet, dass sich im Falle motormanueller Tätigkeit die Systemkosten aus den Lohnkosten (inklusive Lohnnebenkosten) des Waldarbeiters (Entgeltgruppe 5), der Motorsägenentschädigung sowie der Werkzeugentschädigung zusammensetzen.

Sachkosten des Mensch-Tier-Systems
Nach Schroll (2008) verursacht das Pferd je nach Auslastung (h_{real}) Sachkosten im Bereich von 4,18 Euro/h bis 6,28 Euro/h. Im Folgenden sollen die niedrigere Auslastung und damit die höheren Kosten angenommen werden. Zusätzlich bedarf es Personalkosten, die unmittelbar durch die Pflege des Tieres entstehen. Schroll (2008) beziffert die Zeit, die je Einsatztag aufgebracht werden muss, mit 1,3 h und nennt einen Kostensatz von 4,85 Euro/h. Um die Kosten des Systems abzubilden, bedarf es der Addition der Lohnkosten des Pferderückers. Auch hier soll der Tarifvertrag als Orientierung dienen (Entgeltgruppe 5 Stufe 2).

Sachkosten der Mensch-Maschinen-Systeme
Die Sachkosten der Mensch-Maschinen-Systeme ergeben sich summarisch aus der Abschreibung (K_{Abschr}), den Zinskosten (K_{Zins}), den Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten ($K_{RepWart}$), den Betriebsstoffkosten (K_{BetrSt}), den Umsetzkosten (K_{Umsetz}) sowie den sonstigen Kosten (K_{Sonst}):

$$K_{Sach} = K_{Abschr} + K_{Zins} + K_{RepWart} + K_{BetrSt} + K_{Umsetz} + K_{Sonst} \tag{5}$$

Abschreibung: Die erste notwendige Größe ist das Produkt aus dem Anschaffungspreis (für die Maschine selbst und für das notwendige Zubehör) und der Stückzahl, das als **Anschaffungskosten** K_{An} bezeichnet wird.[9] An dieser Stelle besteht ein Informationsbedarf. Dazu ist mittels Literatur zunächst ein Überblick über vorhandene Holzerntemaschinen und ihre Anschaffungskosten zu erarbeiten.

Die Maschinen sind nicht ewig nutzbar. Durch Verschleiß und Alterung verlieren sie ihre Gebrauchsfähigkeit nach einer bestimmten Zeit. Das KWF (2013) bezeichnet die Zeitspanne, in der ein Produkt technisch überholt ist, als **Veralterungszeit** N (in Jahren). Die **Gesamtnutzungsdauer** H (in Maschinenarbeitsstunden, kurz MAS) gibt an, nach wie vielen produktiven Arbeitsstunden die Maschine verschlissen ist. Dies sind theoretische Werte. Nach dieser Zeit entspricht der **Restwert** E_{Ver} der Maschine dem Erlös, der bei einem Verkauf zu erwarten ist. In der Regel entspricht der Erlös nur noch dem Schrottwert. Das KWF (2013) nennt Richtwerte zur Berechnung des Restwertes nach einer bestimmten Zeit n (siehe Tabelle 21 im Anhang).

Forbrig et al. (2011) fanden durch eine Umfrage heraus, dass eine Maschinenarbeitsstunde ungefähr einer Betriebsstunde entspricht. Diese Erkenntnis soll auch den Berechnungen in der vorliegenden Arbeit zu Grunde gelegt werden. Für die verschiedenen Maschinenkategorien werden vom KWF (2013) Richtwerte bezüglich der Gesamtnutzungsdauer und der Veralterungszeit genannt. Der Quotient dieser Werte wird als Auslastungsschwelle h_{opt} bezeichnet:

$$h_{opt} = \frac{H}{N} \tag{6}$$

Die Auslastungsschwelle gibt an, wie viele Stunden die Maschine pro Jahr betrieben werden muss, damit sie nach der Veralterungszeit N die Gesamtnutzungsdauer H erreicht hat. Nach der Kalkulation des KWF (2013) ist sie entscheidend bei der Frage, auf wie viele Maschinenarbeitsstunden die Anschaffungskosten umgelegt werden. Die Tabelle 21 im Anhang zeigt die Richtwerte des KWF (2013) für die jeweilige Maschinenkategorie sowie die daraus errechneten Schwellenwerte.

[9] Da die Stückzahl in der Regel immer den Wert „1“ annimmt, ist der Anschaffungspreis gleich den Anschaffungskosten.

Das „Umlegen“ der Kosten auf die einzelne Maschinenarbeitsstunde wird als Abschreibung bezeichnet und ist nicht mit der steuerlichen Abschreibung zu verwechseln. Im praktischen Betrieb entscheidet nicht die technische Gesamtnutzungsdauer als theoretischer Wert die Höhe der Abschreibung, da die Maschinen in der Regel nicht so lange genutzt werden, sondern bereits vorher zu einem bestimmten Restwert verkauft werden. Hier ist die geplante **jährliche Nutzungsdauer** h_{real} der Maschine in MAS entscheidend. Liegt die tatsächlich realisierbare Einsatzdauer pro Jahr über der Auslastungsschwelle, so empfiehlt das KWF (2013) den Schwellenwert zur Berechnung der unterjährigen Abschreibung zu verwenden. Liegt der Wert unter dem Schwellenwert, so ist die jährliche Auslastung h_{real} zur Kalkulation heranzuziehen (KWF 2013).

Sowohl für die wahrscheinliche jährliche Nutzungsdauer (h_{real}) als auch für Abschreibungsdauer (n) nennt das KWF (2013) ebenfalls Richtwerte (siehe Anhang, Tabelle 21). Bei fast allen Maschinenkategorien liegen die Richtwerte für die wahrscheinliche jährliche Nutzungsdauer (h_{real}) über den Schwellenwerten. Das bedeutet, die **Abschreibung** K_{Abschr}, als Werteverzehr über der Zeit, kann linear (d.h. über die Einsatzstunden gleichmäßig) unter Zuhilfenahme des Schwellenwertes h_{opt} berechnet werden:

$$K_{Abschr} = \frac{K_{An} - E_{Ver}}{n \cdot h_{opt}} \tag{7}$$

wobei der Verkaufserlös über die Anschaffungskosten mittels Faktor F_{Ver} (Richtwerte sind im Anhang, Tabelle 21 zu finden) bestimmt wird:

$$E_{Ver} = K_{An} \cdot F_{Ver} \tag{8}$$

Lediglich beim Harvester und Forwarder liegen die vom KWF (2013) angegebenen Richtwerte zur wahrscheinlichen jährlichen Nutzungsdauer (h_{real}) unter der Auslastungsschwelle h_{opt}. Auch Dreeke et al. (2013) sprechen bei diesen Maschinen von ungefähr 1500 Betriebsstunden pro Jahr. Demzufolge ist mit den wahrscheinlichen jährlichen Nutzungsdauern (h_{real} in MAS) zu rechnen:

$$K_{Abschr} = \frac{K_{An} - E_{Ver}}{n \cdot h_{real}} \tag{9}$$

Zinskosten: Das Geld zum Kauf einer Maschine muss zum Zeitpunkt des Kaufes bereitgestellt werden. Dies kann entweder durch den Betrieb selbst oder durch die Aufnahme eines Darlehens geschehen. Im ersten Fall entgehen dem Betrieb durch die Verwendung der Mittel für die Maschine andere Kapitalerträge aus einer möglichen alternativen Investition. Im zweiten Fall entstehen dem Betrieb Kapitalkosten der Fremdfinanzierung. Wie hoch die **Zinskosten** tatsächlich sind,

hängt nicht nur von der Finanzierungsart, sondern auch von der betrieblichen Situation ab. Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an das KWF (2013) ein Zinsfuß von 8% angenommen. Dreeke et al. (2013) benutzen in ihrer Kalkulation einen Zinssatz von 7,6%.

Auf der einen Seite muss der gesamte Werteverzehr, also der Anschaffungswert abzüglich des Restwertes, verzinst werden. Da die jährliche Tilgung in etwa dem Werteverzehr entspricht und im Laufe der Zeit die Darlehenssumme abnimmt, können die jährlichen Zinskosten wie folgt überschlägig berechnet werden (KWF 2013):

$$K_{Zins^1} = \frac{K_{An} - E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} \tag{10}$$

Auf der anderen Seite ist mit dem Restwert der Maschine über mehrere Jahre Kapital gebunden. Mit diesem Kapital kann auch keine Alternativ-Anlage getätigt werden. Daher ist der Restwert ebenfalls für einen Darlehenszins zu leihen, sodass auch er über die gesamte Zeit verzinst werden muss:

$$K_{Zins^2} = E_{Ver} \cdot \frac{i}{100} = \frac{2 \cdot E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} \tag{11}$$

Durch Addition von K_{Zins^1} und K_{Zins^2}, dem Ausklammern des Zinssatzes und dem Zusammenfassen der Restwerte entsteht folgende Formel zur Berechnung der jährlichen Gesamt-Zinskosten:

$$K_{Zins} = \frac{K_{An} - E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} + \frac{2 \cdot E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} \tag{12}$$

$$= \frac{K_{An} - E_{Ver} + 2E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} \tag{13}$$

$$= \frac{K_{An} + E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100} \tag{14}$$

Um diese Zinskosten auf jede Maschinenarbeitsstunde umzulegen, muss auch hier durch den Schwellenwert

$$K_{Zins} = \frac{\frac{K_{An}+E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100}}{h_{opt}} \tag{15}$$

oder (im Fall von Harvester und Forwarder) durch die wahrscheinliche jährliche Nutzung geteilt werden.

$$K_{Zins} = \frac{\frac{K_{An}+E_{Ver}}{2} \cdot \frac{i}{100}}{h_{real}} \tag{16}$$

Dreeke et al. (2013) beziehen bei der Berechnung der Zinskosten auch eine Anzahlung in die Betrachtung ein. Außerdem errechnen sie den genutzten Zinssatz aus der Kombination von Haben- und Soll-Zinssatz.

Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten: Während des Betriebes fallen Wartungs und Reparaturarbeiten an der Maschine an. Obwohl vor allem die Reparaturkosten im Verlauf der Zeit beziehungsweise mit zunehmenden Alter steigen, werden sie linear umgelegt. Das KWF (2013) empfiehlt zur Schätzung der **Kosten für Reparatur und Wartung** $K_{RepWart}$ folgendes Vorgehen: alle Kosten im „Leben einer Maschine"(Gesamtnutzungsdauer H) werden summiert und ins Verhältnis zum Anschaffungspreis gesetzt. Das Ergebnis ist der sogenannte **Reparaturkostenfaktor** $f_{RepWart}$, der auf Erfahrungswerten oder einer entsprechenden Buchführung beruht. Auch hier nennt das KWF (2013) Richtwerte, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden sollen (siehe Tabelle 21).

Das KWF (2013) nennt zur überschlägigen Berechnung folgende Formel:

$$K_{RepWart} = \frac{K_{An}}{H} \cdot f_{RepWart} \tag{17}$$

Betriebsstoffkosten: Für den Betrieb von Maschinen werden Kraft- und Schmierstoffe benötigt. Bei der Kalkulation der Kraftstoff- und Schmierstoffkosten wird empfohlen, den tatsächlichen Verbrauch (je MAS) oder eigene Erfahrungswerte zu verwenden. Da dies in der vorliegenden Arbeit nicht möglich ist, müssen Annahmen getroffen werden. Auch hier sollen Richtwerte des KWF (2013) Verwendung finden.

Das KWF (2013) schlägt folgende Formel zur Berechnung der Betriebsstoffkosten vor:

$$K_{BetrSt} = V_{KrSt} \cdot P_{KrSt} \cdot (1 + \frac{f_{SchmSt}}{100}) \tag{18}$$

Die Betriebsstoffkosten berechnen sich demnach anhand des Kraftstoffverbrauchs V_{KrSt}, des Kraftstoffpreises P_{KrSt} und des Schmierstofffaktors f_{SchmSt}. Auch hier kann auf die Richtwerte des KWF (2013) verwiesen werden. Der Harvester liegt demnach bei einem Verbrauch von 16 L/MAS_{15} und der Forwarder bei 9 L/MAS_{15} (KWF 2013). Dreeke et al. (2013) schlagen für diese Maschinen 15 L/MAS_{15} und 11 L/MAS_{15} vor. Für einen Skidder mit Kran berechnet das KWF (2013) 7 L/MAS_{15}, für einen einfachen Forstschlepper ohne Kran 4,5 L/MAS_{15}. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Verbrauchswerte können der Tabelle 21 des Anhangs entnommen werden.

Die Kraftstoffkosten (inklusive Transport und Lagerung) werden für diese Untersuchung auf 1,50 Euro/L (netto) festgelegt.

Umsetzkosten: Sowohl bei den Umsetz- als auch bei den Fahrtkosten ist es immer hilfreich, eigene, realitätsnahe Berechnungen zu Grunde zu legen (Dreeke et al. 2013). In der vorliegenden Arbeit werden nur die Umsetzkosten berechnet. Die Kosten für die An- und Abfahrt der Mitarbeiter sowie Pauschalen für Übernachtung und Verpflegung bei weit entfernten Hiebsorten werden aus Gründen der Überschaubarkeit nicht berücksichtigt. Das KWF (2013) berechnet die maschinenbedingten Umsetzkosten mit festen Aufschlägen pro MAS und die personalbedingten Umsetzkosten über einen Faktor anhand der Lohnkosten. Die Tabelle 21 zeigt die Zuschläge und Faktoren für die verschiedenen Maschinenkategorien.

$$K_{Umsetz} = K_{Umsetz^{Masch}} + K_{Umsetz^{Pers}} \tag{19}$$

$$K_{Umsetz} = K_{Umsetz^{Masch}} + K_{Pers} \cdot \frac{f_{Umsetz^{Pers}}}{100} \tag{20}$$

Der Umsetzfaktor $f_{Umsetz^{Pers}}$ wird für Harvester, Forwarder und Seilkräne auf 15% und für alle Schlepper auf 10% festgelegt.

Sonstige Kosten: Nach dem KWF (2013) umfassen die sonstigen Kosten sowohl jene für die Versicherungen und Unterbringung der Maschine als auch die Kosten der Organisation und Verwaltung sowie die Finanzierungskosten. Das KWF bietet zwei verschiedene Lösungswege an. So beschreibt es eine „differenzierte Vorkalkulation“, die alle anfallenden Kosten sehr detailliert beschreibt und einschätzt. Ein ähnliches Verfahren wird von Dreeke et al. (2013) beschrieben. Diese Verfahren der Vollkostenrechnung eignen sich für die Kalkulation im Unternehmen, in dem die tatsächlich anfallenden Kosten bekannt sind. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf das „pauschalierte“ Vorgehen. Wie die Bezeichnung es bereits andeutet, werden hier die sonstigen Kosten mit Hilfe eines Faktors anhand der Anschaffungskosten geschätzt:

$$K_{Sonst} = \frac{K_{An} \cdot \frac{f_{Sonst}}{100}}{h_{real}} \tag{21}$$

Das KWF (2013) bietet auch hier entsprechende Faktoren und Richtwerte an, die für die Berechnungen der vorliegenden Arbeit übernommen werden.

Lohnkosten

Nachdem die Herleitung der Sachkosten bereits detailliert beschrieben ist, folgt nun die Berechnung der Lohnkosten für den Menschen. Die Lohnkosten setzen sich zusammen aus dem Bruttolohn und den Lohnnebenkosten:

$$K_{Lohn} = P_{Bruttolohn} \cdot (1 + \frac{f_{Lnk}}{100}) \tag{22}$$

Das KWF (2013) nennt vier Bestandteile der Lohnnebenkosten und gibt deren Größenordnungen in Relation zum Bruttolohn wie folgt an:

Lohnfortzahlung (35%): Hierzu zählt die Lohnzahlung für Feiertage, Urlaub, Krankheit oder Schlechtwetter.

Sonderzahlungen (20%): Damit sind speziell das Urlaubs- und das Weihnachtsgeld sowie vermögenswirksame Leistungen gemeint.

Sozialversicherungsbeiträge (30%:) Darunter fallen die Arbeitgeberanteile an der Renten-, an der gesetzlichen Kranken-, an der Arbeitslosen- und an der Pflegeversicherung sowie die Kosten der gesetzlichen Unfallversicherung.

Überstunden- und Feiertagszuschläge (15%)

Das KWF (2013) geht demnach von Lohnnebenkosten in Höhe von 100% der Bruttolohnkosten aus. Dieser Wert soll auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung finden.

Zur Berechnung der Personalkosten wird der Tarifvertrag herangezogen:

Mensch-Motorsäge- sowie Mensch-Tier-System: Der im Holzeinschlag tätige Waldarbeiter mit der Entgeltgruppe 5, Erfahrungsstufe 2 erhält als Bruttolohn 2262,41 Euro/Monat[10]. Die regelmäßige wöchentliche Arbeitszeit liegt im Tarifgebiet Ost bei 40,00 h/Woche. Das entspricht einer Monatsarbeitszeit von 173,33 h/Monat. Daraus resultiert ein Stundenlohn von ca. 13,05 Euro/h (Arbeitnehmerbrutto).

Mensch-Maschinen-Systeme: Laut „TV-L-Forst“ werden die Fahrer von Harvester und Forwarder (bzw. Klemmbankschlepper) in die Entgeltgruppe 8 eingeordnet. Die Fahrer der Harvester und Forwarder verdienen somit 2575,73 Euro/Monat (brutto in der Erfahrungsstufe 2). Das bedeutet, dass der Stundenverdienst für einen Fahrer einer komplexen Holzerntemaschine bei ca. 14,86 Euro/h liegt.

Die Fahrer der Schlepper mit Kran werden der Entgeltgruppe 7 (Erfahrungsstufe 2: 2410,52 Euro/Monat, brutto) und die Fahrer von einfacheren Forstschleppern der Entgeltgruppe 6 (Erfahrungsstufe 2: 2364,95 Euro/Monat, brutto) zugeordnet. Die Bruttoverdienste pro Stunde belaufen sich demzufolge auf 13,91 Euro/h beziehungsweise 13,64 Euro/h.[11]

[10] Grundlage für die tariflichen Betrachtungen dieses Kapitels ist die Entgeltabelle (Anlage B zum TV-L) 2014/2015 des Tarifvertrags für den öffentlichen Dienst der Länder (TV-L). Diese war vom 1. Januar 2014 bis zum 28. Februar 2015 gültig. Seitdem sind die Löhne zumindest nominal gestiegen.

[11] Unproduktive Anteile der Arbeit der Maschinenführer sind bereits in den Lohnnebenkosten enthalten.

Unternehmerkosten
Dreeke et al. (2013) weisen auf die Wichtigkeit dieser Kosten hin. Neben dem Lohn des Unternehmers und dessen Altersvorsorge werden hier der Einsatzleiterlohn sowie die Fahrkosten dieser Personen genannt. Diese werden zum Teil bereits in den sonstigen Sachkosten berücksichtigt. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf ein pauschaliertes Vorgehen. Um dabei die Unternehmerkosten voll umfänglich zu berücksichtigen, wird bei allen Systemen der Faktor der sonstigen Sachkosten (je nach Maschinenkategorie um 2 bis 3 Prozentpunkte) auf generell 12% angehoben.

Sekundäre Kosten der Seilkrananlagen
Seilkrananlagen verursachen neben den Systemkosten, die durch den eigentlichen Holztransport entstehen, auch sekundäre, die ihren Ursprung in der Arbeitsvorbereitung beziehungsweise im Auf- und Abbau der Anlage haben (Frauenholz et al. 2011; Nimz & Erler 2014). Die Kosten einer Seilkran-Verfahrensstufe können nach Nimz & Erler (2014) wie folgt abgebildet werden:

$$K_{Verfahrensstufe} = \frac{K_{System}}{TAP} + K_{Vorbereitung} + K_{AufAbbau} \tag{23}$$

Nach Nimz & Erler (2014) können die Kosten für die Vorbereitung wie folgt berechnet werden:

$$K_{Vorbereitung} = \frac{n_{Trassen}[t_{Vorbereitung} \cdot n_{Personal} \cdot P_{Bruttolohn} \cdot (1 + \frac{f_{Lnk}}{100})]}{V_{Hieb}} \tag{24}$$

Die Kosten des Auf- und Abbaus berechnen sich wie folgt:

$$K_{AufAbbau} = \frac{n_{Trassen}[K_{Lohn^{AufAbbau}} + K_{System^{AufAbbau}}]}{V_{Hieb}} \tag{25}$$

wobei

$$K_{Lohn^{AufAbbau}} = t_{Aufbau} \cdot n_{Personal} \cdot (1 + f_{Abbau}) \cdot P_{Bruttolohn} \cdot (1 + \frac{f_{Lnk}}{100}) \tag{26}$$

und

$$K_{System^{AufAbbau}} = t_{Maschine} \cdot K_{Sach} \tag{27}$$

sind. Die Größe „t“ steht jeweils für den Zeitverbrauch; der Faktor „f“ gibt an, wie groß das Verhältnis zwischen Abbau und Aufbauzeit ist. Der Informationsbedarf besteht demnach bei diesen Größen. Die Tabelle 1 zeigt Richtwerte für diese Größen, die auch in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden. Die Anzahl der Seiltrassen $n_{Trassen}$ ist abhängig von dem Abstand und der Ausrichtung der Seiltrassen.

Tab. 1: *Richtwerte zur Berechnung der Vorbereitungs-, Auf- und Abbaukosten nach* Nimz & Erler *(2014)*

$t_{Vorbereitung}$	3 h
t_{Aufbau}	5 h
$t_{Maschine}$	1 h
$n_{Personal}$	3 Waldarbeiter
f_{Abbau}	0,5

3.2.4 Produktivität der Verfahrensstufen und der Verfahren

Um die Holzerntekosten auf das Produkt, den geernteten Festmeter Holz zu beziehen, bedarf es Informationen zur Produktivität der einzelnen Verfahrensstufen beziehungsweise der Verfahren. Die Produktivität ist das Verhältnis zwischen dem Volumen V des bearbeiteten Holzes und der für die Bearbeitung erforderlichen Zeit t. Diese Definition der Produktivität für die vorliegende Arbeit lehnt sich an die Definition der REFA (1978) an, in der die Arbeitsproduktivität als Verhältnis von mengenmäßiger Leistung zum mengenmäßigen Arbeitseinsatz, hier als Gesamtarbeitszeit inklusive Rüst-, Verteil- und Erholzeiten, definiert wird.

Wie oben bereits dargestellt, bestehen die Holzernteverfahren aus verschiedenen Verfahrensstufen, welche einzeln oder in unterschiedlichen Kombinationen von den aufgeführten Arbeitssystemen übernommen werden. Dafür verbrauchen diese Systeme Zeit. Dieser Zeitverbrauch t kann durch Zeitstudien erhoben werden. Er wird bezogen auf das zu bearbeitende Produkt, welches je nach Bearbeitungsgrad Vollbaum, Rohschaft oder das Sortenstück sein kann. Die Leistung L eines Systems beschreibt die Anzahl bearbeiteter oder transportierter Produkte innerhalb einer Stunde. Sie kann durch folgende Beziehung berechnet werden:

$$L = \frac{60}{t} \tag{28}$$

Durch Multiplikation der Leistung mit dem Volumen V des Produktes kann die technische Arbeitsproduktivität errechnet werden:

$$TAP = L \cdot V \tag{29}$$

Ein anderer Weg zur umfassenden Ermittlung der Produktivitäten ist der Einsatz von Produktivitätsmodellen. Diese Modelle beschreiben die Leistung beziehungsweise die Produktivität der Arbeitssysteme in Abhängigkeit verschiedener unabhängiger Faktoren (Purfürst 2009).

Kostadinov et al. (2012) nennen zur Schätzung von Produktivitäten bei der Holzernte zwei Methoden: die multiple lineare Regression sowie die kNN-Methode[12]. Die Autoren nennen sowohl Vor- als auch Nachteile dieser Verfahren und schlussfolgern daraus Anwendungsschwerpunkte. Bei der Regression werden die Zusammenhänge zwischen der unabhängigen und den abhängigen Variablen durch die Regressionsformel, also als mathematischer Zusammenhang dargestellt. Nach Purfürst (2009) ist dieser Modellansatz der am meisten durchgeführte. Kostadinov et al. (2012) schlussfolgern aus ihren Untersuchungen die besondere Eignung dieser Methode für Simulationen und für Sensitivitätsanalysen, da kein Zugriff auf die Ur-Daten erforderlich ist. Laut dem Autorenkollektiv ist die kNN-Methode besonders für Praktiker geeignet, die die Produktivität für ein einzelnes Holzernteereignis schätzen wollen. Nach Lemm et al. (2005) wird die kNN-Methode bereits erfolgreich bei der Waldbrandprognose oder bei der Durchmesserzuwachsschätzung eingesetzt.

Purfürst (2009) nennt für das Fertigungssystem „Harvester“ und das Fertigungs-Transportsystem „Harwarder“ 53 verschiedene Produktivitätsmodelle. Auch Bacher-Winterhalter (2004) führt zahlreiche Quellen zu Harvester-Produktivitätsmodellen auf.

Stitz (2012) nennt in seiner Arbeit verschiedene Produktivitätsmodelle für Forwarder. Spenner (2014) führte in Anlehnung an Stitz (2012) eine ähnliche Untersuchung zu den Produktivitätsmodellen von Seilschleppern durch.

Erni & Frutig (2004) fassen in ihrem Kalkulationsprogramm „HeProMo“ verschiedene Zeitstudien zusammen, um dem Nutzer ein anwendungsfreundliches Hilfsmittel zur Schätzung der Produktivitäten und Holzerntekosten zur Verfügung zu stellen.

In der vorliegenden Arbeit sollen die Produktivitäten mittels dem Kalkulationsprogramm HeProMo berechnet werden. Stitz (2012) führt den hohen Detaillierungsgrad und somit die Anpassungsfähigkeit an reale Bedingungen des Modells als Vorteil an. Zur Vereinfachung soll nur eine unabhängige Variable für die Berechnungen herangezogen werden. Nach Stitz (2012) und Spenner (2014) sind das Stückvolumen, die Rückeentfernung und die technischen Eigenschaften der Maschine die Hauptdeterminanten bei den meisten Modellen für Forwarder und Skidder. Analog gilt das für das Baumvolumen beim Harvester. Dazu ist es erforderlich, eine einfache Regression auf Grundlage einer Stichprobe durchzuführen. Diese Stichprobe muss durch Rahmenbedingungen (als fix betrachtete weitere unabhängige Variablen) und einer Auswahl verschiedener Stückvolumina (respektive Baumvolumina bei der Fertigung), Rückeentfernungen und Maschineneigenschaften beschrieben werden. HeProMo liefert mittels

[12] kNN – k-nearest-neighbor-algorithm: Nach Lemm et al. (2005) beruht diese Methode auf Ähnlichkeiten des zu schätzenden Ereignisses mit Referenzereignissen. „*Auf Grund von Ähnlichkeitsmassen* [werden] *die nächsten Nachbarn bestimmt und dann* [...] *aus den gemessenen Zielvariablen, beispielsweise durch Mittelwertbildung, der gesuchte Schätzwert berechnet.*“ (Lemm et al. 2005, S. 190)

eigenem Sensitivitätsmodul die benötigten Zeiten (in HeProMo „SystemZeitDirekt“ genannt) beziehungsweise Produktivitäten in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Diese können mit folgender Formel in die erforderlichen Zeitverbräuche in min/Stück umgerechnet werden:

$$t = SystemZeitDirekt \cdot V \cdot 60 \tag{30}$$

Die errechneten Zeitverbräuche können in der Folge dazu genutzt werden, mittels dem Programm „IBM SPSS 21“ die einfachen (linearen und quadratischen) Regressionen zu berechnen. Um den Grad der Ähnlichkeit zwischen den aus HeProMo generierten Zeitverbräuchen und der Regression zu bestimmen, wird der Korrelationskoeffizient als dimensionsloses Maß herangezogen. Es zeigt an, wie weit die Werte nach HeProMo von den Schätzwerten der Regressionsfunktion abweichen. Ist der Korrelationskoeffizient gleich 1 (oder -1), dann werden alle Werte von der Funktion ohne Abweichung beschrieben und liegen demzufolge exakt auf dem Graphen. Der Korrelationskoeffizient lässt jedoch keine Rückschlüsse auf eine Streuung der Werte um die Ausgleichsgerade im Sinne eines Bestimmtheitsmaßes zu, weil es sich bei den Werten bereits um aggregierte Modellergebnisse und nicht um Urdaten handelt. Der Korrelationskoeffizient dient ausschließlich dazu, die Funktion (linear oder quadratisch) auszuwählen, die die Werte nach HeProMo besser abbildet.

Die oben beschriebene Vorgehensweise dient dazu, die Produktivität einer Verfahrensstufe zu berechnen. Verfahren bestehen aber in aller Regel aus mindestens zwei Verfahrensstufen. Nun ist zu unterscheiden, ob es sich um voneinander gelöste oder verbundene Verfahrensstufen handelt. Bei sogenannten gelösten Verfahren ist jede Verfahrensstufe unabhängig und unbedingt von allen anderen durchführbar. Hier wird für jede Verfahrensstufe die mittels Regressionsfunktion geschätzte Produktivität verwendet. Hängen zwei Verfahrensstufen prozess-logisch voneinander ab, so wird für beide Stufen die bestimmende Produktivität verwendet.

3.3 Maximierung des Bodenertragswertes

Für die folgenden Berechnungen ist die Verwendung bereits optimierter Bodenertragswerte eine wichtige Voraussetzung. Das heißt, dass im Vorfeld der Bodenertragswert nach den Parametern „Umtriebszeit“, „Eingriffsstärke“, „Aushaltung des Rohholzes“ und „Holzernteverfahren“ maximiert werden soll. Theoretisch müssen ständig alle Parameter gleichzeitig optimiert werden, um den maximalen Bodenertragswert zu finden. Dies ist einerseits sehr aufwendig und andererseits nicht dazu geeignet, Strukturen zu erkennen, sodass ein iteratives Vorgehen gewählt wird. Da zur Berechnung des Bodenertragswertes die Holzerlöse sowie die Holzerntekosten bekannt sein müssen und Abhängigkeiten dieser Größen zur Sortiervariante sowie zum Holzernteverfahren bestehen, müssen zunächst diese Parameter (gemeinschaftlich) untersucht werden.

3.3.1 Optimale Holzernteverfahren

Um nicht alle theoretisch möglichen Holzernteverfahren anzuführen und miteinander zu vergleichen, soll eine Auswahl durchgeführt werden. Gemeinsam mit der Geschäftsleitung des Staatsbetriebes Sachsenforst wurde im Jahr 2013 ein Fragebogen erstellt, der neben weiteren Informationen die angewandten Holzerntefahren bei den Forstbezirken erfragt. Von den zwölf Forstbezirken in Sachsen bearbeiteten drei den Fragebogen selbstständig. Mit vier weiteren Forstbezirken sowie der Nationalparkverwaltung wurde der Fragebogen im leitfadengestützten Interview ausgefüllt.

Auswahl der für die Optimierung verwendeten Holzernteverfahren
Für die Maximierung des Bodenertragswertes müssen ökonomisch optimale Holzernteverfahren zu Grunde gelegt werden. Dies ist getrennt nach Rückegassenabstand und separiert für Kurz- und Langholz durchzuführen. Ein getrenntes Vorgehen ist notwendig, da auch die Sortiervariante den Bodenertragswert beeinflusst. Es hat den Vorteil, dass innerhalb der folgenden Einzelbetrachtungen keine Unterschiede in Hinsicht auf den Holzerlös bestehen und es somit möglich ist, einzig die Holzerntekosten als ökonomisch relevantes Kriterium zu Rate zu ziehen.

3.3.2 Optimale Sortiervariante

Es werden zwei Varianten unterschieden. In der Variante „kurz“ wird die gesamte Hiebsmenge als Kurzholz ausgehalten. Dafür stehen die Sortimente „Langholzabschnitte“, „Palettenholz“ und „Industrieholz, kurz“ zur Verfügung. Die Tabelle 20 im Anhang zeigt die dazu getroffenen Sortiereinstellungen. Die Variante „kurz und lang“ beinhaltet zusätzlich das Sortiment „Langholz“. Eine Sortierung, die sich nur auf Langholz beschränkt, ist im Hinblick auf die getroffenen Sortiereinstellungen nicht praktikabel, da sie zu einem sehr hohen Anteil nicht verwertbaren Holzes führen würde.

3.3.3 Berücksichtigung der Eingriffsstärke

Im Kapitel 3.2.1 wurde die Simulation der ertragskundlichen Datenbasis dargestellt. Dabei wurde ein Fichtenbestand angelegt, der in regelmäßigen Abständen und unter gewissen Zielstellungen durchforstet wurde. Simuliert wurden mäßige Eingriffe mit einem maximalen Durchforstungsvolumen von $60\,\mathrm{m}^3/\mathrm{ha}$.

Zur Maximierung der Bodenertragswerten soll an der „Stellschraube Durchforstungsstärke gedreht“ werden. Dafür werden generell starke Durchforstungen mit einem maximalen Entnahmevolumen von $100\,\mathrm{m}^3/\mathrm{ha}$ angewandt.

3.3.4 Optimierung der Umtriebszeit

Für die folgenden Betrachtungen sollen Bodenertragswerte verwendet werden, die neben der Sortierung und der Eingriffsstärke auch nach der Umtriebszeit optimiert sind. Dazu ist es zunächst notwendig, Abtriebswerte für verschiedene Zeitpunkte zu berechnen. Ab dem Alter 50 Jahre wird für jedes volle Jahrzehnt ein Abtriebswert bis zum Alter 120 Jahre berechnet.

In der Folge wird der Bodenertragswert für jedes Szenario (bzw. für jede Dekade) berechnet. Die optimale Umtriebszeit ist diejenige, die den maximalen Bodenertragswert hervorbringt.

3.4 Die Annuität als jährliche Bodenrente

Möhring & Rüping (2006) nutzen zur Bewertung von forstlichen Nutzungsbeschränkungen die Annuität als Bewertungsgröße. Diese jährlich konstante Zahlungsgröße wird von den Autoren als „jährlicher Holzproduktionswert“ bezeichnet. Nach den Autoren besteht der Vorteil dieser Größe darin, dass sie den Vergleich zwischen Kapitalwerten (Bodenertragswerten) ermöglicht, denen unterschiedliche Bewertungszeiträume zu Grunde liegen. Die Annuität als ewige, jährlich konforme Bodenrente errechnet sich aus dem Faustmannschen Bodenertragswert (siehe Formel 2) multipliziert mit dem Zinssatz:

$$An_{\infty} = C_{0_{\infty}} \cdot i \tag{31}$$

Die Bodenertragswerte sollen in der vorliegenden Arbeit in Annuitäten umgerechnet werden, da diese die Interpretationen deutlich erleichtern und beim Praktiker auf Grund des Jahresbezuges auf höhere Akzeptanz stoßen.

Nachdem das Faustmann-Modell eine Aussage zur Rentabilität der verschiedenen Erschließungssysteme getroffen hat, soll es um weitere Effekte ergänzt werden. Für den Fall, dass diese Effekte nicht oder nur schwer monetär abbildbar sind, sollen die quantitativen Auswirkungen dieser Effekte der Rentabilität gegenübergestellt werden.

3.5 Berücksichtigung nichtmonetärer Effekte mit der Technik nach Klemperer (1996)

Deegen et al. (2000) erweitern ihre finanzielle Analyse der Waldpflegeentscheidung, indem sie öffentliche Leistungen (im Speziellen die Biodiversität) in die Betrachtung einbeziehen. Die Autoren wendeten dabei die Technik nach Klemperer (1996) an, die Veränderungen des nicht monetären Nutzens den sich daraus ergebenden Opportunitätskosten gegenüberstellt. Das dabei von Deegen et al. (2000) verwendete Modell wird für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit leicht angepasst. Dieses abgewandelte Modell sowie die Technik nach Klemperer (1996) wird im folgenden beschrieben.

Das entscheidungsrelevante Kriterium des Faustmann-Modells ist der Kapitalwert (Bodenertragswert, C_0), das bedeutet, der Nutzen U wird auf den Nutzen des Geldeinkommens $U(e)$ reduziert:

$$U = U(e) = U(C_0) \tag{32}$$

Unter der Voraussetzung des Vorhandenseins eines vollkommenen Kapitalmarktes im Gleichgewicht befindet sich das Nutzenmaximum und das Kapitalwertmaximum an gleicher Stelle:

$$\frac{dU_{max}(C_0)}{dt} = \frac{C_{0\,max}}{dt} \tag{33}$$

Die Nutzenfunktion (32) wird nun um weitere, nicht monetären Nutzen $U(w_1, w_2, ..., w_n)$ erweitert:

$$U = U(C_0, w) \tag{34}$$

Da Formel 33 nun nicht mehr gilt, ist die Bestimmung des Nutzenmaximums deutlich erschwert. Trotzdem stellt das Kapitalwertmaximum auch das intertemporale Einkommenmaximum dar und jede Abweichung von diesem finanziellen Optimum bedeutet eine Minderung des Geldeinkommens. Unter der Prämisse der Formel 34 ist eine solche nur dann sinnvoll, wenn dadurch der Gesamtnutzen steigt, indem der außermonetäre Nutzen die Einkommensminderung mindestens ausgleicht. Letztere können als Opportunitätskosten für den zusätzlichen, außermonetären Nutzen bezeichnet werden:

$$C_{0\,k} = C_{0\,max.} - C_{0\,alternativ} \tag{35}$$

Nach Deegen et al. (2000) stellen die Opportunitätskosten eine wertvolle Entscheidungshilfe für die Bereitstellung zusätzlicher Leistungen dar, auch wenn sie nichts über den Nutzen sagen. Die „Simple Betterness Method“ nach Klemperer (1996) stellt die quantitativen Veränderungen weiterer Leistungen den Opportunitätskosten gegenüber und unterstützt bei der Entscheidungsfindung und der Gesamtnutzen-Optimierung.

Zunächst müssen die Annuitäten gemeinsam mit der weiteren Leistung grafisch dargestellt werden, wobei nach absteigender Annuität geordnet wird. Die Abbildung 14 zeigt dies anhand fünf fiktiver Handlungsalternativen beispielhaft.

Anhand dieser Darstellung können nicht dominante Handlungsalternativen identifiziert werden. Dies sind solche, die gegenüber einer anderen in Bezug auf die Annuität und/oder der weiteren Leistung unterlegen sind. Im Beispiel sind die Handlungsalternativen 1 und 3 nicht dominant. Zwar besitzt 1 die gleiche Annuität wie 2, zeigt aber weniger nichtmonetäre Leistung, sodass es keinen Grund gibt, 1 der 2 vorzuziehen. Die Handlungsalternative 3 ist der 2 in beiden Größen unterlegen. Die nicht dominanten Alternativen können nun aus der Abbildung entfernt werden, sodass die Abbildung 15 entsteht.

Zwar lässt sich auch aus der Abbildung 15 kein Optimum ablesen, dennoch hilft sie bei der Entscheidungsfindung. Sie zeigt zum Einen, auf wieviel Annuität verzichtet wird, wenn nicht die Handlungsalternative mit der höchsten Rentabilität, sondern eine andere gewählt wird. Zum anderen gibt sie Auskunft darüber, wieviel zusätzliche, außermonetäre Leistung dadurch bereitgestellt wird.

Um demnach eine Grenzleistung durch Auswahl einer alternativen Handlungsalternative zu erreichen, müssen Opportunitätskosten in Kauf genommen werden, die sich mit folgender Formel beschreiben lassen:

$$OK = AN_{opt} - AN_{altern} \tag{36}$$

Der Entscheider kann nun subjektiv abwägen, ob der nichtmonetäre Nutzenzugang den finanzielle Nutzenentgang rechtfertigt.

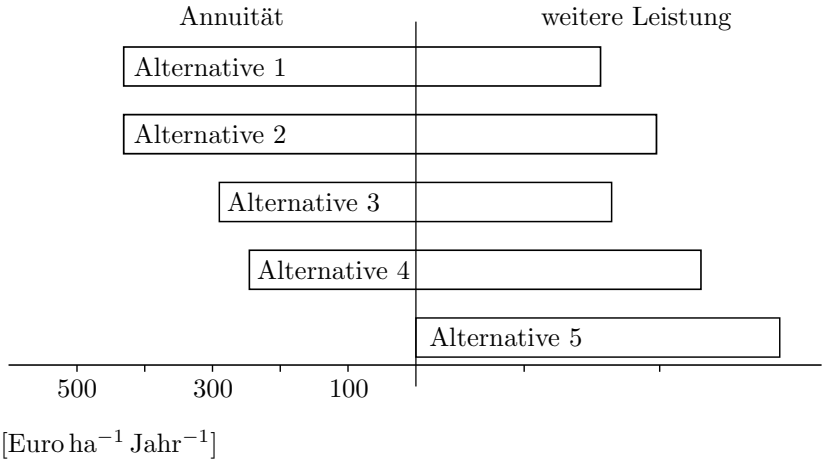


Abb. 14: *Gegenüberstellung von Annuität und einer weiteren Leistung für fünf fiktive Handlungsalternativen (verändert nach* Klemperer *1996, S. 259)*

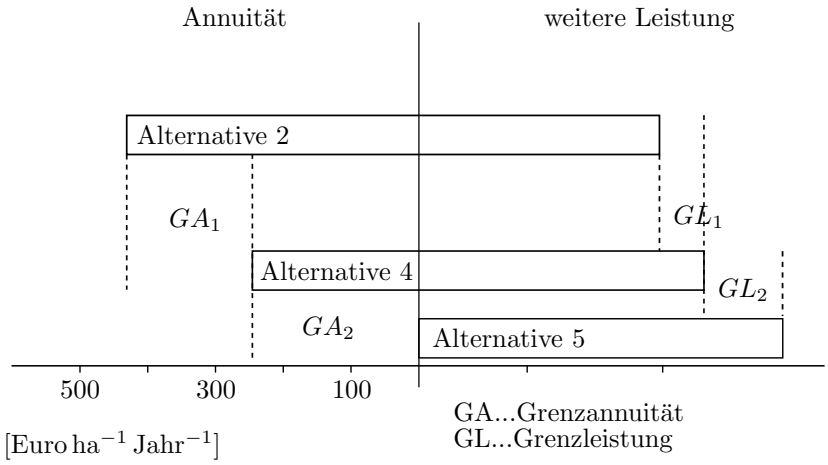


Abb. 15: *Drei verbleibende Handlungsalternativen (verändert nach* Klemperer *1996, S. 260)*

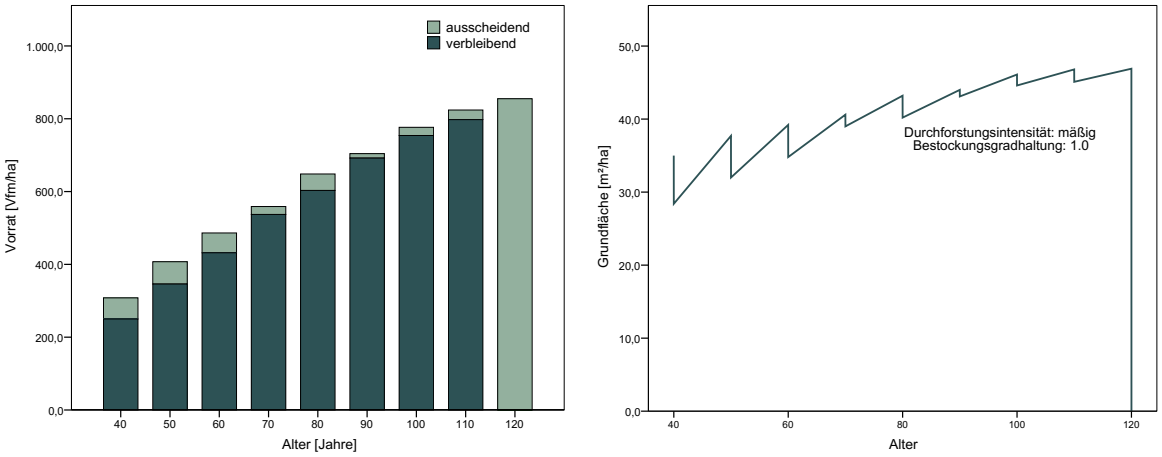
Im Folgenden wird das Faustmann-Modell numerisch untersetzt. Nachdem das Modell „gefüllt“ ist und Annuitäten dargestellt werden können, soll das Modell um zusätzliche Effekte erweitert werden. Die „Simple Betterness Method“ soll abschließend helfen, außermonetäre Vorteile der Erschließungssysteme darzustellen.

4 Ergebnisse

4.1 Grundlagenberechnung

4.1.1 Ergebnisse der ertragskundlichen Simulation

Nach der oben beschriebenen Verfahrensweise wurde ein virtueller Bestand generiert, gepflegt und schließlich geerntet. Die Abbildung 16 veranschaulicht die Ergebnisse der ertragskundlichen Simulation grafisch.



(a) Vorratsentwicklung und Holznutzungen

(b) Grundflächenhaltung

Abb. 16: *Ergebnisse der ertragskundlichen Simulation [Naturaldaten]*

Die Rückegassenanlage im Alter 30 Jahre ist hier nicht abgebildet. Die darauf folgenden Vornutzungen wurden vom Waldwachstumssimulator nach dem vorgegebenen Prinzip der Auslesedurchforstung und weiteren oben beschriebenen Parametern durchgeführt. Dabei wurde im Jahrzehnt unterschiedlich viel Holz entnommen. Die Spannweite reicht von 12 Vfm/ha im 90. Jahr bis 61 Vfm/ha im Jahr 50. Die Summe aller Vornutzungen beträgt ca. 302 Vfm/ha. Im 120. Jahr wird der gesamte Vorrat in Höhe von 855 Vfm/ha schließlich geerntet. Dieser Durchforstungsversuch entspricht einer Bestockungsgradhaltung von 1.0. Die Grundflächenentwicklung ist in der Abbildung 16 (b) dargestellt.

Alle für die weiteren Berechnungen notwendigen Naturaldaten liefert BWinPro. Sie sind für diese Simulation (Pflegeregime: mäßige Durchforstung, Gassenabstand: 20 m) in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: *Naturaldaten [Pflegeregime: mäßige Durchforstung, Gassenabstand: 20 m]*

		Ausscheidender Bestand			
	Alter	**Nutzungsmenge**	**Anzahl**	**durchschn. Volumen**	**Mittelwert des BHD**
Nutzungsart	Jahre	Vfm/ha	Stck/ha	Vfm/Baum	cm
[Gassenaufhieb]	30	27,13	330	0,082	13,0
	40	58,08	300	0,194	16,7
	50	61,33	190	0,323	19,4
	60	54,38	130	0,418	20,5
Vornutzungen	70	21,70	30	0,723	26,0
	80	45,12	60	0,752	25,1
	90	12,22	5	2,444	47,6
	100	22,49	15	1,499	30,9
	110	26,39	10	2,639	46,9
Endnutzung	120	855,00	925	0,924	24,3

4.1.2 Ergebnisse der Holzerlöskalkulation

Nachdem ein „Bestandesleben“ simuliert wurde, konnten die anfallenden Holzmengen unter Zuhilfenahme des Sortierungsmoduls des Programms BWinPro 7.7 berechnet werden. Die Sortierung umfasste folgende Sortimente: Langholz, Langholzabschnitte, Palettenholz und Industrieholz (kurz). Es waren verschiedene Dimensionen und Qualitäten möglich (siehe Tabelle 20 im Anhang).

Zur Kalkulation der Holzerlöse konnte auf Durchschnittspreise des Staatsbetriebes Sachsenforst (2014) aus dem Jahr 2014 zurückgegriffen werden, die ebenfalls im Anhang dargestellt sind (siehe Tabelle 20). Der Fichten-Leitpreis (Langholzabschnitte in der Qualität B/C und der Stärkeklasse 2b+) lag im Jahr 2014 bei 93 Euro/Efm.

Einen Überblick über die angefallenen Sortimente und die daraus entstehenden Holzerlöse gibt die Tabelle 3.

Tab. 3: *Sortimente und Holzerlöse*

	Alter	**Sortimente**				**Gesamterlös**
			Kurzholz			
		Langholz	**Langholzabschnitte**	**Palettenholz**	**Industrieholz, kurz**	
Nutzungsart	Jahre	Efm/ha	Efm/ha	Efm/ha	Efm/ha	Euro/ha
[Gassenaufhieb]	30		11,82	5,69	6,66	1080,37
	40		34,25	13,60	5,17	2771,02
	50	27,48	14,96	10,10	3,76	3274,38
	60	28,30	12,67	6,27	2,54	3193,80
Vornutzungen	70	7,62	11,34	0,65	0,45	1495,62
	80	33,19	3,88	2,48	0,99	2958,81
	90	9,08	1,65			976,00
	100	16,43	2,41	0,98	0,45	1538,17
	110	23,77				2161,61
Endnutzung	120	365,15	221,68	71,47	55,58	50 311,24

Wie zu sehen ist, fallen sowohl bei der Anlage der Rückegassen als auch bei der ersten Durchforstung nur Kurzholzsortimente an. Ihr Anteil ist im Verlauf des Alters rückläufig. Die Erlöse der Durchforstungen schwanken im Bereich zwischen 976 Euro/ha im Jahr 90 und 3274 Euro/ha im Jahr 50. Dies ist vor allem auf die Erntemengenunterschiede zurückzuführen. Der Abtrieb des Bestandes nach 120 Jahren erzielt einen Holzerlös in Höhe von rund 50 000 Euro/ha.

4.1.3 Ergebnisse der Systemkostenkalkulation

Systemkosten des Mensch-Motorsäge-Systems im Holzeinschlag
Der Arbeitsplatz eines Waldarbeiters im Holzeinschlag kostet 26,10 Euro/h zzgl. der Motorsägen- und Werkzeugentschädigung in Höhe von 2,35 Euro/h und 0,15 Euro/h. Die Systemkosten ohne die Berücksichtigung der allgemeinen Unternehmerkosten betragen für den Waldarbeiter im Holzeinschlag demnach 28,60 Euro/h. Werden diese Kosten mit 12% pauschal auf das System aufgeschlagen, kostet es 32,03 Euro/h.

Systemkosten des Mensch-Tier-Systems
Das System „Pferderückung“ setzt sich aus den Lohnkosten des Rückers (26,10 Euro/h) und den Kosten, die direkt (6,28 Euro/h) sowie indirekt (4,85 Euro/h) durch das Pferd verursacht werden, zusammen. In Summe fallen Systemkosten in Höhe von 37,23 Euro/h an. Werden zusätzlich die allgemeinen Unternehmerkosten mit 12% berücksichtigt, erhöht sich dieser Betrag auf 41,70 Euro/h.

Systemkosten der Mensch-Maschinen-Systeme
Die Abbildung 17 zeigt die recherchierten Anschaffungskosten der verschiedenen Maschinenkategorien[13]. Über alle Kategorien hinweg wurden 105 verschiedene Typen in die Systemkostenberechnung einbezogen.

Auf die Kategorie H1 entfiel nur eine Maschine. Der Neupreis liegt bei 122 TEuro. Mit einem deutlichen Abstand dazu liegt der Mittelwert der drei mittelgroßen Harvester bei ca. 319 TEuro. Mit einem weiteren Abstand von ungefähr 75 TEuro folgt der Mittelwert der Kategorie H3 bei 394 TEuro (n=19). Die vier Raupenharvester sind im Durchschnitt mit etwa 360 TEuro etwas günstiger. Das arithmetische Mittel der Anschaffungspreise der drei Prozessoren liegt bei 219 TEuro.

Bei den Schleppern sind die Anschaffungspreise für die selbstfahrende Seilwinde (76 TEuro) und den Forstschlepper (92 TEuro; n=5) am niedrigsten. Weist der Forstschlepper einen Kran auf, steigen die Anschaffungskosten auf 176 TEuro (n=4).

Forstspezialschlepper ohne Kran verursachen bei der Anschaffung Kosten in Höhe von 181 TEuro (n=6). Das Pendant mit Kran ist im Durchschnitt um 82 TEuro kostenintensiver (263 TEuro; n=3). Der Unterschied zu den zwei schweren Modellen beträgt im Schnitt noch einmal 10 TEuro.

Auch auf die Kategorie F1 entfiel nur ein Maschine. Der Neupreis liegt bei 79 TEuro. Eine Maschine der Forwarderklasse F2 kostet im Schnitt rund 237 TEuro (n=7) und

[13] Die Tabelle 22 im Anhang fasst die Mittelwerte der Anschaffungskosten der einzelnen Maschinenkategorien sowie die zu Grunde liegenden Quellen zusammen.

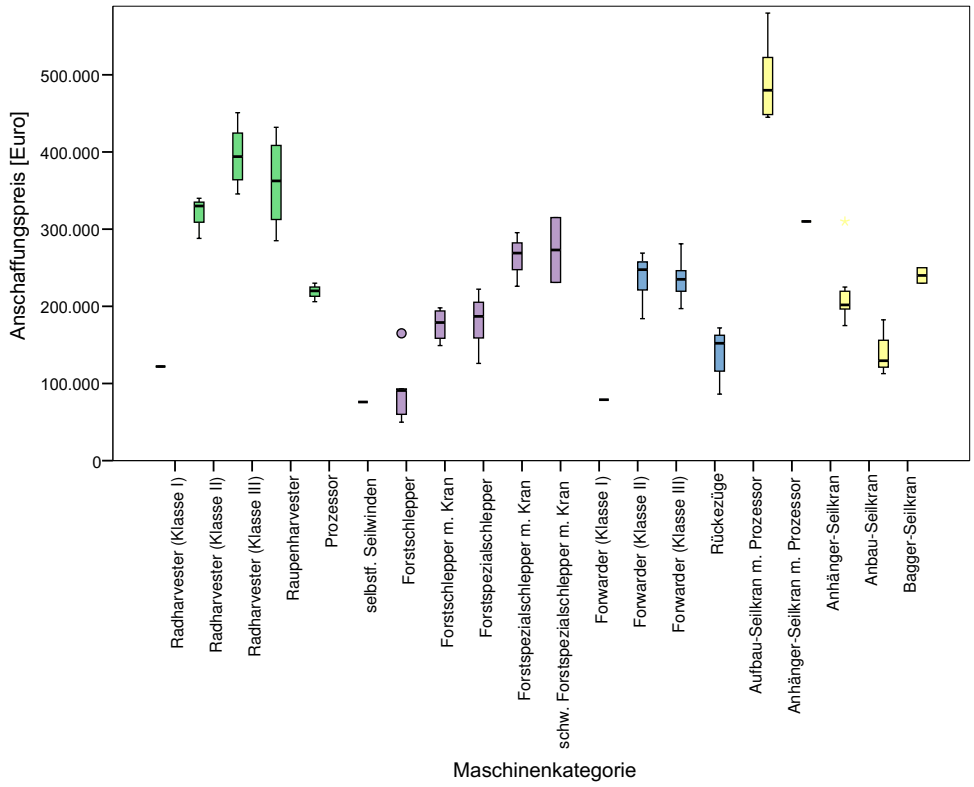


Abb. 17: *recherchierte Anschaffungskosten der verschiedenen Maschinenkategorien*

ist somit statistisch gesehen 3 TEuro teurer als eine Maschine der Klasse 3 (n=19). Ein Rückezug verursacht im Mittel Anschaffungskosten in Höhe von 138 TEuro. Für kleine Forwarder mit Raupenantrieb konnte keinen Anschaffungspreis recherchiert werden.

Die mit Abstand höchsten Anschaffungskosten verursachen die auf einen LKW aufgebauten Seilkrananlagen mit Prozessor. Der Mittelwert der recherchierten Neupreise liegt bei 492 TEuro. Der Anhäge-Seilkran mit Prozessor, der einzige, der in der Literatur gefunden wurde, kostet 310 TEuro. Verzichtet man auf den Prozessor, werden die Kippmastseilgeräte um ca. 93 TEuro günstiger (n=7). Die drei Anbau-Seilkräne kosten in der Beschaffung durchschnittlich 142 TEuro. Die zwei „Yarder“ verursachen bei der Anschaffung Kosten in Höhe von 240 TEuro.

Die Tabelle 23 im Anhang fasst die Anschaffungskosten der verschiedenen Holzerntesysteme als Überblick zusammen. Neben dem arithmetischen Mittelwert sind auch der gegenüber Ausreißern stabilere Median sowie die Systemkosten dargestellt, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Fertigungssysteme: Die Abbildung 18 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der einzelnen Fertigungssysteme.

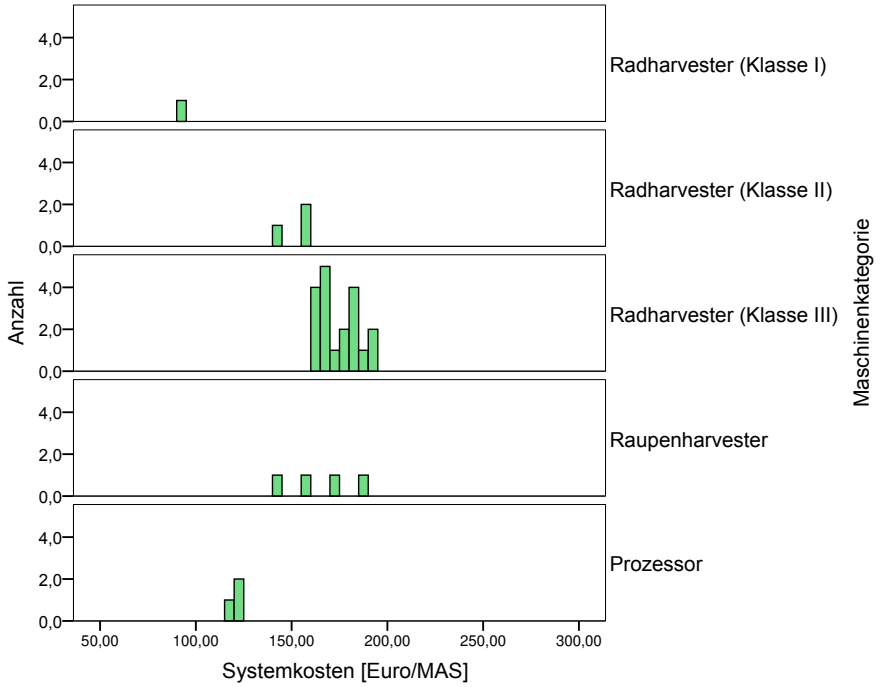


Abb. 18: *Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Fertigungssysteme*

Die Harvester-Systeme weisen auf Grund der hohen Anschaffungskosten auch hohe Systemkosten auf. Deutlich erkennbar ist die Steigung der Systemkosten mit größer werdender Harvesterklasse. Die kleine Maschine liegt mit 92,26 Euro/MAS_{15} deutlich unter den mittelgroßen Maschinen (152,20 Euro/MAS_{15}). Die meisten Kosten pro Zeiteinheit verursachen mit 174,71 Euro/MAS_{15} die großen Radharvester und mit 165,40 Euro/MAS_{15} die Raupenharvester. 120,55 Euro/MAS_{15} kostet ein durchschnittlicher Prozessor. Die Preise für die Raupenharvester streuen im Bezug zum Mittelwert am meisten.

Transportsysteme: Die Abbildungen 19, 20 sowie 21 zeigen die Systemkostenverteilung der einzelnen Transportsysteme.

Die Forstschlepper mit Kran unterscheiden sich von den Forstspezialschleppern (mit Kran) beziehungsweise von den schweren Kranschleppern nur sehr wenig. Es erscheint unlogisch, dass die größte Kategorie (S5; 116,08 Euro/MAS_{15}) und die leichtere Variante des Forstspezialschleppers mit Kran (S4;113,54 Euro/MAS_{15}) günstiger als der Forstschlepper sind (siehe Tabelle 23 im Anhang). Die Ursache dafür ist die unterstellte, verschiedene jährliche Nutzungsdauer, die vom KWF übernommen wurde. Der Unterschied zu den Forstschleppern mit Kran beträgt

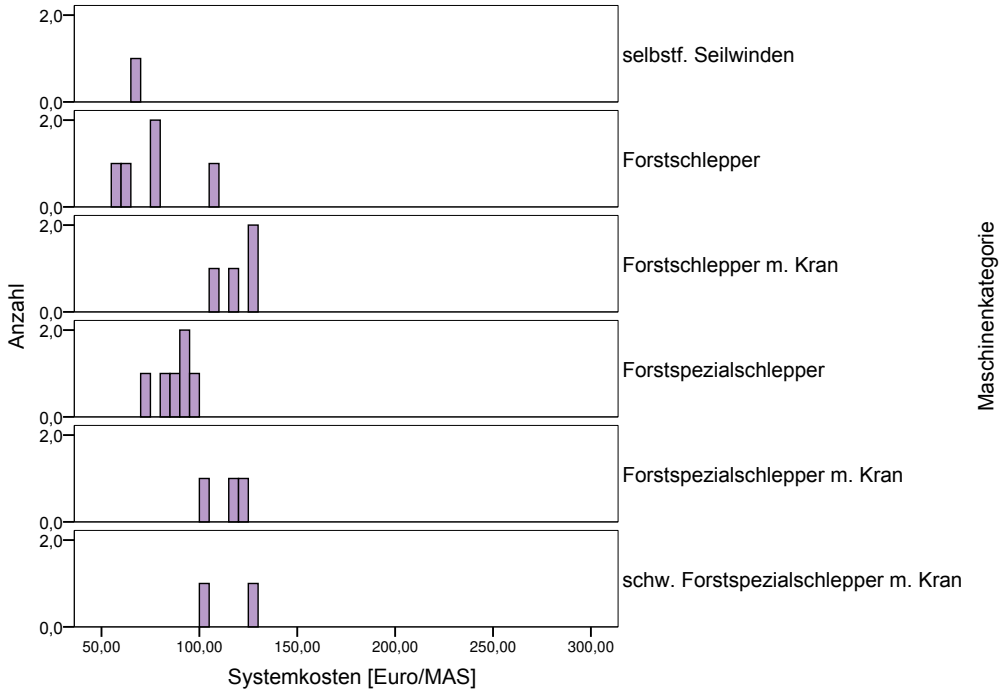


Abb. 19: *Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Transportsysteme – Schlepper*

nur 3,54 Euro/MAS_{15}. Die Differenzen liegen im Bereich zwischen 2,1 und 3,1% und sind vernachlässigbar, was dazu führt, dass die Klassen S2, S4 und S5 zusammengefasst werden zu einer Einheitsklasse „Kranschlepper“ mit Kosten in Höhe von 116,45 Euro/MAS_{15}. Die Forstschlepper ohne Kran verursachen Kosten in Höhe von 76,50 Euro/MAS_{15}. Die Forstspezialschlepper liegen im Schnitt bei Systemkosten von 86,46 Euro/MAS_{15}. Der Unterschied ist mit 9,96 Euro/MAS_{15} relativ hoch (11,5%). Dennoch werden diese Schlepper zur Vereinfachung zusammengefasst zur Klasse der „Seilschlepper“. Die Systemkosten dieser Klasse betragen 81,93 Euro/MAS_{15} als Mittelwert der elf unterschiedlichen Typen. Die geringsten Kosten pro Maschinenarbeitsstunde entstehen bei der selbstfahrenden Seilwinde (68,24 Euro/MAS_{15}).

Beim Einsatz eines kleinen Radforwarders (F1) fallen als Systemkosten 67,02 Euro/MAS_{15} an. Die Forwarder-Klassen F2 und F3 werden auf Grund der preislichen Nähe zusammengefasst. Der Unterschied beträgt 0,98 Euro/MAS_{15} und somit weniger als 1%. Im Mittel kosten die 26 einbezogenen Systeme der Klassen F2 und F3 106,74 Euro/MAS_{15}. Auf einem ähnlichen Niveau liegen die Systemkosten der Rückezüge (105,05 Euro/MAS_{15}).

Sündermann et al. (2013) nennen für den Typ „Terri 34“ Systemkosten in Höhe von 69,50 Euro/MAS_{15}. In Ermangelung anderer Daten wird diese Information übernommen.

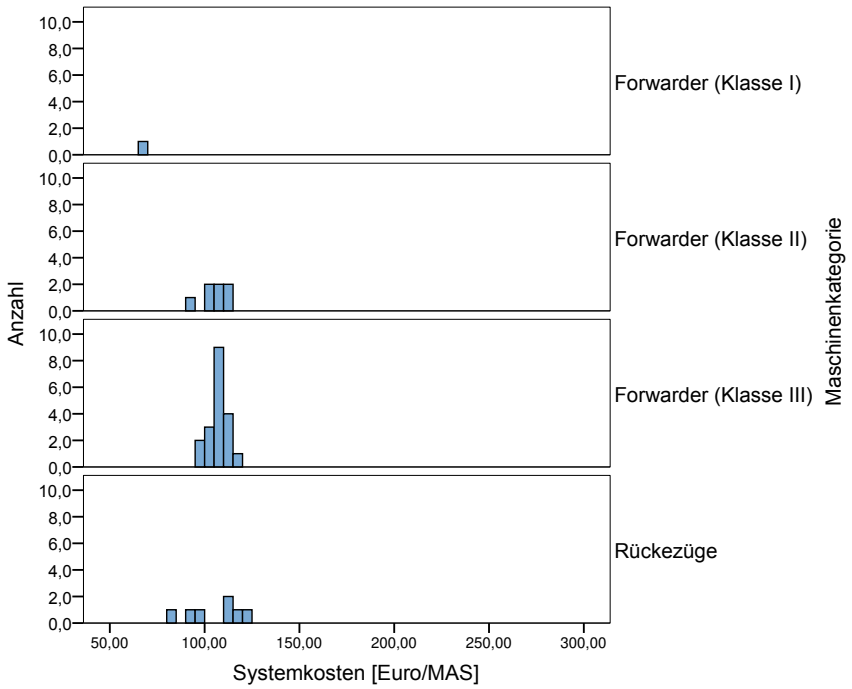


Abb. 20: *Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Transportsysteme – Forwarder und Rückezüge*

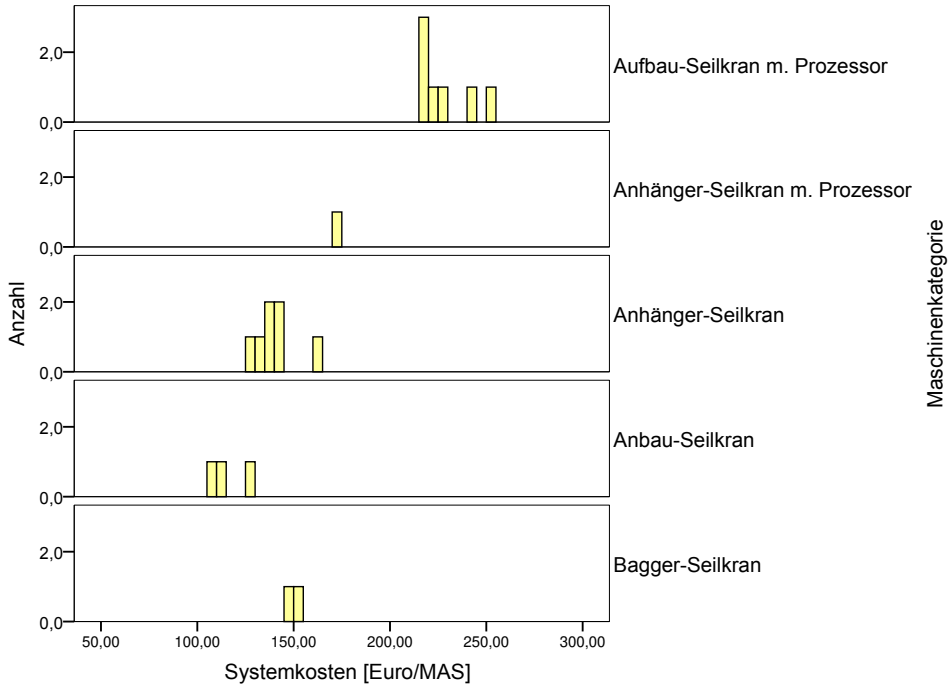


Abb. 21: *Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Transportsysteme – Seilkrane*

Die 20 recherchierten Seilkräne weisen durchschnittlich sehr hohe Systemkosten auf. Am kostenintensivsten sind die Systeme, die auf ein Trägerfahrzeug, meist ein LKW oder Bagger, aufgebaut sind und zusätzlich einen Prozessor aufweisen (sogenannte „Gebirgsharvester“). Sie kosten durchschnittlich 227,77 Euro/MAS_{15} (n=7). Ein recherchierter Anhänger-Seilkran weist ebenfalls einen Prozessor auf. Diese Ausführung ist 32,46 Euro/MAS_{15} teurer als die Kippmastseilgeräte ohne Prozessor (141,13 Euro/MAS_{15}; n=7). Die Anbau-Seilkräne (n=3) kosten im Mittel 116,97 Euro/MAS_{15}. Die Seilkrananlagen als Bagger-Anbau verursachen Systemkosten in Höhe von 151,12 Euro/MAS_{15}.

Da das System Anbau-Seilkran in seinem Einsatzbereich stark limitiert ist (Kurzstreckensystem mit geringer Nutzlast), der Anhänge-Seilkran mit Prozessor sehr selten vorkommt und das System Yarder im Vergleich zu den Anhänger-Varianten sehr teuer ist, werden diese Systeme im weiteren Verlauf der Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt.

Sekundäre Kosten der Seilkranverfahrensstufen

Die Abbildung 22 zeigt die sekundären Kosten der Seilkran-Verfahrensstufen in Abhängigkeit von der Hiebsmenge und der Hiebsflächengröße für zwei verschiedene Seiltrassenabstände.

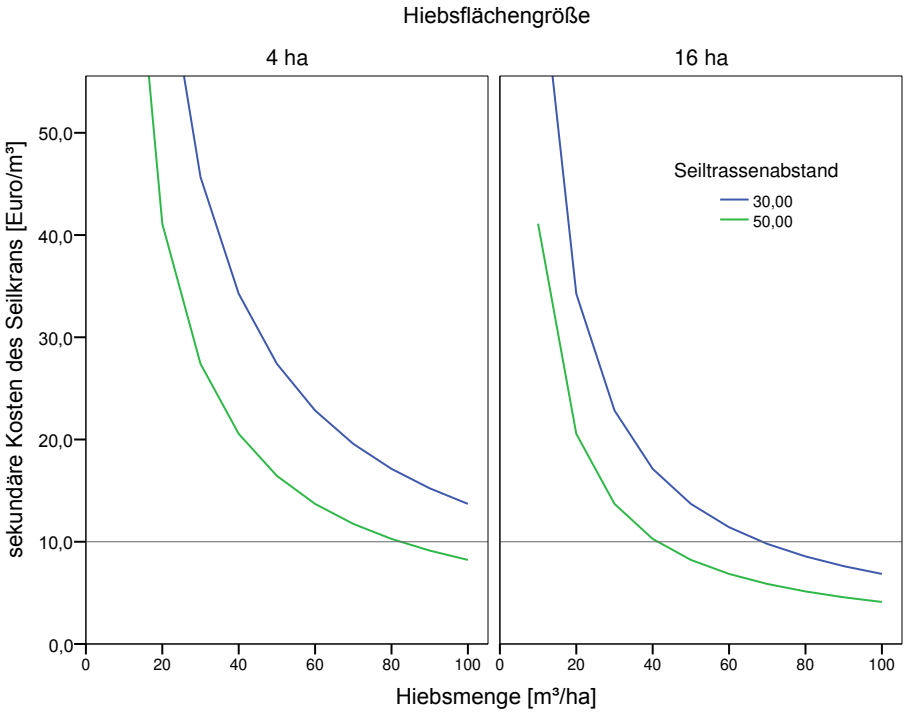


Abb. 22: *Vorbereitungs- sowie Auf- und Abbaukosten der Seilkran-Verfahrensstufen*

Die sekundären Kosten der Seilkran-Verfahrensstufen setzen sich aus den Vorbereitungskosten sowie den Kosten für Auf- und Abbau zusammen. Unterstellt wurden die Richtwerte nach Nimz & Erler (2014).

Der große Einfluss der Erntemenge und der Flächengröße ist ebenso deutlich zu erkennen wie jener des Trassenabstandes. Aus ökonomischer Sicht verbessert sich der Deckungsbeitrag beim Einsatz eines Seilkranes mit zunehmenden Holzmengen je Seiltrasse, da dadurch die Stückkosten gesenkt werden. Dies kann auch durch die Vergrößerung der Hiebsfläche erreicht werden, wenn dadurch die Trassenlänge steigt. In der Abbildung 22 wurden quadratische Hiebsflächen unterstellt.

4.1.4 Ergebnisse der Produktivitätsmodellanalyse – Zeitverbrauch ausgewählter Verfahrensstufen

Für die durchzuführenden Betrachtungen werden die Zeitverbräuche der einzelnen Verfahrensstufen benötigt. Das Modell „HeProMo“ diente der Generierung dieser Daten. Diese wurden im Anschluss mit IBM SPSS (Version 21) ausgewertet, sodass schlichte Modelle zur Schätzung der Zeitverbräuche und somit der Produktivitäten zur Verfügung standen.

Fertigung
Die Abbildung 23 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen dem Volumen des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes und dem Zeitverbrauch t für die Verfahrensstufen des Fertigens.[14]

Die Fertigung eines Baumes mit dem Harvester geschieht sehr zügig und liegt je nach Dimension des Baumes im Bereich von 1 min/Baum bis 3 min/Baum. Die Fertigung mit der Motorsäge bedarf in Abhängigkeit des Baumvolumens das 10- bis 25-fache dieser Zeit. Nur ein Viertel der motormanuellen Zeit benötigt der Waldarbeiter, um den Baum für das maschinelle Aufarbeiten zu fällen. Für die Aufarbeitung dieser Bäume wurde ein um 10% erhöhter Zeitverbrauch beim Einsatz des Harvesters unterstellt (vgl. Müller 2015). Werden die Vollbäume am Lagerplatz aufgearbeitet, sinkt der Zeitverbrauch gegenüber der Harvesterarbeit auf der Rückegasse um 10%.[15] Nach Thieme (1999) wirkt sich die bis zu zehnmal größere Hubkraft der Raupenharvester leistungssteigernd aus. Andere Autoren beurteilen die Produktivität der Raupenharvester als vergleichbar

[14] Die Ordinate der Abbildung. 23 ist logarithmiert, um die motormanuelle sowie die maschinelle Arbeit in einem Diagramm abzubilden.
[15] Die Literatur schweigt zu dieser Fragestellung. Da das Fahren auf der Gasse sowie die Teilschritte Fällen und Vorrücken wegfallen, erscheint diese Festlegung im Bezug auf die Zeiteinsparung als eher vorsichtig.

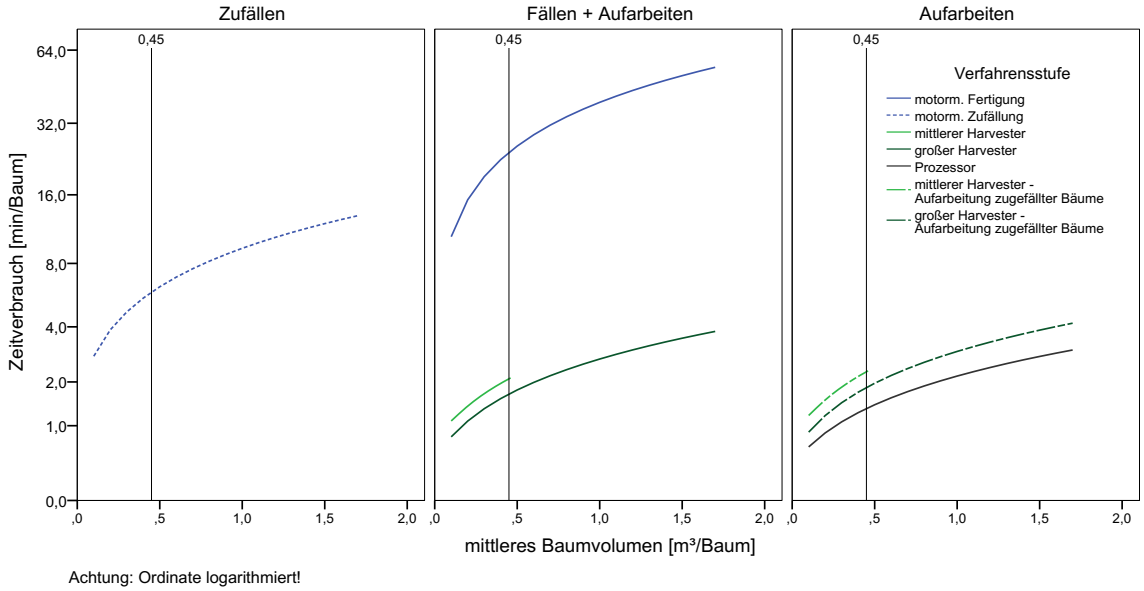


Abb. 23: *Zeitverbäuche der Verfahrensstufen des Fertigens*

mit der von entsprechenden Radmaschinen (Schöttle et al. 1997; Weixler et al. 1997; Stampfer 1999). Für die vorliegende Arbeit wird unterstellt, dass der Zeitverbrauch der Raupenharvestern (H4) gleich dem der großen Radharvester (H3) ist.

Die Kurven für die mittleren Harvester enden bei ca. 0,45 Efm/Baum, da das Produktivitätsmodell „HeProMo“ bei diesem Baumvolumen die Systemgrenze für Harvester mittlerer Größe festlegt.

Die Tabelle 24 im Anhang veranschaulicht den mathematischen Zusammenhang zwischen Baumvolumen und Zeitverbrauch beim Fertigen. Sie fasst die Regressionskoeffizienten a, b und c der Polynome 2. Grades zusammen und zeigt die Korrelationskoeffizienten der Regressionen. Die Gleichungen dieser Kurven haben folgenden Aufbau

$$y = ax^2 + bx + c \tag{37}$$

Transport

Mit dem Programm Holzernteproduktivitätsmodelle der WSL „HeProMo“ konnten Zeitverbräuche für die Schlepper und die Seilkräne berechnet werden.

Das Vorrücken mit dem Pferd und der Winde kann durch das Programm nicht abgebildet werden. Für die Zeitverbräuche des Pferdes werden daher die Daten der Arbeit von Wirth & Wolff (2008) verwendet. Da das Vorrücken mit der selbstfahrenden Winde hauptsächlich Seilarbeit ist, werden Zeitverbräuche wie beim Schleppervorrücken unterstellt.

HeProMo bezieht die Zeitverbräuche für das Rücken mit dem Forwarder nicht auf das Stückvolumen. Daher werden für diese Verfahrensstufen die Produktivitäten in Abhängigkeit von dem mittleren Brusthöhendurchmesser (BHD) des ausscheidenden Bestandes dargestellt.

Seilwinde, Pferd und Schlepper: HeProMo kategorisiert die mittlere Vorrückedistanz in vier Stufen – bis 20 m, 20 m bis 30 m, 30 m bis 40 m, 40 m – und die mittlere Rückeentfernung in drei Stufen – bis 200 m, 200 m bis 400 m, 400 m.

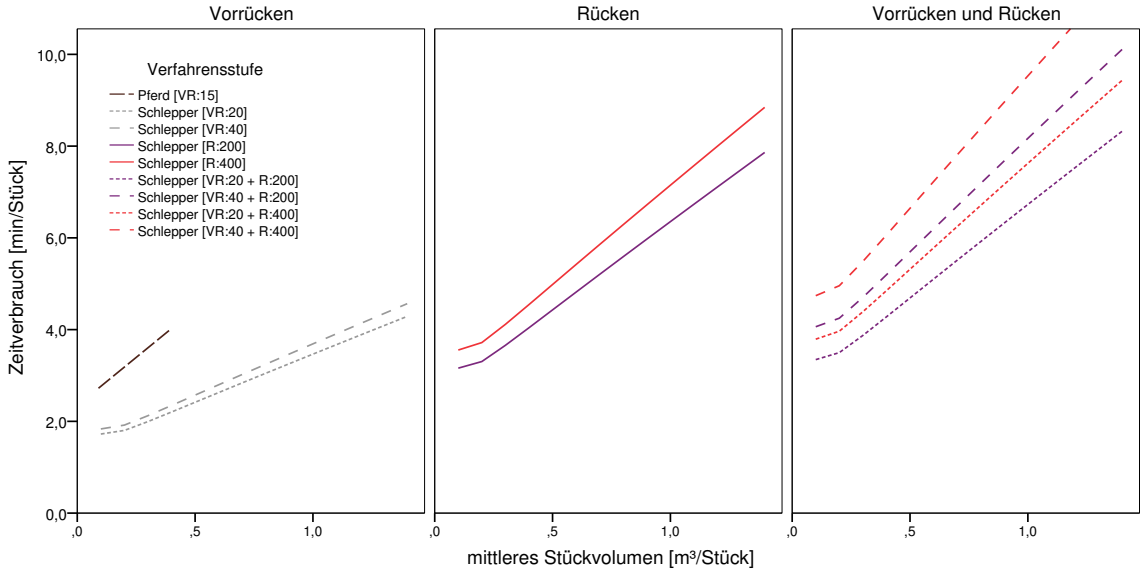


Abb. 24: *Zeitverbräuche der Verfahrensstufen des Holztransportes mit Pferd und Schlepper*

Die Abbildung 24 veranschaulicht die Zusammenhänge grafisch. Für das Vorrücken mittels Schlepper sind die mittleren Distanzen „bis 20 m“ und „über 40 m“ dargestellt. Der Schlepper ist dem Pferd (mittlere Vorrückedistanz 15 m) deutlich überlegen. Hinzu kommt, dass letzteres nur bis zu einem gewissen Stückvolumen eingesetzt werden kann. Eine Erhöhung der Vorrückedistanz beim Schlepper von mehr als 100% zieht demnach einen Anstieg des Zeitverbrauches von ungefähr 6% nach sich. Der mittlere Teil der Grafik zeigt die Zeitverbräuche des Rückens bei mittleren Rückeentfernungen der Kategorien „bis 200 m“ und „200 m bis 400 m“. Die dargestellte Vergrößerung der mittleren Rückeentfernung bewirkt eine Zunahme des Zeitverbrauchs um ca. 12%. Der rechte Teil der Abbildung 24 zeigt die Kombinationen der vorgenannten Ergebnisse.

Die Tabelle 25 des Anhangs zeigt die Regressions- und Korellationskoeffizienten für das Pferd und den Schlepper. In beiden Fällen wurde eine einfache lineare Regression durchgeführt, da die Gerade die generierten Werte besser beschreibt

als die quadratische Funktion. Die Formel entspricht demnach der Form

$$y = mx + n. \tag{38}$$

Forwarder: Wie bereits beschrieben, ist es nicht möglich, mittels HeProMo den Zeitverbrauch eines Forwarders in Abhängigkeit vom Stückvolumen darzustellen. Daher erfolgt die direkte Ermittlung der Produktivität in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes getrennt nach verschiedenen mittleren Rückedistanzen, Gassenabstand und Forwarderklassen. HeProMo kennt im Grunde nur zwei Größenklassen, kleine und mittlere Maschinen. Das Programm lässt aber eine Veränderung des Ladequerschnittes (im Bezug auf den Rungenkorb) zu. Für kleine Forwarder sind dort standardmäßig 3,3 m², für große 4,1 m² eingestellt. Durch Anhebung dieses Wertes auf 4,9 m² soll zusätzlich eine große Maschine simuliert werden. Dieses Vorgehen lehnt sich an die Arbeit von Stitz (2012) an. Des Weiteren führt HeProMo keine Werte für Rückezüge an. Für diese Maschinen werden in der Arbeit die Produktivitäten kleiner Forwarder angenommen.

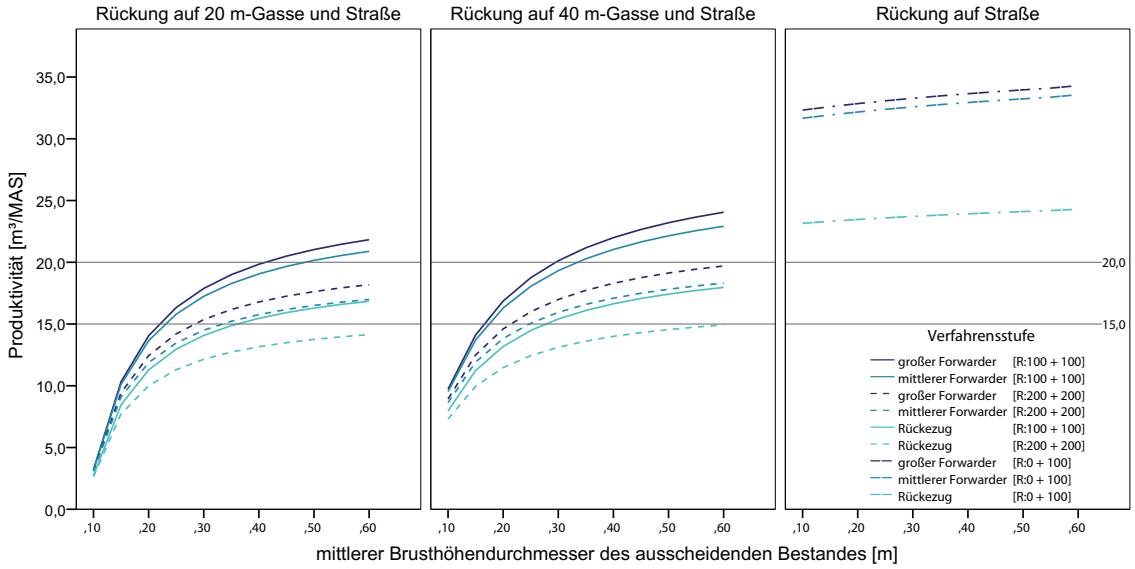


Abb. 25: *Produktivität beim Holztransport mit dem Forwarder*

Grundsätzlich können im Programm Rückeentfernungen frei gewählt werden. Das Modell unterscheidet Rückestrecken, die auf der Rückegasse entstanden sind, von solchen, die auf die Waldstraße entfallen. Es wurden mittlere Rückeentfernungen von 200 m und 400 m unterschieden. Die Rückeentfernungen sollten je zur Hälfte auf der Rückegasse und auf der Waldstraße anfallen. Außerdem erfasst das Programm die Länge der Erschließung (auch hier getrennt nach Rückegassen und Waldstraßen), an der das Holz einseitig beziehungsweise zweiseitig liegt. Über

diese Größe wurde ein 20 m- von einem 40 m-Gassensystem unterschieden. Daneben wurde auch die Rückung betrachtet, die nur einen Teil des Rückens berücksichtigt. Dies kommt zum Beispiel dann vor, wenn das mittels Seilkran gerückte Holz in einer weiteren Verfahrensstufe durch den Forwarder zum eigentlichen Polter gefahren wird. Hierbei fährt der Forwarder nur auf der Waldstraße.

Die Abbildung 25 veranschaulicht die Ergebnisse grafisch. Wie erwartet nimmt die Produktivität mit der Maschinengröße zu und mit steigender Rückeentfernung ab. Außerdem liegen die Produktivitäten bei dem Rückegassenabstand von 40 m etwas höher als bei einem Abstand von 20 m, was auf die Anzahl und Größe der Rauhbeugen zurückgeführt werden kann. Der Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes hat einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität des Forwarders im normalen Betrieb. Die „Rückung nur auf der Straße“ weist höhere Produktivitäten auf. Der Einfluss des mittleren Brusthöhendurchmessers ist hier geringer als bei der Rückung auf Gasse und Straße. Tabelle 26 im Anhang zeigt die Regressions- und Korrelationskoeffizienten.

Seilkran: Auch für die Seilkrananlagen wurden Zeitverbräuche in Abhängigkeit bestimmter Einflussfaktoren ermittelt. Neben dem mittleren Stückvolumen wurde auch die durchschnittliche Vorrückedistanz und die mittlere Rückeentfernung variiert. Neben einer mittleren Vorrückung von 10 m und 20 m wurde auch der Fall unterschieden, bei dem keine Vorrückung notwendig ist. Dies kommt dann vor, wenn die vorangegangene Verfahrensstufe dies übernommen hat, zum Beispiel bei der maschinellen Fertigung mit Harvestern.

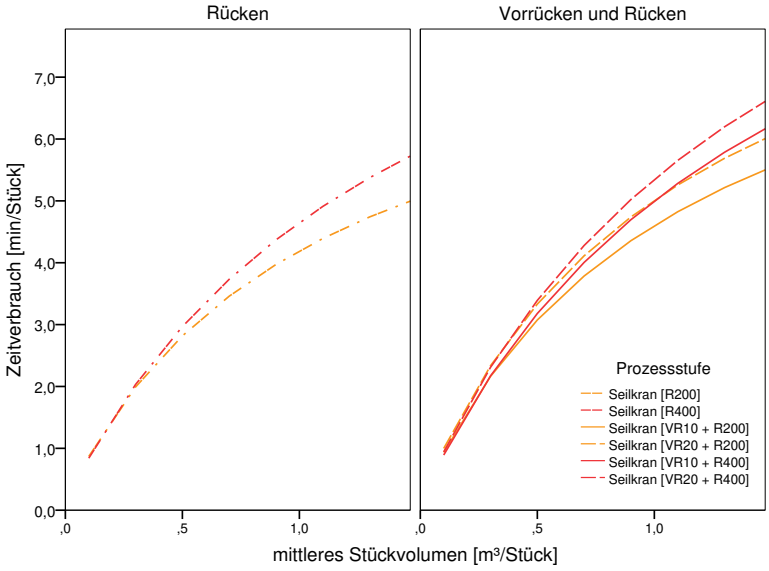


Abb. 26: *Zeitverbräuche beim Holztransport mit dem Seilkran*

Die Abbildung 26 zeigt die verschiedenen Simulationen der Zeitverbräuche in Abhängigkeit von dem mittleren Stückvolumen[16]. Der bekannte Einfluss der Vorrücke- und Rückeentfernung findet sich auch hier wieder.

4.2 Ergebnisse der Bodenertragswertmaximierung

4.2.1 Optimale Holzernteverfahren

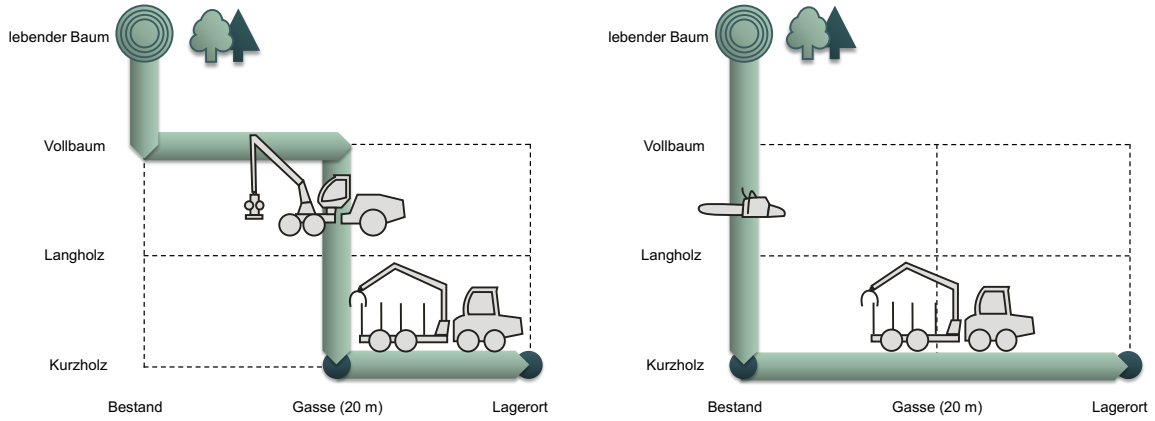
Angewandte Verfahren in den befahrbaren Lagen des Sächs. Staatswaldes
Die sächsische Befahrungsrichtlinie[17] unterteilt die Böden anhand der Verdichtungsempfindlichkeit der Substrate in sensiblere (S2) und weniger sensible (S1) Standorte. Diese Unterteilung legt den zur Anwendung kommenden Rückegassenabstand fest.

S1-Standorte (20 m-Gassenabstand): Auf den weniger sensiblen Standorten (S1) kommen laut Fragebogenauswertung folgende Verfahren zur Anwendung:

In sechs von neun befragten Forstbezirken werden auf S1-Standorten 20 m-Gassensysteme verwendet. Die verbliebenen drei Betriebe arbeiten auch auf S1-Standorte ausschließlich mit 40 m-Gassensystemen. Von den sechs Forstbezirken mit 20 m-Gassensystem wird in zwei Fällen bei der Endnutzung dann auf das 40 m-Gassensystem gewechselt, indem jede zweite Gasse ausgelassen wird. An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass die Praktiker freiwillig einen weiteren Gassenabstand wählen und die vermutlich höheren Holzerntekosten in Kauf nehmen. Nach Faber (2007) kann dies als freiwillige Selbstbeschränkung bezeichnet werden.

Für das 20 m-Gassensystem kommen laut der Fragebogenauswertung folgende zwei Standardverfahren zur Anwendung: Die Abbildung 27 (a) zeigt das vollmechanisierte Kurzholzverfahren mit Harvester und Forwarder. Nach Aussagen der Forstbezirke ist dieses Verfahren das Standardverfahren auf S1-Standorten. Es besteht aus zwei Verfahrensstufen: der maschinellen Fertigung mit dem Harvester und der maschinellen Rückung mit dem Forwarder. Bei Endnutzungen oder über bereits vorhandener Verjüngung beziehungsweise über Voranbauten wird das hochmechanisierte Kurzholzverfahren – wie in Abbildung 27 (b) dargestellt – verwendet. Hier fertigt allein der Waldarbeiter mit seiner Motorsäge; Vorrückung und Rückung übernimmt der Forwarder[18].

[16] Den Überblick über die Regressionen zeigt die Tabelle 27 im Anhang.
[17] siehe Sachsenforst (2006)
[18] Im sächsischen Landeswald kommen in diesem Verfahren vor allem die reviereigenen Waldarbeiter zum Einsatz. Die Rückung wird dabei oft als Unternehmerleistung organisiert.



(a) vollmech. Kurzholzverfahren (b) hochmech. Kurzholzverfahren

Abb. 27: *Standardverfahren auf S1-Standorten*

In beiden genannten 20 m-Verfahren kommt es regelmäßig zum Einsatz von Bogiebändern. In allen Forstbezirken sind die Bänder Teil der Leistungsbeschreibung und müssen generell beim Einsatz von Radmaschinen vorgehalten werden.

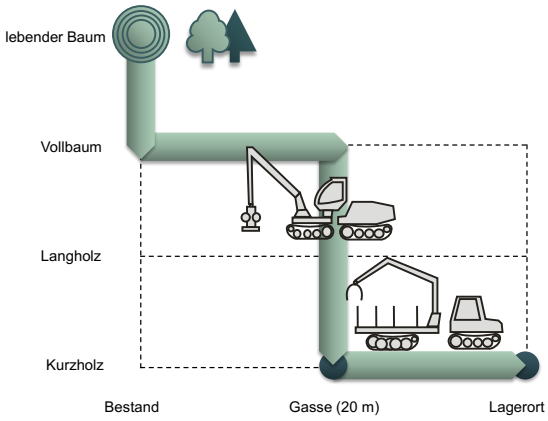


Abb. 28: *vollmechanisiertes Kurzholzverfahren mit leichtem Raupen-Harvester und Raupen-Forwarder*

Zwei der Befragten nannten außerdem die Verfahrensvariante, die in Abbildung 28 dargestellt ist. Es ist ebenfalls ein vollmechanisiertes Kurzholzverfahren. An Stelle der Radmaschinen werden in diesem Verfahren leichte Maschinen mit Raupenfahrwerken eingesetzt. Im Forstbezirk Neudorf konnten sowohl die Maschinen (Abbildung 67 im Anhang) als auch die Rückegassen nach der Rückung besichtigt werden. Die kleinen Holzerntemaschinen des Herstellers Farmi entsprechen der Harvesterklasse H1 und der Forwarderklasse F1.

S2-Standorte (40 m-Gassenabstand): Die Holzernte auf 40 m-Feinerschließungssystemen erfordert außerhalb der Kranzone immer ein motormanuelles Fällen, das sogenannte Zufällen. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen hochmechanisierte Verfahren, wie sie in allen befragten Forstbezirken zur Anwendung kommen, teilweise auch auf technologisch weniger sensiblen Standorten (S1). In der Praxis können unterschiedliche Reihenfolgen von Zufällen und Aufarbeiten beobachtet werden. In jungen, dichten Beständen mit hoher Stammzahl kommen grundsätzlich zwei Harvestergänge zum Einsatz. Nachdem der Harvester im ersten Durchlauf die Kranzone bearbeitet hat, wird der restliche ausscheidende Bestand zugefällt und dann vom Harvester aufgearbeitet. In älteren Beständen kommt nur ein Harvestergang zur Anwendung, nachdem zugefällt wurde. In Beständen mit dichtem Unterstand (Waldumbau- oder Endnutzungs-Bestände) agieren Zufäller und Harvestersystem gemeinsam auf der Fläche.

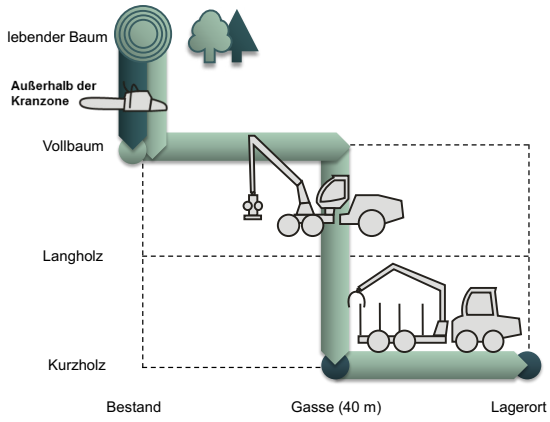
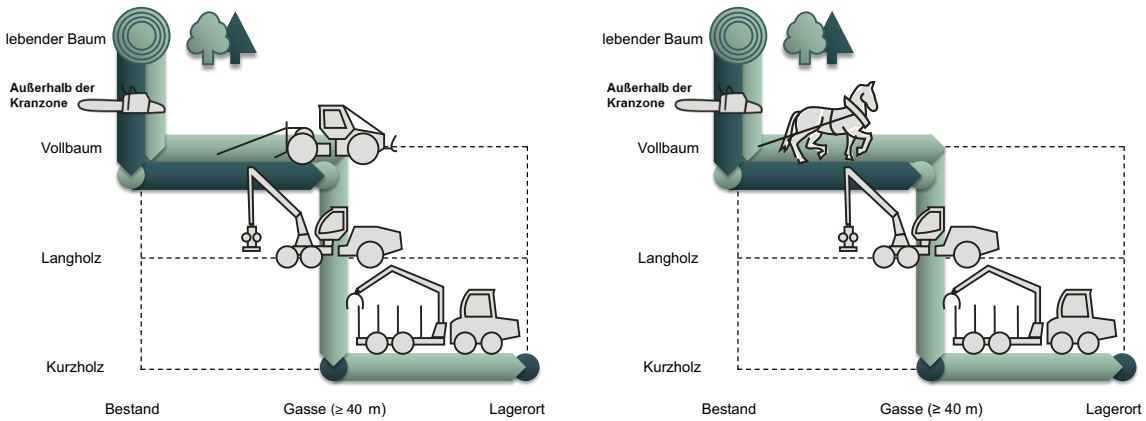


Abb. 29: *hochmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Zufällung, Harvester und Forwarder*



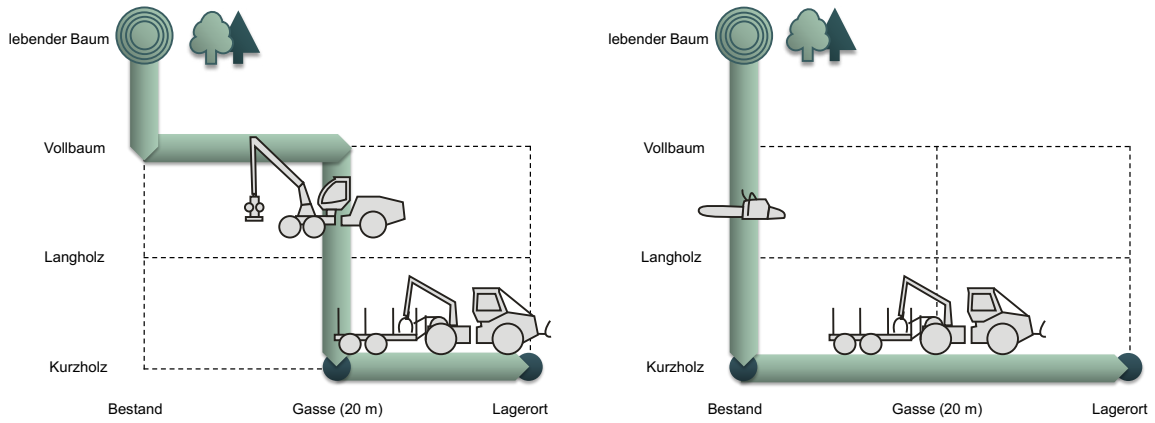
(a) tlw. maschinelle Vorrückung (b) tlw. tierische Vorrückung

Abb. 30: *hochmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Zufällung und tlw. Vorrückung*

Oft ist es aufgrund der geringen Baumhöhen notwendig, zumindest einen Teil der zugefällten Bäume, die vom Kran des Harvesters nicht erreichbar sind, in der Regel dünnörtig[19] vorzurücken. Die Abbildung 30 zeigt Verfahren mit dieser vierten Verfahrensstufe – dem maschinellen beziehungsweise tierischen Vorrücken.

Für die Optimierung verwendete Holzernteverfahren

20m Gassenabstand – Kurzholz: Die Voruntersuchung zeigt, dass hier drei Verfahren zur Anwendung kommen (Abbildungen 27 und 28). Darüber hinaus sind auch Varianten denkbar, bei denen Kurzholzrückezüge zum Einsatz kommen (Abbildung 31).



(a) vollm. m. Rückezug (b) hochm. m. Rückezug

Abb. 31: 20 m-*Gassenabstand: Kurzholzverfahren mit Rückezug*

Es stehen also fünf verschiedene Verfahren zur Verfügung, für die Holzerntekosten zu ermitteln sind. Alle Verfahren bestehen aus je zwei Verfahrensstufen. Da die leistungsbezogenen Holzerntekosten abhängig vom Stückvolumen beziehungsweise vom mittleren Brusthöhendurchmesser des ausscheidenen Bestandes sind, wird das Problem grafisch gelöst. Da es sich bei allen Verfahren um voneinander gelöste Verfahrensstufen handelt, werden die Systemkosten jeder Verfahrensstufe durch deren Produktivität geteilt.

[19] Die Maschinenstation Königstein wählt hierbei ein besonderes Vorgehen: die Bäume werden dickörtig vorgerückt.

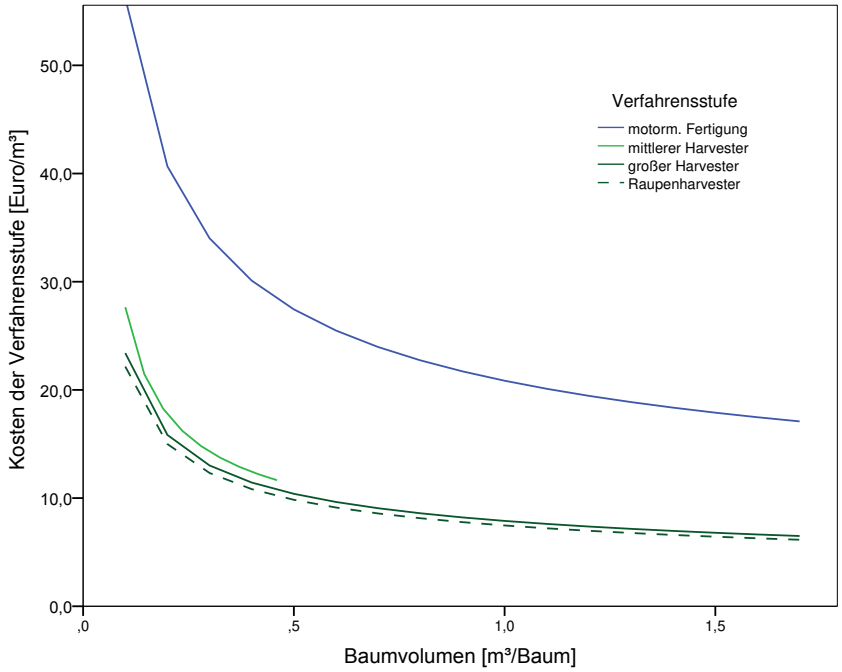


Abb. 32: *Kosten der Fertigungs-Verfahrensstufen für* 20 m*-Gassenabstände*

Die Abbildung 32 zeigt die Kosten der vier zur Verfügung stehenden Systeme zur Fertigung des Rohholzes auf Rückegassen mit einem Abstand von 20 m. Deutlich zu erkennen ist, dass der Einsatz eines großen Radharvesters der Kategorie H3 im Vergleich zu H1 und H2 die wenigsten Kosten verursacht. Limitiert wird dieses System nur durch die Dimension des Baumes. Übersteigt der Baum einen Fälldurchmesser von 65 cm bis 70 cm, kommen Radmaschinen an ihre Systemgrenze, sodass in diesem Bereich der Raupenharvester sein Optimum hat. Nach Thieme (1999) liegt deren maximaler Fälldurchmesser bei 80 cm.

Die Kosten des Raupenharvesters liegen hier stets unter denen der großen Radharvester. Dies ist auf die geringeren Anschaffungskosten zurückzuführen. Da in der sächsischen Praxis jedoch überwiegend Radmaschinen beobachtet werden und der Einsatz von Harvestern mit Kettenfahrwerken auf ebenen oder schwach geneigten, terrestrischen beziehungsweise wechselfeuchten Standorten die Ausnahme darstellt, wird generell mit der Kategorie H3 weiter gerechnet.

Die Verfahrensstufen für das Rücken des Holzes sind in Abbildung 33 für zwei verschiedene mittlere Rückeentfernungen dargestellt. Sowohl bei 200 m als auch bei 400 m ist der Einsatz großer Radforwarder (F3) aus rein ökonomischer Sicht am besten. Das Verhältnis aus ähnlichen Systemkosten (im Vergleich zu den Forwarderklassen F2 und F3) zu geringerer Produktivität führt zu höheren Kosten der Verfahrensstufe „Rückezug“.

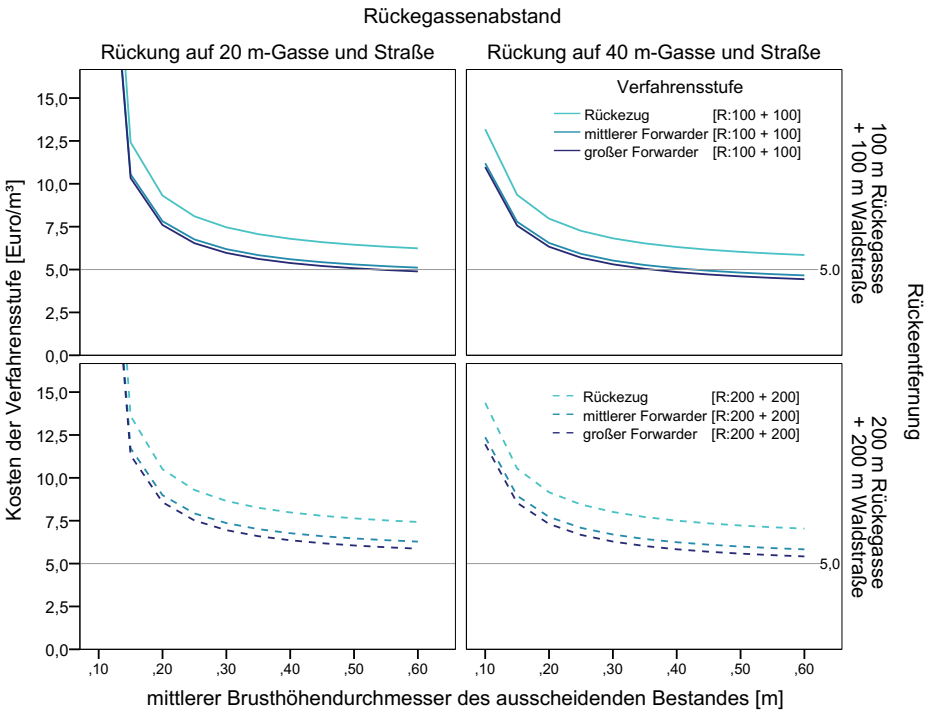
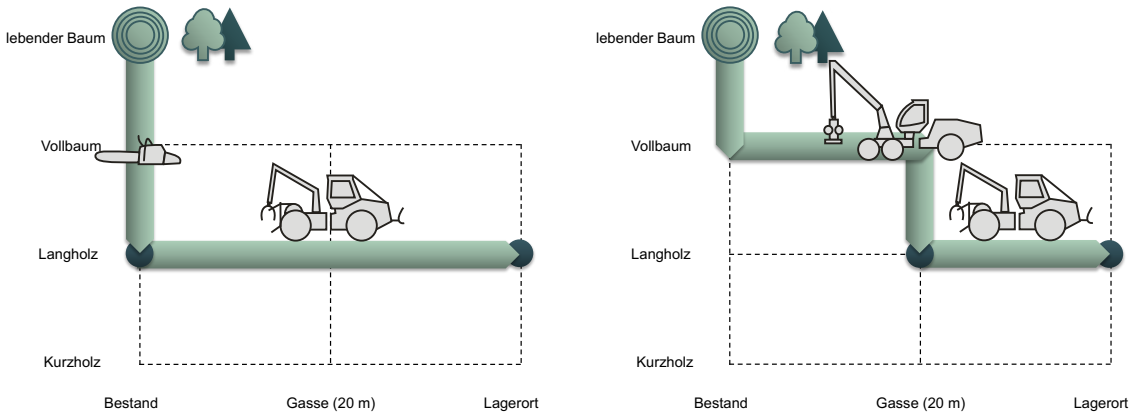


Abb. 33: *Systemkosten der Forwarder-Verfahrensstufen für* 20 m*-Gassenabstände*

Werden beide Aussagen miteinander in Verbindung gebracht, wird klar, dass das hochmechanisierte Kurzholzverfahren mit Harvester und Forwarder (S. 90, Abbildung 27 (a)) das Standardverfahren auf der 20 m-Erschließung in Kombination mit der Produktion von Kurzholzsortimenten ist, da es sowohl bei der Fertigung als auch beim Transport des Holzes die geringsten Kosten verursacht.

20 m Gassenabstand – Langholz: Für die Produktion von Langholz-Sortimenten stehen prinzipiell die gleichen Fertigungs-Verfahrensstufen zur Verfügung. Auf Grund der Länge der Sortimente scheidet eine tragende Rückung aus. Folglich kommen nur Schlepper zur Anwendung.

Die Abbildung 34 zeigt zwei mögliche Langholz-Verfahren zur Anwendung bei Gassenabständen von 20 m. Das Verfahren (a) stellt ein hochmechanisiertes Langholzverfahren dar. Die Langholzsortimente werden motormanuell im Bestand gefertigt, vom Schlepper vorgerückt und schließlich gerückt. Das Verfahren (b) ist ein vollmechanisiertes Langholzverfahren. Hier übernimmt der Radharvester beziehungsweise der Raupenharvester das Fertigen sowie das Vorrücken des Holzes. Im Anschluss daran wird das Holz durch den Schlepper zum Lagerort gerückt. Dargestellt ist der Einsatz von Kranschleppern zur Rückung des Holzes. Ebenso ist in jedem Verfahren der Abbildung 34 die Verwendung einfacher und kostenextensiver Seilschlepper denkbar.



(a) hochm. Langholzverfahren (b) vollm. Langholzverfahren

Abb. 34: 20 m-*Gassenabstand: Langholzverfahren mit Kranschlepper*

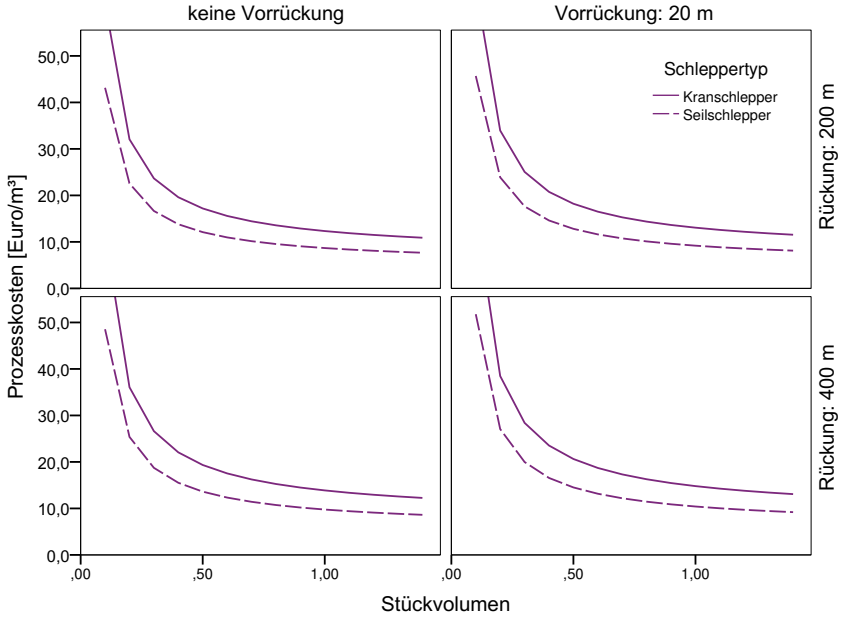


Abb. 35: *Systemkosten der Schlepper-Verfahrensstufen für* 20 m-*Gassenabstände*

Unter der Annahme, dass es zwischen den Maschinenkategorien Seilschlepper und Kranschlepper keine Produktivitätsunterschiede gibt, ist der Schluss zulässig, dass die Seilschlepper auf Grund der geringeren Systemkosten die geringsten Kosten der Verfahrensstufen verursachen. Stutz (2004) fand in seiner Untersuchung heraus, dass der Kran Vorteile beim Manipulieren und Ablegen der Langholzsortimente aufweist. Er konnte eine Produktivitätssteigerung von 10% nachweisen. Vor

dem Hintergrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Anschaffungskosten wäre jedoch eine Steigerung der Produktivität von mehr als 42% notwendig, damit der Kranschlepper preiswerter würde als der Seilschlepper. Die Abbildung 35 zeigt die Kosten der Verfahrensstufe in Abhängigkeit der mittleren Vorrücke- und Rückedistanz ohne Berücksichtigung einer Steigerung der Produktivität durch den Kran.

Wie oben bereits ausführlich dargelegt wurde, unterliegt der Waldarbeiter mit der Motorsäge dem Vergleich mit dem Mensch-Maschine-System Harvester sehr deutlich. Daraus kann auch für die Produktion von Langholz geschlussfolgert werden, dass der Einsatz von Fertigungsmaschinen weniger Kosten verursacht. Außerdem entfällt dadurch das Vorrücken durch die Schlepper, was zu einer Steigerung der Produktivität und dadurch zum Sinken der Kosten führt. Da das Rücken mit dem Kranschlepper ca. 42% teurer ist, sollen generell Seilschlepper zum Einsatz kommen. Als Standardverfahren für die Produktion von Langholz auf einer Erschließung mit Rückegassen in Abständen von 20 m soll das vollmechanisierte Langholzverfahren mit Harvester und Seilschlepper dienen.

40 m Gassenabstand – Kurzholz: Die Abbildung 37 zeigt, dass bei Erschließungssystemen, deren Rückegassenabstand über die doppelte Kranlänge hinausgeht, nicht mehr jeder Baum durch den Kran des Harvester erreichbar ist. In diesem Fall wird mindestens eine weitere Verfahrensstufe notwendig: die Zufällung. Wenn die Bäume nicht lang genug sind, sodass der Harvester sie nicht greifen kann, kommt noch eine weitere Verfahrensstufe hinzu, die nur das Vorrücken übernimmt. Für die vorliegende Arbeit soll gelten, dass bis zu einem Gassenabstand von 40m generell nur das Zufällen notwendig ist.[20]

Die Abbildung 36 (a) und (b) zeigt die hochmechanisierten Kurzholzverfahren, bei denen ein Teil der Bäume motormanuell zugefällt wird.

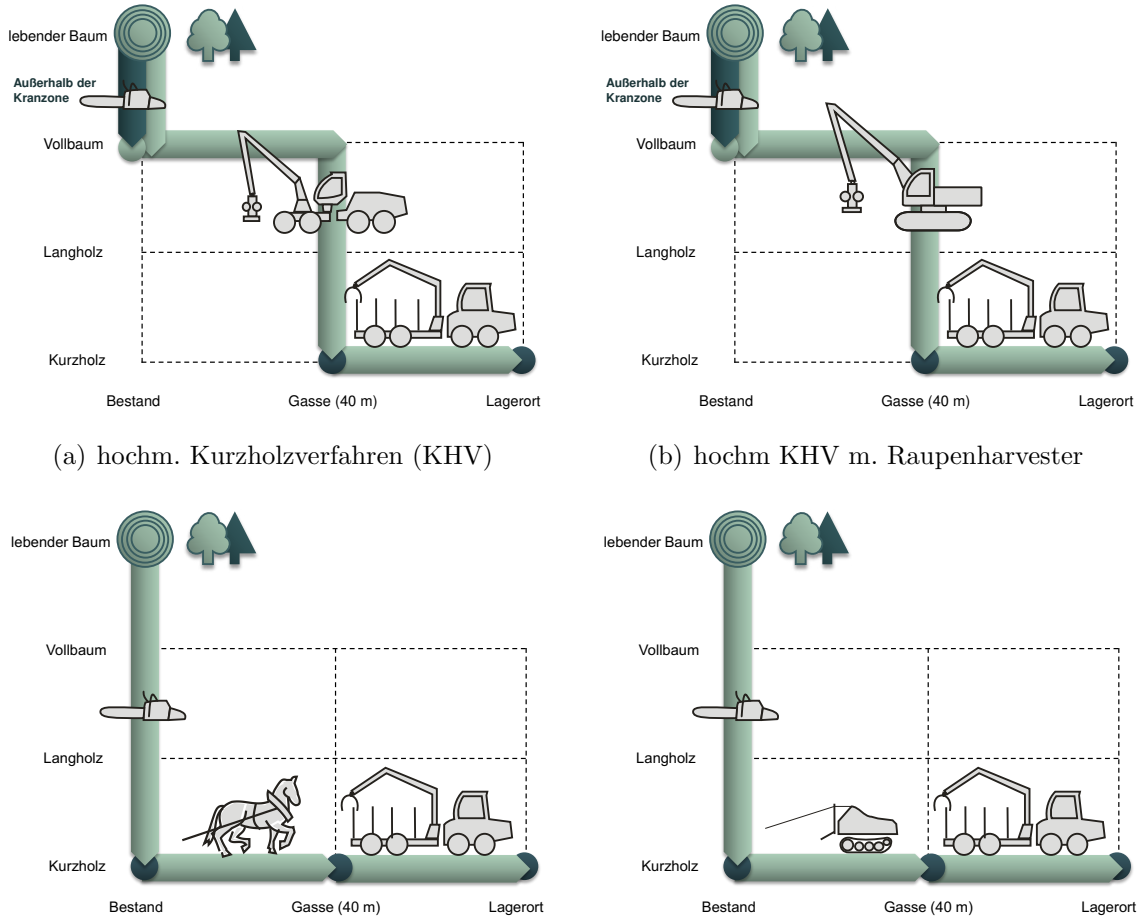
Wie in der Abbildung 37 zu sehen ist, teilt die Kranlänge den Bestandesblock (Gassenzwischenbereich) in zwei Bereiche.

$$A = A_{Kranzone} + A_{Zwischenzone} \tag{39}$$

Der grüne Bereich ist im Gegensatz zum roten vom Kran erreichbar. Die Formel 40 zeigt, wie der Anteil der Zwischenzone, indem zugefällt beziehungsweise vorgerückt werden muss, an der Hiebsfläche berechnet werden kann:

$$A\%_{Zwischenzone} = \frac{Gassenabstand - 2 \cdot Kranreichweite}{Gassenabstand - Gassenbreite} \cdot 100 \tag{40}$$

[20] Dem Autor ist natürlich bewusst, dass in jungen dichten Nadelholzbeständen sowie im Laubholz auf das Vorrücken nicht verzichtet werden kann. Trotzdem soll die vorgenommene Annahme der Klarheit und Verständlichkeit des Modells dienen. Die Folgen dieser Vereinfachung werden in der Methodendiskussion bewertet.



(a) hochm. Kurzholzverfahren (KHV)

(b) hochm KHV m. Raupenharvester

(c) teilm. Kurzholzverfahren m. Pferd

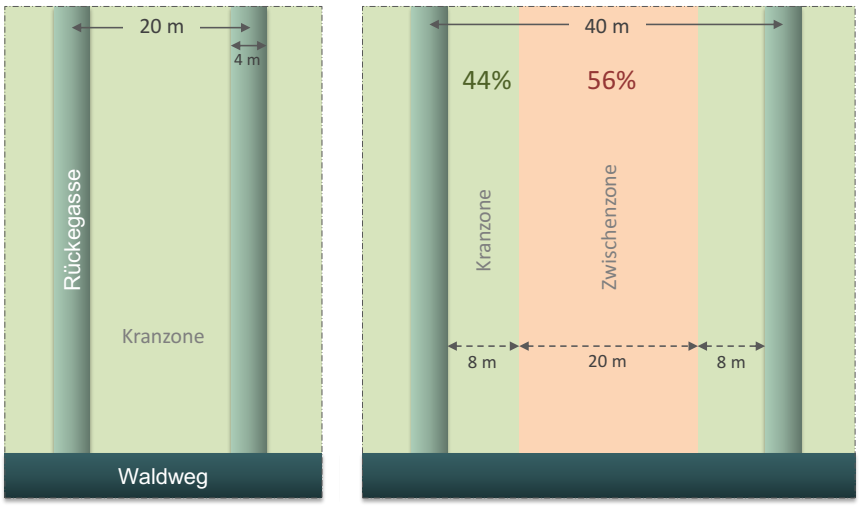
(d) hochm. KHV m. selbstfahr. Winde

Abb. 36: 40 m-*Gassenabstand: Kurzholzverfahren*

Demzufolge entspricht bei einem 40m-Gassensystem der „Zufällbereich“ einem Flächenanteil von ca. 56%.[21] Dieses exemplarische Beispiel verdeutlicht, dass der Rückegassenabstand die Holzernte und somit die Kosten beeinflusst.

Für die Kalkulation der Holzerntekosten muss über den Flächenanteil die Menge des Holzes bestimmt werden, die mittels einer zusätzlichen Verfahrensstufe gefällt und vorgerückt werden muss. Bei sehr starkem Nadelholz gibt es eine Anzahl von Bäumen in der Kranzone, die aufgrund ihrer Dimension nicht vom Harvester

[21] Es existiert eine Ausnahme: Wenn während einer Bestandesgeneration ausgehend von einem 20 m-Gassensystem in ein 40 m-System übergegangen wird, bleibt in aller Regel jede zweite Gasse frei. Auf diesen stehen selbstverständlich keine Bäume, sodass der Zufällbereich beziehungsweise -anteil entsprechend kleiner ist. Die Formel 40 ändert sich im Zähler auf der Seite des Substrahenden, indem dieser nicht mehr nur aus der doppelten Kranreichweite, sondern aus der Summe der doppelten Kranreichweite und der einfachen mittleren Gassenbreite besteht.



(a) 20 m (b) 40 m

Abb. 37: *Kran- und Zwischenzonenverteilung bei unterschiedlichen Gassenabständen*

gefällt werden können. Pausch & Heindl (2007) konnten einen Zusammenhang zwischen der Zufällwahrscheinlichkeit eines Baumes und dessen BHD sowie der Entfernung von der Gassenmitte feststellen. Bei sehr starken Nadelholz kann unter Zuhilfenahme dieser Ergebnisse berechnet werden, wieviele Bäume aufgrund ihres Durchmesser innerhalb der Kranzone zugefällt werden müssen.[22]

Die Verfahren (c) und (d) der Abbildung 36 benötigen auf Grund der motormanuellen Fertigung kein Zufällen.

Die motormanuelle Fertigung kostet auch bei 40 m-Gassenabständen bedeutend mehr als das Zusammenspiel von motormanueller Zufällung mit maschineller Aufarbeitung (in der Zufällzone; unterstellt wurden 56% der Bäume) und der maschinellen Fertigung (in der Kranzone). Die Abhängigkeit dieser Fertigungskosten von Baumvolumen verdeutlicht die Abbildung 38.

Die Abbildung 39 zeigt die Kosten der Verfahrensstufen des Vorrückens. Die selbstfahrende Seilwinde verursacht hier die geringsten Kosten.

Das hochmechanisierte Kurzholzverfahren (mit Rad- oder Raupenharvester) verursacht die geringsten Verfahrenskosten, da die Fertigung preiswerter ist und keine zusätzliche Verfahrensstufe für das Vorrücken notwendig ist.

[22] Die genannte Erhebung wurde für das Königsbronner Harvester-Verfahren (Kieser & Teuffel 2002) durchgeführt.

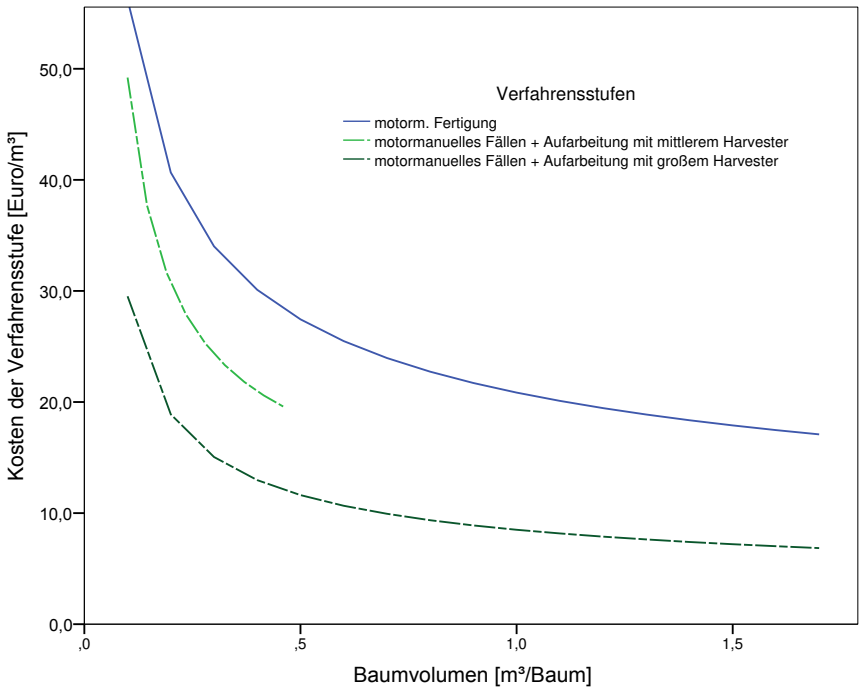


Abb. 38: *Kosten der Fertigungs-Verfahrensstufen für* 40 m*-Gassenabstände*

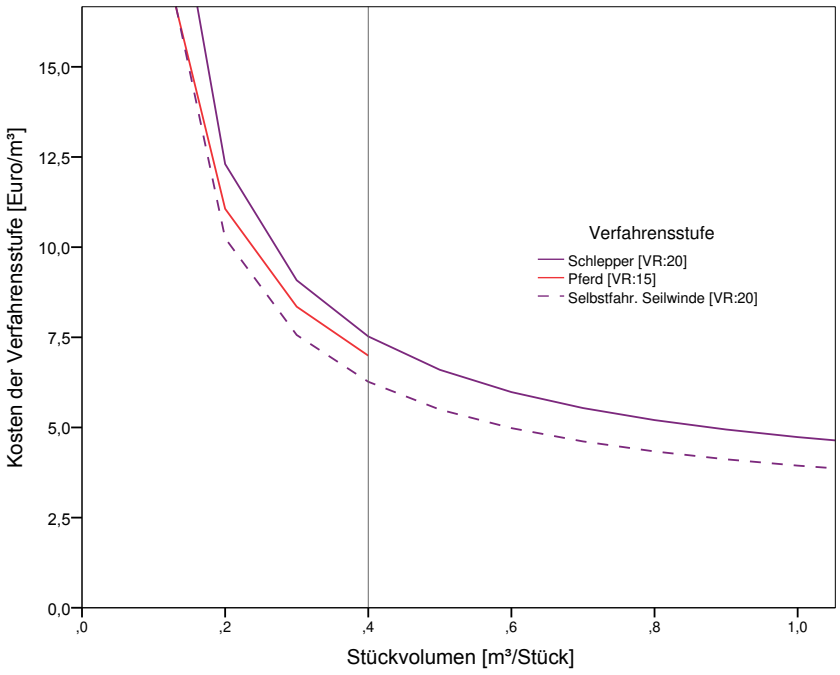
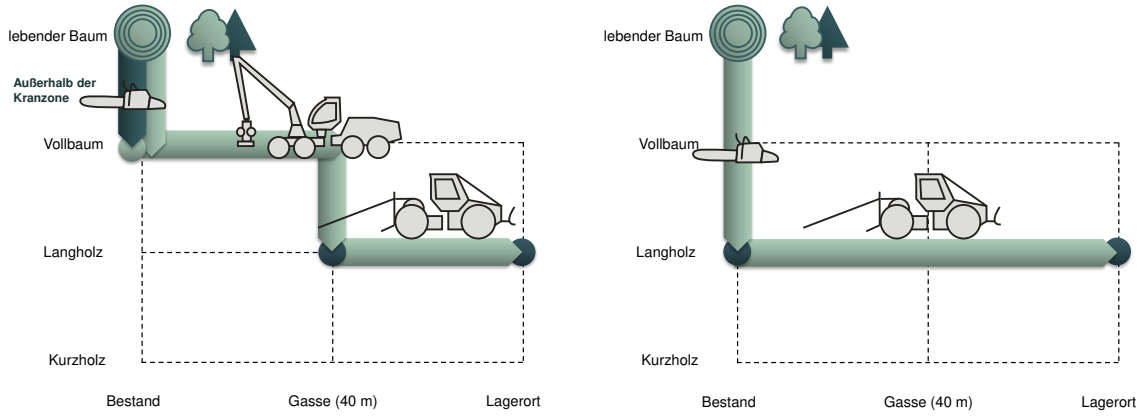


Abb. 39: *Kosten der Verfahrensstufen „Vorrücken“*

40 m Gassenabstand – Langholz: Für die Produktion von Langholzsortimenten stehen grundsätzlich zwei Verfahren zu Verfügung. Die Abbildung 40 zeigt zwei hochmechanisierte Verfahren.



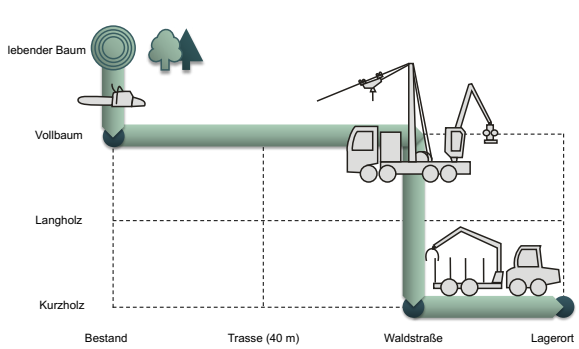
(a) hochm. Langholzverfahren (b) hochmechanisiertes Langholzverfahren

Abb. 40: 40 m-*Gassenabstand: Langholzholzverfahren*

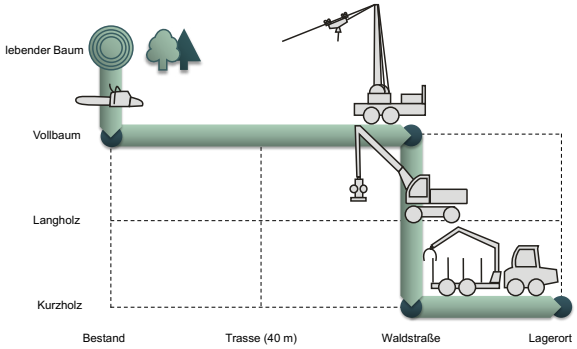
Aus den vorangegangenen Erläuterungen geht der deutliche Kostenunterschied zwischen der Fertigung mit Harvester und einer motormanuellen Fertigung hervor. Beim hochmechanisierten Langholzverfahren mit vollständiger motormanueller Fertigung schlägt die Rückung teurer zu Buche, da der Schlepper zusätzlich das Vorrücken übernimmt.

gassenunabhängig – Kurzholz: Beim Einsatz von Seilkrananlagen wird die Fläche, wenn die Fällung (im Vollbaumverfahren) beziehungsweise Fällung, Entastung und Sortimentierung (im Kurzholzverfahren) im Bestand mittels Motorsäge erfolgt, nicht befahren. Trotzdem muss eine Erschließung für das Seil erfolgen. Die Anlage der sogenannten Seiltrassen kann in unterschiedlichen Abständen erfolgen. Die Abbildung 41 zeigt drei Seilkranverfahren zur Produktion von Kurzholz[23]. Im hochmechanisierten Vollbaumverfahren (a) kann auch ein Anhänger-Seilkran in Verbindung mit einem Prozessor zur Anwendung kommen (b). Da die Summe der Systemkosten dieser Maschinen (261,68 Euro/MAS_{15}) größer ist als die Systemkosten des „Gebirgsharvesters“ (227,77 Euro/MAS_{15}) und gleicher Zeitverbrauch unterstellt wird, scheidet die Kombination (b) aus.

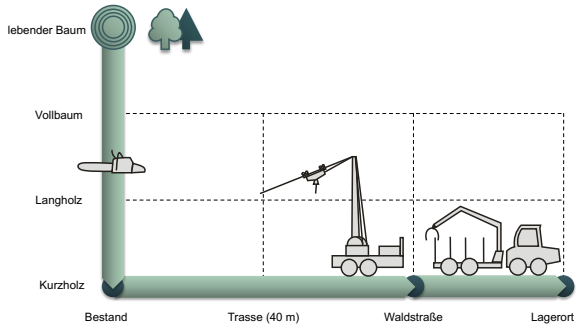
[23] Weitere Seilkransysteme standen zwar zur Verfügung, kamen aber aus unterschiedlichen Gründen nicht in Betracht (siehe Seite 83).



(a) hochm. VollbaumV mit Gebirgsharvester



(b) hochmechanisiertes Vollbaumverfahren



(c) hochmechanisiertes Kurzholzverfahren

Abb. 41: *gassenunabhängige Kurzholzernteverfahren*

Die Abbildung 41 (c) zeigt ein hochmechanisiertes Kurzholzverfahren mit motormanueller Fertigung sowie Transport mittels Kippmastseilgerät als Anhänge-Variante. Die Grafik der Abbildung 42 zeigt die Kosten der Verfahren (a) und (c). Da in allen drei Verfahren der Forwarder als zweites Rückemittel (für das sogenannte „Fertigrücken"; dies bezeichnet den weiteren Transport vom Endmast der Seilkrananlage bis zum Lagerplatz des Holzes) zum Einsatz kommt, wurden die Kosten dieser Verfahrensstufe in der Abbildung 42 nicht berücksichtigt. Da im Verfahren (c) Kurzholz anstatt ganzer Bäume gerückt wird, muss mittels des Stück/Baum-Faktors Skalengleichheit hergestellt werden. Der Kostenvorteil des Verfahrens (a) ist schon bei einem vergleichsweise geringen Stück-Baum-Faktor deutlich erkennbar.

gassenunabhängig – Langholz: Ähnliche Verfahren stehen für die Produktion von Langholz zur Verfügung (Abbildung 43). Die Langholzsortimente können entweder direkt im Bestand oder nach dem Transport als Vollbaum auf der Waldstraße aufgearbeitet werden. Die oben geschilderten Unterschiede in Bezug auf die Fertigungskosten (siehe Abbildung 42) und die Produktivitätsunterschiede gelten auch hier, was dazu führt, dass das Verfahren (a) die wenigsten Kosten verursacht.

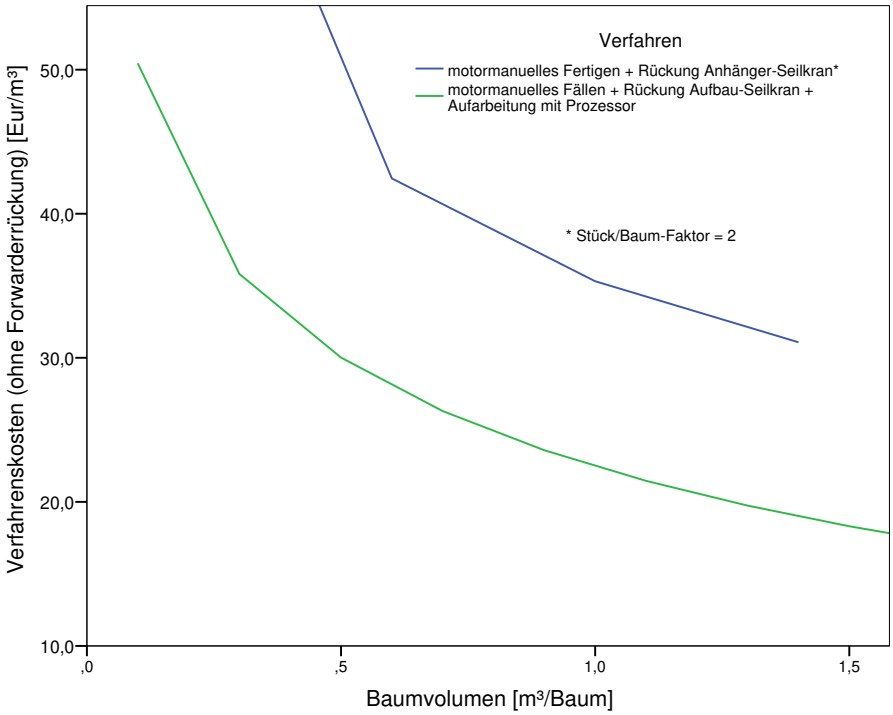
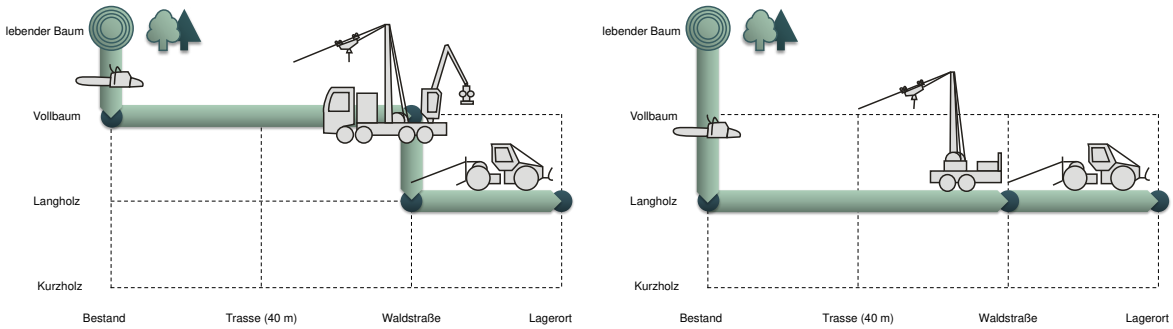


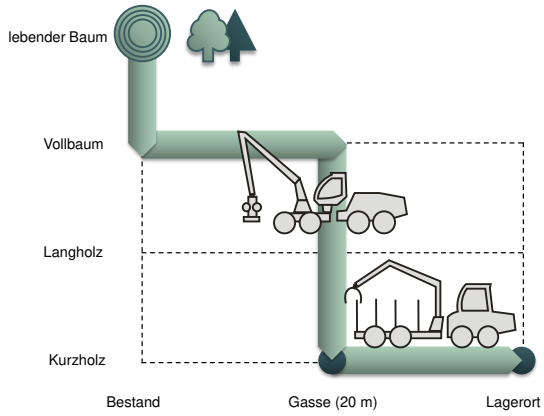
Abb. 42: *Kosten der Fertigungsverfahrensstufen bei den Seilkranverfahren*



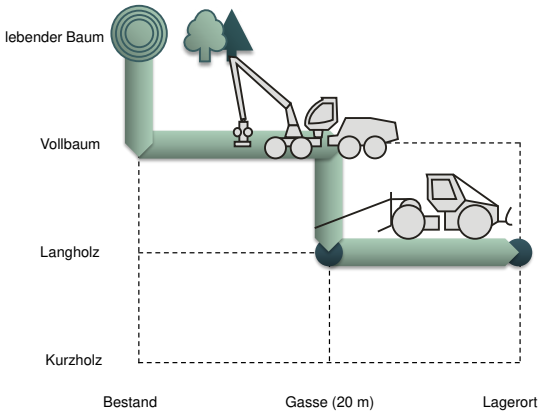
(a) hochmechanisiertes Vollbaumverfahren (b) hochmechanisiertes Langholzverfahren

Abb. 43: *gassenunabhängige Langholzernteverfahren*

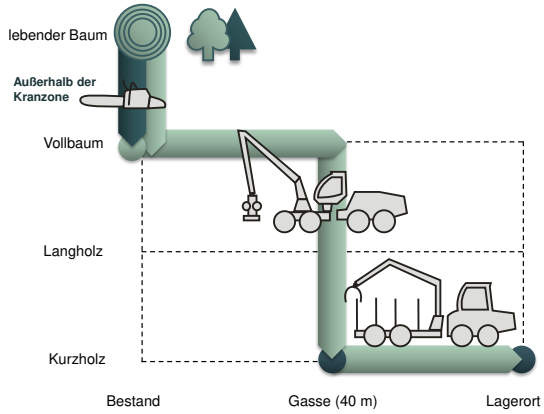
Die Abbildung 44 fasst die Verfahren mit den niedrigsten Verfahrenskosten für die sechs verschiedenen Konstellationen (drei Erschließungssysteme und zwei Längensortierungen des Holzes) zusammen. Nur diese sechs Verfahren werden als Ergebnis des ersten Optimierungsschrittes in die weiteren Betrachtungen einbezogen.



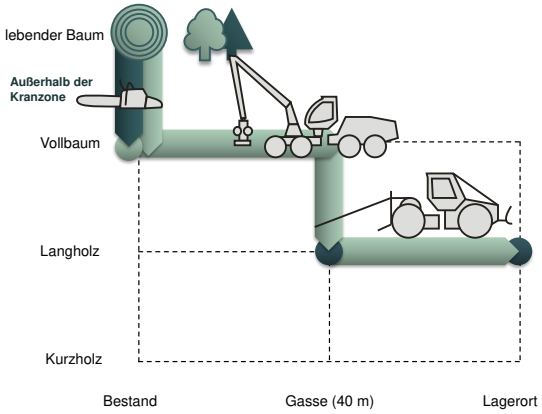
(a) vollm. Kurzholzverfahren



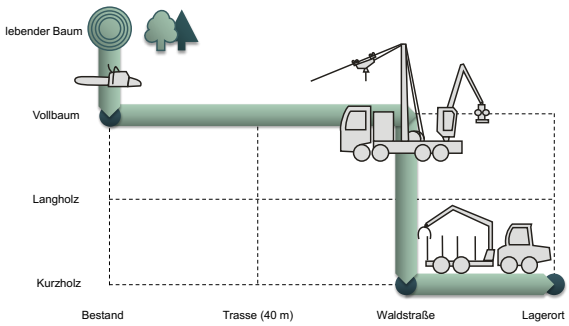
(b) vollm. Langholzverfahren



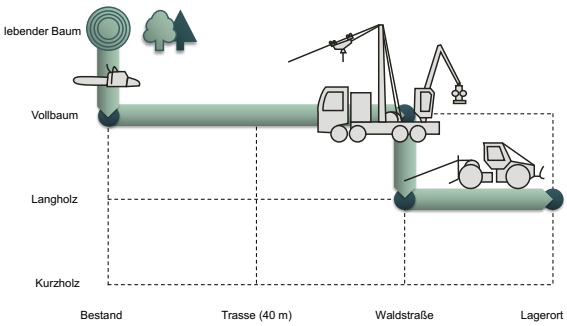
(c) hochm. Kurzholzverfahren



(d) hochm. Langholzverfahren



(e) hochm. Vollbaumverfahren (kurz)



(f) hochm. Vollbaumverfahren (lang)

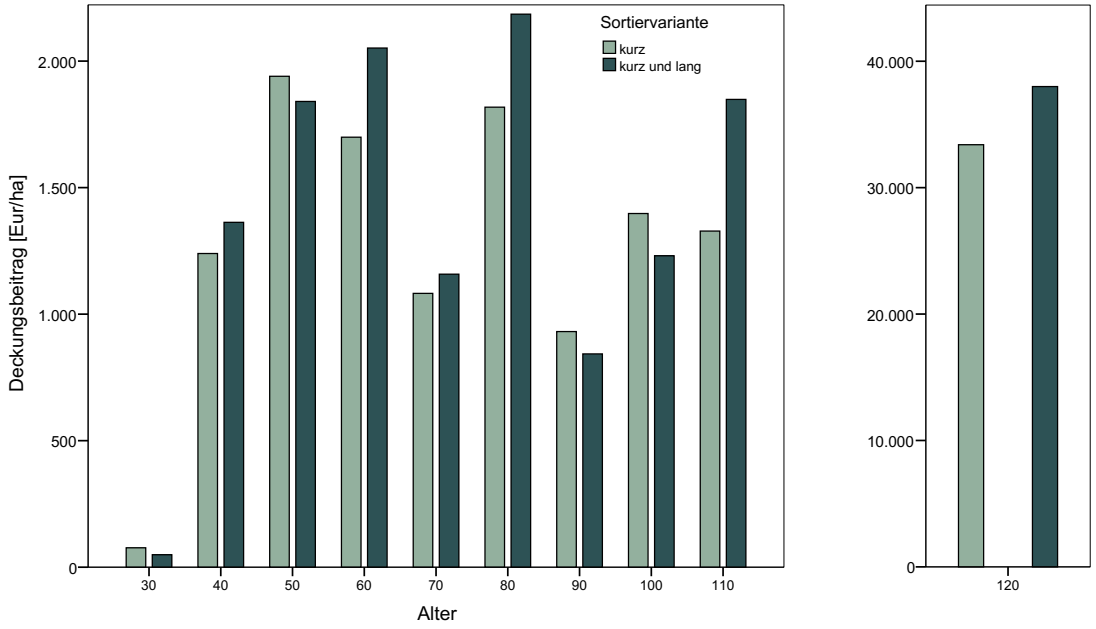
Abb. 44: *Zusammenstellung der Funktigramme der Holzernteverfahren mit den niedrigsten Kosten je Sortiervariante und Erschließungssystem*

4.2.2 Optimale Sortiervariante

Die Frage nach den effizientesten Verfahren, je nach Rückegassenabstand und der Länge der anfallenden Holzsortimente, ist bereits beantwortet. Nun soll die Aushaltung des Holzes optimiert werden. Es wird demnach die Frage gestellt, welche Sortierung größere Bodenertragswerte erzielt.

Die Ergebnisse des Kapitels 4.1.1 sollen an dieser Stelle für eine statische Betrachtung der Deckungsbeiträge beider Sortiervarianten dienen. Die Sortierung wird, wie oben beschrieben, mit dem Waldwachstumssimulator „BWinPro“ durchgeführt. Im Fenster „Sorting Dialog“ (siehe Abbildung 7) werden für die Sortiervariante „kurz“ entsprechend nur die Kurzholzsortimente ausgewählt.

Die Tabelle 28 im Anhang zeigt die monetarisierten Ergebnisse der beiden Sortiervarianten. Die Deckungsbeiträge sind in der Abbildung 45 grafisch dargestellt. Zu Grunde gelegt wurde eine Erschließung mit 20 m-Gassen.



(a) Vornutzungen (b) Endnutzung

Abb. 45: *Deckungsbeiträge der zwei Sortiervarianten*

Betrachtet man die beiden Varianten statisch, kann man feststellen, dass die Variante „kurz und lang“ in Summe höhere Deckungsbeiträge erzielt. Da diese Betrachtungsweisen nicht dem dynamischen Anspruch der Arbeit genügt, soll als Beurteilungsgröße der Bodenertragswert herangezogen werden.

Tab. 4: *Bodenertragswerte der verschiedenen Sortiervarianten*

	Bodenertragswerte [Euro ha^{-1}]		
Zinssatz	SV „kurz“	SV „kurz und lang“	Differenz
0,01%	3535990	4005052	469062
1,0%	19475	22158	2683
2,5%	1767	2185	418

Die Tabelle 4 zeigt die Bodenertragswerte der zwei verschiedenen Sortiervarianten[24] in Abhängigkeit vom Zinsatz sowie die Differenz aus beiden[25]. Unabhängig vom Zinssatz ist der Bodenertragswerte der Sortiervariante „kurz und lang“ größer.

Eine grafische Darstellung der relativen Unterschiede zwischen den Sortiervarianten in Abhängigkeit des unterstellten Zinssatzes zeigt die Abbildung 46.

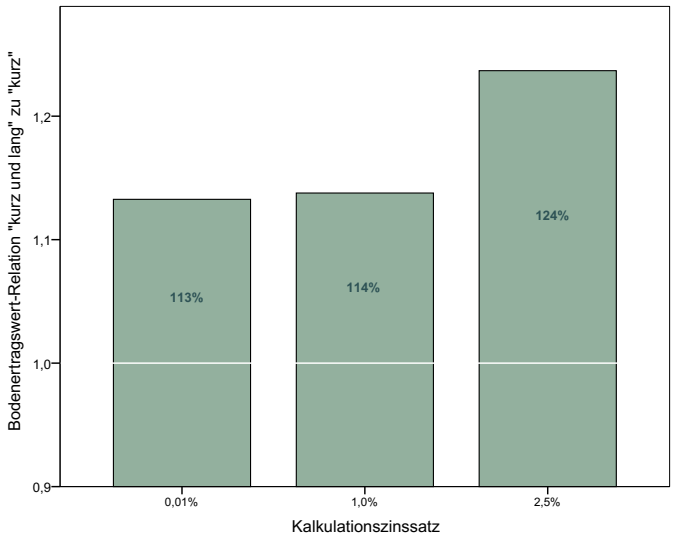


Abb. 46: *Verhältnis der Bodenertragswerte der zwei Sortiervarianten*

Nachdem die zwei Sortiervarianten für den 20 m-Aufschluss untersucht wurden, sollen die Varianten auch bei 40 m- beziehungsweise gassenunabhängigen Erschließungssystemen analysiert werden. Die Tabelle 5 zeigt die errechneten Bodenertragswerte der beiden Varianten für die bekannten Zinssätze. Da die Sortiervariante „kurz und lang“ generell höhere Bodenertragswerte hervorbringt, wird sie im Folgenden als optimale Variante verwendet.

[24] Den Berechnungen wurde das 20 m-Gassensystem zu Grunde gelegt.

[25] Um den Einfluss des Kalkulationszinssatzes darzustellen, soll sowohl ein sehr kleiner als auch ein großer Zinssatz verwendet werden. Im Folgenden werden alle Ergebnisse für die drei Zinssätze 0,01%, 1% und 2,5% dargestellt.

Tab. 5: *Bodenertragswerte der verschiedenen Sortiervarianten für die Erschließungsalternativen*

		Bodenertragswerte [Euro ha^{-1}]		
	Zinssatz	SV „kurz“	SV „kurz und lang“	Differenz
40 m-Gassenabstand	0,01%	3151261	3951624	800364
	1,0%	17710	22131	4421
	2,5%	1689	2298	609
gassenunabhängig	0,01%	2350448	2833786	483338
	1,0%	11852	14469	2617
	2,5%	175	505	330

4.2.3 Berücksichtigung der Eingriffsstärke

Die Tabelle 6 zeigt die Bodenertragswerte der „mäßigen“ und „starken“ Durchforstung in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Erschließung.

Tab. 6: *Bodenertragswerte der mäßigen und der starken Durchforstung*

		Bodenertragswerte [Euro ha^{-1}]	
	Zinssatz	mäßige Durchforstungen	starke Durchforstungen
20 m-Gassenabstand	0,01%	4 005 052	4 436 147
	1,0%	22 158	26 337
	2,5%	2185	3411
40 m-Gassenabstand	0,01%	3 951 624	4 362 020
	1,0%	22 131	25 949
	2,5%	2298	3338
gassenunabhängig	0,01%	2 833 786	3 291 181
	1,0%	14 469	17 938
	2,5%	505	1280

Aus den Zahlen wird deutlich, dass die starke Durchforstung deutlich höhere Bodenertragswerte erreicht als die mäßige. Im Folgenden soll daher ausschließlich mit den Ergebnissen weiter gerechnet werden, denen eine starke Durchforstung zu Grunde gelegt wurde.

4.2.4 Optimierung der Umtriebszeit

Die Tabelle 7 zeigt die nach der Umtriebszeit optimierten Bodenertragswerte und Annuitäten für die drei Erschließungssysteme und die beispielhaften Zinssätze. Den dargestellten Ergebnissen liegen die jeweils effizientesten Holzernteverfahren, eine starke Auslesedurchforstung sowie die Sortierung „kurz und lang“ zu Grunde.

Im 20 m-Gassensystem betragen die optimalen Umtriebszeiten beim geringen Zinssatz (0,01%) 100 und bei mittleren (1%) sowie hohen (2,5%) Zinskosten 80 Jahre. Im 40 m-Gassenabstand liegen diese bei 100 (0,01% und 1%) sowie bei 70 Jahren (2,5%) – beim Seilkran-Verfahren bei 100 (0,01% und 1%) sowie 60 Jahren (2,5%).

Wie zu erkennen ist, sinken alle drei ökonomischen Kennzahlen mit zunehmenden Zinssatz und größer werdenden Holzerntekosten.

Tab. 7: *Optimale Umtriebszeit, Bodenertragswerte und Annuitäten der drei Erschließungsalternativen nach Zinssatz*

	Zinssatz [%]	opt. Umtriebszeit [Jahre]	Bodenertragswert [Euro ha^{-1}]	Annuität [Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$]
20 m-Gassensystem	0,01%	100	4 621 946	462
	1,00%	80	29 091	291
	2,50%	80	4807	120
40 m-Gassensystem	0,01%	100	4 466 359	447
	1,00%	100	27 661	277
	2,50%	70	4173	104
gassenunabhängig	0,01%	100	2 887 954	289
	1,00%	100	15 406	154
	2,50%	60	774	19

4.3 Harmonisierung der Naturaldaten

Die Abbildung 47 zeigt die optimierten und kumulierten, absoluten Erlöse der Vornutzungen der drei Erschließungsalternativen. Wie zu erkennen ist, übersteigen die kumulierten Erlöse der 40 m-Varianten[26] die der 20 m-Erschließung ab dem Alter von 50 Jahren.

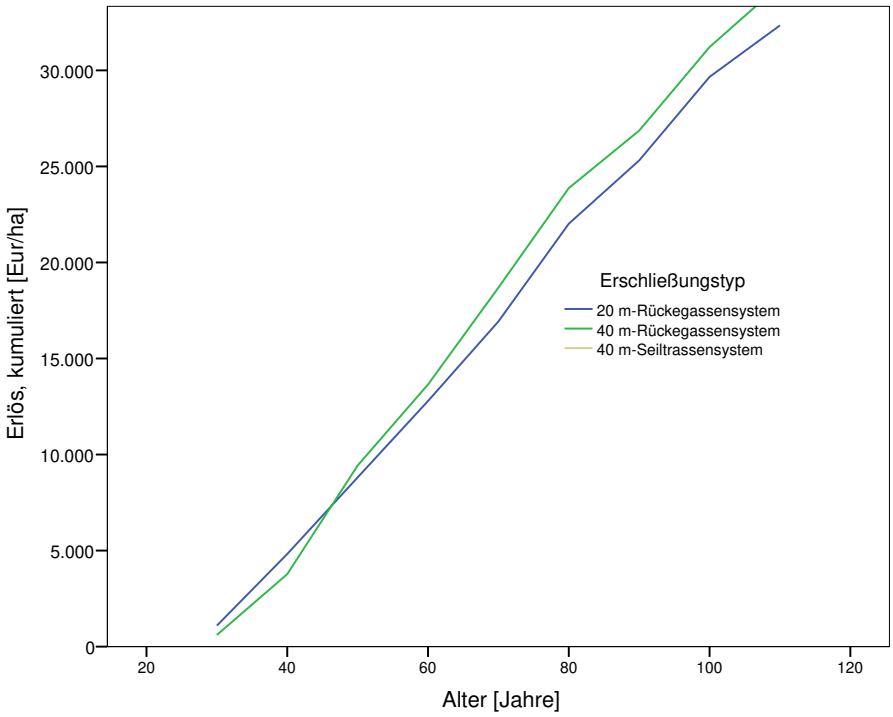


Abb. 47: *Kumulierte Vornutzungserlöse der drei Erschließungsalternativen*

Auch bezüglich der Abtriebserlöse sind Unterschiede erkennbar (siehe Abbildung 48), die nicht durch den weiteren Rückegassenabstand allein erklärbar sind, sondern auch der unterschiedlichen Verteilung zwischen Kurz- und Langholz geschuldet sind.

Beide Effekte kommen durch Unterschiede in den Naturaldaten zustande, die mit Hilfe des Programms BWinPro erzeugt wurden. Das Weglassen einer von zwei Gassen bewirkt einen positiven ertragskundlichen Effekt in der Simulation, der sich wiederum in den Vornutzungserlösen niederschlägt. Darüber hinaus haben die unterschiedlichen naturalen Daten auch Auswirkungen auf die Holzerntekosten, da das mittlere Baum- beziehungsweise Stückvolumen oder der Brusthöhendurchmesser zur Schätzung des Zeitverbrauchs einer Verfahrensstufe herangezogen wird.

[26] Der Graph der 40 m-Seiltrassen-Erschließung ist nicht zu erkennen, da er auf Grund gleicher Zahlenbasis genau hinter der grünen Linie der 40 m-Rückegassen-Erschließung liegt.

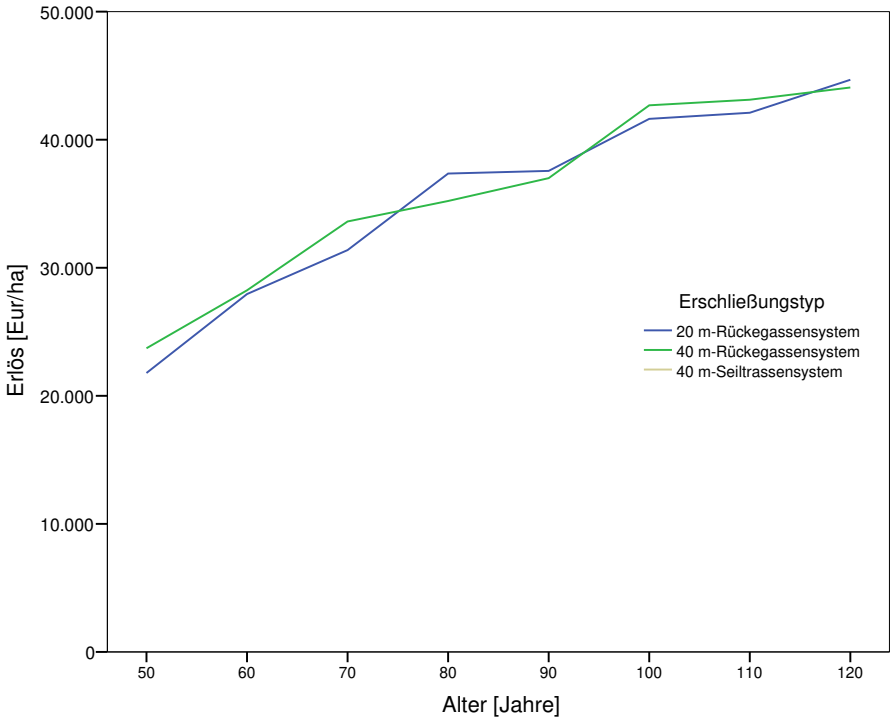


Abb. 48: *Abtriebserlöse der drei Erschließungsalternativen*

Um die geschilderten Effekte auf die Erlös- und Kostenseite zu minimieren, wird folgendes Vorgehen gewählt: Zur Vereinheitlichung werden die (nach Durchforstungsart und Sortiervariante optimierten) Naturaldaten der Simulation für 20 m-Gassenabstände im Folgenden auch für weitere Gassen- und Trassenabstände verwendet. Eine Ausnahme stellt die Anlage der Gassen beziehungsweise Trassen im Alter von 30 Jahren dar. Für diese Maßnahme werden die „originalen“ Simulationsdaten genutzt, da hier verschiedene Entnahmemengen je nach gewähltem Erschließungsmodell resultieren.

Die Tabelle 8 im nächsten Abschnitt zeigt die optimalen Umtriebszeiten, die Bodenertragswerte sowie die Annuitäten der Erschließung mit Gassen aller 20 m sowie der harmonisierten 40 m-Gassen- sowie der harmonisierten 40 m-Seiltrassen-Variante. Durch die Harmonisierung der Naturaldaten werden die Bodenertragswerte und Annuitäten grundsätzlich kleiner (vgl. Tabelle 7). Eine Ausnahme stellt die gassenunabhängige Variante bei den Zinssätzen 0,01% und 2,5% dar. Hier werden die Bodenertragswerte, wie die Annuitäten größer.[27]

[27] Dies kann beim Zinssatz 0,01% auf die Verschiebung der Umtriebszeit und damit auf eine Verbesserung des dynamischen Erlös-Kostenverhältnisses zurückgeführt werden. Für den Zinssatz 2,5% lässt sich dieser Effekt maßgeblich auf den besseren Deckungsbeitrag der Vornutzung im Alter 40 zurückführen. Hier wird nach der Harmonisierung mehr Holz geerntet, was den Deckungsbeitrag durch eine bessere Verteilung sekundärer Kosten der Seilkrananlagen positiv beeinflusst.

4.4 Interpretation der numerischen Grundlagen und Simulation weiterer Effekte

Tab. 8: *Optimale Umtriebszeit, Bodenertragswerte und Annuitäten der unterschiedlichen Feinerschließungssysteme nach der Harmonisierung der Naturaldaten*

	Zinssatz	opt. Umtriebszeit	Bodenertragswert	Annuität
	[%]	[Jahre]	[Euro ha^{-1}]	[Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$]
20 m-Gassensystem	0,01	100	4 621 946	462
	1,00	80	29 091	291
	2,50	80	4807	120
40 m-Gassensystem	0,01	120	4 305 320	431
	1,00	100	26 327	263
	2,50	80	4114	103
gassenunabhängig	0,01	120	2 968 233	297
	1,00	100	14 891	149
	2,50	60	994	25

Durch die Harmonisierung wurde der Einfluss einer unterschiedlichen naturalen Datenbasis einerseits und die Wirkung verschiedener Erlösströme andererseits ausgeschlossen. Die Unterschiede zwischen den Erschließungssystemen – wie sie Tabelle 8 zeigt – erklären sich demnach nur noch aus den verschiedenen Holzernteverfahren mit ihren unterschiedlichen Kosten.

Je nach verwendetem Kalkulationszinssatz sinken der Bodenertragswert beziehungsweise die Annuität durch die Erweiterung des Rückegassenabstandes auf 40 m um 7% (i=0,01%) bis 14% (i=2,5%). Kommen Seilkransysteme zum Einsatz, sinken diese Werte um 36% (i=0,01%) bis 79% (i=2,5%).

Tab. 9: *Relative Bodenertragswerte und Annuitäten (40 m-Rückegassen- und 40 m-Seiltrassen-Erschließung in Relation zur 20 m-Rückegassen-Erschließung)*

	Zinssatz	20 m-Gassensystem	40 m-Gassensystem	gassenunabhängig
Relationen	0,01%	100%	93%	64%
	1,00%	100%	90%	51%
	2,50%	100%	86%	21%

Die Tabelle 9 zeigt die Relationen der beiden Verfahrensalternativen in Bezug zum 20 m-Rückegassensystem. Wie zu erkennen ist, nehmen die relativen Abstände zwischen den

drei Erschließungssystemen mit steigendem Zinssatz zu. Daraus kann bereits an dieser Stelle geschlussfolgert werden, dass diese am geringsten sind, wenn der Zinssatz gegen Null tendiert.

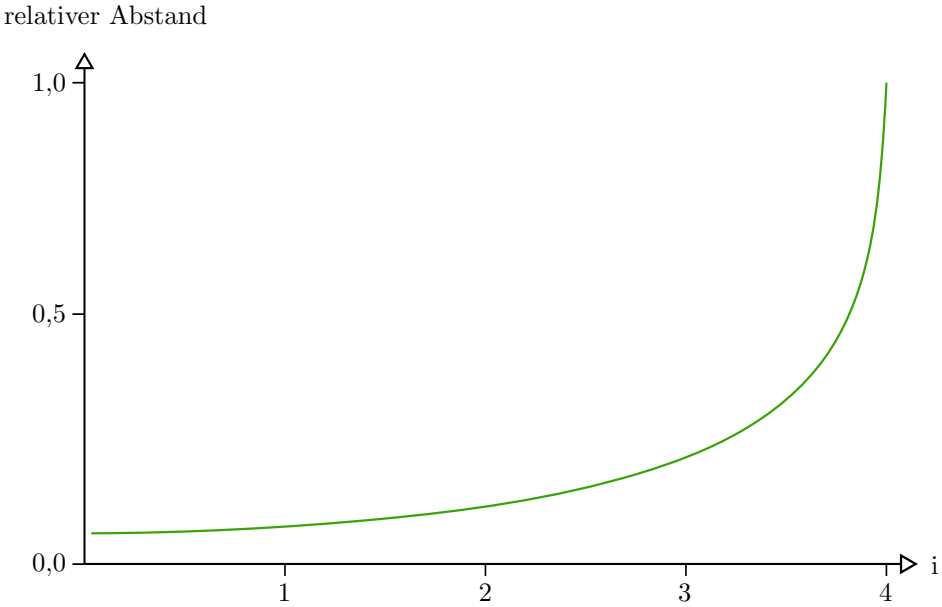


Abb. 49: *Abstand der Annuität der 40 m-Erschließung zur Annuität der 20 m-Erschließung in Relation zu dieser (relativer Annuitätenabstand)*

Die Abbildung 49 zeigt den mit dem Zinssatz i nahezu exponentiell größer werdenden relativen Abstand der Annuität der 40 m-Erschließung zu der des Standardverfahrens, der durch weiteres Experimentieren festgestellt werden konnte. Ferner zeigte dieses „Drehen am Zinssatz“, dass bei einem Zinssatz von 3,0% die Seilkranerschließung sowie ab 4,0% die Erschließung mit 40 m-Gassen unrentabel werden, d.h. zu negativen Bodenertragswerten und demzufolge negativen Annuitäten führen (der relative Annuitätenabstand ist dann größer als 1,0).

These 1

Mit zunehmendem Kalkulationszinssatz i steigt die relative Differenz zur finanziell-optimalen Alternative nahezu exponentiell an.

Was bedeutet die oben beschriebene These für die Praxis?[28] Der relative Abstand zwischen der Alternative und dem Optimum kann mit den (relativen) Opportunitätskosten gleich gesetzt werden, die für die Alternative aufgebracht werden müssen. Unter der Annahme, dass die Bereitschaft, ein teureres Verfahren zu wählen, mit steigenden

[28] Die formalen Thesen werden in der vorliegenden Arbeit in sogenannte Praxissätze „übersetzt“. Sie dienen neben dem besseren Verständnis auch der Beschreibung praktischer Auswirkungen und Zusammenhänge.

Opportunitätskosten sinkt, ist die Reziproke des relativen Abstandes gewissermaßen ein Weiser für die Bereitschaft zur freiwilligen Selbstbeschränkung. Das heißt, je kleiner der Zinssatz ist, desto eher wird ein Waldbesitzer bereit sein, eine Alternative mit höheren Kosten zu wählen, da der relative Verzicht mit Abnahme des Zinssatzes sinkt. Waldbesitzer, die mit sehr geringem (oder keinem) Zins rechnen, müssen bei der Anwendung der 40 m-Verfahren auf weniger Annuität verzichten als solche, die einen hohen Zinssatz wählen.

Praxissatz 1

Je höher der Kalkulationszinssatz ist, desto größer sind die Opportunitätskosten und umso kleiner ist die Bereitschaft des Waldbesitzers, ein teureres Verfahren anzuwenden.

Nachdem die Unterschiede zwischen den untersuchten Verfahren quantifiziert und der Einfluss des Zinssatzes i interpretiert wurde, soll das im Kapitel 3.1 beschriebene Modell nun erweitert werden, um verschiedene weitere Effekte abzubilden. Diese Erweiterungen beinhalten zum Teil neue Modelle, die speziell für die Fragestellung entwickelt wurden und im Folgenden beschrieben werden.

4.4.1 Biologische Produktionsfunktion des Bodens

Die Beschränkung der Befahrung auf dafür fest definierte Bereiche führt zu einer Funktionalisierung des Waldbodens. Der Rückegassenboden kann nicht länger ausschließlich als biologische Produktionsfläche betrachtet werden. Vielmehr hat er vorrangig eine technische Funktion. Die zentrale Frage ist, wie viel Fläche der primären, biologischen Produktion verloren geht. Und wie wirkt sich dies auf die Ertragsleistung des Waldbestandes aus? Dass die Literatur diesbezüglich keine eindeutige Antwort gibt, wurde bereits dargelegt. Aus diesem Grund soll ein gedankliches Konstrukt helfen, die theoretischen Auswirkungen auf die Rentabilität der Erschließungsoptionen darzustellen.

Zunächst soll ein quantitativer Ansatz verfolgt werden. Dazu ist eingangs zu klären, welcher Zusammenhang zwischen der quantitativen Flächeninanspruchnahme (FIA) durch das Erschließungssystem und dem Rückegassenabstand besteht. Die Lösung ist der Quotient aus der Breite der Rückegassen geteilt durch den Abstand der Gassen zueinander, wie die Formel 41 zeigt.[29]

[29] Schack-Kirchner et al. (2020) weisen darauf hin, dass bisher keine Informationen zu der Frage vorliegen, ob sich der Rückegassenabstand auf die effektive Rückegassenbreite im Praxisbetrieb auswirkt. Zur Vereinfachung des Modells wurde der Einfluss des Abstandes auf die Breite, der durch unterschiedliche Überfahrhäufigkeit und der verschiedenen zur Anwendung kommenden Holzernteverfahren resultieren kann, in der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen.

$$FIA\% = \frac{Gassenbreite}{Gassenabstand} \cdot 100 \tag{41}$$

Dieser Zusammenhang sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie groß die Verschlechterung der Ertragssituation durch das Erschließungssystem tatsächlich ist. Die Lösung des Problems bedarf also auch einer qualitativen Komponente: Die Befahrung des Waldbodens führt zur einer Verschlechterung des Bodenzustands. Dies suggeriert eine Abnahme der biologischen Produktivkraft dieses Bodens, der zumindest durch die Gassenrandbäume durchwurzelt und somit Lebensraum dieser Bäume ist. Wie groß diese Abnahme tatsächlich ist, bleibt unbekannt. Jedoch sind zwei Extremfälle denkbar. Einerseits wäre es möglich, dass die Befahrung überhaupt keine Auswirkungen auf das Baumwachstum hat. Andererseits könnte es dazu führen, dass der Boden der Rückegasse auf gesamter Breite von 4 m jegliche biologische Produktivkraft verliert und der Ertrag auf der in Anspruch genommenen Fläche ausbleibt.

Die Formel 42 beschreibt die Absenkung des Bodenertragswertes durch die Flächeninanspruchnahme als Produkt der quantitativen Flächeninanspruchnahme, dem Bodenertragswert und dem qualitativen Faktor. Letztgenannter kann Werte zwischen 0 (keine Verschlechterung der biologischen Produktivkraft) und 1 (Verlust aller Produktivkraft auf der Rückegasse) annehmen.

$$Bodenertragswertabsenkung = \frac{Gassenbreite}{Gassenabstand} \cdot BEW \cdot Faktor_{qual} \tag{42}$$

Dieser Ansatz reduziert den Bodenertragswert auf theoretische Weise auf der Fläche, die vornehmlich der Befahrbarkeit dient (Rückegassenfläche). Die Höhe dieser Reduzierung wird über den qualitativen Faktor der Flächeninanspruchnahme geregelt. Er beschreibt demzufolge die Höhe der Ertragsverschlechterung.

Wird für beide „terrestrischen“ Erschließungssysteme der gleiche Faktor unterstellt[30], bedeutet das, dass der Bodenertragswert (respektive die Annuität) bei 20 m-Gassensystemen mit steigendem qualitativen Faktor überproportional mehr abnimmt als bei 40 m-Erschließung, denn einerseits ist die Rückegassenfläche doppelt so groß und andererseits ist der Bodenertragswert durch geringere Holzerntekosten größer.

[30] Es ist durchaus denkbar, dass der Faktor auf weiten Gassensystemen grundsätzlich höher sein muss als auf engen, da die Befahrungsintensität und die damit verbundene Beanspruchung in der Regel deutlich größer ist. Die vorliegende Arbeit folgt jedoch dem Ansatz, dass bereits die erste Überfahrt die größte Bodenverdichtung nach sich zieht (vgl. Kremer 2008), sodass die Befahrungsfrequenz vor diesem Hintergrund als Einflussgröße zurücktritt. Auch Schack-Kirchner & Hildebrand (1994) empfehlen, den befahrenen Flächenanteil als Beurteilungskriterium heranzuziehen, da Unterschiede durch Mehrbefahrung der Gassen mit vergrößerten Zwischenfeldern nicht beobachtet wurden.

Tab. 10: *Auswirkungen der Flächeninanspruchnahme auf die biologische Produktion durch Veränderung des qualitativen Faktors*

	Zinssatz	Annuität		
		Faktor=0	Faktor=0,33	Faktor=1
	[%]	[Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$]		
20 m-Gassensystem	0,01	462	432	370
	1,00	291	272	233
	2,50	120	112	96
40 m-Gassensystem	0,01	431	416	387
	1,00	263	255	237
	2,50	103	99	93
gassenunabhängig	0,01	297		
	1,00	149		
	2,50	25		

Die Tabelle 10 zeigt die Auswirkung, wenn der Faktor die Werte 0 (das entspricht der Ausgangssituation), 0,33 (dies entspricht einer geringen Verschlechterung) oder 1 (hier wird der vollständige Verlust der Produktivkraft unterstellt) annähme, auf die berechneten Annuitäten der drei Erschließungssysteme[31]. Dieser Effekt kann nur bei den Systemen Auswirkungen hervorbringen, bei denen Maschinen den unbefestigten Waldboden befahren, weshalb bei der Seilkranvariante keine entsprechenden Effekte auftreten.

Anhand der Zahlen ist erkennbar, dass dieser Effekt (je nach gewähltem Faktor) in beiden Gassensystemen zu einer Abnahme der Annuitäten führt. Im 20 m-Gassensystem verringern sich diese Werte deutlich stärker, was dazu führt, dass der „Abstand“ zwischen den beiden Systemen je nach unterstelltem Faktor mehr oder weniger abnimmt. Wird der Faktor 1 unterstellt, kann beobachtet werden, dass die Annuitäten der 20 m-Erschließung zumindest für den sehr geringen Zinssatz 0,01% und für die 1%ige Verzinsung kleiner werden als die Annuitäten des 40 m-Gassensystemes.

Der simulierte Verlust der Produktionsfunktion auf der Rückegasse führt zu einer Änderung der Relationen der Systeme zueinander. Die Tabelle 11 zeigt die relativen Annuitäten in Bezug auf das 20 m-Gassensystem. Die Annäherung der aufwendigeren Systeme an das Standardverfahren durch Erhöhung des Faktors ist deutlich erkennbar. Auch hier wird der bereits oben beschriebene Einfluss des Zinssatzes deutlich.

[31] Auch hinsichtlich der Seiltrassen wird unterstellt, dass sie 4 m breit sind.

Tab. 11: *Relative Bodenertragswerte und Annuitäten bei vollständigem Verlust der biologischen Produktionsfunktion auf der Rückegasse (d.h. Faktor = 1)*

	Zinssatz	20 m-Gassensystem	40 m-Gassensystem	gassenunabhängig
	0,01%	100%	105%	80%
Relationen	1,00%	100%	102%	64%
	2,50%	100%	96%	26%

These 2a

Wirkt die durch Befahrung hervorgerufene irreversible Verdichtung auf die Produktionsfunktion des Waldbodens, so führt dies unweigerlich zur Abnahme der relativen Differenz zwischen der Annuität der jeweiligen Alternative zum finanziellen Optimum.

Es wird demnach angenommen, dass in Abhängigkeit von der Verdichtungsempfindlichkeit des Substrates und der Sensibilität der Bäume gegenüber der Verdichtung diese mehr oder weniger stark mit Wuchsdepressionen und/oder Qualitätsverlusten (zum Beispiel Rotfäule bei der hier verwendenten Baumart) reagieren. Folglich kann weniger und/oder nur geringer-wertiges Holz geerntet werden, sodass die Annuitäten sinken. Da dies auf den Flächen, die mit 20 m-Feinaufschluss bewirtschaftet werden, mehr Bäume betrifft als auf der 40 m-Alternative, müssen die Annuitäten hier folgerichtig schneller sinken.

Je nachdem, wie stark die Befahrung (Verdichtung) wirkt, nähern sich die Alternativen dem Optimum mehr oder weniger an. Bei sehr großer (unterstellter) Wirkung führt es sogar zur Umkehr des finanziellen Optimums – die Erschließung mit Rückegassen im Abstand von 40 m wird rentabler.

Die hier unterstellte Theorie besagt, dass die Befahrung zur pauschalen Absenkung der Rentabilität führt, da ein Teil der Waldfläche nicht mehr ausschließlich als Produktionsfläche zur Verfügung steht, die Produktivkraft hier eingeschränkt ist und dieser „Verlust“ nicht durch die verbleibende Fläche kompensiert werden kann.

Eine andere Möglichkeit, die Ertragsverschlechterung abzubilden, ist im Folgenden anhand der (auf Seite 44 bereits beschriebenen) Faustmann-Formel dargestellt:

$$C_{0_\infty} = \frac{z_{Bbg.}q^T + \sum_{t=1}^{T-1} z_{Wpfl.t}q^{T-t} + z_{EN}}{q^T - 1} \Rightarrow max. \tag{43}$$

Die Deckungsbeiträge bei den Waldpflegemaßnahmen sowie bei Erntenutzungen entstehen durch Substraktion, wobei die Kosten (Produkt aus Verfahrenspreis und Volumen)

von den Erlösen (Produkt aus Holzpreis und Volumen) abgezogen werden:

$$z_{Wpfl}; z_{EN} = P_{Holz} \cdot V - P_{Verfahren} \cdot V \tag{44}$$

Durch den Einbau von zwei Faktoren lässt sich die Ertragsminderung wieder in eine quantitative und eine qualitative Komponente zerlegen:

$$z_{Wpfl}; z_{EN} = R_{qual} \cdot P_{Holz} \cdot R_{quant} \cdot V - P_{Verfahren} \cdot R_{quant} \cdot V \tag{45}$$

wobei $R_{qual} = 1 - [F_{P_{Holz}} \cdot FIA]$ die Qualitätsverschlechterung
und $R_{quant} = 1 - [F_V \cdot FIA]$ die Volumenminderung abbildet.

Dadurch sind zwei Stellschrauben geschaffen, die den Einfluss der Rückegasse auf das Holzwachstum qualitativ sowie quantitativ abbilden.

Wird davon ausgegangen, dass sich durch die Rückegasse die zu erntende Holzmenge reduziert, kann der Volumen-Faktor $[F_V]$ geändert werden. Dieser wirkt gleichermaßen auf Minuend und Subtrahend. Der Holzpreis-Faktor ($F_{P_{Holz}}$; im Folgenden auch als „Qualitätsfaktor“ bezeichnet) findet Anwendung, wenn von einer qualitativen Auswirkung der Rückegasse auf das Holz ausgegangen wird. Er wirkt nur auf den Minuenden. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Art und Weise der Wirkung der Flächeninanspruchnahme grundlegende Unterschiede im numerischen Ergebnis bewirkt und demzufolge einen diversen Einfluss auf die Rentabilität haben muss.

Die Volumenveränderung verändert sowohl Erlöse als auch Kosten und wirkt daher geringer als die Veränderung der Qualität. Diese verringert nur die Erlöse, die Holzerntekosten werden jedoch nicht beeinflusst, was den Deckungsbeitrag verschlechtert.

These 2b

Die Holzentwertungen durch die Befahrung wirken relativ betrachtet stärker auf die Rentabilität als die Volumenminderung.

Die Abbildung 50 zeigt den Verlauf der Annuitäten in Abhängigkeit von der Höhe des Volumenfaktors[32]. Bei allen drei Zinssätzen führen Volumenminderungen zur Rentabilitätsgleichheit der beiden terrestrischen Erschließungssysteme: Beim Zinssatz von 0,01% liegt dieser ungefähr beim 0,65fachen der Flächeninanspruchnahme. Ist der Zinssatz 1,0%, kommt es erst bei 0,81 zu einem Break-even-point. Liegt der Zinssatz höher (2,5% Zinssatz), verschiebt sich der Schnittpunkt weiter nach rechts (0,94).

[32] Dargestellt ist der Volumenfaktor in Abhängigkeit von der Flächeninanspruchnahme. Durch diese Darstellungsweise können die unterschiedlichen Gassenabstände innerhalb eines Diagrammes dargestellt werden. Der Wert 1,0 bedeutet demnach, dass der komplette (100%) Gassenanteil (20% bzw. 10%) des Volumens verloren geht. Somit sinkt im 20 m-System das Volumen um 20% auf 80% beziehungsweise im 40 m-Rückegassensystem um 10% auf 90%.

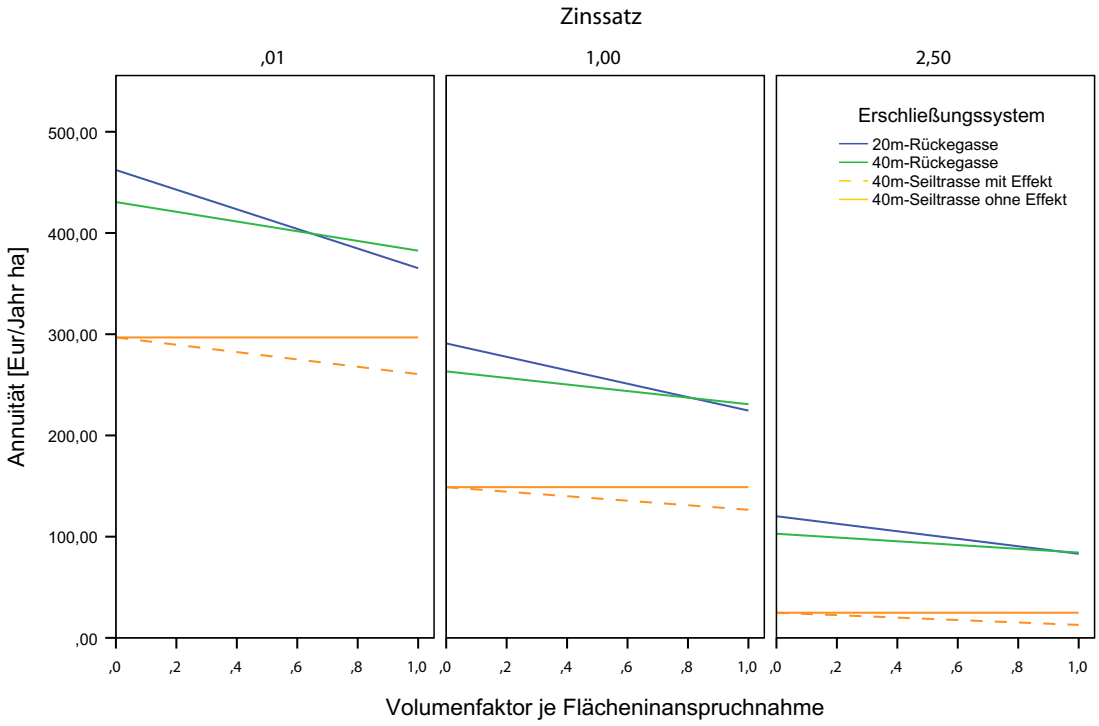


Abb. 50: *Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Volumenfaktor je Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung der drei Zinssätze*

Wie groß muss der Volumenunterschied demnach sein, um Annuitätengleichheit zu erzielen? Wie der Tabelle 12 entnommen werden kann, muss (je nach Zinssatz) die Volumendifferenz in beiden Systemen zwischen 7 und 10% liegen, damit die 40 m-Gasse eine höhere Rentabilität aufweist als die 20 m-Erschließung[33].

Tab. 12: *Volumenreduktion am Break-Even-Point*

		Volumen-	verbleibendes Volumen		
	Zinssatz	faktor	20 m-Gassensystem	40 m-Gassensystem	Δ
Relationen	0,01%	0,65	87%	94%	6,9%
	1,00%	0,81	84%	92%	8,9%
	2,50%	0,94	81%	91%	10,3%

[33] Als Δ wurde hier die Differenz aus dem verbleibenden Volumen im 40 m-Gassensystem und dem im 20 m-Gassensystem in Relation zu dem Wert des 40 m-Gassensystems dargestellt. 9% bei i=1,00% bedeutet demnach, dass im 20 m-Gassensystem 9% weniger Holz anfallen muss (als im alternativen System mit Rückegassen alle 40 m), damit der Nachteil der höheren Erntekosten des 40 m-Gassensystems ausgeglichen wird.

In Betrieben mit einem niedrigem Kalkulationszinsfuß führt die 40 m-Gasse demnach eher zu einem Rentabilitätvorteil als in Betrieben mit höheren Zinssätzen. Die Erschließung mit Seiltrassen im Abstand von 40 m führt sowohl bei der Annahme, dass die geschilderten Effekte auch hier vorkommen[34], als auch bei der gegenteiligen Annahme zu keinem Schnittpunkt mit den terrestrischen Erschließungssystemen. Rechnerisch käme es erst bei einem Volumenunterschied von 28% bis 42% (zwischen der 40 m-Rückegassenerschließung und der Seiltrassenerschließung) zur Rentabilitätsgleichheit. Das Seilkranverfahren ist demzufolge keine Alternative zu den Verfahren mit auf-Rückegassen-fahrenden Maschinen. Zumindest sofern nur der Effekt der Ertragsverschlechterung unterstellt wird.

Der Verlauf der Annuitäten der verschiedenen Erschließungen über den Qualitätsfaktor ist in Abbildung 51 dargestellt und ähnelt dem oben beschriebenen Verlauf der Volumenreduktion. Da der Qualitätsfaktor nur die Erlösseite bei gleichem Volumen mindert und dieser durch die gleichbleibenden Holzerntekosten somit stärker als der Volumenfaktor auf den Deckungsbeitrag wirkt, sinken die Annuitäten stärker.

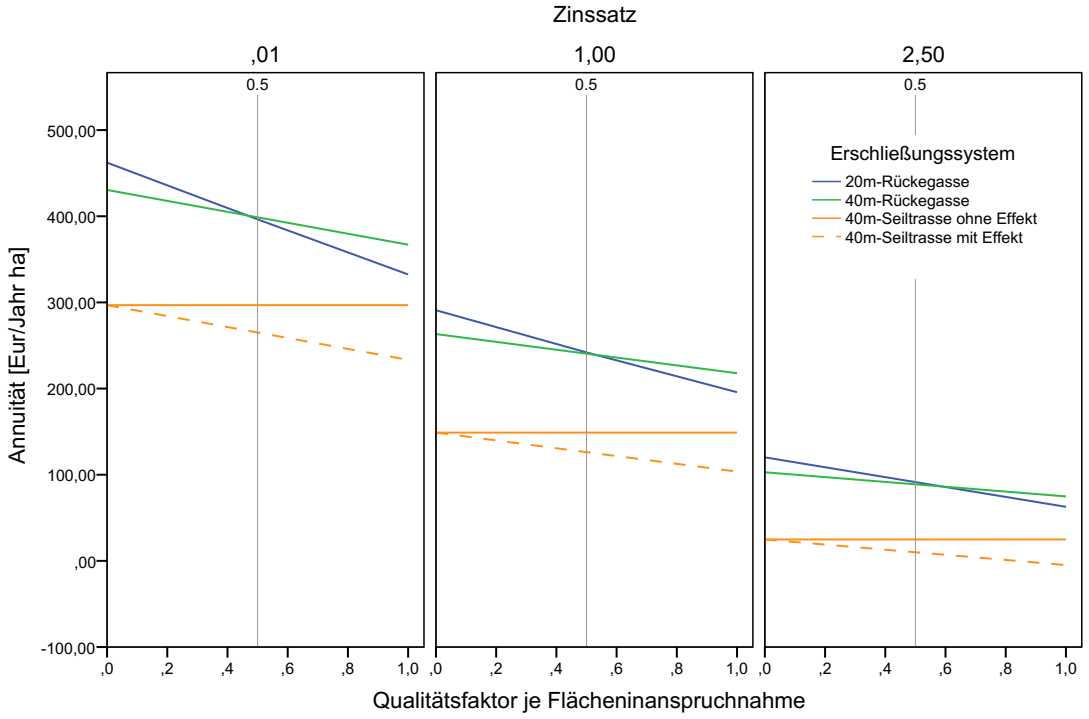


Abb. 51: *Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Qualitätsfaktor je Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung der drei Zinssätze*

[34] Es wird die Annahme getroffen, dass die Effekte in Verfahren ohne Befahrung des Waldbodens mit Maschinen nicht auftreten, da als Ursache der Wert- oder Massenminderung die Bodenstrukturveränderungen und nicht die „Baumfreiheit“ der Erschließungslinie angesehen werden. Zur Vollständigkeit ist der gegenteilige Fall dennoch in beiden Diagrammen dargestellt.

Die Zusammenhänge zwischen Zinssatz und Lage der Schnittpunkte ähneln auch hier dem oben beschriebenen, liegen aber deutlich weiter links.[35] So schneiden sich die Graphen beim Zinssatz 0,01% schon bei 0,48, bei 1% bei 0,56 sowie beim Zinssatz 2,5% bei 0,59. Daraus folgt, dass es eines deutlich kleineren Einflusses des Qualitätsfaktors bedarf, um Rentabilitätsgleichheit herzustellen. Tabelle 13 zeigt, dass nur 5 bis 6% Preisunterschied notwendig sind, damit die 40 m-Alternative rentabler wird.

Tab. 13: *Preisreduktion am Break-Even-Point*

		Preis-	verbleibender Preis		
	Zinssatz	faktor	20 m-Gassensystem	40 m-Gassensystem	Δ
	0,01%	0,48	90%	95%	5,0%
Relationen	1,00%	0,56	89%	94%	5,9%
	2,50%	0,59	88%	94%	6,3%

Da die Schnittpunkte in Bezug auf die verschiedenen Kalkulationszinssätze enger zusammenliegen, ist der Einfluss des Zinssatzes auf die Rentabilität geringer als bei der Volumenreduktion, aber dennoch klar erkennbar. Auch hier kommt es in Betrieben mit geringem Kalkulationszinssatz eher zu einem Rentabilitätsvorteil weiterer Abstände.

These 2c

Sowohl die Volumenminderung als auch die Holzentwertung führen bei einem geringeren Zinssatz eher zu einer Umkehr des Optimums als bei hohem Zins.

These 2d

Der Einfluss des Zinssatzes ist bei der Holzentwertung deutlich geringer als bei der Volumenminderung.

Praxissatz 2a

In Waldbeständen aus Baumarten, die auf Bodenverdichtung mit abnehmender Wuchsleistung und/oder Holzqualität reagieren, kann die Erweiterung des Gassensystems von 20 auf 40 m mit einem Rentabilitäsvorteil verbunden sein.

Praxissatz 2b

Bereits eine geringe Holzentwertung an der Gasse kann zu einem Vorteil des weiteren Gassensystems führen.

[35] Auch hier stellt die Seiltrassenerschließung keine Alternative dar, da hierzu eine Preisdifferenz von 21% bis 28% zur 40 m-Rückegassenerschlieung notwendig wäre.

4.4.2 Technische Befahrbarkeit der Rückegassen

Wie bereits dargelegt, hat der Boden der Rückegassen primär eine technische Funktion. Diese kann vornehmlich auf sensiblen Standorten durch das Befahren, insbesondere durch den Forwarder als sehr schwere Maschine, die obendrein mehrfach dieselbe Gasse befährt, gestört werden. Anders ist es in der gassenunabhängigen Alternative. Da hier keine Rad- beziehungsweise Raupenmaschinen zum Einsatz kommen, kommt es auch zu keiner Störung der technischen Befahrbarkeit.

An dieser Stelle kommt die Frage auf, in welchem Umfang Beeinträchtigungen auf den Rückegassen im 20 m- beziehungsweise im 40 m-Erschließungsnetz entstehen. Außerdem soll im Folgenden zwischen Beeinträchtigung und Schaden differenziert werden.

4.4.2.1 Störung und Schädigung der technischen Befahrbarkeit

Führt eine Störung des Bodens zu einer Beeinträchtigung der Befahrbarkeit und werden dadurch Maßnahmen notwendig, die darauf abzielen, die Befahrbarkeit zu erhalten beziehungsweise wieder herzustellen, liegt eine Schädigung vor. Jede Funktionsstörung wird durch den finanziellen Mittelaufwand zu einem wirtschaftlichen Schaden. Wird zum Beispiel die Rückegasse so sehr in Mitleidenschaft gezogen, dass ein Herstellen des Profils mit Heckschild oder zusätzlicher Maschine notwendig ist, stellt dies einen betrieblichen Aufwand dar. Somit liegt ein Schaden vor. Bloße Profilabdrücke im Oberboden ziehen keine Maßnahme und somit keinen Aufwand nach sich. Vorsorgende Maßnahmen wirken aus betriebswirtschaftlicher Sicht in gleicher Weise als Aufwendungen.

4.4.2.2 Quantitativer Zusammenhang zwischen Schäden auf den unterschiedlichen Gassenabständen

An dieser Stelle muss die Frage gestellt werden, welchen Einfluss der Rückegassenabstand auf die Schadenshöhe hat. Nach Schack-Kirchner et al. (2020) besteht ein Informationsdefizit beim Einfluss der Überfahrhäufigkeit beziehungsweise der Gesamtlast auf die Tragfähigkeit der Rückegasse. Daher soll im Folgenden jeder theoretisch denkbare Fall untersucht werden.

Grundsätzlich können drei Fälle voneinander unterschieden werden: Im ersten Fall kommt es im 20 m-Gassensystem zu einem Schaden mit einer bekannten Schadenshöhe. Tritt dieser im 40 m-Gassensystem zufällig nicht oder in kleinerem relativen Umfang auf, wird dieser Schaden im 40 m-System als „unterproportional“ bezeichnet.

In einem anderen Fall kommt es zu „streckenproportionalen“ Schäden. Diese liegen dann vor, wenn die relative Schadenhöhe (im Gegensatz zur absoluten) gleich ist. Dies begründet sich durch die reduzierte Gesamterschließungslänge bei weiteren Gassenabständen. Für die Erschließung mit 20 m- beziehungsweise mit 40 m-Gassen bedeutet das, dass der absolute Schaden im weiten Gassensystem (40 m) um 50% kleiner als im Aufschluss mit 20 m-Gassen ist.

Der dritte Fall beschreibt einen Schaden im 40 m-Erschließungssystem, der relativ betrachtet pro laufenden Meter Gasse größer als im engeren 20 m-System ist. Dies entsteht zum Beispiel dann, wenn der Boden durch die höhere Befahrungsintensität der weiten Gassenabstände mehr gestört wird, da pro Gasse ungefähr die doppelte Holzmenge gerückt werden muss. Dieser Fall wird als „überproportional“ bezeichnet.

Die Abbildung 52 verdeutlicht die drei Fälle grafisch. Zusätzlich ist eine starke Ausprägung des dritten Falls dargestellt.

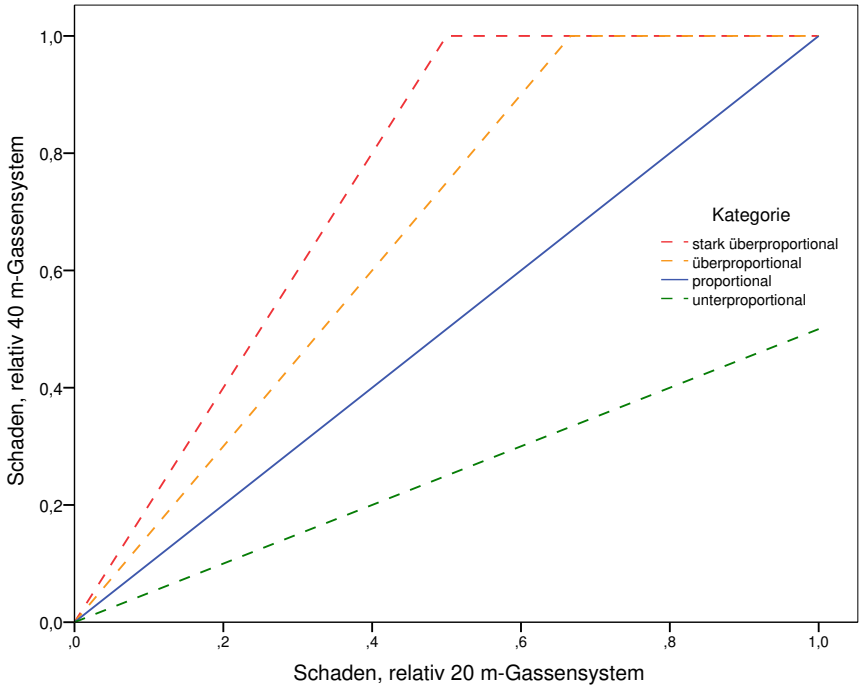


Abb. 52: *Zusammenhang der Schäden in den unterschiedlichen Erschließungssystemen*

Folgende Beispiele sollen dem Verständnis dieses Zusammenhangs dienen:

unterproportionaler Schaden
Diese Situation tritt zufällig nur dort auf, wo sensible Bereiche der Hiebsfläche von den 20 m-Rückegassen „geschnitten“ werden und bei der 40 m-Erschließung genau zwischen den Gassen liegen. Liegt zum Beispiel ein einzelnes punktförmiges Befahrungshindernis in Form einer „Nassstelle“ vor, ist die Wahrscheinlichkeit, dieses mit der Rückegasse zu treffen, im 20 m-Gassensystem deutlich höher als im 40 m-System. Dieser Effekt wird nur zufällig und auf kleiner Fläche auftreten. Je größer die betrachtete Fläche ist, umso unwahrscheinlicher wird ein Auftreten dieses Zusammenhangs. Im Folgenden soll daher der unterproportionale Schaden keine Berücksichtigung finden.

streckenproportionaler Schaden
Die Rückegasseneinfahrten sind besonders sensible Bereiche der Feinerschließung, die zum Teil stark beansprucht werden. Werden diese in einer bestimmten Länge unabhängig vom vorliegenden Rückegassenabstand befestigt, liegt ein streckenproportionaler Schaden vor.

überproportionaler Schaden
Kommt es auf den Rückegassen im 20 m-Abstand zu Schäden, ist durch die erhöhte Belastung der 40 m-Rückegassen damit zu rechnen, dass hier größere Schäden auftreten, da die gleiche Menge Holz über halb so viele Gassen bewegt werden muss.

Die in Abbildung 52 dargestellte starke Ausprägung des überproportionalen Falls entspricht dem Verhältnis 2:1. Das bedeutet, dass im 40 m-Gassensystem (relativ betrachtet) genau doppelt so viel Rückegassenlänge geschädigt ist als im 20 m-Gassensystem. Dieser Schaden wird in Bezug zum gerückten Holzvolumen („Holzmasse“) im Folgenden auch als „massenproportional“ bezeichnet.

4.4.2.3 Auswirkungen auf die Annuität

Um die Auswirkungen der geschilderten Effekte auf den Bodenertragswert und die Annuität zu beurteilen, bedarf es zunächst einiger Festlegungen bezüglich der Bedingungen des Modells:

Maßnahmengleichheit: Einer Berechnung wird über die gesamte Umtriebszeit hinweg immer die gleiche Sanierungsart unterstellt. Eine Änderung der Sanierungsart ist praktisch denkbar, würde durch die Vielzahl der möglichen Konstellationen keinen Zugewinn an Klarheit erzeugen.

zeitliche Homogenität: Um den Einfluss des Zeitpunktes der Maßnahme (im Sinne der technischen Vorsorge oder Sanierung) auszublenden, wird für jede Holzerntemaßnahme (alle Vornutzungen außer der Gassenaufhieb im Alter 30 und die Erntenutzung) eine entsprechende Vorsorge- beziehungsweise Sanierungsmaßnahme berechnet. Es wird sozusagen eine Gleichverteilung des Risikos über der Zeit unterstellt.

Beide Annahmen führen dazu, dass in dem „Schadausmaß“ sowohl der Anteil der betroffenen Rückegassenlänge als auch die Häufigkeit des Schadens im Bestandesleben beinhaltet ist. Wird zum Beispiel eine von fünf Rückegassen je Hektar im 20m-Gassensystem (also 20% der Rückegassen) geschädigt und tritt dieser Schaden nur nach einer von zehn Maßnahmen (10%) auf, dann beträgt das Schadausmaß 2% [36].

Die dargelegte Methode diente bis hierher der quantitativen Beschreibung eines Schadens an der technischen Befahrbarkeit. Doch jeder Schaden hat eine qualitative Ausprägung, d.h. er kann verschieden schwer sein. Die Bezugsgröße für diese Schwere ist der Aufwand, der vorsorglich oder sanierend betrieben werden muss, um den Schaden zu verhindern oder zu begleichen. Um die qualitativen Auswirkungen der Vorsorge beziehungsweise der Sanierung auf die Annuität abzubilden, werden im Folgenden drei verschiedene Sanierungsarten (stellvertretend für die Schwere eines Schadens) gewählt. Eine Sanierungsart, die vergleichsweise wenig Kosten pro laufenden Meter verursacht, ist das Abschieben des Mittelsteges mit dem Heckschild der Holzerntemaschine. Nach ForstBW (2012b) entstehen dabei Kosten in Höhe von 0,20 Euro/lfdm. Werden die Fahrspuren durch Bagger oder Raupe mit Material des Mittelsteges beziehungsweise der Randaufwölbungen verfüllt, kostet die Sanierung 2,00 Euro/lfdm. ForstBW (2012b) entstehen Kosten in Höhe von 14,00 Euro/lfdm, wenn standfestes Material angekauft, angefahren und mit Bagger eingebaut werden muss. Da eine solche Befestigung in der Regel zwischen 25 und 30 Jahre nutzbar ist, muss jeder Dekade ein entsprechender Anteil unterstellt werden. Für die vorliegenden Arbeit soll dieser Anteil 5,00 Euro/lfdm betragen.

[36] Das Schadausmaß ist somit ein Produkt aus dem Flächenanteil des Schadens gemessen am Gesamt-Feinerschließungssystem und der Häufigkeit des Auftretens bezogen auf ein Bestandesleben.

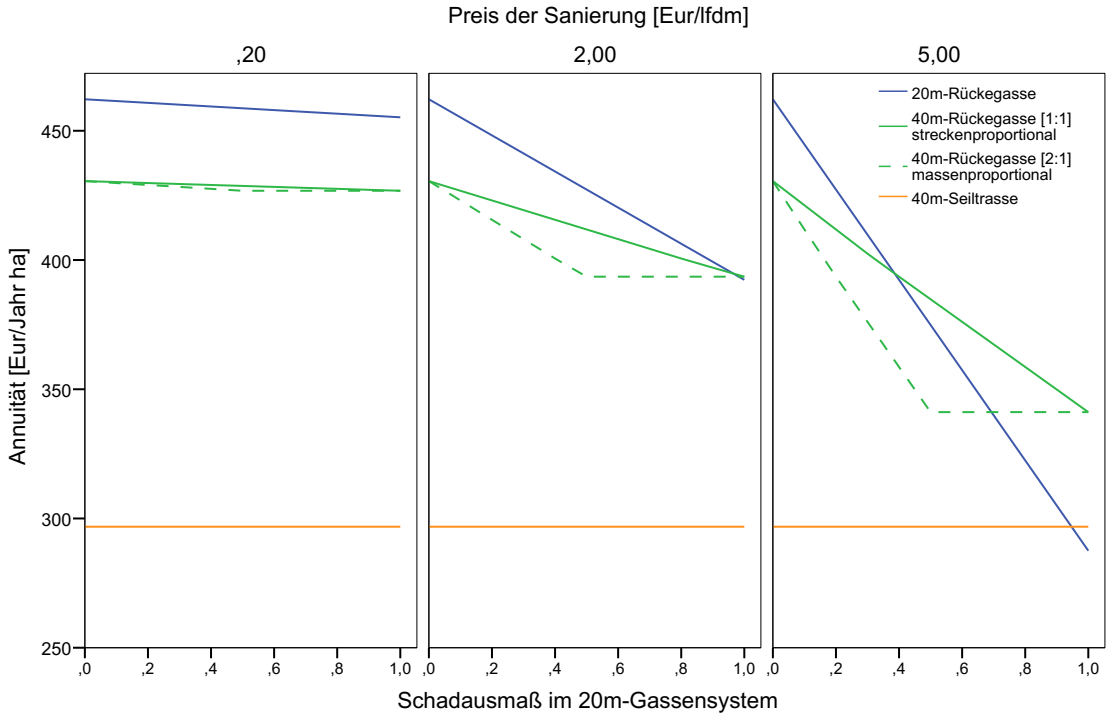


Abb. 53: *Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 0,01%*

Die Abbildung 53 zeigt die Annuitäten in Abhängigkeit der Maßnahme und dem Schadausmaß für einen Zinssatz von 0,01%. Im linken Teil der Darstellung sind die Annuitäten der unterschiedlichen Erschließungen für die einfachen Maßnahmen (0,20 Euro/lfdm) abgebildet. Es ist klar erkennbar, dass selbst bei Vollschädigung der Erschließungsanlage, das 20 m-Gassensystem die größten Annuitäten aufweist. Die Annuitätsverläufe der drei verschiedenen Erschließungen schneiden sich in keinem Fall. Im mittleren Teil der Abbildung sind die Annuitäten dargestellt, denen Sanierungskosten in Höhe von 2,00 Euro/lfdm unterstellt wurden. Auch hier hat die 20 m-Gasse deutliche Vorteile gegenüber der 40 m-Gasse. Erst bei einem Schadausmaß von ca. 97% (streckenproportionales Szenario) beziehungsweise 98% (massenproportionaler Fall) schneiden sich die Annuitätsverläufe, sodass die 40 m-Rückegasse wirtschaftlicher wird. Im schweren Fall (5,00 Euro/lfdm) schneidet die 20 m-Kurve die streckenproportionale Linie der 40 m-Erschließung bei 38% und die massenproportionale bei 69%.

Bei allen drei Simulationen wird deutlich, dass die Erschließung mit Rückegassen zu höheren Werten im Vergleich zur Seilkranrückung führt. Im Fall eines schweren Schadens in Kombination mit einem Schadausmaß von 95% unterliegt die 20 m-Rückegassen-Erschließung zwar der Bewirtschaftung mit Seiltrassen aller 40 m, dennoch weist der vollständige Ausbau des 40 m-Systems eine mit Abstand bessere Rentabilität auf.

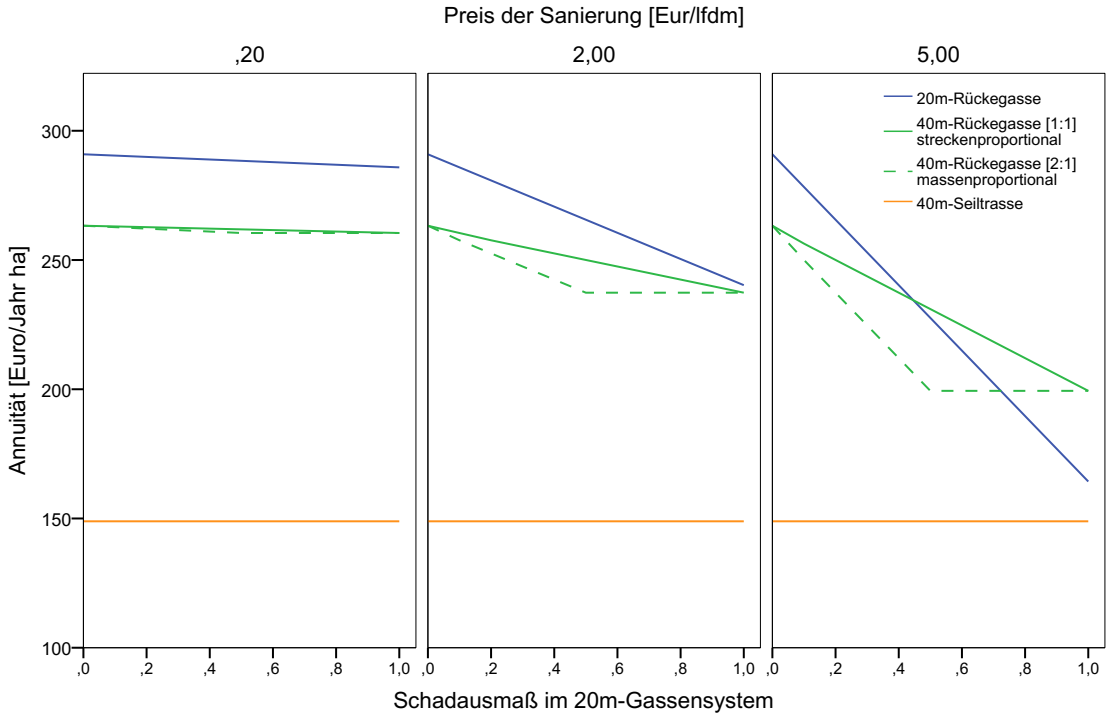


Abb. 54: *Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 1,0%*

Die Abbildung 54 veranschaulicht die geschilderten Zusammenhänge für einen Zinsfuß von 1%. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur in geringem Maße von denen des sehr geringen Zinssatzes. Kostet die Sanierung 0,20 beziehungsweise 2,00 Euro/lfdm liegt der wirtschaftliche Vorteil deutlich bei der Erschließung mit Rückegassen im Abstand von 20 m. Der Vorteil der 40 m-Rückegassenerschließung wird im rechten Teil der Abbildung sichtbar. Er entsteht je nach unterstellten Zusammenhang zwischen einem Schadanteil in Höhe von 44% und 72%. Bei diesem Zinssatz entsteht unter keiner Konstellation ein „break even point“ mit der Konstanten, die eine Erschließung mit Seiltrassen unterstellt.

Das Ergebnis ändert sich bei einem hohen Zinssatz nicht wesentlich. Die Darstellung 55 zeigt die Ergebnisse dieses Zinssatzes. Auch hier bewirken geringe Wiederherstellungskosten (0,20 Euro/lfdm) keinen Effekt. Verursacht die Wiederherstellung höhere Kosten (2,00 Euro/lfdm) entsteht ein Vorteil der 40 m-Rückegassenerschließung wie gewohnt erst bei sehr hohen Schadanteilen (99%). Beim Einbau von fremden Material erreicht die 40 m-Rückegasse ihren Vorteil im Bereich zwischen 40% und 71%.

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass die Rentabilität der Erschließung mit Rückegassen im Abstand von 40 m beziehungsweise mit Seiltrassen der Rentabilität des Systems mit 20 m-Rückegassen in der Variante mit geringen sowie weitgehend in

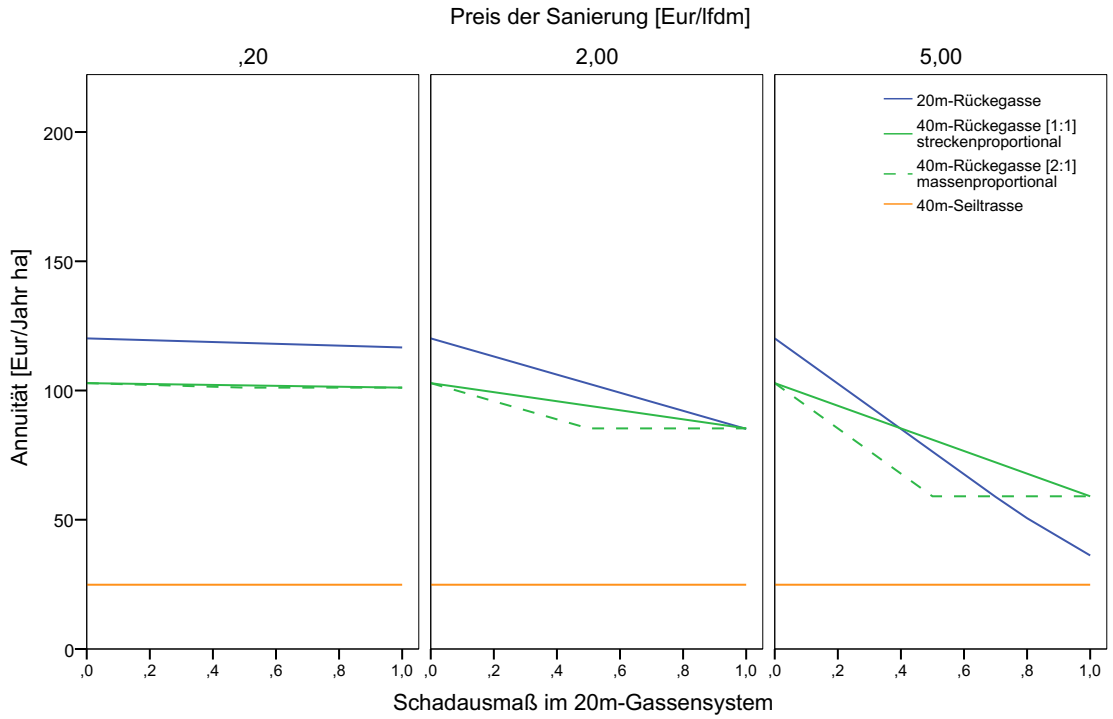


Abb. 55: *Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über der Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 2,5%*

der Variante mit mittleren Wiederherstellungskosten unterliegt. Der Zinssatz hat eher einen untergeordneten Einfluss auf dieses Ergebnis. Werden hohe Sanierungskosten unterstellt, liegen die Schnittpunkte der beiden Gassensysteme je nach unterstelltem Szenario in einem Bereich zwischen ca. 40% und 70% (vgl. Tabelle 14).

Tab. 14: *Für Annuitätengleichheit notwendiges Schadausmaß in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schadschwere*

		Schadschwere [Euro/lfdm]		
	Zinssatz	0,20	2,00	5,00
Schadausmaß	0,01%	-	97 bis 98%	38 bis 69%
	1,00%	-	-	44 bis 72%
	2,50%	-	99%	40 bis 71%

Tab. 15: *Annuität des 40 m-Gassensystems in Relation zur Annuität des 20 m-Gassensystems ohne und mit voller (streckenproportionaler) Schädigung der technischen Befahrbarkeit in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schadschwere*

		Relation	Schadschwere [Euro/lfdm]		
	Zinssatz	ohne Schaden	0,20	2,00	5,00
	0,01%	0,93%	94%	100%	119%
Relationen	1,00%	0,91%	91%	99%	121%
	2,50%	0,86%	87%	100%	163%

Die neun Diagramme der Abbildungen 53 - 55 zeigen für drei Zinssätze die Entwicklung der Annuität unterschiedlicher Erschließungssysteme[37]. Bisher wurde angenommen, dass die Art der Sanierungsmaßnahme in beiden Gassensystemen gleich ist. Es ist dennoch möglich, dass sich der Schaden im 40 m-Gassensystem nicht einfach nur quantitativ größer ist, sondern sich auch in der Qualität deutlich von dem Schaden des 20 m-Gassensystems unterscheidet. Für diesen Fall kann die blaue Linie der 20 m-Erschließung mit der grünen Linie der 40 m-Gassensysteme eines „qualitativ-größeren" Schadens (weiter rechts) verglichen werden. In jedem Fall sind Schnittpunkte („Break-even-Points") der Graphen ausgeschlossen, da sich der Annuitätenabstand mit zunehmendem Schadausmaß vergrößern statt verkleinern würde. Dennoch ist auch dieses Szenario für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit interessant, da der beschriebene „Vergrößerungseffekt"– die Zunahme der Annuitätendifferenz – die Annäherung auf Grund anderer Effekte gewissermaßen „aufzehren" würde.

Zusammenfassend kann über Zinssätze und Schadschwere (Sanierungskosten) hinweg festgehalten werden, dass die Graphen der terrestrischen Erschließungssysteme sich einander annähern, sofern von einem streckenproportionalen Fall (1:1) ausgegangen wird. Im massenproportionalen Fall verlaufen die Graphen annähernd parallel. Das heißt, nur der dargestellte streckenproportionale Fall führt zu einer Verringerung des Annuitätenabstandes. Der simulierte massenproportionale Fall (2:1 – als Sonderfall der überproportionalen Fälle) lässt den Abstand nicht kleiner werden. Fälle dazwischen sind denkbar, in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht dargestellt und entsprechend einzuordnen.

Die Tabelle 15 zeigt die Relationen der Annuität des 40 m-Gassensystems ohne und mit voller streckenproportionaler Schädigung der technischen Befahrbarkeit. Es ist deutlich erkennbar, dass der Abstand der 40 m-Gasse zum finanziellen Optimum, infolge der notwendigen Sanierung eines jeden Schadens geringer wird. Das Ausmaß dieser Verringerung ist nicht nur von der Schadschwere, sondern auch vom Kalkulationszinssatz abhängig. Der Einfluss des Zinses steigt mit zunehmender Schadschwere.

[37] Die numerische Übersicht aller Annuitäten bei voller Schädigung der technischen Befahrbarkeit ist in Tabelle 31 im Anhang dargestellt.

These 3a

Ein streckenproportionaler Schaden der technischen Befahrbarkeit bewirkt eine Verringerung des Annuitätenabstandes zwischen den terrestrischen Feinerschließungssystemen.

Wie in den Abbildungen 53 - 55 erkennbar, hebt ein massenproportionaler Schaden diesen Effekt (These 3a) solange auf, bis das 40 m-Gassensystems vollständig geschädigt ist. Zur Erinnerung: Das 20 m-Gassensystem ist bei diesem Punkt erst zur Hälfte geschädigt. Wird es weiter geschädigt, nähern sich beide Annuitäten wieder an, da im 40 m-Gassensystem bereits der Tiefpunkt erreicht ist. Bis dahin bleibt der Abstand annähernd gleich. Auf Grund der gleichmäßigen Absenkung der Annuitäten beider terrestrischen Erschließungssysteme nimmt die relative Annuität in Abhängigkeit vom Zinssatz sowie von der Schadschwere mehr oder weniger ab (vgl. Abbildung 66 des Anhangs, Seite V).

These 3b

Ein überproportionaler Schaden wirkt dieser Verringerung des Annuitätenabstandes entgegen und hebt sie bei einem Verhältnis von 2:1 (Massenproportionalität) auf. Erst wenn das 40 m-Gassensystem komplett geschädigt ist, kommt es bei fortschreitender Schädigung im 20 m-System wieder zu einer Annäherung und Steigerung der relativen Annuität, die bis zu diesem Punkt leicht gesunken ist.

Die Abbildung 56 zeigt die relative Annuität des 40 m-Gassensystems ohne und mit (vollständiger) Schädigung in Abhängigkeit des Zinssatzes und der Schwere des Schadens.[38] Wie zu erkennen ist, macht sich ein leichter Schaden an der technischen Befahrbarkeit hinsichtlich der oben beschriebenen Annäherung kaum bemerkbar (vgl. Tabelle 15). Ein mittelschwerer Schaden lässt die Annuitäten bereits auf das Niveau der Annuität des 20 m-Gassensystems steigen. Ein schwerer Schaden bewirkt ein deutliche Umkehr des finanziellen Optimums. Für alle gilt: je größer der Zinssatz und je größer die Schadschwere, desto größer die relative Annuität.

These 3c

Die Annäherung (relative Annuität) ist umso größer, je streckenproportionaler der Schaden, je höher der Aufwand der Sanierung und je größer der Kalkulationszinssatz ist.

[38] Die Abbildung besitzt gleichermaßen Gültigkeit für den streckenproportionalen wie für den massenproportionalen Fall, da sich beide Verläufe in dem Punkt der vollständigen Schädigung wieder treffen.

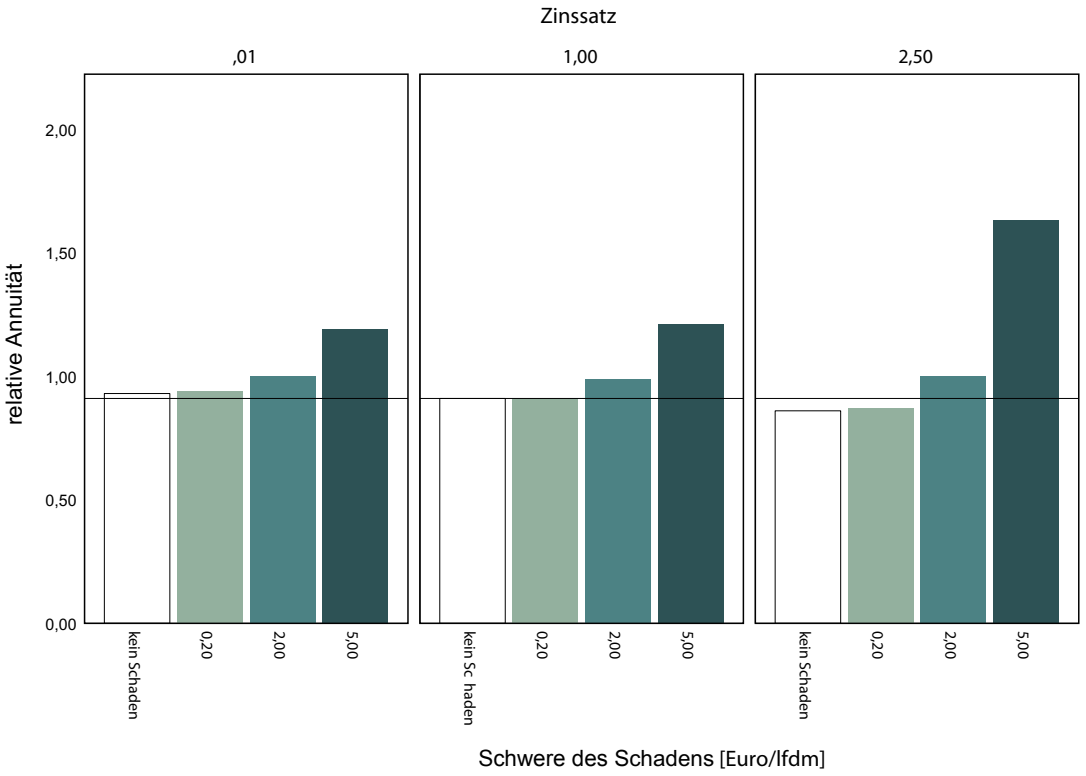


Abb. 56: *relative Annuität des 40 m-Gassensystems bei vollständiger Schädigung und in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schwere des Schadens (die Bezugslinie wurde auf Höhe der relativen Annuität (0,9) für den Zinssatz 1,0%, ohne Schäden eingezeichnet)*

Vor dem Hintergrund der möglichen qualitativ-größeren Ausprägung eines Schadens im 40 m-Gassensystem – wie auf Seite 127 beschrieben – kann eine weitere These beschrieben werden:

These 3d

Eine durch Vergrößerung des Rückegassenabstandes implizierte Zunahme der Schadschwere dämpft die Annäherung (These 3c). Bei starker Zunahme der Schadschwere führt dies schließlich zur Vergrößerung der Annuitätendifferenz.

Die vier Thesen erlangen praktische Bedeutung: Eine vollständige leichte Schädigung verursacht nur eine Annäherung von 0,6 bis 1,1 Prozentpunkte (vgl. Tabelle 15). Der Effekt ist so gering, dass er beinahe vernachlässigt werden kann. Eine vollständige mittelschwere Schädigung führt bereits zu einer Annäherung von 7,2 bis 14,6 Prozentpunkten, welche zur Optimalitätsänderung führt. Schwere Schäden führen entsprechend zu größeren Verschiebungen. Hier entstehen in Abhängigkeit vom Zinssatz und von der

beobachteten Proportionalität „Break-even-Points“ bei ca. 40% bzw. ca. 70%. Die Abbildung 57 zeigt, unter welchen Bedingungen welcher Abstand anzuraten ist.

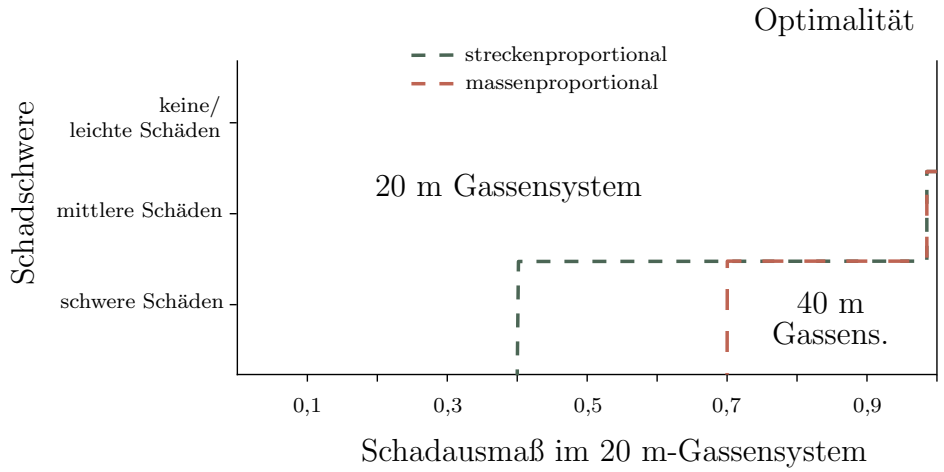


Abb. 57: *Optimalität des Rückegassenabstandes in Abhängigkeit von Schadschwere, -ausmaß und -proportionalität ohne Berücksichtigung weiterer Effekte*

Praxissatz 3a

Leichte und mittelschwere Schäden können bei streckenproportionaler Ausprägung und in Kombination mit anderen Effekten zu einem Rentabilitätsvorteil des 40 m-Gassensystems beitragen.

Praxissatz 3b

Ein streckenproportionaler Schaden, wie das Instandsetzen oder Befestigen der Gasseneinfahrten, lässt den Rentabilitätsunterschied zwischen 40 m- und 20 m-Gassenerschließung umso geringer werden, je teurer die Sanierung/ die Vorsorge und je größer der Kalkulationszinssatz ist.

Praxissatz 3c

Bei massenproportionalen Schäden ist die 20 m-Gasse in der Regel vorteilhaft. Sobald aber der massenproportionale Schaden so schwer ausfällt, dass ca. 70% der Gassen vollständig ausgebaut werden müssen, ist eine Erschließung mit weiteren Gassenabständen vorzuziehen.

Praxissatz 3d

Wird der Schaden mit der Vergrößerung des Rückegassenabstandes von 20 auf 40 m schwerer (wird zum Beispiel eine Steigerung von Spurtyp 2 zu Spurtyp 3 durch Zunahme der Befahrungsintensität beobachtet), sollte von weiten Gassenabständen Abstand genommen werden.

4.4.3 Effekte auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Forstwirtschaft

Aus dem leitfadengestützen Interview mit der Nationalparkverwaltung[39] ging hervor, dass unter dort vorzufindenden Bedingungen Erschließungslinien wegebauähnlichen Maßnahmen unterzogen werden, die nicht auf den Erhalt der technischen Befahrbarkeit abzielen, sondern auf die gesellschaftliche Akzeptanz (vgl. Abbildung 65 im Anhang, Seite IV). Daraus kann geschlussfolgert werden, dass dies eine Zielgröße der ordnungsgemäßen Bewirtschaftung darstellt, die einerseits zu erhalten ist und andererseits durch die Befahrung, im Speziellen durch die Sichtbarkeit der Fahrspuren auf dem Waldboden offensichtlich bedroht wird.

Nur in diesem Zusammenhang entfaltet dieser externe Effekt eine interne Wirkung. Durch im Betrieb anfallende Kosten sinken der Bodenertragswert und die Annuität entsprechend. Somit können die Auswirkung dieses Effektes (zumindest in Teilen) anhand der ökonomischen Größen im beschriebenen Modell abgebildet werden.

Um die Akzeptanz der Waldbesucher zu erhalten, werden auch hier Maßnahmen zur Spurbeseitigung (Einebnen der Fahrspuren mit Schild oder Minibagger) ergriffen, wie jene, die im Kapitel 4.4.2 durch die geringen und mittleren Sanierungskosten beschrieben werden. Es gelten demnach die gleichen Zusammenhänge sowie die geschilderten Ergebnisse. Aus diesem Grund wird auf das Formulieren zusätzlicher Thesen verzichtet werden. Folgende drei Praxissätze können ergänzt werden.

Praxissatz 3e

Kosmetische Sanierungen zum Erhalt der gesellschaftlichen Akzeptanz können bei streckenproportionaler Ausprägung und in Kombination mit anderen Effekten zu einem Rentabilitätsvorteil des 40 m-Gassensystems beitragen.

Praxissatz 3f

Ein massenproportionaler kosmetischer Schaden trägt erst zu einem Rentabilitätsvorteil des 40 m-Gassensystems bei, wenn dieses vollständig geschädigt ist.

Praxissatz 3g

Bei vollständiger Sanierung einer mittelschweren kosmetischen Schädigung des 20 m-Gassensystems entsteht Rentabilitätsgleichheit mit dem 40 m-Gassensystem.

[39] Die Verwaltung des Nationalparks Sächsische Schweiz ist in die sächsische Forstverwaltung integriert und wurde ebenfalls befragt (siehe Kapitel 3.3.1).

4.4.4 Waldbauliche Effekte des Feinaufschlusses

Im Kapitel 4.4.1 wurden ausführlich die potentiellen Beeinträchtigungen durch die Erschließung mit Rückegassen vor dem Hintergrund einer Abnahme der Volumen- beziehungsweise Wertleistung des Bestandes beschrieben. Darüber hinaus kann eine Vergrößerung des Rückegassenabstandes aber auch positive Wirkungen auf die Rentabilität der Holzproduktion entfalten.

Bereits Erler (2005) rechnet mit positiven Effekten weiter Gassensysteme auf Grund erweiterter waldbaulicher Freiheit. Er gründet seine Hypothese auf den mehr als doppelt so breiten Bestandesblöcken der Erschließung mit 40 m-Rückegassen im Vergleich zu einem konventionellen Aufschluss mit Rückegassen alle 20 m. Die Arbeitsbereiche sind bei der letzteren nur 16 m breit, hingegen stehen bei dem weiteren Gassennetz Blöcke von 36 m Breite zur Verfügung.

Waldbauliche Ziele können durchaus verschiedene Dimensionen aufweisen. Neben solchen, die nur schwer in einer Rentabilitätsrechnung fassbar sind, wie Stabilität, Vitalität oder Struktur, lassen sich andere sehr gut in monetären Einheiten ausdrücken. Dazu gehört neben der Qualität des Holzes auch die Dimension. Beide Ziele sind durch die im Modell geschaffenen Faktoren (Vergleich Kapitel 4.4.1) abbildbar. Wenn zum Beispiel die Hypothese unterstellt wird, dass durch die erhöhte waldbauliche Handlungsfreiheit im 40 m-Gassensystem ein besserer Holzpreis oder mehr Volumen erzielt werden, können die geschaffenen Faktoren um die Höhe der „Mehrleistung“ verändert werden, wodurch die Rentabilität der 40 m-Erschließung steigt.

Die Thesen 2a-d gelten entsprechend. Folgende zusätzliche Praxissätze sollen das Ergebnis anschaulich machen.

Praxissatz 2c

In Waldbeständen aus Baumarten, bei denen es möglich ist, die Holzqualität und/ oder die Wuchsleistung durch breitere Behandlungsblöcke zu steigern, kann die Erweiterung des Gassensystems mit einem Rentabilitätsvorteil verbunden sein, mindestens aber zu diesem beitragen.

Praxissatz 2d

Vor allem eine geringe Verbesserung der Holzqualität kann zu einem Vorteil des weiteren Gassensystems führen.

4.5 Simple Betterness Method nach Klemperer

4.5.1 Biologische Produktionsfunktion des Bodens

Die Modellierung der Flächeninanspruchnahme der Rückegasse und der damit verbundenen negativen Effekte auf den Waldboden und seine Produktivkraft hat zwei Wege aufgezeigt, wie die Auswirkungen berechnet werden können. Da die im Modell verwendeten Faktoren dem Waldbesitzer in den allermeisten Fällen unbekannt bleiben, hilft das Modell nur bedingt bei der Wahl der optimalen Handlungsalternative.

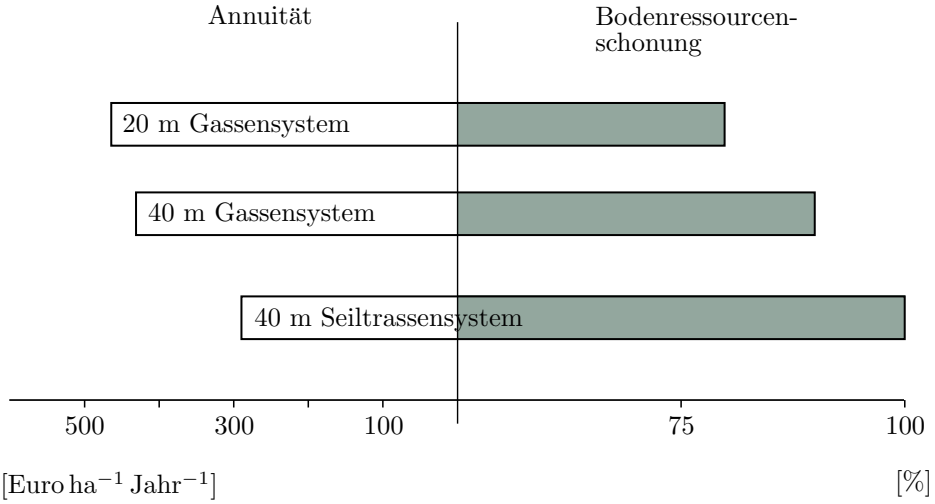


Abb. 58: *Gegenüberstellung der Annuität und der Bodenressourcenschonung der drei Handlungsalternativen für den Zinssatz 0,01%*

Die Abbildung 58 zeigt die drei Erschließungssysteme als Handlungsalternativen. Der Annuität (hier bei einem Zinssatz von 0,01%) ist hier die Schonung der Bodenressource gegenübergestellt. Letztere ist ein theoretischer Wert, der angibt, wie viel Waldboden unbefahren bleibt, und kann wie folgt berechnet werden:

$$BRS[\%] = 100 - FIA\% = (1 - \frac{Gassenbreite}{Gassenabstand}) \cdot 100 \tag{46}$$

Wie zu erkennen ist, scheidet kein Erschließungssystem von den weiteren Betrachtungen aus, da alle dominant gegenüber einem anderen sind. Das gilt im Übrigen auch bei Unterstellung der Zinssätze 1,0% und 2,5%.

4.5.1.1 Opportunitätskosten des 40 m-Gassensystems

Die Grenzannuität (Opportunitätskosten) beträgt im vorliegenden Fall (0,01%) 31 Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$. Sie reduziert sich mit steigendem Zinssatz auf 28 Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$ (1,0%) beziehungsweise 17 Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$ (2,5%).

Die Tabelle 16 zeigt die Opportunitätskosten absolut sowie in Bezug zur optimalen Annuität. Wie zu erkennen ist, nehmen die absoluten Opportunitätskosten zwar mit steigendem Zinssatz ab, jedoch steigen die relativen Opportunitätskosten. So muss ein Waldbesitzer mit kaum vorhandenen Kapitalkosten (0,01%) auf nur 7% seiner jährlichen Bodenrente verzichten, um 10% mehr Boden zu schonen. Dahingegen muss der Waldbesitzer mit hohem Zinssatz (2,5%) auf doppelt so viel verzichten, um den gleichen Effekt zu erlangen. Der Waldbesitzer mit geringen Kalkulationszinssatz wird demzufolge eher zu dem Entschluss kommen, dass der Nutzen aus der Bodenschonung den finanziellen Nutzenentgang rechtfertigt, und demzufolge in die Erschließung mit weiten Gassenabstand „investieren“.

Tab. 16: *absolute und relative Opportunitätskosten der Bodenressourcenschonung durch 40 m-Gassensysteme*

	Opportunitätskosten	
Zinssatz	absolut [Euro $Jahr^{-1}$ ha^{-1}]	relativ
0,01%	31	7%
1,00%	28	10%
2,50%	17	14%

4.5.1.2 Opportunitätskosten des 40 m-Seiltrassensystems

Die maximale Bodenschonung kann durch den Verzicht der Befahrung erzielt werden. Für die hierdurch erreichte vollständige Bodenschonung ist je nach Zinssatz auf 36%, 49% oder 79% der Annuität zu verzichten.

Tab. 17: *absolute und relative Opportunitätskosten der Bodenressourcenschonung durch 40 m-Seiltrassensysteme*

	Opportunitätskosten	
Zinssatz	absolut [Euro $Jahr^{-1}$ ha^{-1}]	relativ
0,01%	165	36%
1,00%	142	49%
2,50%	95	79%

These 4a

Die Steigerung der Bodenressourcenschonung von 80 auf 100% ist mehr als fünfmal teurer als die Erhöhung von 80 auf 90%.
Der Bodenschutz durch 40 m-Rückegassenerschließung hat demnach Effizienzvorteile gegenüber dem durch Seilkranverfahren.

Für den Waldbesitzer stellen die errechneten Oppotunitätskosten ein finanzielles Entscheidungskriterium bereit. Natürlich muss individuell vom Wirtschafter auf der Ebene jedes einzelnen Bestandes abgewogen werden, ob die Zunahme der Bodenschonung ein Verzicht auf einen bestimmten Teil der Annuität rechtfertigt. Maßgeblich werden hier die Ziele des Waldbesitzers und seine Risikopräferenz sein. Aber auch der Standort, seine Belastbarkeit und die daraus resultierende Wahrscheinlichkeit einer Überlastung werden bei dieser Frage zu berücksichtigen sein.

Praxissatz 4a

Die Minimierung der Bodeninanspruchnahme von 10 auf 0% ist viermal teurer als die von 20 auf 10%.

Die Standorte des Freistaates Sachsens werden durch die Richtlinie „Holzerntetechnologien“ klassifiziert. Mittels der Bodenfeuchte, der Horizontfolge und der Lage im Relief werden die Standortsformen in unterschiedliche Befahrungsklassen (B-Klassen) eingeordnet und anhand der Verdichtungsempfindlichkeit unter besonderer Berücksichtigung der Körnungsart und des Skelettgehaltes in zwei Sensibilitätsklassen (S-Klasse) unterschieden (siehe Tabelle 32 im Anhang).

Ein Ziel der Richtlinie ist es, die Fläche „auf der durch Befahrung eine Beeinträchtigung des Bodens auftreten kann“[40], zu minimieren. Die sensiblen, befahrungsempfindlichen Böden (S2-Standorte) sollten also mehr geschont werden als weniger sensible (S1-Standorte). Indem die Befahrung auf ein Gassennetz im Abstand von 40 m konzentriert wird, nimmt der Freistaat Sachsen bewusst Mehrkosten in Kauf und reduziert dadurch seine Annuität, um dadurch 10% mehr Boden zu schonen. Unterstellt man dem öffentlichen Haushalt einen sehr geringen Kalkulationszinssatz, liegen die Opportunitätskosten bei 31 Euro ha^{-1} $Jahr^{-1}$ beziehungsweise 7%. Bei ungefähr 106 Tsd. ha sensibler Standorte in befahrbaren Lagen des Sächsischen Staatswaldes (das entspricht ca. 54%; siehe Tabelle 32 im Anhang) fallen durch die Erweiterung des Rückegassenabstandes theoretisch jährliche Opportunitätskosten in Höhe von ca. 3,3 Mio. Euro für den Bodenschutz an[41].

[40] Sachsenforst (2006), S. 10.
[41] Die Opportunitätskosten wurden für einen Fichtenbestand errechnet. Sie besitzen daher keine allgemeine Gültigkeit. Die Hochrechnung auf die Staatswaldfläche des Freistaates Sachsen dient nur als Größenordnung der Veranschaulichung.

4.5.2 Waldbauliche Effekte des Feinaufschlusses

Neben der Schonung der Ressource Boden soll auch der waldbauliche Einfluss des Feinaufschlusses der Einkommensfunktion gegenübergestellt werden. Die Abbildung 59 zeigt die drei Handlungsalternativen.

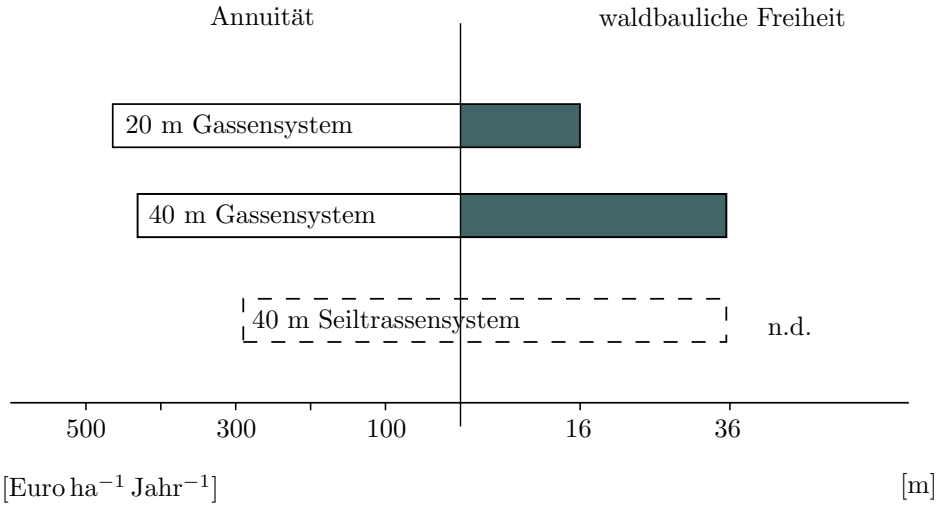


Abb. 59: *Gegenüberstellung der Annuität und der waldbaulichen Freiheit der drei Handlungsalternativen für den Zinssatz 0,01%*

Der Annuität ist nun die „waldbauliche Freiheit“ gegenübergestellt. Sie kann mit der Breite beschrieben werden, die in den Feinerschließungssystemen zwischen zwei Linien verbleibt und waldbaulich genutzt werden kann:

$$WF = Gassenabstand - Gassenbreite \tag{47}$$

Wie zu erkennen ist, ist die gassenunabhängige Alternative (40 m Seiltrassensystem) gegenüber der Alternative „40 m Gassensystem“ nicht dominant.

These 4b

Feinerschließungssysteme mit Seiltrassen anstatt Rückegassen bringen bei gleichem Linienabstand hinsichtlich der waldbaulichen Freiheit keinen zusätzlichen Effekt, bei deutlich größeren Opportunitätskosten.

Demzufolge kann für die Praxis festgehalten werden:

Praxissatz 4b

Nur vor dem Hintergrund größerer waldbaulicher Handlungsfreiheit ist von Seilkranverfahren abzuraten, da der gleiche Effekt durch Rückegassen (im gleichen Abstand) mit weniger Kosten erreicht werden kann.

Tab. 18: *absolute und relative Opportunitätskosten der waldbaulichen Freiheit durch 40 m-Gassensysteme*

	Opportunitätskosten	
Zinssatz	absolut [Euro $\text{Jahr}^{-1}\,\text{ha}^{-1}$]	relativ
0,01%	31	7%
1,00%	28	10%
2,50%	17	14%

Die Tabelle 18 beschreibt die absoluten und relativen Opportunitätskosten. Je nach Zinssatz muss auch hier auf 7% bis 14% der Annuität verzichtet werden, um in den Genuss einer größeren Waldbaulichen Freiheit zu kommen.

4.6 Kombination der Effekte

Nachdem die verschiedenen Effekte beschrieben und modelliert sind, können diese nun zusammengeführt werden. Da die Volumen- und Qualitätsänderung sowie die Schäden nahezu linear wirken, wurde ein „Optimalitätsdreieck der Feinerschließung“ entwickelt.

Die Abbildung 60 zeigt das Optimalitätsdreieck exemplarisch für den Zinssatz 1% sowie für schwere streckenproportionale Schäden: In den Ecken sind die Schwellenwerte (Mindestwerte) für die Volumen- und die Qualitätsdifferenz sowie für das Schadausmaß dargestellt, bei denen die 40 m-Gassenerschließung dem engen Gassenabstand überlegen ist. Dazwischen zeigt es beispielhaft vier Kombination dieser Mindestanforderungen, welche ebenso zur Optimalität der 40 m-Rückengassenerschließung führen.

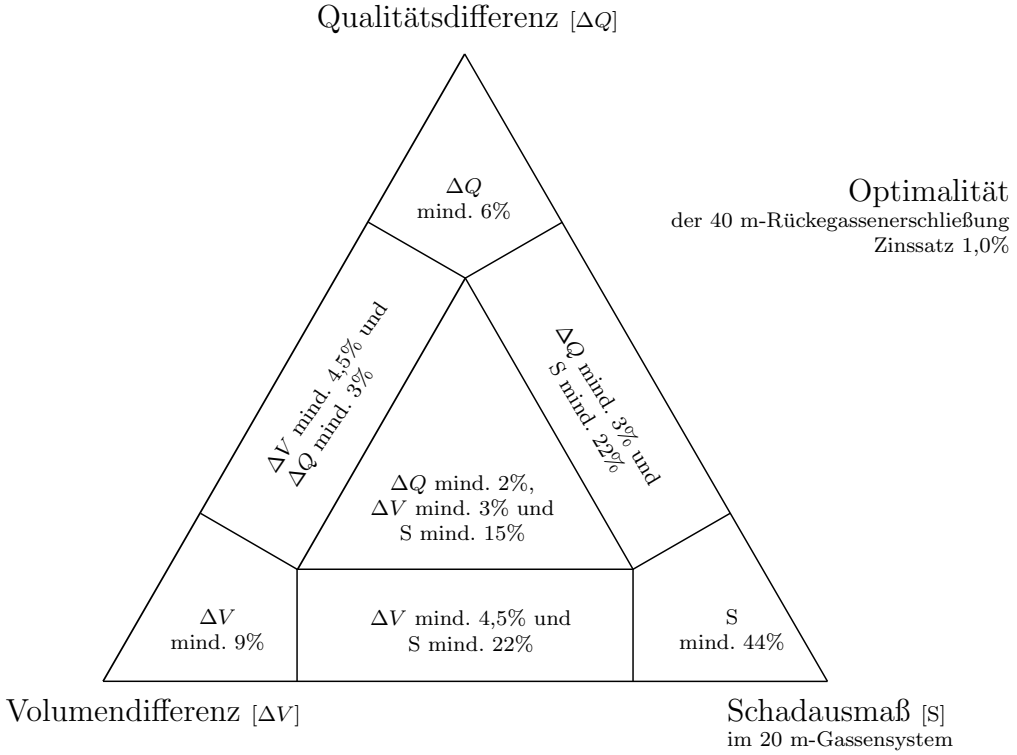


Abb. 60: *Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel schwerer streckenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0%*

Am dargestellten Beispiel ist zu erkennen, dass die verschiedenen Effekte nahezu linear miteinander kombiniert werden können. Die Optimalität der 40 m-Gasse ergibt sich demnach aus der Ausprägung der drei Parameter:

$$a_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{mind\Delta V} \tag{48}$$

$$a_{\Delta Q} = \frac{\Delta Q}{mind\Delta Q} \tag{49}$$

$$a_S = \frac{S}{mindS} \tag{50}$$

wobei

$a_{\Delta V}$ der Anteil an der Mindest-Volumendifferenz,

ΔV die tatsächliche Volumendifferenz,

$mind\Delta V$ die Mindest-Volumendifferenz zur Optimalität der 40 m-Rückegassen,

$a_{\Delta Q}$ der Anteil an der Mindest-Qualitätsdifferenz,

ΔQ die tatsächliche Qualitätsdifferenz,

$mind\Delta Q$ die Mindest-Qualitätsdifferenz zur Optimalität der 40 m-Rückegassen,

a_S der Anteil am Mindest-Schadausmaß,

S das tatsächliche Schadausmaß im 20 m-Gassensystem und

$mindS$ das Mindest-Schadausmaß (im 20 m-Gassensystem) zur Optimalität der 40 m-Rückegassenerschließung sind.

Im massenproportionalen Schadfall kommt es erst ab einem Schadausmaß von 50% (in Bezug auf das 20 m-System) zu einer Annäherung der Systeme. Bis dahin verlaufen die Graphen parallel. Daher errechnet sich der Anteil am Mindest-Schadausmaß hier wie folgt:

$$a_{S_{massenprop}} = \frac{S - 50}{mindS - 50} \Leftrightarrow S \geq 50\% \tag{51}$$

Für Schadausmaße, die kleiner als 0,5 sind gilt:

$$a_{S_{massenprop}} = 0 \Leftrightarrow S < 50\% \tag{52}$$

Für die Wahl des optimalen Gassenabstandes gilt folgende Optimalitätsregel:

$$a_{\Delta V} + a_{\Delta Q} + a_S \geq 1 \curvearrowright 40\ m\ optimal \tag{53}$$

beziehungsweise

$$a_{\Delta V} + a_{\Delta Q} + a_S < 1 \curvearrowright 20\ m\ optimal \tag{54}$$

Die Tabelle 19 fasst die zur Optimalität der 40 m-Rückegassenerschließung notwendigen Mindestwerte für die Volumen- und Qualitätsdifferenz sowie für das Schadausmaß zusammen. Für leichte Schäden (unabhängig vom Zinssatz) sowie für mittelschwere

Tab. 19: *Mindestwerte für Volumen- und Qualitätsdifferenz sowie Schadausmaß zur Optimalität der 40 m-Rückegassenerschließung*

			Schaden					
			streckenprop.			massenprop.		
	Volumen	Qualität	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Zinssatz	$mind\Delta V$	$mind\Delta Q$	Mindest-Schadausmaß ($mindS$)					
0,01%	6,9%	5,0%	976%	97%	38%	976%	98%	69%
1,00%	8,9%	5,9%	1233%	111%	44%	1233%	111%	72%
2,50%	10,3%	6,3%	988%	99%	40%	988%	99%	71%

Schäden bei einem Zinssatz von 1% liegen die Werte über 100%. Dies sind theoretische Schnittpunkte der Graphen. Da das Schadausmaß Werte über 1,0 nicht annehmen kann, reichen hier Schäden allein nicht aus, um einen Rentabilitätsvorteil des weiteren Erschließungssystems zu begründen.

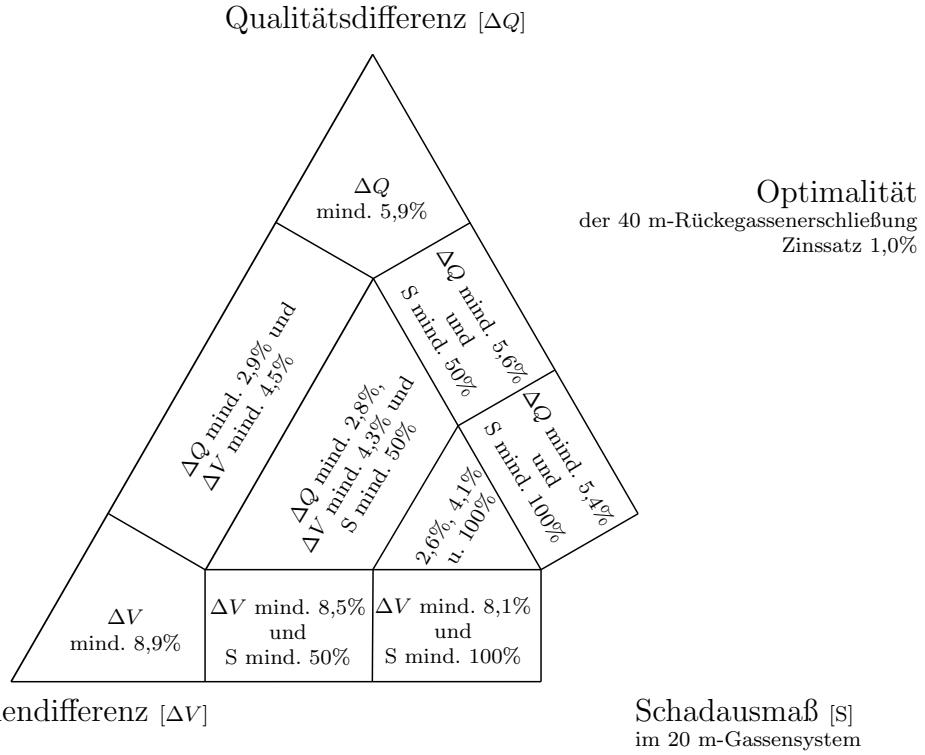


Abb. 61: *Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel leichter streckenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0%*

Die Abbildung 61 zeigt mögliche Kombinationen am Optimalitätsdreieck für den Zinssatz 1% und leichte streckenproportionale Schäden. Wie zu erkennen ist, führt eine vollständige leichte Schädigung der Rückegassen nicht zur Optimaliät der 40 m-Gasse.

Erst durch das Auftreten weiterer Effekte kann diese begründet werden. In der Abbildung sind beispielhaft sechs verschiedene Kombination beschrieben.

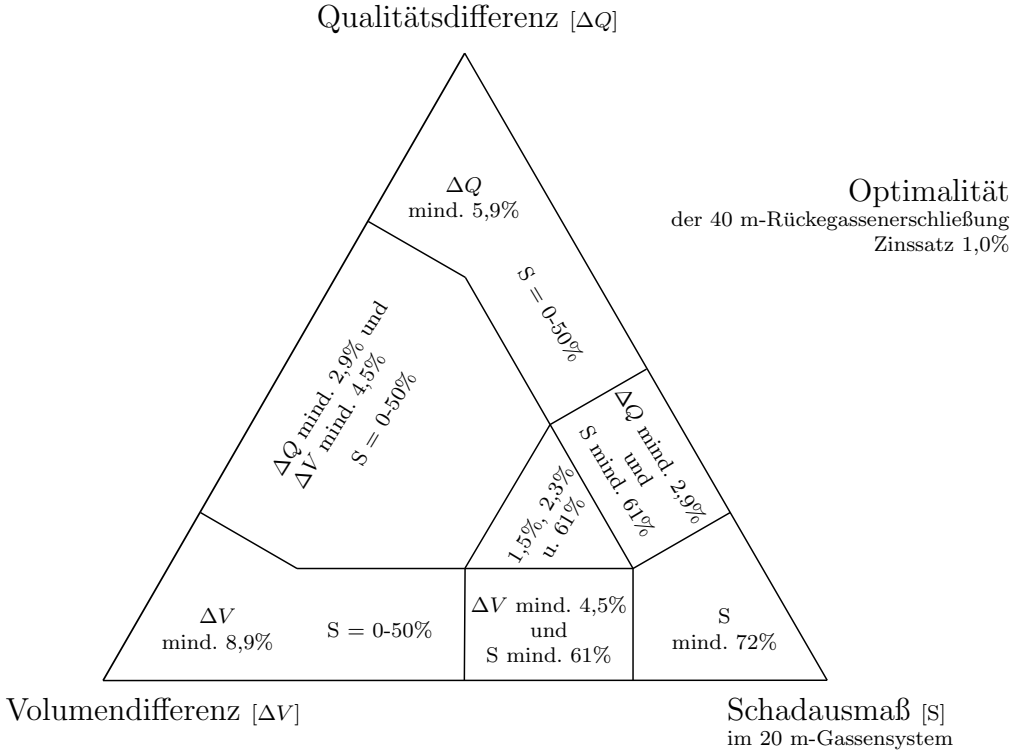


Abb. 62: *Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel schwerer massenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0%*

Das Optimalitätsdreieck für schwere massenproportionale Schäden (Zinssatz 1%) ist in Abbildung 62 dargestellt. Schadausmaße im Wertebereich von 0 bis 50% (in Bezug auf das 20 m-Gassensystem) führen nicht zu einem Einfluss auf die Optimalität, da der absolute Annuitätenabstand sich dadurch nicht verändert. Erst wenn das 40 m-Gassensystem vollständig geschädigt ist, kommt es zur Annuitätenannäherung und somit zu einem Beitrag des Schadens an der Optimalität. Exemplarisch sind drei Kombinationen des Schadausmaßes mit anderen Effekten dargestellt. Auch hier wird die lineare Additionfähigkeit der Effekte (siehe Optimalitätsregel für massenproportionale Schäden) deutlich.

Neben den drei abgebildeten Optimalitätsdreiecken könnten auf Grund der in der vorliegenden Arbeit verwendeten drei Zinssätze, der zwei in den Vordergrund gestellten Sonderfälle der Schadproportionalität sowie der drei exemplarischen Schadqualitäten 15 weitere Kombinationen dargestellt werden.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Folgende Übersicht fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt eine Empfehlung zum Erschließungsmittel sowie zur -dichte für die Praxis:

Erschließungsmittel und -dichte: Praxisempfehlung

20 m-Rückegasse:

- wenn keine (oder nur leichte) Schäden und keine anderen Effekte auftreten oder
- bei massenproportionalen Schaden aus technischer oder gesellschaftlicher Sicht bis 50% der 20 m-Feinerschließung

40 m-Rückegasse:

- wenn 5-6%* bessere Holzqualität (Holzpreis) durch geringere Flächeninanspruchnahme und/oder größere waldbauliche Freiheit erwartet werden oder
- wenn 7-10%* mehr Holz im 40 m-Gassensystem durch geringere Flächeninanspruchnahme und/oder größere waldbauliche Freiheit erwartet werden oder
- wenn der Ausbau von 38-44%* der Rückegasse (im 20 m-System) auf Grund schwerer streckenproportionaler Schäden beziehungsweise von 69-72%* der Rückegasse (im 20 m-System) auf Grund schwerer massenproportionaler Schäden notwendig wird oder
- wenn mehrere der oben dargestellten Bedingungen in Kombination auftreten (siehe Optimalitätsregel).

40 m-Seiltrassen:

- wenn der Standort keine Befahrung zulässt

* Der Anteil ist abhängig vom Kalkulationszinssatz.

5 Diskussion

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methode zum Vergleich unterschiedlicher Feinerschließungssysteme hinsichtlich ihrer Rentabilität unter Berücksichtigung weiterer Effekte. Hierzu wurde auf das international bekannte und nach wie vor in der Wissenschaft verwendete Modell von Martin Faustmann zurückgegriffen. Es wurde erweitert, um folgende vier Effekte abbilden zu können:

1. Effekte auf das Wachstum der Bäume,
2. Effekte auf die Qualität des Holzes,
3. Effekte auf die technische Befahrbarkeit und
4. Effekte auf die Waldästhetik.

Ein fünfter, waldbaulicher Effekt wurde ebenfalls abgebildet. Zur Vereinfachung wird dieser im Folgenden nicht weiter aufgeführt, da er durch die Massen- oder Wertleistung beschrieben werden kann und demzufolge über den 1. und 2. Effekt Wirkung entfaltet. Zur Abbildung der Wirkungsweisen wurden zum Teil eigene Modelle erstellt und deren Ergebnisse erläutert.

In den folgenden Abschnitten sollen zunächst Aspekte der dargelegten Methodik kritisch hinterfragt und überprüft werden. Danach erfolgt die Diskussion und Interpretation der Ergebnisse anhand der erstellten Thesen.

5.1 Methodendiskussion

5.1.1 Faustmann-Modell und Grundlagenberechnungen

Mit der dargelegten Methodik wurde ein Weg aufgezeigt, Effekte durch Holzerntemaßnahmen im Sinne einer dynamischen Investitionsrechnung mittels des Modells von Martin Faustmann abzubilden. Dieses Modell hat aber klare Grenzen. So beschreibt Deegen (1997) vier Modellbedingungen, die im Folgenden aufgegriffen werden.

Das Faustmann-Modell setzt die Grundannahme voraus, dass die Entscheidungen auf vollkommenden Märkten getroffen werden, in denen Kapitalnehmerzins und Kapitalgeberzins gleich sowie über alle Perioden konstant und bekannt sind (Deegen 1997). In den staatlichen Forstbetrieben werden die Entscheidungen aber nur teilweise auf Märkten herbeigeführt. Vielmehr sind sie Ausdruck eines politischen Prozesses (vgl. Deegen 2013).

Dies lässt sich am Beispiel der zahlreichen Richtlinien – so zum Beispiel die Holzerntetechnologie- oder Waldentwicklungstypen-Richtlinie des Freistaates Sachsen – darlegen (Sachsenforst 2006, 2013). Durch die Holzerntetechnologie-Richtlinie ist die Anwendung eines bestimmten Erschließungssystems klar geregelt. Die Richtlinie lässt beinahe keine Spielräume, eine Entscheidung (zum Beispiel die Wahl des Gassenabstandes) frei zu treffen. Vielmehr bindet sie diese Entscheidung an wenige Größen, wie zum Beispiel die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodensubstrates. Das macht die Richtlinie einerseits sehr handhabbar, andererseits engt es den Entscheidungsspielraum des örtlichen Wirtschafters maximal ein und lässt keine freie Entscheidung – zum Beispiel anhand der Rentabilität – zu.

Ferner ist der im Faustmann-Modell zu verwendende Kalkulationszinssatz stark vom Eigentümer und der gegenwärtigen Kapitalmarktsituation abhängig. Darüber hinaus spielen auch die subjektiven Einstellungen des Waldbesitzers, insbesondere seine Risikofreudigkeit eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Quantifizierung des Zinssatzeinflusses wurde durch die Verwendung von drei Beispielzinssätzen vorgenommen. Der Zinssatz kann darüber hinaus auch andere als die verwendeten Werte annehmen. An einer Stelle wurde der Einfluss eines stetig zunehmenden Zinssatzes zumindest für den Bereich positiver Bodenertragswerte untersucht (Kapitel 4.4).

Das Faustmann-Modell ist in der Lage, den Kapitalwert eines gesamten Bestandeslebens inklusive des Bodens abzubilden, indem es unterstellt, dass auch in den nachfolgenden Bestandesgenerationen die gleiche Bewirtschaftungsweise zur Anwendung kommt (Deegen (1997) verwendet den Ausdruck „Aneinanderreihung unendlicher und identischer Wiederholung von Investitionen“). Diese Annahme des Modells ist vor allem vor dem Hintergrund der Langfristigkeit der Waldwirtschaft kritisch zu sehen.

Da jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht bekannt ist, was in der Zukunft sein wird, ist es durchaus ratsam, zur Beurteilung der gegenwärtigen Art und Weise der Bewirtschaftung dieselbe auch für die Zukunft zu unterstellen.

Eine abgewandelte Variante des Faustmann-Modells ist das Modell des Kapitalhaltungswertes. Es eignet sich insbesondere zur ökonomischen Beurteilung von Folgeinvestitionen, da es auf der Theorie der versunkenen Kosten („sunk-cost-theorie“) aufbaut. Es kann zum Beispiel herangezogen werden, wenn ein Wechsel innerhalb der beschriebenen Erschließungssysteme beabsichtigt wird. Da der Kapitalhaltungswert je nach Betrachtungszeitpunkt sehr unterschiedliche Werte annehmen kann und eine unvorstellbar große Zahl von Möglichkeiten (und Zeitpunkten) zur Änderung des Erschließungssystems existiert, wurde in der Methodik der vorliegenden Arbeit der Bodenertragswert dem Kapitalhaltungswert vorgezogen.

Als Betrachtungsmaß wurde die Annuität als jährliche Rente gewählt. Möhring & Rüping (2006) führen als Vorteil dieser Größe die höhere Akzeptanz der Praxis an. Sie begründen dies mit der besseren Verständlichkeit durch den jährlichen Bezug. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich beim Bodenertragswert um einen theoretischen Wert handelt, der durch ein forstökonomisches Modell ermittelt wurde. Er beschreibt den Bodenwert zum Zeitpunkt „t gleich 0“ und dient somit der Beurteilung der Rentabilität. Die Annuität ist gewissermaßen dessen Verzinsung. Größen der Waldwertrechnung beziehungsweise Marktpreise, die tatsächlich für einen Waldbestand mit dem dazugehörigen Boden erzielt werden, können sich hiervon unterscheiden und sind nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung.

Über die Voraussetzung des vollkommenen Kapitalmarktes hinaus wird im Faustmann-Modell die Annahme getroffen, dass alle künftigen, zur Berechnung notwendigen Preise bekannt sind (Deegen 1997). Sie wurden im methodischen Abschnitt der vorliegenden Arbeit definiert und für alle Berechnungen als konstant festgelegt. Nun ist das eine recht einfache Annahme, die in dieser Form mit an Gewissheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht eintreten wird. Da aber über die Preise der Zukunft keine andere Annahme getroffen werden kann, da sie schlichtweg noch nicht bekannt sind, ist es demnach die beste und einzig mögliche Lösung des Dilemmas der unbekannten Preise.

Die der Berechnung zu Grunde liegenden Faktorenpreise beruhen durchweg auf schriftlichen Quellen. So wurden für die Kalkulation der Holzerlöse Durchschnittspreise aus dem Jahr 2014 durch das Holzmarkt-Referat des Staatsbetriebes Sachsenforst zur Verfügung gestellt. Die zur Systemkostenberechnung notwendigen Anschaffungskosten der verschiedenen Maschinenkategorien entstammen einer eigens durchgeführten Literaturrecherche, die teilweise durch nachgefragte Angaben der Hersteller und Händler ergänzt wurde. Der zur Zinskostenberechnung herangezogene Zinsfuß von 8% oder die Kraftstoffkosten wurde in Anlehnung an KWF (2013) und Dreeke et al. (2013) festgelegt. Ohne Zweifel kann über den einen oder anderen Wert trefflich gestritten werden, denn einige Kosten sind während des Erstellungsprozesses der vorliegenden Dissertation mit

hoher Wahrscheinlichkeit gestiegen. Auch die Holzpreise unterliegen – nicht nur auf Grund von großen Kalamitäten und dem dadurch entstehenden Überangebot, wie es aktuell erlebbar ist – regelmäßigen Schwankungen. Letztere beeinflussen die Annuitäten vermutlich am stärksten, haben aber zunächst keinen Einfluss auf die absoluten Unterschiede zwischen den untersuchten Feinerschließungssystemen, da deren Einfluss auf die Ertragsseite (durch die Harmonisierung der Naturaldaten) vorerst ausgeschlossen wurde und demzufolge die absoluten Annuitätenunterschiede nur auf die unterschiedlichen Holzerntekosten zurückgeführt werden können. Jedoch können aufwandseitige Veränderungen der Faktorenpreise (Kosten für Anschaffung, Kraftstoff, etc.) die absoluten Annuitätendifferenzen beeinflussen.

Als dritte Annahme wurde der Holzertrag als bekannt angesehen (vgl. Deegen 1997), indem das Wachstum des definierten Fichtenbestandes als naturale Grundlage mittels des Programms „BWinPro 7.0“ erstellt wurde. Auch Hanewinkel & Navarro (2005) nutzten zur ökonomischen Bewertung des Waldumbauprozesses das Simulationsexperiment. Der Vorteil wird darin gesehen, dass auch ohne empirische Grundlage ein ökonomischer Vergleich verschiedener grundsätzlicher Strategien möglich ist, da das Experiment die notwendige numerische Basis liefert. Die Verwendung eines Waldwachstumssimulators zur Erstellung einer naturalen Datenbasis ist in der forstökonomischen Forschung nichts Neues (Spellmann et al. 1999; Deegen et al. 2000; Schmidt et al. 2001; Duda 2006; Albert 2007). Die Stammzahl des erzeugten Bestandes liegt mit 2000 Stück/ha eher am unteren Ende der derzeitigen Empfehlungen der einschlägigen Richtlinien (LAF 2002; Sachsenforst 2013). Die Oberhöhenbonität entspricht ungefähr dem sächsischen Durchschnitt von 14 Vfm/a ha. Es ist bekannt, dass das Wachstum der Fichte sich in den letzten Jahren stark veränderte, was zu einer Verbesserung der Ertragslage der Waldbesitzer führt. Um den Unterschieden zur Ertragstafel gerecht zu werden, wurde ein Waldwachstumssimulator verwandt. Die sächsische Version des BWinPro bildet das Wachstum der Fichte für Sachsen aller Wahrscheinlichkeit nach am besten ab, da ständig Versuchsflächendaten eingepflegt werden. Die Version stand dem Autor jedoch nicht zur Verfügung.

An dieser Stelle soll auch die Auswahl der Beispielbaumart Fichte diskutiert werden. Die Fichte ist noch immer der klassische Brotbaum der sächsischen Forstwirtschaft. In aller Regel werden mit ihr Massenholzsortimente erzeugt. Der Zieldurchmesser liegt im Landeswald des Freistaates Sachsen aktuell bei 40 bis 50 cm Brusthöhendurchmesser. Die Auswahl dieser Baumart für die Überlegungen der vorliegenden Arbeit kann auf eben diese große wirtschaftliche Bedeutung zurückgeführt werden. Eine andere Baumart hätte sowohl holzpreis- als auch technologiebedingt andere Ergebnisse erzielt. Eine entsprechende Prognose soll in der Ergebnisdiskussion gewagt werden.

Die Rückegassenanlage erfolgte im Alter von 30 Jahren ohne Kombination mit dem Ersteingriff im Rahmen der Jungdurchforstung. Dieser folgte dementsprechend erst im Bestandesalter 40, was der hohen Wachstumsleistung der Fichte zwischen 25 und 35

Jahre nicht gerecht zu werden scheint. Die Trennung von Gassenanlage und Erstdurchforstung ist auch in der Praxis teilweise zu beobachten, obschon die Forsteinrichtung in sächsischen Landes-, Kirchen- und Körperschaftswald derzeit beides in Kombination empfiehlt, um Teile des starken Volumenzuwachses dieser frühen Phase abzuschöpfen (Sachsenforst 2016). Die Erstdurchforstung ist nach den derzeitig gültigen Richtlinien des Freistaates Sachsen im Oberhöhenbereich von 12 bis 13 m durchzuführen (Sachsenforst 2016). Das angewandte Pflegeregime könnte demnach zu nicht optimalen Bodenertragswerten beziehungsweise Annuitäten geführt haben. Solche, die auf Ertragsveränderungen zurückgeführt werden können, haben zwar keinen Einfluss auf die absolute Annuitätendifferenz, verändern aber den relativen Abstand und somit auch die relativen Opportunitätskosten, da sich die Bezugsgröße dieses Verhältnisses verändert. Jede auf höhere Erträge zurückzuführende Bodenertragswertvergrößerung lässt demnach die relativen Opportunitätskosten sinken, da der Abstand zwischen zwei Alternativen gleicht bleibt und die Bezugsgröße der Relation größer wird.

Das gewählte Pflegeregime entspricht einer Auslesedurchforstung (Hochdurchforstung) mit einer Maßnahme im Jahrzehnt. Die Durchforstungen wurden durch den Simulator anhand eingestellter Rahmenbedingungen durchgeführt. Fichtenbestände werden derzeit mit einem deutlich kleineren Durchforstungsintervall bewirtschaftet. So plant die Forsteinrichtung in der Regel zwei Maßnahmen pro Jahrzehnt über das gesamte Bestandesleben hinweg (Sachsenforst 2016). Auch die Eingriffsstärken entsprechen nicht der gestaffelten Durchforstung, wie sie regelmäßig im Landeswald des Freistaates Sachsen angewendet werden. Vor allem in der Phase der Jungdurchforstung und zu Beginn der Altdurchforstung liegen die Vornutzungsmengen unter üblichen Werten, was zu einer sehr hohen Grundflächenhaltung führt. Zur Würdigung dieser Unschärfe sei auf die Ausführungen weiter oben verwiesen. Eine Änderung des Pflegeregimes hätte eine Veränderung der absoluten Bodenertragswerte und Annuitäten zur Folge, jedoch keinen Einfluss auf den absoluten Annuitätenabstand zwischen den verschiedenen Erschließungsoptionen.

Die Verfahrenskosten wurden mittels gebräuchlicher Verfahren der Maschinenkostenkalkulation sowie der Schätzung von Produktivitäten auf Grundlage von Modellen bestimmt. In Deutschland ist vor allem die Kalkulation nach dem Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF 2013) weit verbreitet und von Wissenschaft und Praxis anerkannt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode durch Aspekte der Vorgehensweise von Dreeke et al. (2013) sinnvoll ergänzt. Zur Schätzung der Produktivitäten wurde auf das bekannte Kalkulationsprogramm „HeProMo“ zurückgegriffen. Es weist verschiedene Vorteile auf. So sind in diesem Programm bereits verschiedene Zeitstudien zu unterschiedlichen Maschinensystemen zusammengefasst, sodass auf die sonst notwendige Recherche verzichtet werden konnte. Ferner besticht das Programm durch nutzerfreundliche Oberflächen und Schnittstellen, wodurch es sich auch als Baustein für die Modellierung eignet (Frutig et al. 2009). Andererseits wurden auch dessen Schwachstellen ersichtlich. So nennt es zum Beispiel keine Zeitverbräuche für das

Vorrücken mit dem Pferd oder der selbstfahrenden Winde beziehungsweise für das Rücken mit Rückezügen, sodass hier andere Quellen herangezogen oder Modellannahmen getroffen werden mussten. Auch große Forwarder sind nicht aufgeführt, sodass eine Extrapolation durch Anhebung des Ladequerschnitts durchgeführt wurde. Alternativ hätten andere Zeitstudien oder Produktivitätsmodelle herangezogen werden können. Da es in der vorliegenden Arbeit weniger auf die absolute Treffsicherheit der Daten als vielmehr deren innere Konsistenz ankam, wurde hiervon abgesehen.

Bei der Auswahl der zu Grunde gelegten Verfahren wurde eine Vereinfachung hinsichtlich des Vorrückens vorgenommen. So wurde festgelegt, dass im 40 m-Gassensystem zwar ein Zufällen der Bäume notwendig ist, die mit dem Harvesterkran nicht erreichbar sind, diese jedoch zu keinem Zeitpunkt im Bestandesleben vorgerückt werden müssen. In der Praxis wird gerade in jungen, dichten Nadelholzbeständen beobachtet, dass zwei Harvestergänge notwendig sind und die Bäume außerhalb des Kranbereiches zumindest teilweise seilunterstützt zu Fall gebracht werden und/ oder vorgerückt werden. In einigen Fällen wurde vom Autor beobachtet, wie alle zugefällten Bäume dickörtig vorgerückt wurden. Die Anwender versprachen sich dadurch eine Steigerung der Harvester-Produktivität bei der Aufarbeitung, da das dünnörtige Vorrücken mit dem Kran des Harvesters vor dem eigentlichen Aufarbeiten entfällt. Um die Unschärfe, zu der diese Vereinfachung führt, im Modell zu quantifizieren, wurde folgende Versuchsanordnung vorgenommen: Da der Erfahrung nach das Vorrücken nur in Vornutzungsbeständen und nur innerhalb der Zufällzone notwendig wird, wurde in den Durchforstungen zum Zeitpunkt 40 und 50 Jahre ein pauschaler Kostenaufschlag von 5 Euro/Efm vorgenommen.[42] Je nach Zinssatz verringerte sich die Annuität um 3,5 bis 4,2 Euro beziehungsweise der Annuitätenabstand vergrößerte sich um 0,8 (0,01%) bis 3,3 Prozentpunkte (2,5%).

Alle den freien Kapital- und Bodenmarkt sowie die Forstwirtschaft beeinflussenden Einschränkungen und Faktoren, die nicht beschrieben sind, werden ausgeblendet, was sozusagen eine vierte Bedingung der Modellbetrachtungen darstellt (vgl. Deegen 1997).

Diese Bedingung trifft in Realität auch nur eingeschränkt zu. So ist es im Landeswald des Freistaates Sachsen nicht und im sonstigen öffentlich Wald nur schwer möglich, Waldboden frei zu kaufen, zu verkaufen oder zu verpachten. Außerdem sind im Staatswald die Entscheidungen, wie viel Holz eingeschlagen wird, vielmehr von waldbaulichen Notwendigkeiten geprägt als von Rentabilitätsbetrachtungen.

[42] Im Alter 30 Jahre wurde im Modell nur der Gassenaufhieb vorgenommen. Ein Kostenaufschlag ist demzufolge nicht notwendig.

5.1.2 Optimierung

Alle methodischen Schritte innerhalb der Optimierung zielen darauf ab, den Bodenertragswert zu maximieren, um dem Faustmann-Modell gerecht zu werden.

Zunächst wurden für die drei beschriebenen Erschließungssysteme die optimalen Holzernteverfahren nach dem Kriterium der Holzerntekosten bestimmt. Da daraufhin auch eine Optimierung in Bezug auf die Aushaltungsvariante (ausschließlich Kurzholz gegenüber der Kombination aus Kurz- und Langholz) durchgeführt wurde, mussten sechs Holzernteverfahren bestimmt und den folgenden Berechnungen zu Grunde gelegt werden. Die Verwendung der Holzerntekosten als Kriterium ist zulässig, sofern die Holzerntetechnologie das Waldpflegeregime nicht beeinflusst. Diese Annahme wurde für die vorliegende Arbeit getroffen. Sollte dies nicht zutreffen, so müsste der Bodenertragswert als Auswahlkriterium herangezogen werden.

In einem weiteren Schritt wurden die beiden Aushaltungsvarianten innerhalb der drei Erschließungsszenarien gegenübergestellt. Hier wurde der Bodenertragswert zur Optimierung herangezogen, da die Sortiervariante sowohl die erforderliche Holzerntetechnik und deren Kosten als auch die Erlöse bestimmt. In allen Erschließungssystemen führte die Kombination aus Kurz- und Langholzproduktion zu deutlich größeren Bodenertragswerten. Die Überlegenheit wurde mit zunehmendem Zinssatz und aufwendigerem Erschließungssystem deutlicher.

Ferner wurde auch die Eingriffsstärke einer Optimierung unterzogen, indem (im Waldwachstumssimulator) die maximale Eingriffsstärke auf $100\,\mathrm{m}^3/\mathrm{ha}$ angehoben wurde (vorher $60\,\mathrm{m}^3/\mathrm{ha}$). Dieses statische Vorgehen wurde nur einmal durchgeführt, um ein mäßiges mit einem starken Durchforstungsregime vergleichbar zu machen. Natürlich hätten viel mehr Durchforstungsregime in die Optimierung einbezogen werden können, um ein Ergebnis zu erzielen, das der Optimalität noch näher kommt. Der Mehrwert für die Arbeit wäre dabei jedoch begrenzt gewesen. Wie bereits dargelegt, verändert das Waldbauregime zwar die absolute Höhe der Annuität, hat aber keinen Einfluss auf die absoluten Abstände durch verschiedene Holzernteverfahren, wohl aber auf deren relative Differenz.

Bei der schrittweisen Optimierung der numerischen Datenbasis nach der Aushaltung des Holzes sowie nach der Durchforstungsstärke wurde eine Umtriebszeit von 120 Jahren angenommen. Eine Optimierung nach der Umtriebszeit wurde erst danach durchgeführt. Theoretisch muss eine Optimierung so durchgeführt werden, dass zeitgleich alle Variablen mit dem Ziel der Bodenertragswertmaximierung optimiert werden, was jedoch praktisch nicht zu realisieren ist.

Die beschriebene Harmonisierung der Naturaldaten blendet die Wachstumsunterschiede auf Grund der verschiedenen Gassenabstände vollständig aus. Einzig die Holzmengenunterschiede zum Zeitpunkt der Gassenanlage blieben Bestandteil der numerischen

Datenbasis und wurden in den weiteren Berechnungen berücksichtigt. Im 40 m-System verbleiben zunächst mehr Bäume im Bestand, was eine Auswirkung auf die Gesamtwuchsleistung des Bestandes haben kann. Um diesen Effekt auszuschließen und dadurch die Rentabilitätsunterschiede einzig auf die verschiedenen Holzerntekosten zurückzuführen, blieben die von BWinPro simulierten Wachstumseffekte unberücksichtigt, indem die naturale Basis des 20 m-Gassensystemes auch auf die weiteren Abstände angewendet wurde. Inwiefern die vom Simulator errechneten naturalen Unterschiede dem Zufall oder der Stammzahldifferenz zugeschrieben werden können, bleibt offen. Es wäre natürlich möglich gewesen, den weiteren Berechnungen die ursprüngliche Naturaldatenbasis zu unterstellen. Da aber der Einfluss ertragsseitiger quantitativer und qualitativer Unterschiede später näher beleuchtet werden sollte, wurde zunächst davon abgesehen.

Interessant wäre in dieser Hinsicht eine weiterführende Untersuchung. So könnte die Anlage von Rückegassen in verschiedenen Abständen und deren Einfluss auf das Bestandeswachstum in BWinPro oder anderen Waldwachstumssimulatoren (z.B. Silva) gezielt simuliert und ausgewertet werden. Wenn eine Metastudie zu dieser Frage keine eindeutige Antwort hervorbringt (vgl. Jäger 2012), so könnte eine derartige Untersuchung richtungsweisend für die zentrale Frage sein, ob Rückegassen – als „baumleere Streifen“ (unter Ausschluss eines Effektes durch die Befahrung und die damit einhergehende Bodenverdichtung) – einen quantitativen Einfluss auf die Ertragsleistung haben.

5.1.3 Berücksichtigung nichtmonetärer Effekte

Die vorliegende Arbeit verwendet zur Berücksichtigung nichtmonetärer Effekte die Methode nach Klemperer (1996), die auch Deegen et al. (2000) verwendeten und die hier an die Fragestellung angepasst wurde. Die Vorgehensweise ermöglicht es, außermonetäre Vorteile der Erschließungssysteme darzustellen, indem der nichtmonetäre Nutzen den Opportunitätskosten gegenübergestellt wird.

5.2 Ergebnisdiskussion

Die vorliegende Arbeit lässt verschiedene Effekte der Holzernte in das Faustmannmodell als ökonomisches Handlungskalkül einfließen. Damit legt das geschaffene Modell den Grundstein zum Vergleich verschiedener Feinerschließungssysteme. Eine abschließende Antwort auf die Frage, welches das ökonomisch Bessere sei, ist nicht Ziel der vorliegenden Arbeit und kann vor dem Hintergrund der Vielzahl unabhängiger Variablen auch nicht getroffen werden. Die Beziehungen und Abhängigkeiten des Modells, die als Ergebnis in elf Thesen Ausdruck fanden, werden nun näher beleuchtet und diskutiert.

These 1

Mit zunehmendem Kalkulationszinssatz i steigt die relative Differenz zur finanziell-optimalen Alternative nahezu exponentiell an.

Einen großen Einfluss auf den Bodenertragswert und folglich auch auf die Annuität hat der zu Grunde gelegte Zinssatz. Zunächst wurden die Annuitätsdifferenzen zwischen den Erschließungssystemen bestimmt, wobei weitere Effekte vorerst ausgeblendet wurden.

Mit dem unterstellten Preis- und Produktivitätsniveau erzielt die 40 m-Erschließung gegenüber der Erschließung mit Gassen in einem Abstand von 20 m geringere Bodenertragswerte. Dies begründet sich allein in den höheren Verfahrenskosten. Da Seilkranverfahren erfahrungsgemäß deutlich teurer sind als Holzernteverfahren mit auf dem Boden fahrenden Maschinen, bildet die Erschließung mit Seiltrassen das Schlusslicht einer Rangfolge. Dies konnte durch die Berechnungen der vorliegenden Arbeit bestätigt werden.

Die Annuitäten sinken durch die Erweiterung des Rückegassenabstandes von 20 auf 40 m je nach Zinssatz um 7 bis 14%. Der Seilkraneinsatz lässt die Annuitäten des 20 m-Gassensystems um 37 bis 79% sinken. Natürlich ist es theoretisch nicht ausgeschlossen, dass die Annuitätendifferenzen auch viel geringer beziehungsweise null sein können. Voraussetzung hierfür wären Holzerntekosten, die sich kaum beziehungsweise nicht voneinander unterscheiden. In der Praxis wurde durch den Autor eine fehlende Preisdifferenzierung bei der Angebotsabgabe öffentlicher Ausschreibungen beobachtet, was durch Mischkalkulationen zu erklären ist und nicht heißt, dass tatsächlich nicht höhere Kosten bei der Holzernte auf weiten Gassenabständen angefallen wären.

Die absoluten Abstände zwischen den Annuitäten der drei Erschließungssysteme nehmen mit zunehmendem Kalkulationszinssatz ab. Durch den relativen Vergleich der drei Systeme wird erkennbar, dass die (relativen) Abstände mit zunehmendem Zinssatz deutlich größer werden, da die Annuitäten insgesamt abnehmen. Dies gilt jedoch nur so lange, wie der Zinssatz zu positiven Bodenertragswerten führt. Der daran anschließende Zinsbereich – hier größer als 4% –, der zu negativen Annuitäten führt, kann jedoch vernachlässigt werden, da kein Investor diesen Verlust dulden würde, solange er eine alternative Kapitalanlage nutzen kann.

Der beobachtete und als These 1 zum Ausdruck gebrachte Zusammenhang kann wie folgt interpretiert werden: Je höher der Kalkulationszinssatz gewählt wird, desto unrentabler werden alternative Verfahren, da die relativen Opportunitätskosten steigen. Als Umkehrschluss kann also festgehalten werden, dass Betriebe, die einen sehr geringen Zinssatz zu Grunde legen, oder solche, die gar keinen Zinssatz berücksichtigen, am ehesten bereit sein können, ein teureres Verfahren anzuwenden, um

somit in den Genuss positiver nichtmonetärer Effekte durch Alternativverfahren zu kommen.

Die Ursache für den beschriebenen Zusammenhang kann in der Eigenart des unterstellten Zahlungsstromes gesehen werden. Würden keine Kosten für die Bestandesbegründung unterstellt, würde der relative Annuitätenabstand bei steigendem Zinssatz keinen progressiven, nahezu exponentiellen Verlauf nehmen, sondern je nach Entwicklung der Deckungsbeiträge und Mehrkosten für das alternative Verfahren im Laufe des Bestandesleben regellos steigen oder sinken.[43] Bei angenommenen konstanten Deckungsbeiträgen und Mehrkosten entspräche der relative Annuitätenabstand den Mehrkosten in Bezug auf den Deckungsbeitrag des 20 m-Gassensystems und würde unabhängig vom Zinssatz stets gleich bleiben. Die beobachtete Steigerung des Annuitätenabstandes mit zunehmendem Zinssatz ist folglich auf die Verringerung der Mehrkosten des Alternativverfahrens im Laufe des Bestandeslebens zurückzuführen.

Der in der These 1 beschriebene Zusammenhang gilt nur, sofern (1.) Kosten für die Bestandesbegründung unterstellt werden (progressiver Verlauf) und (2.) eine Verringerung der Mehrkosten des Alternativverfahrens im Laufe der Nutzungen innerhalb eines Bestandeslebens zu verzeichnen ist (Anstieg der Annuitätendifferenz).

Biologische Produktionsfunktion des Bodens

These 2a

Wirkt die durch Befahrung hervorgerufene irreversible Verdichtung auf die Produktionsfunktion des Waldbodens, so führt dies unweigerlich zur Abnahme der relativen Differenz zwischen der Annuität der jeweiligen Alternative zum finanziellen Optimum.

Wird der durch die Befahrung hervorgerufenen Bodenverdichtung ein negativer Effekt auf das Baumwachstum unterstellt, kommt es bei allen Verfahrensalternativen mit auf dem Waldboden fahrenden Maschinen zum Absinken der Bodenertragswerte und Annuitäten. Wird von einem zur Rückegassenfläche proportionalen Absinken ausgegangen, nehmen sowohl der absolute als auch der relative Annuitätenabstand ab.

Die These beinhaltet demnach eine Ursache-Wirkung-Beziehung als Bedingung. Auf den Einfluss der Baumart sei hierbei hingewiesen. So kann dieser Effekt für eine

[43] Für den in der vorliegenden Arbeit unterstellten Wertebereich wurden die relativen Annuitätet des Vergleichs wegen unter Ausschluss der Begründungskosten berechnet. Für den Zinssatz von 0,01% beträgt der relative Annuitätenabstand 7,0%, für i = 1% 8,4% sowie für i = 2,5% 9,2%.

diesbezüglich robuste Baumart ausbleiben oder nicht beobachtet werden, was dazu führt, dass die Abnahme der Annuitätendifferenz nicht beobachtet wird. Umso deutlicher kann der Effekt bei einer sensiblen Baumart ausgeprägt sein. Auch eine Abhängigkeit von Standort und Witterung ist denkbar. Ein trockener Sandstandort mit hohem Skelettanteil wird durch die Befahrung weniger stark verdichtet als ein Lößlehm-Staugley mit geringem Skelettanteil bei feuchter Witterung. Je nach Verdichtung und Sensibilität der Baumart ihr gegenüber wird das Bestandeswachstum unterschiedlich stark beeinträchtigt. Für den (unwahrscheinlichen) Sonderfall, dass das Baumwachstum unabhängig vom Rückegassenabstand gleichmäßig absinkt, gilt die These nicht.

Welche praktische Bedeutung entfaltet diese These? Wird davon ausgegangen, dass die Bedingung zutrifft, bedeutet dies, dass der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Wuchsleistung den Rentabilitätsnachteil des weiten Gassenabstandes geringer werden lässt. Die Rentabilität der Alternative nähert sich der des Optimums an – auch eine Umkehr des Optimums zugunsten der Alternative ist denkbar. Die Frage nach dem Einfluss der Befahrung auf die Wuchsleistung kann hier nicht abschließend beantwortet werden. Es sei an dieser Stelle auf die Abeit von Jäger (2012) verwiesen, der in seiner Metastudie kein eindeutiges Gesamtbild darlegen konnte.

These 2b

Die Holzentwertungen durch die Befahrung wirken relativ betrachtet stärker auf die Rentabilität als die Volumenminderung.

Im Gegensatz zu These 2a, deren pauschale Bedingung es ist, dass die Befahrung einen Einfluss auf die Produktionsfunktion ausübt, differenzieren die nachfolgenden Thesen diesen Einfluss nach der Wirkungsweise. So wird unterschieden, ob die Bodenveränderung quantitativ wirkt, das heißt das Volumenwachstum der Bäume beeinträchtigt oder Auswirkungen auf die Qualität der Bäume nach sich zieht, die zu geringeren Holzpreisen führen. Diese Unterscheidung erlaubt einen Vergleich, wie diese These ihn vornimmt. So konnte beobachtet werden, dass befahrungsbedingte Holzentwertungen vergleichbarer Größenordnung deutlich stärker auf die Rentabilität wirken als Volumenminderungen.

Hierbei kommt der relativen Betrachtungsweise eine wichtige Bedeutung zu. Die These gilt nur, wenn die relative Abnahme der beiden Größen „Holzpreis“ und „Holzvolumen“ gleich ist.[44] Ohne diese Bedingung besitzt These 2b keine Gültigkeit.

[44] Die relative Abnahme bedeutet hier das Absinken der Größen um die x-fache Flächeninanspruchnahme. So führt zum Beispiel das Absinken der Holzqualität um das 0,6fache der Flächeninanspruchnahme zur Optimalitätsumkehr. Ein Absinken des Holzvolumens um das 0,6fache der Flächeninanspruchnahme reduziert zwar den Annuitätenabstand merklich, verändert die Optimalität der 20 m-Gassenerschließung hingegen nicht.

Natürlich könnte in der Diskussion das Argument angeführt werden, dass eine Verschlechterung der Holzqualität und somit des Preises viel wahrscheinlicher ist als eine Abnahme der Holzmenge (oder umgekehrt). Jedoch wurden Wahrscheinlichkeiten aus verschiedenen Gründen nicht in die Betrachtungen einbezogen. Ein entscheidender Grund ist der gegenwärtig fehlende Wissensstand dazu.

Es stellt sich nun die Frage, warum dieser Zusammenhang zu beobachten ist. Die Antwort darauf ist denkbar einfach: Während im Fall der Qualitätsverschlechterung die Deckungsbeiträge (proportional zur Flächeninanspruchnahme) sinken, aber in allen Erschließungssystemen die gleiche Menge Holz geerntet werden muss, bleiben die Deckungsbeiträge im Fall der Mengenabsenkung konstant, wobei weniger Holz zu ernten ist. Folglich sinken die Annuitäten der optimalen Verfahrensvariante schneller als die der Alternative und durch Preissenkung stärker als durch Volumenminderung[45].

Ein einfaches statisches Zahlenbeispiel soll den Zusammenhang verdeutlichen: Angenommen wird, dass unabhängig vom Gassenabstand ein Volumen von 100 Efm geerntet sowie ein Erlös von 35 Euro/Efm erzielt wird und die Holzerntekosten im 20 m-Gassensystem 15 Euro/Efm sowie 20 Euro/Efm im 40 m-Gassensystem betragen. Demzufolge liegen die Deckungsbeiträge bei 20 beziehungsweise 15 Euro/Efm und die holzerntekostenfreien Erlöse bei 2000 beziehungsweise 1500 Euro.

Wird nun ein Einfluss der Befahrung auf das Holzvolumen in voller Höhe der Flächeninanspruchnahme (-20% sowie -10%) unterstellt, sinkt das Erntevolumen auf 80 Efm beziehungsweise 90 Efm bei gleichbleibenden Deckungsbeiträgen je Erntefestmeter. Folglich sinkt der Holzerntekostenfreie Erlös in Höhe der vollen Flächeninanspruchnahme auf 80% beziehungsweise 90% des Ausgangswertes (1600 Euro sowie 1350 Euro).

Stellt man dieser Überlegung eine Abnahme der Qualität (also des Holzpreises) in gleicher Höhe gegenüber, verändern sich die Werte wie folgt: Der Deckungsbeitrag im 20 m-Gassensystem sinkt um 35% auf 13 Euro/Efm, da der Erlös um 7 Euro/Efm (20% von 35 Euro/Efm) sinkt. Der Deckungsbeitrag im 40 m-Gassensystem sinkt ebenfalls, jedoch nur um 23% auf 11,5 Euro/Efm. Folglich sinken auch die holzerntekostenfreien Erlöse auf 1300 Euro (65%) sowie auf 1150 Euro (77%).

[45] Der Effekt, dass die Qualitätsverschlechterung zu einem stärkeren Absinken der Annuität des optimalen Verfahrens (im Vergleich zum Absinken der Annuität der Verfahrensalternative) führt, besitzt nur solange Gültigkeit, wie der relative Deckungsbeitrag (erntekostenfreier Holzerlös) im 40 m-Gassensystem größer als 50% des Deckungsbeitrages im 20 m-Gassensystem ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flächeninanspruchnahme im 20 m-Gassensystem doppelt so groß ist als im 40 m-System (Proportionalität).

Durch dieses Zahlbeispiel wird der Einfluss des Deckungsbeitrages deutlich. Auch dem Verhältnis zwischen den relativen Holzerntekosten (durchschnittlicher Preis je Erntefestmeter) und dem durchschnittlichen Holzpreis (Erlös je Erntefestmeter) kommt eine große Bedeutung zu:

$$DB\,I = E \cdot (1 - \frac{K_{HE}}{E}) \tag{55}$$

Dieses Verhältnis beschreibt den Anteil des Erlöses, der zur Deckung der Holzerntekosten notwendig ist. Dass dieses Kosten-Erlös-Verhältnis regelmäßig Werte kleiner als 1 annehmen sollte, damit positive Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden, leuchtet dem aufmerksamen Leser ein. Am Beispiel des oben eingeführten simplen Zahlenbeispiels errechnet sich das Verhältnis aus 15 Euro/Efm geteilt durch 35 Euro/Efm, was einen Wert von ca. 0,43 für das Standardverfahren ergibt. Bei der alternativen Variante beträgt dieser Wert ca. 0,57 (20 Euro/Efm geteilt durch 35 Euro/Efm).

Je größer das Kosten-Erlös-Verhältnis bei den untersuchten Verfahren ist, umso stärker wirkt die Holzentwertung im Vergleich zur Volumenminderung[46]. Daraus kann geschlossen werden, dass bei ertragreichen Baumarten beziehungsweise in wertvollen Beständen (günstige, geringe K-E-Verhältnisse) der Effekt der These 2b geringer ausfallen wird als bei Baumarten oder in Beständen, die nur wenig Holzerlöse bei gleichen oder zumindest ähnlichen Erntekosten (ungünstige, hohe K-E-Verhältnisse) erzielen.

Im Ergebnisteil wurde dargestellt, wie groß der Volumen- beziehungsweise Preisunterschied sein muss, damit es zu einem Break-Even-Point kommt. Klar ist, dass diese Angaben nur für die hier unterstellten Eingangsgrößen Gültigkeit besitzen und je nach Baumart, am Markt erzielten Holzerlösen und Kosten der Ernte abweichen werden. Die Grundaussage der These 2b bleibt hiervon jedoch unberührt.

Der kritische Leser wird anmerken, dass das pauschale Absenken der Erntevolumen und Holzpreise um einen bestimmten Anteil über alle Eingriffszeitpunkte hinweg in dieser theoretischen Art und Weise in der Praxis nicht zu beobachten sei. Dieses Argument kann nicht entkräftet werden. Da einerseits das Absinken dieser Größen durch die Bodenverdichtung innerhalb des Bestandeslebens nicht bekannt ist und andererseits eine Abhängigkeit von Baumart, Bonität und Standort zu erwarten ist, erscheint dieses modellhafte Vorgehen dennoch als geeignet, trotz Unsicherheit einen Zusammenhang zu ergründen.

[46] Wenn der Deckungsbeitrag eines Verfahrens auf Grund höherer Holzerntekosten sinkt und folglich das beschriebene Verhältnis größer wird, wirkt eine Qualitätsverschlechterung (Holzpreisabsenkung) umso mehr, da das Verhältnis zwischen der Absenkung des Holzpreises zum Deckungsbeitrag (der durch höhere Kosten sinkt) ungünstiger wird. Hingegen wirkt jede Mengenänderung hier linear, da der (relative) Deckungsbeitrag zwar durch die Kostensteigerung sinkt, jedoch von der Mengensenkung unberührt bleibt.

Die These erlangt insofern praktische Bedeutung, dass bereits an dieser Stelle klar wird, dass sowohl ein quantitativer als auch ein qualitativer Vorteil im 40 m-Gassensystem den Rentabilitätsnachteil gegenüber dem Optimum ausgleichen kann. Dies könnte begründen, warum einige Praktiker generell 40 m-Gassensysteme anwenden und dabei bewusst Mehraufwendungen in Kauf nehmen.

These 2c

Sowohl die Volumenminderung als auch die Holzentwertung führen bei einem geringeren Zinssatz eher zu einer Umkehr des Optimums als bei hohem Zins.

These 2d

Der Einfluss des Zinssatzes ist bei der Holzentwertung deutlich geringer als bei der Volumenminderung.

Auf den ersten Blick erinnern die Thesen 2c und 2d an die These 1. Auch hier wird ein Einfluss des Zinssatzes beschrieben, sodass sich die Vermutung aufdrängt, dass hier der progressive Zusammenhang der These 1 seine Wirkung entfaltet. Wie bereits dargelegt wurde, begründet sich der nahezu exponentiell verlaufende Zusammenhang zwischen dem Zinssatz und dem relativen Annuitätenabstand in den Bestandesbegründungskosten – blendet man diese aus, ist der Effekt nicht mehr in dieser Form zu beobachten. Experimentell konnte der Einfluss der Begründungskosten für die in These 2c und 2d beschriebenen Effekte ausgeschlossen werden. Interessanterweise führt das Ausblenden der Begründungskosten zu beinahe keiner Veränderung der Schnittpunkte (break even points) zwischen den beiden Gassenabständen. Der in These 2c beschriebene Effekt begründet sich demnach nicht aus dem als These 1 beschriebenen Zusammenhang.

Damit es zur Rentabilitätsgleichheit (Break even) kommt, muss ein Volumenunterschied zwischen dem Optimum und der Alternative von ca. 7% bei sehr niedrigem Zinssatz beziehungsweise von 10% bei hohem Zinssatz (2,5%) vorliegen.

Betriebe mit einem sehr niedrigen Kalkulationszinssatz profitieren von diesem Effekt also deutlich mehr als solche mit einem hohen Kalkulationszinssatz.

Anders sieht es bei dem Einfluss auf die Holzqualität aus. Aus oben geschilderten Gründen nähern sich hier die Annuitäten deutlich stärker an.[47] Auch hier wurde ein Einfluss des Zinssatzes festgestellt, der jedoch deutlich schwächer ausgeprägt ist als beim Volumeneffekt. Dies begründet sich in der unterschiedlichen Wirkungsweise des Qualitätsfaktors, wie bereits mehrfach beschrieben wurde.

[47] Das liegt daran, dass der negative Anstieg im 20 m-Gassensystem doppelt so groß ist wie der im 40 m-Gassensystem und der absolute Annuitätenabstand deutlich kleiner ist als die Anstiegsdifferenz.

Die Wirkung qualitativer Unterschiede im Holzertrag durch verschiedene Gassenabstände ist nahezu unabhängig vom Zinssatz. Betriebe mit niedrigen sowie solche mit hohen Kalkulationszinssätzen könnten fast gleichermaßen von diesem Effekt profitieren.

Die Thesen 2a-d entfalten ihre Gültigkeit auch dann, wenn als Ursache-Wirkungs-Beziehung waldbauliche Effekte unterstellt werden. Hier wird davon ausgegangen, dass die mehr als doppelt so breiten Bestandesblöcke im 40 m-System eine positive waldbauliche Wirkung entfalten. Erler (2005) beschreibt dies anhand der größeren waldbaulichen Freiheit bei weiten Gassenabständen. Es wird demnach keine dem Gassenabstand proportionale Wuchsdepression oder Qualitätsminderung unterstellt, sondern eine Steigerung von Dimension und/oder Qualität auf Grund von breiteren Behandlungseinheiten zwischen den Rückegassen.

Auch hier ist ein Einfluss der Baumart (sowie der Herkunft), des Standortes und der daraus resultierenden Bonität denkbar. In einem Kieferbestand, der auf einem armen sandigen Standort stockt und keinerlei Wertholzoption aufweist, kann der Effekt eher ausgeschlossen werden. In einem Edellaubholzbestand auf reichem und frischem Standort, der durch beste Qualitäten gekennzeichnet ist, wird ein solcher waldbaulicher Effekt deutlich wahrscheinlicher sein. Es ist denkbar, dass in diesem Fall mehr Auslesebaum-Anwärter vorhanden sind, welche die Auslese verbessern und folglich zu einem höheren Deckungsbeitrag im Abtrieb führen. Andererseits ist auch in der Massenholzproduktion ein positiver Effekt durch breitere Behandlungseinheiten theoretisch möglich. Gerade in Beständen mit kurzen Umtriebszeiten und hoher Stammzahl kann das Vorhandensein einer zusätzlichen Gasse als baumfreier Streifen zu einer geringeren Rentabilität führen.

Technische Befahrbarkeit der Feinerschließung

Zunächst müssen die zu Grunde gelegten Bedingungen des Modells diskutiert werden. Zum einen wurde Maßnahmengleichheit festgelegt. Dies bedeutet, dass bei den Berechnungen über die gesamte Umtriebszeit hinaus immer die gleiche Sanierungsart unterstellt und demzufolge ein Wechsel ausgeschlossen wurde. Dieser ist zwar theoretisch wie praktisch möglich, verursacht jedoch eine unendlich große Anzahl denkbarer Szenarien, wodurch der Zugewinn an Klarheit über die Wirkungen der untersuchten Effekte ausbleiben dürfte.

Ferner wurde der Einfluss des Zeitpunktes einer Maßnahme ausgeschaltet, indem „zeitliche Homogenität“ festgelegt wurde. Hier wurden die Kosten über alle Maßnahmen im Laufe eines Bestandeslebens gleichmäßig verteilt. Das hat den Vorteil, dass der

Einfluss des Zeitpunktes ausgeblendet wird[48]. Andererseits kann der Zeitpunkt einer Sanierungsmaßnahme abhängig vom Bestandesalter sein und dadurch durchaus einen Einfluss auf die Wirkung des Effektes haben. Letzteres konnte demnach mit der zu Grunde gelegten Modellannahme in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden. Die Abhängigkeit des Sanierungszeitpunktes vom Bestandesalter beziehungsweise der Wuchsphase des Bestandes war nicht Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, eröffnet jedoch einen Ansatz für weitergehende Untersuchungen.

Beide Annahmen waren notwendig, um das Faustmannmodell um die Effekte der technischen Befahrbarkeit zu erweitern, wobei der Ansatz des numerischen Vorgehens zu wahren und dabei die Anzahl der möglichen Szenarien gering zu halten war. Auch die Festlegung auf drei unterschiedliche Sanierungsarten zur Untersetzung der Schadschwere ist diesem Abstraktionsgrad geschuldet.

Schlussendlich ist an dieser Stelle auch der quantitative Zusammenhang zwischen Schäden auf Gassen unterschiedlicher Abstände zu diskutieren. Diese theoretischen Überlegungen helfen, die in der Praxis beobachteten Fälle in drei Kategorien zu ordnen. Der unterproportionale Schaden (als erster Fall) ist in der Praxis sicher hier und da anzutreffen, wird aber mit größer werdender Betrachtungseinheit stets unwahrscheinlicher. Aus diesem Grund blieb er in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt. Trotzdem soll auch dieser Fall später erneut aufgegriffen werden, um die beobachteten Zusammenhänge entsprechend zu übertragen.

Der streckenproportionale Schaden beschreibt den Fall, bei dem ein relatives Verhältnis von 1:1 vorliegt. Alle darüber hinausgehenden Fälle werden als überproportional bezeichnet, wobei der Schaden im Verhältnis von 2:1 eine Sonderstellung einnimmt. Hier wird angenommen, dass auf Grund der doppelten Holzmenge (Holzmasse) die bei der Erschließung im 40 m-Gassensystem je Gasse transportiert werden muss, das Schadausmaß auch doppelt so groß ist. Damit wird den Annahmen gefolgt, dass für die Spurbildung hauptsächlich der Forwarder verantwortlich ist (vgl. Richter 2008; Erler & Güldner 2002; Hauptvogel 2004; Uhl et al. 2003; Kremer et al. 2003; Ohrner et al. 2003; Borchert et al. 2008) und die Häufigkeit der Überfahrten entscheidend für das Auftreten von Bodenstrukturveränderungen sind (vgl. Sündermann & Röhe 2014; Wehner 2005b; Hehn & Sauter 2005). In Anlehnung an die zu transportierende Holzmasse wird dieser Schaden als „massenpropotional“ bezeichnet.

Zwischen dem streckenproportionalen und dem massenproportionalen Fall sowie über diesen hinaus sind eine unendlich große Menge von anderen Verhältnissen denkbar. Der Aufwand, diese zu beschreiben und in die Arbeit einzubeziehen, steht in keinem Verhältnis zu dem zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Der Fokus auf die beiden beschrieben Schadproportionen erscheint daher gerechtfertigt.

[48] Die Häufigkeit einer Sanierungsmaßnahme wird im Modell über das Schadausmaß berücksichtigt (vgl. Seite 123). Die Modellbedingung „zeitliche Homogenität“ bedeutet demnach mitnichten, dass bei jedem Eingriff auch eine Sanierung durchgeführt wird.

These 3a

Ein streckenproportionaler Schaden der technischen Befahrbarkeit bewirkt eine Verringerung des Annuitätenabstandes zwischen den terrestrischen Feinerschließungssystemen.

Ein streckenproportionaler Schaden, der zum Beispiel das Befestigen der Gasseneinfahrten notwendig macht, verursacht in beiden Erschließungssystemen Kosten. Die Strecken-Proportionalität verursacht ein Kostenverhältnis von 1:2 zwischen den beiden Gassensystemen. Dadurch sinken die Annuitäten unterschiedlich stark – der (negative) Anstieg des 20 m-Gassensytems ist doppelt so groß wie der des 40 m-Gassensystems. Hierin ist die in der These beschriebene Annäherung begründet.

Die Strecken-Proportionalität ist ein theoretischer Zusammenanhang, der streng genommen in der Praxis kaum zu beobachten sein wird. Dennoch hilft dieses quantitative Verhältnis bei der Klärung der Frage, welchen Einfluss befahrungsbedingte Schäden am Erschließungssystem auf die Rentabilität der Waldbewirtschaftung mit verschiedenen Gassensystemen haben.

Im Ergebnisteil wurde dargestellt, von welchen Faktoren der Umfang dieser Annäherung abhängig ist. Zunächst sind diesbezüglich das Schadausmaß sowie die Schadschwere zu nennen. Ein leichter Schaden in geringem Ausmaß hat auch nur eine marginale Annäherung der Annuitäten zur Folge. Dementsprechend wirkt ein schwerer Schaden in starker Ausprägung deutlicher. Darüber hinaus wirkt auch der unterstellte Kalkulationszinsatz auf die relative Annuität. Dies wird im Folgenden näher beleuchtet.

Ein streckenproportionaler Schaden trägt immer zum Vorteil der 40 m-Gasse bei. Ein anderer Zusammenhang ist unter den angenommenen Modellbedingungen nicht beschreibbar und darüber hinaus auch nicht zu beobachten. Ob dieser Beitrag – für sich allein betrachtet – ausreicht, eine Rentabilitätsumkehr zu bewirken, hängt maßgeblich von Schadausmaß und Schadschwere ab. Für eine solchen Umkehr müsste – vor dem Hintergrund des unterstellten Wertebereiches im numerischen Beispiel – ein Schaden vorliegen oder zu erwarten sein, der auf ca. 40% (je nach Zinssatz) des Erschließungssystems Kosten für eine dauerhafte Befestigung mit Fremdmaterial verursacht. Dies kommt sicher nur dann vor, wenn die Befahrbarkeit des Standortes stark eingeschränkt ist und folglich auch über die Gasseneinfahrten hinaus Befestigungen vorgenommen werden müssen. Für einen solchen Fall ist eine Vergleichsrechnung in Bezug auf ein weiteres Erschließungssystem unbedingt ratsam.

These 3b

Ein überproportionaler Schaden wirkt dieser Verringerung des Annuitätenabstandes entgegen und hebt sie bei einem Verhältnis von 2:1 (Massenproportionalität) auf. Erst wenn das 40 m-Gassensystem komplett geschädigt ist, kommt es bei fortschreitender Schädigung im 20 m-System wieder zu einer Annäherung und Steigerung der relativen Annuität, die bis zu diesem Punkt leicht gesunken ist.

Die These 3a beschreibt das Verhältnis 1:1 (relativer Schaden im 40 m-Gassensystem zu relativer Schaden im 20 m-Gassensystem), der zu einer Verringerung des Annuitätenabstandes führt. Da ein kleineres Verhältnis in der vorliegenden Arbeit aus oben genannten Gründen zunächst keine Berücksichtigung fand, beschreibt die These 3b jene Verhältnisse, die größer als 1:1 sind. Diese Verhältnisse führen dazu, dass im 40 m-Gassensystem ein größerer (relativer) Anteil als im 20 m-Gassensystem Schaden nimmt. Dadurch sinkt die Annuität im 40 m-Gassensystem schneller als bei einem streckenproportionalen Schaden. In der Folge nähern sich die Annuitäten weniger stark an. Beim „Sonderfall“ des massenproportionalen Schadens verringern sich die Annuitäten beider Erschließungssysteme gleichermaßen, sodass es zu keiner Annäherung kommt. Nimmt das Verhältnis Werte an, die größer als zwei (2:1) sind, so führt das folgegemäß zur Zunahme des Annuitätenabstandes.

Bei allen Verhältnissen, die größer als 1 (1:1) sind, ist das Absinken der Annuität im 40 m-Gassensystem begrenzt auf das Niveau der vollständigen Schädigung. Zwar kann das Schadausmaß im 20 m-Gassensystem weiter steigen, was die Annuität der 20 m-Gasse weiter sinken lässt, doch die Annuität der 40 m-Gasse hat bereits ihren Tiefpunkt erreicht, sodass diese konstant bleibt. Ab diesem Punkt kommt es folglich wieder zur Annäherung und damit zur Steigerung der relativen Annuität infolge Absinken des Nenners.

Überproportionale Schäden können demnach zu einem Rentabilitätsvorteil beitragen, solange das Verhältnis kleiner als 2:1 ist. Massenproportionale Schäden oder solche, die ein größeres Verhältnis aufweisen, tragen erst dann zu einem Rentabilitätsvorteil der 40 m-Rückegassenerschließung bei, wenn das 40 m-Gassensystem vollständig geschädigt wurde.

Der Proportionalität der Schäden kommt demnach eine wichtige Bedeutung mit praktischem Ausmaß zu. Denn werden in der Praxis Schäden beobachtet, die dem Verhältnis 2:1 entsprechen oder ein größeres Verhältnis aufweisen, sollte von der Erschließung mit 40 m-Gassen grundsätzlich abgesehen werden, da diese nur dann zu einem Rentabilitätsvorteil beitragen, wenn sie vollständig geschädigt sind oder eine komplette Schädigung bevorsteht. Bis zu diesem Punkt verringert sich darüber hinaus die relative Annuität. Dieser Effekt kann andere positive Effekte gewisser-

maßen „verzehren“. Die 40 m-Rückegassenerschließung macht in solchen Fällen nur dann Sinn, wenn keine beziehungsweise sehr geringe Schäden an der technischen Befahrbarkeit beobachtet werden und ein großer positiver Einfluss andere Effekte (ertragskundlicher, waldbaulicher etc. Art) auf die Rentabilität der Waldwirtschaft zu beobachten sind.

Ist das Verhältnis streckenproportional (ca. 1:1), ist grundsätzlich die 40 m-Gassenerschließung ins Kalkül zu ziehen. Wenn die technische Befahrbarkeit in Mitleidenschaft gezogen wird, trägt sie zur Zunahme der relativen Annuität und einer eventuellen Umkehr bei.

These 3c

Die Annäherung (relative Annuität) ist umso größer, je streckenproportionaler der Schaden, je höher der Aufwand der Sanierung und je größer der Kalkulationszinssatz ist.

Aus den Thesen 3a und b geht der Einfluss der Schadproportionalität auf die relative Annuität – dem Verhältnis zwischen den Rentabilitäten der beiden Erschließungsalternativen – hervor. Im streckenproportionalen Fall sinken die Werte unterschiedlich stark, im massenproportionalen Fall in gleichem Maße. Somit kommt es im ersten zu einer Annäherung, im zweiten Fall nicht. Die beschriebenen Fälle stellen gewissermaßen Sonderfälle dar. In der Praxis werden Verhältnisse zwischen diesen beziehungsweise solche, die über den massenproportionalen Fall hinaus gehen, zu beobachten sein.

Der Einschätzung des örtlichen Wirtschafters, welcher Zusammenhang zwischen den beobachteten Schäden der verschiedenen Erschließungsalternativen besteht, kommt eine große Bedeutung zu, da sie maßgeblich für die Wahl des optimalen Gassenabstandes sein wird. Sofern ein massenproportionaler Fall beobachtet wird, sollten unbedingt weitere Effekte analysiert werden, da die negativen Effekte auf die technische Befahrbarkeit keinen Beitrag zu einem Rentabilitätsvorteil leisten werden. Wird hingegen ein streckenproportionaler Zusammenhang beobachtet, kann zumindest ein positiver Einfluss auf die relative Annuität der 40 m-Rückegassenerschließung unterstellt werden. Wie groß dieser sein wird, hängt wiederum von anderen Faktoren ab. An erster Stelle ist hier das Schadausmaß zu nennen. Je mehr Rückegassenfläche geschädigt ist beziehungsweise je öfter Kosten für eine Instandsetzung oder Vorsorge entstehen, umso größer fällt die Annäherung aus und umso kleiner ist der Rentabilitätsnachteil des weiten Erschließungssystems.

Darüber hinaus hat auch die Schadschwere, also die qualitative Ausprägung der Schäden, einen Einfluss auf die relative Annuität der 40 m-Rückegasse. Wie im Ergebnisteil gezeigt werden konnte, sinken die Rentabilitäten mit zunehmender Schadschwere – also mit zunehmenden Kosten, die für die Instandsetzung anfallen.

Ein schwerer streckenproportionaler Schaden, wie zum Beispiel das Befestigen der Gasseneinfahrten mit Wegebaumaterial, senkt demzufolge den Rentabilitätsvorteil der Standarderschließung mit Rückegassen im Abstand von 20 m. Auf den Einfluss der Bodenart, des Bodentyps und des Hydromorphiegrads des Standortes sei an dieser Stelle verwiesen. Die Sensibilität des Substrates und die zum Zeitpunkt der Befahrung vorherrschende Bodenfeuchte bestimmen die Beeinträchtigung der technischen Befahrbarkeit und deren ökonomische Folgen maßgeblich.

Auch der Einfluss des Zinssatzes auf die relative Annuität konnte im numerischen Beispiel der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden. Zunächst muss für den schadfreien Fall konstatiert werden, dass die relative Annuität mit zunehmendem Zinssatz sinkt (bzw. dass der relative Annuitätenabstand mit zunehmendem Zinssatz steigt – vergleiche These 1). Analog zu dieser Erkenntnis ist die Zunahme der relativen Annuitat bei steigender streckenproportionalen Schädigung der technischen Befahrbarkeit zu beobachten. Dieser Effekt ist vor allem bei schweren Schäden, d.h. bei großen Kosten für die Wiederherstellung beziehungsweise Vorsorge zu beobachten.

Bemerkenswert ist, dass der als These 1 diskutierte Effekt sich im (befahrungsbedingten) Schadensfall – also bei der Beeinträchtigung oder dem Verlust der technischen Befahrbarkeit – auszugleichen scheint. Oben wurde geschlussfolgert, dass Betriebe, welche mit sehr hohem Zinssatz kalkulieren, auf Grund der größeren Annuitätendifferenz eher zum Standardverfahren (finanzielles Optimum) greifen werden, da sie einen größeren Rentabilitätsnachteil bei der Anwendung des alternativen Verfahrens in Kauf nehmen müssen. Hier wird jedoch deutlich, dass diese Betriebe im Sanierungs- oder Vorsorgefall eine größere Annäherung der Annuitäten verzeichnen können. Dies kann und sollte die Entscheidung des örtlichen Wirtschafters beeinflussen.

These 3d

Eine durch Vergrößerung des Rückegassenabstandes implizierte Zunahme der Schadschwere dämpft die Annäherung (These 3c). Bei starker Zunahme der Schadschwere führt dies schließlich zur Vergrößerung der Annuitätendifferenz.

In den oben diskutierten Zusammenhängen konnte zwar die quantitative Ausprägung des Schadens zwischen den Erschließungsvarianten verschieden sein, die qualitative Ausprägung wurde jedoch als konstant betrachtet. Trotzdem ist es theoretisch wie praktisch möglich, dass der Schaden bei Vergrößerung des Gassenabstandes nicht nur in quantitativer Hinsicht zunimmt, sondern auch in qualitativer – also schwerer wird. In diesem Fall wird die Annäherung der Rentabilitäten quasi gedämpft, da die (relativen) Kosten der Sanierung in der Alternative mit weiten Gasssenabstand größer sind als die (relativen) Kosten der Sanierug im Standardverfahren.

Im ersten Sonderfall – dem streckenproportionalen Schaden – geht bei einem Kostenverhältnis von 2:1 die Annäherung der Annuitäten verloren, da die Gesamtkosten für die Sanierung im 40 m-Gassensystem genauso groß sind wie die Gesamtsanierungskosten im 20 m-Gassensystem.

Im zweiten Sonderfall – dem massenproportionalen Schaden – kommt es unabhängig vom Kostenverhältnis zu einer Entfernung der Annuitäten. Erst wenn das 40 m-Gassensystem vollständig geschädigt ist, nähert sich die Renatbilität der Alternativvariante mit zunehmender Schädigung der des Optimums an. Dieser Fall sollte in der Praxis möglichst vermieden werden.

An dieser Stelle wird erneut der Stellenwert der Schadproportionalität ersichtlich. Darüber hinaus erlangt auch die Entwicklung der Schadschwere bei Vergrößerung des Rückegassenabstandes Bedeutung. Auf den Zusammenhang mit den standörtlichen Gegebenheiten wird wiederholt verwiesen.

Effekte auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Forstwirtschaft

Im Ergebnisteil wurde bereits dargestellt, dass auch aus Gründen der gesellschaftlichen Akzeptanz wegebauähnliche Maßnahmen ergriffen werden. Da die daraus resultierenden Effekte denen, die aus Gründen des Erhalts der technischen Befahrbarkeit zu beobachten sind, gleichen, wurde auf die Entwicklung zusätzlicher Thesen verzichtet. Entsprechende Praxissätze, welche auf die oben diskutierten Zusammenhänge zurück gehen, wurden aufgestellt.

Maßnahmen zum Erhalt der gesellschaftlichen Akzeptanz wurden vor allem in Waldgebieten mit besonderer Erholungsfunktion beziehungsweise in Schutzgebieten beobachtet. Hier kann es unter Umständen sinnvoll sein, das Gassensystem grundsätzlich auf 40 m umzustellen. Diese Umstände treten zum Beispiel dann ein, wenn die Fahrspuren im 20 m-Gassensystem vollständig mit einem Bagger eingeebnet werden. ForstBW (2012b) nennt hierfür Kosten in Höhe von bis zu 2 Euro lfdm^{-1}. Im numerischen Beispiel wurde gezeigt, dass unabhängig vom Zinssatz diese Schadschwere bereits ausreicht, um den Rentabilitätsnachteil der 40 m-Erschließung auszugleichen.

Darüber hinaus sind die Thesen 3a bis 3d auf diesen Effekt übertragbar. Abschließend gilt auch hier, dass für eine Bewertung der ökonomischen Optimalität eine regional- und standörtlich-differenzierte Auswertung der Erfahrungen der örtlichen Bewirtschafter unabdingbar ist. Ohne die Einschätzung der Schadproportionalität sowie dessen Zusammenhang zur Schadschwere kann keine fachlich-fundierte Würdigung der Effekte auf die Renatbilität erfolgen.

Waldbauliche Effekte des Feinaufschlusses

Die Thesen 2a bis 2d beschreiben die ökonomische Wirkungsweise eines negativen Einflusses der Erschließung mit Rückegassen sowie der darauf stattfinden Befahrung auf das Baumwachstum und die Qualität des Holzes. Sie stellen die Veränderung der Rentabilität durch eine Abnahme der Volumen- beziehungsweise Wertleistung im Detail dar.

Durch die Vergrößerung des Rückegassenabstandes ist jedoch auch ein positiver waldbaulicher Einfluss denkbar. Da die Wirkungsweise dieser Annahme mit den bereits beschriebenen Zusammenhängen identisch ist, wurde auch hier auf die Entwicklung zusätzlicher Thesen verzichtet – die Thesen 2a bis 2d sind übertragbar. Gleichwohl wurden zwei Praxissätze formuliert.

Simple Betterness Method

These 4a

Die Steigerung der Bodenressourcenschonung von 80 auf 100% ist mehr als fünfmal teurer als die Erhöhung von 80 auf 90%. Die Schonung des Bodens durch 40 m-Rückegassenerschließung hat demnach Effizienzvorteile gegenüber der Schonung durch Seilkranverfahren.

Auch hier muss daraufhin gewiesen werden, dass der in These 4a beschriebene Faktor auf die im numerischen Beispiel unterstellten Holzerntekosten zurückzuführen ist, welche wiederum auf den unterstellten Faktorenpreisen und Produktivitätsmodellen beruhen.

Diese These veranschaulicht das Verhältnis zwischen den Opportunitätskosten der Alternativen zum Optimum. Da der Opportunitätsgewinn der zweiten Alternative (Erschließung mit Seiltrassen) genau doppelt so groß ist wie der der ersten (40 m-Rückegassenerschließung), fällt die Interpretation sehr leicht. Für die „Einsparung“ der letzten 10 Prozentpunkte (Anwendung von Seilkranverfahren) muss auf viermal mehr Annuität verzichtet werden als für die Einsparung der vorletzten 10 Prozentpunkte (von 80% auf 90% – durch die Erweiterung des Rückegassenetzes auf 40 m). Es ist demzufolge aus Sicht der Bodenressourcenschonung effizienter, das Rückegassensystem von 20 m auf 40 m zu erweitern, als Seilkransysteme anzuwenden. Die Praxis bestätigt dies – Seilkransysteme in der Ebene kommen ausnahmslos nur dann zur Anwendung, wenn eine Befahrung mit Rad- oder Raupenfahrwerken nicht mehr möglich ist (beziehungsweise die dadurch bedingten Schäden einen hohen Wiederherstellungsaufwand nach sich ziehen).

These 4b

Feinerschließungssysteme mit Seiltrassen anstatt Rückegassen bringen bei gleichem Linienabstand hinsichtlich der waldbaulichen Freiheit keinen zusätzlichen Effekt, bei deutlich größeren Opportunitätskosten.

Da die waldbauliche Freiheit in der vorliegenden Arbeit über die Breite der Behandlungseinheiten definiert wird, entsteht durch die Anwendung von Seilkranverfahren mit Seiltrassen im Abstand von 40 m gegenüber der 40 m-Rückegassenerschließung kein Vorteil, obgleich sie deutlich mehr Kosten verursachen. Demzufolge rechtfertigt auch die waldbauliche Freiheit die Anwendung deutlich teurerer Seilkranverfahren nicht.

Der kritische Leser wird anmerken, dass im Gegensatz zur Erschließung mit Gassen im gleichen Abstand keine Befahrung stattfindet, und demzufolge Bodenstrukturveränderungen und Wurzelbeschädigungen der Gassenrandbäume ausbleiben. Die „Blockbegrenzung“, im Sinne von Bäumen am Gassenrand, die im Rahmen einer Positivauslese nicht ausgewählt werden können, ist folglich nicht so stark ausgeprägt als bei der Erschließung mit Rückegassen. Die Definition der waldbaulichen Freiheit anhand des Abstandes und der Breite der Feinerschließungslinien weist demnach Grenzen auf.

6 Schlussfolgerung

Die Motivation zur vorliegenden Arbeit lag in den oft geführten Diskussionen über den „richtigen“ Gassenabstand. Im Zentrum der Betrachtung steht der Vergleich alternativer Holzernteverfahren mit dem üblichen Standardverfahren auf Rückegassen im 20 m-Abstand. Die zentralen Fragen der vorliegenden Untersuchungen waren: Welche Kosten entstehen bei der Anwendung praxisüblicher Verfahren? Wie groß sind die Kostenunterschiede zwischen den Verfahren und den Erschließungssystemen? Wie wirken sich diese Unterschiede auf die Rentabilität der Waldbewirtschaftung aus? Ist ein weiteres Feinerschließungssystem ökonomisch zu rechtfertigen? Gibt es Ursachen, die es zur langfristig günstigeren Alternative werden lassen?

Die angewandte Methode kann nicht alle Fragen abschließend beantworten. Vielmehr hängt die Überlegenheit der Standardverfahren (auf 20 m-Rückegassen) von verschiedenen Rahmenbedingungen ab. Die Abbildung 63 zeigt die fünf Rahmenbedingungen, die auch Niederschlag im Modell der vorliegenden Arbeit fanden. Darüber hinaus zeigt es weitere Variablen und Einflussfaktoren auf, die wiederum auf die Rahmenbedingungen wirken und somit indirekte Wirkung auf die Rentabilität entfalten.

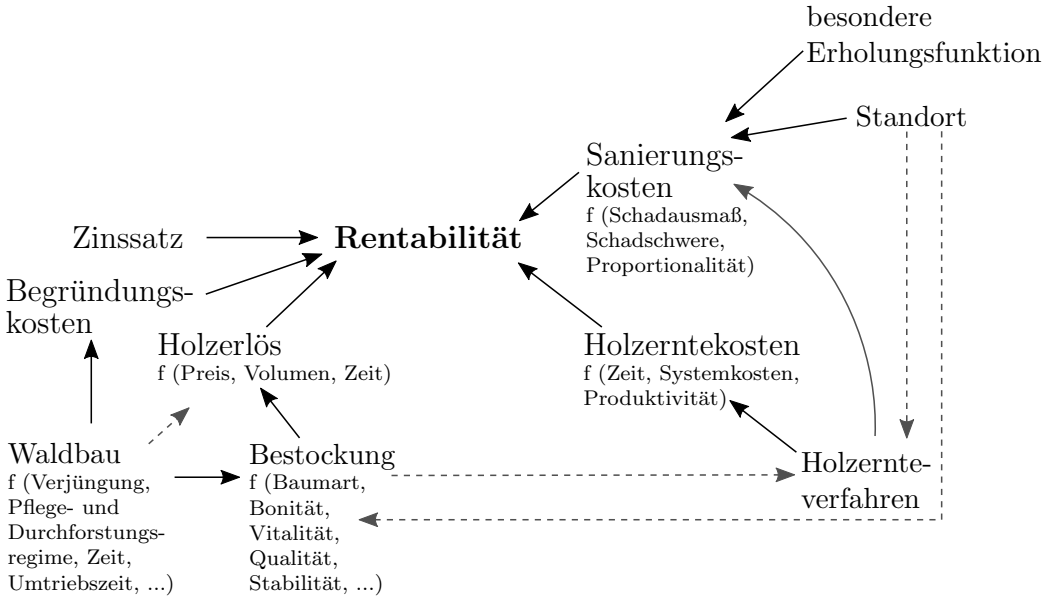


Abb. 63: *Rahmenbedingungen des angewandten Modells und ihre Wirkungen auf die Rentabilität der Bewirtschaftung*

Im Folgenden werden die fünf Rahmenbedingungen und deren Wirkungen zusammenfassend dargestellt. Die Einschätzung der Sensitivität des Modells gegenüber der Veränderung einzelner Rahmenbedingungen und den zu Grunde liegenden Variablen lässt Rückschlüsse auf das Potenzial zu, den Rentabilitätsnachteil des weiteren Gassenabstandes auszugleichen.

Die Schlussfolgerung soll dem ökonomisch interessierten Wirtschafter bei der Bewertung seiner Holzernteverfahren dienen. Schließlich bleibt die Wahl des Gassenabstands eine Entscheidung des Waldbewirtschafters, die stets von der individuellen Einschätzung der vorherrschenden Rahmenbedingungen sowie von seinen persönlichen Präferenzen und Zielen beeinflusst wird.

Zinssatz (Kapitalkosten)

Den Kapitalkosten kommt eine entscheidende Bedeutung im Modell zu – auch weil der Zinssatz von keinem anderen Faktoren im beschriebenen Modell abhängig ist. Zusammenfassend kann die Wirkung dieser Rahmenbedingung wie folgt beschrieben werden:

Je höher der Zinsatz und umso größer folglich die Zinskosten, desto unrentabler ist die Anwendung teurerer Holzernteverfahren (vergleiche These 1). Im numerischen Beispiel hat sich der relative Unterschied zwischen den untersuchten Alternativen bei der Erhöhung von einem sehr niedrigen (0,01%) auf einen hohen (2,5%) Zinssatz nahezu verdoppelt. Auf den beschriebenen Zusammenhang zu den Begründungskosten sei an dieser Stelle unbedingt hingewiesen.

Effekte, die auf der Seite der Holzerlöse auftreten (vor allem bei Volumen-Effekten, aber auch beim Preiseffekt), wirken in Betrieben mit einem hohen Kalkulationszinssatz weniger stark auf den Annuitätenabstand als in Betrieben mit geringem Zinssatz (vergleiche These 2c und 2d).

Anders ist es beim Auftreten von mittleren und hohen Sanierungs- oder Vorsorgekosten. Diese wirken bei Betrieben mit hohem Kalkulationszinssatz deutlich stärker auf das Absinken des relativen Annuitätenabstandes als bei solchen mit geringem Zinssatz (siehe These 3a). Dieser Effekt ist bei leichten Schäden, die nur geringe Kosten nach sich ziehen, vernachlässigbar.

Begründungskosten

Die Begründungskosten fallen immer dann an, wenn aufwendige Kunstverjüngung notwendig wird. Sie hängen maßgeblich von der gewählten Baumart, dem einzubringenden Pflanzensortiment, dem Pflanzverband sowie den Standortbedingungen ab. Auch die Notwendigkeit aufwendiger Schutzeinrichtungen schlägt sich in diesen Kosten nieder.

Die durch die Bestandesbegründung verursachten hohen Investitionskosten zu Beginn der Umtriebszeit wirken stark auf die Rentabilität der Bewirtschaftung und somit auf den relativen Annuitätenabstand zwischen zwei Verfahrensalternativen. Wenngleich der absolute Annuitätenabstand unverändert bleibt, führen Begründungskosten – vor allem in Verbindung mit hohen Zinssätzen – zu einer deutlichen Vergrößerung des relativen Abstandes. Bei der Anwendung von geringen Zinssätzen bleibt der Einfluss dieser Kosten erwartungsgemäß beinahe aus. Betriebe mit hohen Zinskosten müssen folglich die Begründungskosten im Blick behalten, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des Rentabilitätsnachteils teurerer Erschließungssysteme haben.

Hier soll auch dem Einfluss der Umtriebszeit auf das Modell kurz Aufmerksamkeit gewidmet werden, wenngleich diese Variable nicht Gegenstand der Betrachtung war. Dem aufmerksamen Leser wird einleuchten, dass mit bei größeren Umtriebszeiten die oben beschriebenen Effekte der Begründungskosten zunehmen werden. Auf den Zusammenhang zwischen Baumart, Produktionsziel und Produktionsdauer sei an dieser Stelle verwiesen.

Holzerlös

Der Holzerlös ist als einzige Rahmenbedingung für positive Rentabilitäten der Waldbewirtschaftung verantwortlich und daher sehr bedeutend. Grundsätzlich ist der Erlös von Menge und Preis der zu erntenden Sortimente abhängig. Beide resultieren aus der Bestockung – vor allem aus dem Volumen und der Qualität des Holzes. Zur Erreichung des forstlichen Produktionsziels sind daneben auch die Vitalität sowie die Stabilität der Bestockung von entscheidender Bedeutung. Alle diese Größen resultieren wiederum aus verschiedenen Faktoren, die der örtliche Wirtschafter durch Waldbau beeinflusst.

Aber auch die Holzernte – im Speziellen die Befahrung der Bestände mit Rad- oder Kettenfahrwerken – kann die Variablen beeinträchtigen. Wird davon ausgegangen, dass die Befahrung und die damit einhergehenden Veränderungen des Bodens negative Effekte auf die Produktionsfunktion des Waldbodens (und dem darauf stockenden Bestand) haben, sinken folglich die Erlöse und die daraus resultierenden Rentabilitäten. Doch auch der umgekehrte Fall ist denkbar: werden die Dimension sowie die Qualität des Holzes durch breitere Behandlungseinheiten gesteigert, führt dies zu einer Erhöhung der Rentabilität der Bewirtschaftung mit weiten Abständen.

Grundsätzlich gilt, verschlechtern sich die Deckungsbeiträge, so vergrößert sich der relative Annuitätenabstand. Damit vergrößert sich der Bereich, der durch andere Effekte überwunden werden muss, damit ein Alternativverfahren zum Optimum wird.

Der Deckungsbeitrag verschlechtert sich immer dann, wenn die Erntekosten steigen (zum Beispiel auf Grund schwieriger Erntebedingungen oder eines größeren Anteils motormanueller Arbeit bei der Ernte) oder die Holzpreise sinken (zum Beispiel auf Grund von Preisveränderungen am Holzmarkt oder einer Verschlechterung der Holzqualität). In beiden Fällen vergrößert sich das Verhältnis zwischen den relativen Holzerntekosten und dem durchschnittlichen Holzpreisen, was – auch ohne die Berücksichtigung zusätzlicher Effekte – den relativen Annuitätenabstand zwischen dem Standard- und den Alternativverfahren steigen lässt.

Auch die Baumart hat einen Einfluss auf die Holzerlöse und somit auf die Rentabilität der Waldbewirtschaftung sowie den relativen Annuitätenabstand zwischen Verfahrensalternativen. Erzielt eine Baumart geringere Holzpreise am Markt ohne dass sich die Produktionsdauer wesentlich verkürzt, so wirkt sich dies genauso negativ auf die genannten Größen aus, wie höhere Preise bei wesentlich längerer Produktionsdauer.

Befahrungsbedingte Holzentwertungen sowie Qualitätssteigerungen durch größere waldbauliche Freiheiten in Beständen mit weitem Aufschluss führen zu einer Annäherung der Verfahrensalternativen oder gar zu einer Umkehr des Optimums. Da diese Effekte direkt über die Deckungsbeiträge auf das Modell Einfluss nehmen, wirken sie stärker als Volumenveränderungen und umso mehr, je größer das Kosten-Erlös-Verhältnis ist.

Eine Veränderung der Massenleistung hat für sich genommen keinen Einfluss auf den Deckungsbeitrag. Sinken die Erntevolumen in beiden Verfahrensalternativen gleichermaßen bleibt der relative Annuitätenabstand unverändert. Ein befahrungsbedingtes Absinken der Massenleistung kann jedoch zu einer Annäherung des alternativen Verfahrens an das Optimum führen (siehe These 2a). Im Gegensatz zu den qualitätsseitigen Effekten unterliegen die Volumen-Effekte einem großen Einfluss des Zinssatzes. Die Wirkung in Betrieben mit hohen Zinssätzen fällt hier deutlich stärker aus.

Holzerntekosten

Die Holzerntekosten bestimmen maßgeblich die Diskussion über die Optimalität von Holzernteverfahren und sind daher ein wichtiges Kriterium bei der Entscheidungsfindung der Waldbewirtschafter. Die Differenz zwischen den Kosten des Standardverfahrens und denen der Alternative ist eine entscheidende Größe, schließlich bewirkt sie den Rentabilitäsnachteil der Bewirtschaftung mit weiten Gassenabständen, der durch andere Effekte überwunden werden muss, damit aus einem alternativen ein optimales Verfahren wird.

Die Holzerntekosten sind verfahrensspezifisch und ergeben sich aus dem Verhältnis zwischen den Systemkosten und der Produktivität. Beide Größen unterliegen dem Einfluss der Bestockung und des Standortes.

Auf den Einfluss des Deckungsbeitrages auf den relativen Annuitätenabstand wurde bereits mehrfach verwiesen. Dem Verhältnis zwischen Holzerntekosten und -erlösen kommt eine zentrale Bedeutung im vorliegen Modell zu, da es den relativen Annuitätenabstand bestimmt. Jedes Verringerung der Systemkosten sowie jede Steigerung der Produktivität hat nicht nur ein Sinken der Holzerntekosten zur Folge sondern auch eine Verringerung des relativen Annuitätenabstandes, was den Nachteil des alternativen Verfahrens folglich kleiner werden lässt.

Grundsätzlich gilt, je kleiner die absoluten Verfahrenskosten und/ oder die Kostendifferenz zwischen alternativen Holzernteverfahren sind, umso geringer ist der relative Annuitätenabstand. Aus diesem Grund sollten je Erschließungsvariante nur (kosten-) optimierte Verfahren ins Kalkül gezogen werden.

Sanierungskosten

Sanierungskosten entstehen immer dann, wenn der örtliche Wirtschafter Maßnahmen ergreift um befahrungsbedingte Schäden an der Rückegasse zu sanieren oder diesen vorzubeugen. Das Auftreten von Sanierungskosten hat einen Einfluss auf die Optimalität von Verfahrensalternativen. Die Wirkung hängt von der Höhe der Kosten sowie von dem beobachteten Einfluss des Rückegassenabstandes (Proportionalität der Schäden) ab.

Die Höhe der Sanierungskosten ergibt sich aus dem Produkt von Ausmaß (Quantität) und Schwere (Qualität) des Schadens. Je mehr Rückegassenfläche geschädigt ist und je mehr Geld pro Flächeneinheit aufgewendet werden muss, um die technische Befahrbarkeit wiederherzustellen, desto größer fallen die Sanierungskosten aus und umso kleiner wird die Annuität der Waldbewirtschaftung.

Der Einfluss der Sanierungskosten auf die Optimalität der Verfahrensalternativen ist abhängig vom beobachteten Zusammenhang zwischen Schadausmaß und Rückegassenabstand. In der vorliegenden Arbeit wurde hier mit zwei Sonderfällen gearbeitet: dem streckenproportionalen sowie dem massenproportionalen Schaden.

Der streckenproportionale Fall führt auf Grund der reduzierten Rückegassenfläche im 40 m-Gassensystem beim Auftreten von Schäden und dem damit einhergehenden Verlust der technischen Befahrbarkeit mindestens zur Verringerung des Rentabilitätsvorteils des 20 m-Rückegassensystems. Bei hohen Sanierungskosten kann auch eine Umkehr des Optimums erwartet werden.

Massenproportionale Schädigungen am Erschließungssystem würden hingegen erst dann zu einer Annäherung der Alternativen (in Bezug auf ihre Annuitäten) führen, wenn das 40 m-Gassensystem vollständig geschädigt ist. Ein solcher Zustand rechtfertigt zwar theoretisch einen weiten Gassenabstand ökonomisch, muss jedoch auf Grund von ökologischen und sozialen Zielkonflikten unbedingt vermieden werden.

Der Zusammenhang in Bezug auf die Schadschwere ist daneben ebenfalls im Blick zu behalten. Nimmt die Schwere des Schadens durch Vergrößerung des Rückegassenabstandes zu, dämpft dies die Verringerung des Annuitätenabstandes beziehungsweise vergrößert diesen. An dieser Stelle wird deutlich, wie wichtig die differenzierte Betrachtung der auftretenden Schäden und der Einfluss des Rückegassenabstandes ist. Hier ist neben weitergehender wissenschaftlichen Betrachtung des komplexen Systems der Rückegasse und ihrer technischen Funktionen vor allem die Erfahrung und Kenntnis des örtlichen Wirtschafters notwendig, um den Zusammenhang und die daraus resultierenden Effekte für die Waldbewirtschaftung prognostizieren zu können.

Zuletzt muss auch hier auf den Einfluss des Zinssatzes hingewiesen werden. Hohe Zinssätze verstärken die beschriebenen Effekte.

7 Zusammenfassung

Das Befahren mit schweren Maschinen verursacht Bodenstrukturveränderungen, weshalb im Rahmen des forstlichen Bodenschutzes eine Funktionalisierung des Waldbodens vorgenommen und das Fahren auf Rückegassen konzentriert wird, die in unterschiedlichen Abständen angelegt werden können. Die ökonomischen Auswirkungen der Rückegassen beziehungsweise deren Abstände zueinander sind bisher wenig untersucht.

Der Erhalt der Befahrbarkeit steht im Mittelpunkt forsttechnischer Betrachtungen. So stehen eine Vielzahl von verschiedenen Maßnahmen zur Verfügung, um einen drohenden Verlust abzuwehren. Ist die forsttechnische Befahrbarkeit erst einmal verloren, kann sie nur durch langwierige bodenbiologische und -physikalische Prozesse wiederhergestellt werden. Kurzfristig ist sie nur durch die Befestigung der Rückegasse mit Wegebaumaterial wiederherzustellen.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht die ökonomische Abbildung von verschiedenen Effekten der Befahrung: Neben Kosten, die im Zusammenhang mit dem Erhalt oder der Wiederherstellung der technischen Befahrbarkeit auftreten, sind auch die Wirkungen auf die ertragskundliche Leistung des Bestandes sowie auf die Qualität zukünftig zu erntender Bäume abbildbar. Hierzu dient das Faustmann-Modell als forstökonomisches Handlungskalkül. Mit Hilfe einer numerischen Simulation der ertragskundlichen Datenbasis zur Berechnung der Holzerlösströme sowie der Kalkulation der forsttechnischen System- und Verfahrenskosten können Rentabilitätsunterschiede durch die Anwendung unterschiedlicher Feinerschließungssysteme ermittelt werden. Ferner wird das Modell um weitere Effekte der Befahrung erweitert, um die Auswirkungen auf die Rentabilität mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchen. Monetär nur schwer zu quantifizierende Effekte werden durch die Darstellung der Opportunitätskosten in die Betrachtungen einbezogen. Um den Einfluss der Zinskosten darzustellen, werden drei verschiedene Zinssätze unterstellt.

Der Rentabilitätsnachteil durch Vergrößerung des Rückegassenabstandes von 20 auf 40 m beträgt je nach unterstellten Kalkulationszinssatz zwischen 7 und 14% der Rentabilität des Standardverfahren mit 20 m-Gassen. Der Nachteil durch die Anwendung von Seilkranverfahren beträgt zwischen 36 und 79%. Der Nachteil alternativer Verfahren steigt mit zunehmenden Zinssatz umso stärker, je mehr Begründungskosten im Modell berücksichtigt werden müssen.

Unterstellt man den Verlust der biologischen Produktionsfunktion im Umfang der Flächeninanspruchnahme durch die Rückegassen, kommt es zur Umkehr der Optimalität – Gassen im Abstand von 40 m und die darauf zur Anwendung kommenden Verfahren sind dann überlegen. Die Holzentwertungen wirken stärker auf die Rentabilität als die Volumenminderung. Der beobachtete Effekt wirkt umso stärker, je ungünstiger das Kosten-Erlös-Verhältnis ist. So konnte für das numerische Beispiel errechnet werden, dass ein Volumenunterschied zwischen den verschiedenen Feinerschließungssystemen von 7 bis 10% (je nach Zinssatz) notwendig ist, um Rentabilitätsgleichheit herzustellen. Gleiche Wirkung ist durch den Unterschied des mittleren Holzpreises von 5 bis 6% erreichbar. Bei beiden Effekten führt ein geringer Zinssatz eher zu einer Umkehr des Optimums, wenngleich die Wirkung bei der Holzentwertung deutlich kleiner ist. Für die Effekte auf die Volumen- beziehungsweise Wertleistung der Waldbestände durch größere Gassenzwischenbereiche und dadurch gesteigerter waldbaulicher Handlungsfreiheit gelten gleiche Zusammenhänge.

Schäden an der forsttechnischen Befahrbarkeit wirken ebenfalls auf die Rentabilität der Waldbewirtschaftung. Durch die Einführung der Schadensarten „streckenproportional“ und „massenproportional“ sowie der Größe des Schadausmaßes und der Unterscheidung nach Schadschwere können die Effekte der Befahrung auf die forsttechnische Befahrbarkeit in ihren Wirkungen differenziert und Schlussfolgerungen für die Praxis abgeleitet werden. So führt der Ausbau von 38-44% der Rückegasse (im 20 m-System) auf Grund schwerer streckenproportionaler Schäden beziehungsweise von 69-72% der Rückegasse (im 20 m-System) auf Grund schwerer massenproportionaler Schäden sowie eine vollständige mittelschwere Schädigung, die ein Einebnen der Fahrspuren notwendig macht, zur Optimalität der 40 m-Rückegassenerschließung. Grundsätzlich gilt, dass der Rentabilitätsnachteil des 40 m-Gassensystems umso geringer wird, je teurer die Maßnahme und je größer der Zinssatz ist. Hingegen sollten 40 m-Seiltrassen nur auf solchen Standorten zur Anwendung kommen, die keine Befahrung zulassen. Die Ergebnisse können für eine Sanierung, die aus waldästhetischen beziehungsweise aus sonstigen gesellschaftlichen Erwägungen vollzogen wird, entsprechend übertragen werden.

Die ökonomischen Effekte auf Grund von Schäden am Erschließungssystem sind mit solchen, die auf die Qualität oder das Volumen des Holzes wirken, beliebig kombinierbar. Eine eigens entwickelte Optimalitätsregel hilft bei der Wahl des effizienteren Gassenabstandes.

Die Opportunitätskosten für den Bodenschutz – durch Reduzierung der Fläche die primär der Befahrung dient – von 20 auf 10% beziehungsweise für die Erhöhung der waldbaulichen Handlungsfreiheit durch die Verbreiterung der „Behandlungsblöcke“ betragen je nach Zinssatz zwischen 31 und 17 Euro pro Jahr und Hektar. Eine Reduzierung der Flächeninanspruchnahme von 20 auf 0% – durch die Anwendung von Seilkranverfahren - verursacht Opportunitätskosten in Höhe von 95 bis 165 Euro pro Jahr und Hektar. Ein zusätzlicher Gewinn an waldbaulicher Handlungsfreiheit entsteht dadurch

nicht. Somit sind Verfahren mit Rückegassen im Abstand von 40 m hinsichtlich des Bodenschutzes und der waldbaulichen Handlungsfreiheit effizienter als Seilkranverfahren.

Der forstlichen Praxis kann abschließend empfohlen werden, folgende fünf Rahmenbedingungen stets im Blick zu haben, um optimale Holzernteverfahren bestimmen zu können: die Begründungskosten, die Holzerlöse und -erntekosten, die Sanierungskosten sowie den Zinssatz.

Anhang

Abbildungen

(a) Track 575 - Raupenforwarder (b) Track 775 - Raupenharvester

Abb. 64: *Kleinsysteme des finnischen Herstellers Farmi (Produktion eingestellt)*

MORGENPOST, 2.10.2012 **Sachsen/Gewinnspiel** · 11

Das ist ‚geplante Waldpflege': Baumärger im Nationalpark

SEBNITZ - Große Aufregung im Nationalpark Sächsische Schweiz: Am Lindengründel (Luchsstein) entdeckten Wanderer schweres Arbeitsgerät des Sachsenforstes, das massive Schäden im Gelände hinterlassen hat.

„Mitten in der streng geschützten Kernzone wurden alte Wege zum Teil komplett zerstört", schimpft Christian Helfricht von der IG Stiegen und Wanderfreunde. Im Nationalpark in der höchsten Schutzzone dürfe der Einsatz der sogenannten Harvester nicht akzeptiert werden. Zudem entdeckte er auch einen offenen Dieselkanister. „Mir fehlen da die Worte und man ist den Tränen nahe, wenn man diesen Frevel an der Natur sieht."

Die Nationalparkverwaltung ist sich keiner Schuld bewusst: „Das war geplante und routinemäßige Waldpflege", so Sprecher Hanspeter Mayr. Der Weg sei extra für Waldarbeiten angelegt worden. „Die Schäden werden beseitigt", verspricht Mayr. Das Gebiet liege zudem nicht in der Kernzone, sondern an der Grenze. Zum Kanister konnte er nichts sagen. „Wir prüfen das." mor

Die Arbeitsgeräte haben tiefe Spuren hinterlassen. Die Schäden werden jedoch behoben, so die Nationalparkverwaltung.

Foto: Christian Helfricht

Abb. 65: *Zeitungsartikel der Morgenpost am 2. Oktober 2010 nach einer Holzerntemaßnahme im Nationalpark Sächsische Schweiz*

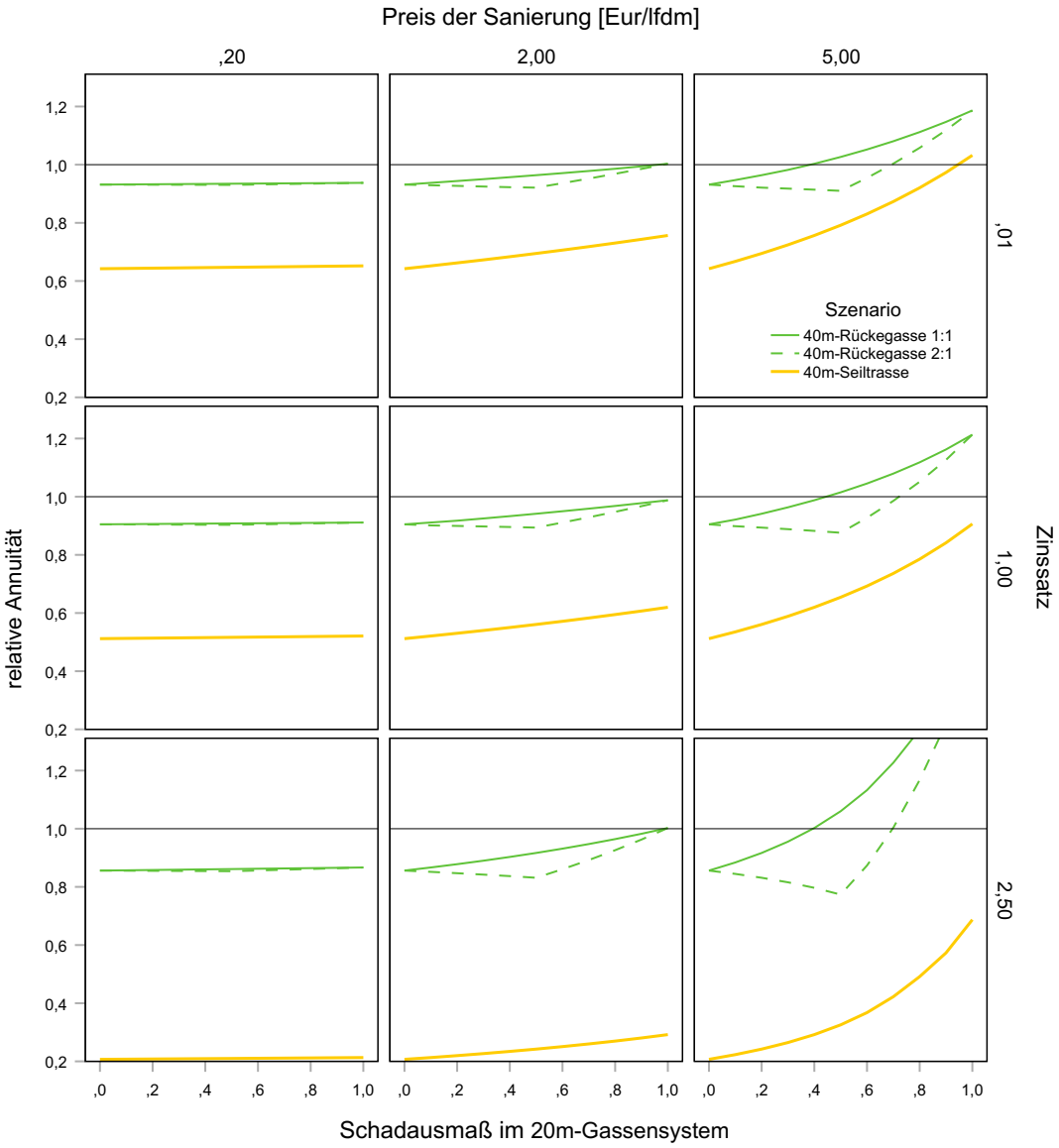


Abb. 66: *relative Annuitäten der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung der drei verwendeten Kalkulationszinssätze*

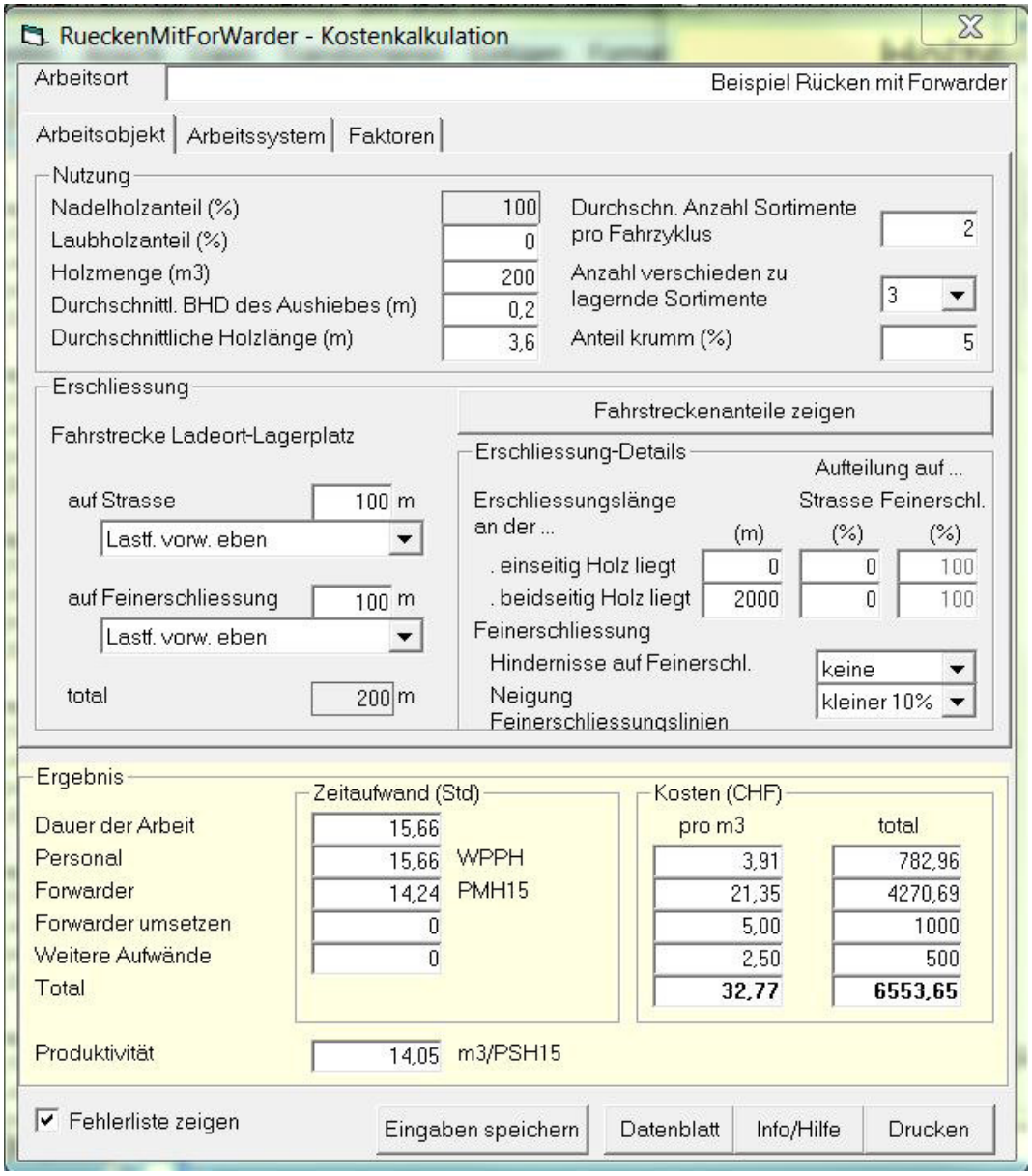


Abb. 67: *Einstellungen der Produktivitätsanalyse des Forwarders im Programm HeProMo*

Tabellen

Tab. 20: *Sortierungseinstellungen*

Sortiment	Güte	Stärkeklasse	Durchmesser				Länge		Zugabe		Wertigkeit	Preis	Prozent der Bäume	Kollektiv	Sortimentsaushaltung
			D_{min}	D_{max}	$Zopf_{min}$	$Zopf_{max}$	L_{min}	L_{max}	Z_{abs}	Z_{rel}					
			cm				m		cm	%		Euro/Efm	%		
Langholz	A	3b	35,0	39,9	12,0	99,9	12,0	18,0		1	70	100,00	5,0	Z-Bäume	einfach
		4	40,0	49,9								110,00			
		5	50,0	59,9								120,00			
		6	60,0	69,9								130,00			
	B/C	1a	10,0	14,9	12,0	99,9	12,0	18,0		1	65	57,00	55,0	alle	einfach
		1b	15,0	19,9								72,00			
		2a	20,0	24,9								83,00			
		2b+	25,0	69,9								93,00			
	D	1a	10,0	14,9	12,0	99,9	12,0	18,0		1	60	50,00	45,0	alle	einfach
		1b	15,0	19,9								55,00			
		2a	20,0	24,9								57,00			
		2b+	25,0	69,9								60,00			
Langholzabschnitte	A	3b	35,0	39,9	10,0	55,0	3,6	5,0	10		68	100,00	5,0	Z-Bäume	mehrfach
		4	40,0	49,9								110,00			
		5	50,0	59,9								120,00			
		6	60,0	69,9								130,00			
	B/C	1a	10,0	14,9	10,0	55,0	3,6	5,0	10		63	57,00	55,0	alle	mehrfach
		1b	15,0	19,9								72,00			
		2a	20,0	24,9								83,00			
		2b+	25,0	69,9								93,00			
	D	1a	10,0	14,9	10,0	55,0	3,6	5,0	10		58	50,00	45,0	alle	mehrfach
		1b	15,0	19,9								55,00			
		2a	20,0	24,9								57,00			
		2b+	25,0	69,9								60,00			
Palettenholz		1-2a	10,0	24,9	10,0	55,0	2,4	3,0	10		56	39,00	100,0	alle	mehrfach
Industrieholz, kurz	N		6,0	75,0	6,0	75,0	2,0	3,0		10	54	32,00	80,0	alle	mehrfach
	F/K							2,0			52	26,00	20,0		

Tab. 21: *Richtwerte für die Maschinenkostenkalkulation (verändert nach* KWF *2013)*

		Veralterungszeit	techn. Gesamtnutzungsdauer	Auslastungsschwelle	Abschreibungsdauer	wahrscheinliche jährliche Nutzungsdauer	Restwertfaktor	Reparaturkostenfaktor	Kraftstoffverbrauch	Schmierstoffaktor	Sonstige Kosten	Umsetzkosten ohne Lohn
		N	**H**	$\mathbf{h}_{opt}$	**n**	$\mathbf{h}_{real}$	$\mathbf{f}_{Ver}$	$\mathbf{f}_{RepWart}$	$\mathbf{f}_{KrSt}$	$\mathbf{f}_{SchmSt}$	$\mathbf{f}_{Sonst}$	$\mathbf{K}_{Umsetz}$
Maschinenkategorie		Jahre	MAS	MAS_{15}/Jahr	Jahre	MAS_{15}/Jahr	% von K_{An}	L/MAS_{15}			% von K_{An}	Euro/MAS_{15}
	H1								12,0			
Radharvester	H2								15,0			2,0
	H3	8	14 000	1750	6	1500	25	1,1	16,0	0,25	12	
Raupenharvester	H4								16,0			
Prozessoren	P								14,0			1,5
selbstfahrende Seilwinden	SFW							0,6	3,5	0,05		
Forstschlepper	S1		17 000	667		700			4,5	0,05		
Forstschlepper m. Kran	S2	15			9		40	0,8	6,0	0,15	12	0,5
Forstspezialschlepper	S3								5,5	0,05		
Forstspezialschlepper m. Kran	S4		10 000	1133		1200		0,9	7,0	0,15		
schwere Forstspezialschl. m. Kran	S5								7,0	0,15		
	F1								7,0			
Radforwarder	F2	10	16 000	1600	7	1500	30	0,9	8,0			2,0
	F3								9,0	0,15	12	
Rückezüge	RZ1/2	15	10 000	667	9	700	40	0,8	7,0			0,5
kleiner Raupenforwarder	F5	10	16 000	1600	7	1500	30	0,9	7,5			2,0
Aufbau-Seilkran m. Prozessor	SK1							0,9	18,0	0,25		2,0
Anhänger-Seilkran m. Prozessor	SK2								15,0	0,20		2,0
Anhänger-Seilkran	SK3	15	17 000	1133	12	1300	20		12,0	0,10	12	1,5
Anbau-Seilkran	SK4							0,8	10,0	0,10		0,5
Bagger-Seilkran	Y								14,0	0,15		2,0

Tab. 22: *Anschaffungskosten der recherchierten Maschinen-Systeme sowie die zu Grunde liegenden Quellen*

Maschinenkategorie		Anzahl Typen	Ansch.Kosten Mittelwert	Ansch.Kosten Median	Quellen
			Euro	Euro	
Radharvester	H1	1	122 000		[1, S. 125]
	H2	3	319 333	330 000	[1, S. 90], [2, S. 102], [4]
	H3	19	394 318	394 000	[1, S. 77 ff.], [2, S. 74], [3, S. 125 ff.], [4]
Raupenharvester	H4	4	360 500	362 500	[1, S. 82], [2, S. 171], [3, S. 112]
Prozessoren	P	3	218 667	220 000	[2, S. 85], [3, S. 86 ff.]
selbstf. Seilwinden	SFW	1	76 000		[3, S.212]
Forstschlepper	S1	5	91 746	90 880	[1, S. 130 ff.]
Forstschl. m. Kran	S2	4	176 283	179 000	[2, S. 107], [3, S. 145 ff.], [4]
Forstspezialschl.	S3	6	181 073	186 975	[1, S. 156 ff.], [3, S. 84 ff.], [4]
Forstspez. m. Kran	S4	3	263 483	269 000	[1, S. 103 ff.], [3, S. 139]
schw. FSS m. Kran	S5	2	273 000		[2, S. 71], [3, S. 168]
Radforwarder	F1	1	79 000		[3, S. 125]
	F2	7	236 843	247 500	[1, S. 99 ff.], [2, S. 102], [3, S. 132 ff.]
	F3	19	233 705	235 000	[1, S. 77 ff.], [3, S. 125 ff.], [4]
Rückezüge	RZ1/2	7	138 181	152 100	[1, S.73 ff.], [3, S. 99 ff.]
Aufbau-Seilkran m. Proz.	SK1	7	492 429	480 000	[1, S. 212], [3, S. 193 ff.], [5]
Anhänger-Seilkran m. Proz.	SK2	1	310 000		[3, S. 198]
Anhänger-Seilkran	SK3	7	216 972	201 805	[1, S. 209], [3, S. 193 ff.], [5]
Anbau-Seilkran	SK4	3	141 587	129 500	[3, S. 202], [5]
Bagger-Seilkran	Y	2	240 000		[2, S. 85], [3, S. 162]

[1] Austrofoma (2007) [2] KWF (2008) [3] Austrofoma (2011)
[4] Busch (2013) [5] KWF (2015)

Tab. 23: *Systemkosten der Mensch-Maschinen-Systeme*

Maschinenkategorie		Anzahl Typen	Anschaffungs-		Systemkosten		
			Mittelwert	Median	Mittelwert	Median	Variationskoeffizient
			Euro		Euro/MAS_{15}		
	H1	1	122 000		92,26		
Radharvester	H2	3	319 333	330 000	152,20	155,13	4%
	H3	19	394 318	394 000	174,71	174,62	6%
Raupenharvester	H4	4	360 500	362 500	165,40	165,95	9%
Prozessoren	P	3	218 667	220 000	120,55	120,91	2%
selbstf. Seilwinden	SFW	1	76 000		68,24		
Forstschlepper	S1	5	91 746	90 880	76,50	76,13	22%
Forstschl. m. Kran	S2	4	176 283	179 000	119,72	120,93	7%
Forstspezialschl.	S3	6	181 073	186 975	86,46	88,00	10%
Forstspez. m. Kran	S4	3	263 483	269 000	113,54	115,02	7%
schw. FSS m. Kran	S5	2	273 000		116,08		10%
	F1	1	79 000		67,02		
Radforwarder	F2	7	236 843	247 500	106,25	108,78	6%
	F3	19	233 705	235 000	107,23	107,54	5%
Rückezüge	RZ1/2	7	138 181	152 100	105,05	111,23	13%
kleiner Raupenforwarder	F5	0			69,50*		
Aufbau-Seilkran m. Proz.	SK1	7	492 429	480 000	227,77	224,54	6%
Anhänger-Seilkran m. Proz.	SK2	1	310 000		173,59		
Anhänger-Seilkran	SK3	7	216 972	201 805	141,13	136,57	7%
Anbau-Seilkran	SK4	3	141 587	129 500	116,97	113,89	6%
Bagger-Seilkran	Y	2	240 000		151,12		

*nach Sündermann et al. (2013)

Tab. 24: *Regressionen für die Verfahrensstufen des Fertigens*

Verfahrensstufe	**Regressionskoeffizienten**			**Korrelationskoeffizient**
	a	**b**	**c**	
motormanuelles Fällen	−1,3187	8,5291	2,2024	0,9995
motormanueller Holzeinschlag	−6,2518	37,6570	7,9231	0,9994
Holzeinschlag mit mittlerem Harvester	−1,0059	3,4127	0,7565	1,0000
Holzeinschlag mit großem Harvester	−0,3698	2,4841	0,6090	0,9997
Aufarbeiten mit mittlerem Harvester	−1,0059	3,4127	0,9665	1,0000
Aufarbeiten mit großem Harvester	−0,3698	2,4841	0,8190	0,9997
Aufarbeiten mit Prozessor	−0,2957	1,9871	0,4872	0,9997

Tab. 25: *Regressionen zum Holztransport mit dem Schlepper bzw. dem Pferd*

Verfahrensstufe	**RegrKoeff**		**Korellationskoeffizient**
	m	**n**	
Pferd [VR:15]	4,2012	2,3435	0,9637
Schlepper [VR:20]	2,0443	1,4170	0,9992
Schlepper [VR:40]	2,1762	1,5085	0,9992
Schlepper [R:200]	3,7479	2,5979	0,9992
Schlepper [R:400]	4,2164	2,9226	0,9992
Schlepper [VR:20 + R:200]	3,9684	2,7507	0,9992
Schlepper [VR:40 + R:200]	4,8188	3,3402	0,9992
Schlepper [VR:20 + R:400]	4,4975	3,1175	0,9992
Schlepper [VR:40 + R:400]	5,6219	3,8968	0,9992

Tab. 26: *Regressionen zum Holztransport mit dem Forwarder*

	Verfahrensstufe	**Regressionskoeffizienten**			**Korellationskoeffizient**
		a	**b**	**c**	
20 m Gassenabstand	kleiner Forwarder [R:100+100]	−80,051	78,845	−2,5636	0,9757
	mittlerer Forwarder [R:100+100]	−98,420	97,870	−3,5031	0,9785
	großer Forwarder [R:100+100]	−102,26	102,29	−3,8602	0,9801
	kleiner Forwarder [R:200+200]	−67,832	65,519	−1,5582	0,9683
	mittlerer Forwarder [R:200+200]	−81,487	79,014	−2,0500	0,9702
	großer Forwarder [R:200+200]	−86,862	84,884	−2,4889	0,9731
40 m Gassenabstand	kleiner Forwarder [R:100+100]	−39,730	52,085	4,1198	0,9887
	mittlerer Forwarder [R:100+100]	−64,522	68,569	4,3796	0,9904
	großer Forwarder [R:100+100]	−68,084	72,851	4,2071	0,9911
	kleiner Forwarder [R:200+200]	−39,543	40,615	4,3865	0,9855
	mittlerer Forwarder [R:200+200]	−49,450	51,166	4,9095	0,9869
	großer Forwarder [R:200+200]	−54,159	56,469	4,7760	0,9881
	kleiner Forwarder [R:0+100]	−1,5758	3,3139	22,854	0,9997
	mittlerer Forwarder [R:0+100]	−2,5221	5,4400	31,165	0,9994
	großer Forwarder [R:0+100]	−2,6387	5,6798	31,802	0,9995

Tab. 27: *Regressionen für die Verfahrensstufen des Transportes mit Seilkran*

Verfahrensstufe	**Regressionskoeffizienten**			**Bestimmtheitsmaß**
	a	**b**	**c**	
Seilkran [R:200]	−0,9966	4,4804	0,6667	0,9936
Seilkran [R:400]	−1,0298	5,1002	0,5404	0,9969
Seilkran [VR:10 + R:200]	−1,0906	4,9427	0,7040	0,9940
Seilkran [VR:20 + R:200]	−1,1847	5,4050	0,7412	0,9943
Seilkran [VR:10 + R:400]	−1,1040	5,4975	0,5640	0,9970
Seilkran [VR:20 + R:400]	−1,1782	5,8948	0,5876	0,9971

Tab. 28: *Unterschiede bezüglich der Sortiervarianten am Beispiel der mäßigen Durchforstung im 20 m-Gassensystem*

	Alter	Nutzungsmenge	kurz			kurz und lang		
			Erlöse	Kosten	Deckungsbeitrag	Erlöse	Kosten	Deckungsbeitrag
Nutzungsart	Jahre	m^3/ha	Euro/ha	Euro/ha	Euro/ha	Euro/ha	Euro/ha	Euro/ha
[Gassenaufhieb]	30	27,13	1113,35	1036,76	76,59	1080,37	1031,21	49,16
	40	58,08	2640,89	1401,24	1239,65	2771,02	1408,14	1362,88
	50	61,33	3137,38	1197,36	1940,02	3274,38	1433,85	1840,53
	60	54,38	2660,71	961,44	1699,27	3193,8	1142,20	2051,60
Vornutzungen	70	21,70	1394,32	312,28	1082,04	1495,62	337,68	1157,94
	80	45,12	2401,62	583,64	1817,98	2958,81	773,34	2185,47
	90	12,22	1044,66	113,46	931,20	976,00	133,10*	842,90
	100	22,49	1659,47	261,79	1397,68	1538,17	307,57*	1230,60
	110	26,39	1564,35	236,05	1328,30	2161,61	313,02*	1848,59
Endnutzung	120	855,00	44 236,78	10 841,14	33 395,64	50 311,24	12 314,09	37 997,15

* Auf Grund des geringen Kurzholzanfalls, wird die gesamte Hiebsmenge vom Schlepper gerückt.

Tab. 29: *Optimierte und harmonisierte Naturaldaten*
[Pflegeregime: starke Durchforstung, Sortiervariante: kurz und lang]

		Alter	**Ausscheidender Bestand**						
			Nutzungsmenge	**Anzahl**	**durchschn. Volumen**	**Mittelwert des BHD**	**Volumen**		**mittl. Stückvol. Langh.**
							Kurzholz	**Langholz**	
		Jahre	Vfm/ha	Stck/ha	Vfm/Baum	cm	Efm/ha		Efm/Stck
Gassen-	20 m	30	27,2	330	0,082	13,0	24,1	-	-
anlage	40 m	30	14,4	175	0,082	13,1	13,0	-	-
Vornutzungen		40	78,7	400	0,197	16,8	71,4	-	-
		50	69,8	220	0,317	19,3	34,1	30,6	0,287
		60	66,0	155	0,426	20,6	15,6	42,5	0,382
		70	63,7	115	0,554	22,3	17,5	40,7	0,476
		80	87,1	95	0,917	27,8	20,6	49,6	0,657
		90	50,0	50	1,000	26,7	8,7	33,2	0,826
		100	62,4	50	1,248	30,6	33,4	22,7	0,906
		110	49,7	50	0,994	27,7	31,0	11,4	0,568
Endnutzung		50	384,7	1270	0,303	18,7	197,4	158,1	0,313
		60	456,5	1050	0,435	20,8	180,2	239,7	0,382
		70	523,9	895	0,585	22,7	184,4	284,3	0,499
		80	584,2	780	0,749	24,6	204,1	310,8	0,605
		90	603,2	685	0,881	25,7	235,2	295,2	0,652
		100	644,2	635	1,014	26,9	258,3	310,2	0,781
		110	660,2	585	1,129	27,7	323,9	254,9	0,684
		120	680,7	530	1,284	29,2	281,7	285,9	0,729

Tab. 30: *Erlöse und Kosten [Pflegeregime: starke Durchforstung, Sortiervariante: kurz und lang]*

		Alter	**Holzerlöse**		**Holzerntekosten**			
					20 m		**40 m**	
		Jahre	Euro/ha	Euro/Efm	Euro/ha	Euro/Efm	Euro/ha	Euro/Efm
Gassen-	20 m	30	1093	45,37	1027	42,61		
anlage	40 m	30	606	46,59			552	42,46
Vornutzungen		40	3728	52,19	1880	26,32	2256	31,57
		50	3988	61,64	1646	25,44	1959	30,28
		60	3979	68,43	1378	23,70	1657	28,49
		70	4139	71,05	1221	20,95	1456	24,98
		80	5089	72,51	1228	17,49	1490	21,23
		90	3294	78,57	703	16,77	850	20,27
		100	4351	77,60	815	14,54	969	17,29
		110	2681	63,19	667	15,71	795	18,74
Endnutzung		50	21 782	61,27	8953	25,19	10 684	30,05
		60	27 946	66,56	9495	22,61	11 291	26,89
		70	31 380	66,96	9389	20,03	11 212	23,93
		80	37 358	72,55	9389	18,23	11 222	21,79
		90	37 564	70,82	9129	17,21	10 873	20,50
		100	41 626	73,23	9185	16,16	10 943	19,25
		110	42 105	72,75	9105	15,73	10 779	18,63
		120	44 679	78,71	8706	15,34	10 385	18,30

Tab. 31: *Optimale Umtriebszeiten und Annuitäten der beiden terrestrischen Erschließungssysteme bei voller Schädigung der technischen Befahrbarkeit*

Erschließungs-	**Zinssatz**	**Schadqualität**	**opt. U.**	**Annuität**	**Δ**	Δ_{rel}
system	%	Euro/lfdm	Jahre	Euro/ha	Euro/ha	%
20 m-Gassen	0,01		100	462,19		
		0,20	100	455,21	-7,0	-1,5
		2,00	100	392,33	-69,9	-15,1
		5,00	100	287,54	-174,7	-37,8
	1,00		80	290,91		
		0,20	80	285,84	-5,1	-1,7
		2,00	80	240,27	-50,6	-17,4
		5,00	80	164,31	-126,6	-43,5
	2,50		80	120,16		
		0,20	80	116,66	-3,5	-2,9
		2,00	80	85,13	-35,0	-29,2
		5,00	60	36,18	-84,0	-69,9
40 m-Gassen	0,01		120	430,53		
		0,20	120	426,79	-3,7	-0,9
		2,00	100	393,55	-37,0	-8,6
		5,00	100	341,15	-89,4	-20,8
	1,00		100	263,27		
		0,20	100	260,45	-2,8	-1,1
		2,00	80	237,36	-25,9	-9,8
		5,00	80	199,38	-63,9	-24,3
	2,50		80	102,86		
		0,20	80	101,11	-1,8	-1,7
		2,00	80	85,34	-17,5	-17,0
		5,00	80	59,07	-43,8	-42,6

Tab. 32: *Flächenanteile der technologischen Standortsklassen gemäß der Richtlinie „Holzerntetechnologien“ (Sachsenforst 2006) am Staatswald im Freistaat Sachsen (Hangneigungsklassen 1 bis 4: eben bis 40[45]% Neigung) nach Sachsenforst (2012)*

Sensibilitätsklassen	**sensibel**	S2	61 522 ha	7081 ha	21 903 ha	11 330 ha	4021 ha
	weniger sensibel	S1	67 409 ha	12 791 ha	3758 ha	7319 ha	
			B1 **befahrbar**	B2 **eingeschränkt befahrbar**	B3 **stark eingeschr. befahrbar**	B4 **kaum befahrbar**	B5 **nicht befahrbar**
			Befahrbarkeitsklassen				

Literaturverzeichnis

Adams & Froehlich 1981
ADAMS, P.W.; FROEHLICH, H.A.: Compaction of forest soil. In: *Pacific Northwest Extension Publication (PNW)* 217 (1981)

Albert 2007
ALBERT, M.: Waldwachstumssimulatoren zur mehrkriteriellen Szenariobeurteilung: ein Ansatz für eine benutzerfreundliche und flexible Bewertung. In: *DVFFA - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2007*, 2007

Arnup 1998
ARNUP, R.: The extent, effects and management of forestryrelated soil disturbances, with reference to implications for the Clay Belt. A literature review/ Northeast Science & Technology. 1998 (TR-037)

Austrofoma 2007
BAUER, R.; GATTERBAUER, E.; HADER, F.; JIRIKOWSKI, W.; LUGMAYR, J.; NEMESTOTHY, N.; SPICAR, H.: *AUSTROFOMA und AUSTROFOMA Bioenergie. Wertschöpfung aus Holz mit moderner Forsttechnik. Oktober 2007, Heiligenkreuz. Tagungsführer.* Organisationsbüro der AUSTROFOMA, Landwirtschaftskammer Niederösterreich, 2007

Austrofoma 2011
JIRIKOWSKI, W.; NEMESTOTHY, N.; SPICAR, H.: *AUSTROFOMA und AUSTROFOMA Bioenergie. Forsttechnik im Naturverjüngungsbetrieb. Oktober 2011, Stift Rein/Graz. Tagungsführer.* Organisationsbüro der AUSTROFOMA, Landwirtschaftskammer Steiermark, 2011

Bacher-Winterhalter 2004
BACHER-WINTERHALTER, M.: *Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzerntesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes*, Albert-Ludwigs-Univerität Freiburg im Breisgau, Inaugural-Dissertation, 2004

Bacher-Winterhalter & Sauter 2005
BACHER-WINTERHALTER, M.; SAUTER, U. H.: *Kapitel:* Bestandespfleglichkeit von Holzerntesystemen in Dauerwäldern. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 362–367

Benthaus & Matthies 1993
BENTHAUS, M.; MATTHIES, D.: Regeneration befahrbarer Waldböden – Ein Vergleich von Breit- und Normalreifenspuren 6 Jahre nach Befahrung. In: *AFZ - Der Wald* (1993)

Beylich et al. 2010
Beylich, A.; Oberholzer, H.-R.; Schrader, S.; Höper, H.; Wilke, B.-M.: Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. In: *Soil and Tillage Research* 109 (2010), Nr. 2, S. 133–143

Bley 2002
Bley, D.: Sind Traktionsmittel immer nötig? – Zugkrafterhöhung nur mit Absenkung des Reifeninnendruckes. In: *Forsttechnische Informationen* (2002), Nr. 1+2, S. 14–16

Borchert 2008
Borchert, H.: Bodenschutz bei der Holzernte. In: *LWF aktuell* (2008), Nr. 67, S. 3–4. Abgerufen am 21.9.2020 von https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a67_bodenschutz_web.pdf

Borchert et al. 2008
Borchert, H.; Blaschke, M.; Metan, M.: Wurzelverletzungen unter Raupe und Rad. In: *LWF aktuell* (2008), Nr. 67, S. 16–18

Borchert et al. 2015
Borchert, H.; Huber, Chr.; Goettlein, A.; Kremer, J.: Nutrient Concentration on Skid Trails under Brush-Mats – Is a Redistribution of Nutrients Possible? In: *Croatian Journal of Forest Engineering* 36 (2015), Nr. 2, 243-252. Abgerufen am 21.9.2020 von http://hrcak.srce.hr/151786

Borchert & Kremer 2007
Borchert, H.; Kremer, J.: Unternehmer bevorzugen große Maschinen. LWF und TUM erfassten die forsttechnische Ausstattung von rund 170 Firmen. In: *LWF aktuell* 59 (2007), S. 27–29

Borchert et al. 2013
Borchert, H.; Kremer, J.; Huber, C. L.: Schutz des Waldbodens beim Einsatz von Forstmaschinen. In: *LWF Wissen. Berichte der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (2013), Nr. 72, 39-45. Abgerufen am 21.9.2020 von https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/dateien/w72_schutz_des_waldbodens_beim_einsatz_von_forstmaschinen_bf_gesch.pdf

Borchert & Metan 2008
Borchert, H.; Metan, M.: Kein Luftdruck für alle Fälle. Niedriger Reifenfülldruck verringert Bodenbelastung. In: *LWF aktuell* (2008), Nr. 67, S. 22–23

Brand & Priemer 1959
Kapitel: Die Bodenstabilisierung mit Kalk als Bauelement im Forst- und Wirtschaftswegebau. In: Brand, W.; Priemer, G.: *Der Wald braucht Kalk.* „Kalkdienst"– Land- und forstwirtschaftliche Abteilung der Düngekalk-Hauptgemeinschaft, 1959

Bredberg & Wästerlund 1983
Bredberg, C.-J.; Wästerlund, I.: Wurzel- und Bodenschäden durch Fahrzeuge. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* (1983), Nr. 102, S. 86–98. Abgerufen am 21.9.2020 von http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02741842.

Brockmann & Sann 2008
Sächsischer Städte- und Gemeindetag (Hrsg.): Brockmann, J.; Sann, D.: *Waldgesetz für den Freistaat Sachsen. Kommentar und ergänzende Vorschriften.* Stuttgart: Kohlhammer – Deutscher Gemeindeverlag, 2008

Busch 2013
Busch, U.: *Listenpreise Forstmaschinen. Kotschenreuther Forst- & Landtechnik GmbH & Co.KG, Steinwiesen.* Schriftliche Mitteilung, 2013

Cochran & Brock 1985
Cochran, P. H.; Brock, T.: Soil Compaction an Initial Height Growth of Planted Ponderosa Pine/ U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1985 (PNW-RN-434). Abgerufen am 21.9.2020 von http://dx.doi.org/https://doi.org/10.2737/PNW-RN-434.

Daxner 1998
Daxner, P.: *Produktivität und Effizienz des selbstfahrenden Laufwagens „WOODLINER“.* Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Masterarbeit, August 1998

Daxner & Stampfer 1998
Daxner, P.; Stampfer, K.: Selbstfahrende Laufwägen – nicht nur Woodliner. In: *Österreichische Forstzeitung* (1998), Nr. 5, S. 5–6

Deegen 1997
Deegen, P.: *Forstökonomie kennenlernen.* Dresden: Harald Taupitz, Bogenschützen-Verlag Dresden, 1997

Deegen 2000
Deegen, P.: Zur Interpretation der Faustmannschen Formel als ein komplexes forstökonomisches Verhaltensmodell. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 171 (2000), Nr. 5+6, S. 88–96

Deegen 2013
Deegen, P.: Economics of the external and the extended orders of markets and politics and their application in forestry. In: *Forest Policy and Economics* (2013), Nr. 35, S. 21–30

Deegen et al. 2011
Deegen, P.; Hostettler, M.; Navarro, G. A.: The Faustmann model as a model for a forestry of prices. In: *European Journal of Forest Research* (2011), Nr. 130, S. 353–368

Deegen et al. 2000
Deegen, P.; Stümer, W.; Villa, W.; Pretzsch, H.: Zur finanziellen Analyse der Waldpflegeentscheidung bei Berücksichtigung der Biodiversität, dargestellt am Beispiel der Fichte in Sachsen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* (2000), Nr. 119, S. 226–244

Denninger 2002
Denninger, W.: Stand der hochmechanisierten Holzernte in Niedersachsen. In: *Forst & Technik* (2002), Nr. 7, S. 14–17

Dietrich 2011
DIETRICH, K: *Auswirkungen einer Reisigauflage auf die Bodenfeuchte einer Rückegasse*, Technische Universität Dresden, Masterarbeit, 2011

Dreeke et al. 2013
DEUTSCHER FORSTUNTERNEHMER VERBAND (Hrsg.): DREEKE, R.; KÖRNER, H.; SACHSE, M.: *Kalkulation in Forstunternehmen.* Scheeßel: Forstfachverlag GmbH & Co. KG, 2013

Duda 2006
DUDA, H.: *Vergleich forstlicher Managementstrategien: Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator*, Georg-August-Universität Göttingen, Dissertation, 2006

Ebeling et al. 2016
EBELING, C.; LANG, F.; GAERTIG, T.: Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. In: *Forest Ecology and Management* 359 (2016), S. 74–82

Ebeling et al. 2017
EBELING, C.; F., Lang; FRÜND, H.-C.; GAERTIG, T.: Evidence for increased P availability on wheel tracks 10 to 40 years after forest machinery traffic. In: *Geoderma* 297 (2017), S. 67–69

Eibenstein 2011
EIBENSTEIN, T.: *Grundlagenuntersuchung zur Kontaktflächendruckverteilung unter Bogie-Bändern*, TU Dresden, Bachelorarbeit, 2011

Eibenstein et al. 2012
EIBENSTEIN, T.; PURFÜRST, Th.; ERLER, J.: Mindern Bogiebänder den Bodendruck? In: *Forst & Technik* (2012), Nr. 6, S. 42–46

Eliasson & Wasterlund 2007
ELIASSON, L.; WASTERLUND, I.: Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. In: *Forest Ecology and Management* 252 (2007), Nr. 1, S. 118–123

Eppinger et al. 2002
EPPINGER, M.; SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E. E.: Feinwurzelerfassung in einem Buchenbestand – Rückegassen als Wurzelraum? In: *AFZ - Der Wald* (2002), Nr. 10, S. 489–491

Erler 2000
ERLER, J.: *Forsttechnik. Verfahrensbewertung.* UTB, Stuttgart, 2000

Erler 2005
ERLER, J.: Was kostet die Rückegasse. In: *AFZ - Der Wald* 60 (2005), Nr. 6, S. 297–311

Erler 2009a
ERLER, J.: Forstliches Technikmanagement – Entwurf eines Gesamtkonzeptes. In: *Forst und Holz* 64 (2009), Nr. 4, S. 42–45

Erler 2009b
ERLER, J.: Taktisches Technikmanagement im Forst – Das beste Verahren für einen konkreten Einsatz. In: *Forst und Holz* 64 (2009), Nr. 12, S. 2–6

Erler et al. 2010
ERLER, J.; BORCHERT, H.; SCHACK-KIRCHNER, H.: Ergebnisse des Arbeitskreises „Technisch-Biologische Maßnahmen zur Wiederherstellung der Rückegasse“. In: *Forsttechnische Informationen* (2010), Nr. 1+2, S. 7–9

Erler & Dög 2009
ERLER, J.; DÖG, M.: Funktiogramme für Holzernteverfahren – Komplex und trotzdem gut verständlich. In: *Forsttechnische Informationen* (2009), Nr. 9+10, S. 14–17

Erler & Güldner 2002
ERLER, J.; GÜLDNER, O.: Technologisch differenzierte Standorte – Der Weg zu einem Vertragsbodenschutz? In: *AFZ - Der Wald* (2002), Nr. 10, S. 484–488

Erler & Hauptvogel 2004
ERLER, J.; HAUPTVOGEL, A.: Maschinelle Holzernte bei weiten Rückegassenabständen. Verfahrensmodifikation bei der maschinellen Holzernte mit permanenten Rückegassenabständen von 20, 40 und 60 m unter Verwendung temporärer Gassen in der maschinellen Erst- und Zweitdurchforstung von Waldholzbeständen. In: *Forst und Technik* 16 (2004), Nr. 4, S. 28–30

Erler & Weiß 2003
ERLER, J.; WEISS, M.: Netz-Darstellung von Arbeitsverfahren. In: *Forsttechnische Informationen* 54 (2003), Nr. 9, S. 103–107

Erni & Frutig 2004
ERNI, V.; FRUTIG, F.: HeProMo - für die einfache Vorkalkulation von Holzerntearbeiten. In: *Wald und Holz* (2004), Nr. 5, S. 46–47

Faber 2007
FABER, R.: *Freiwillige Selbstbeschränkung bei forsttechnischen Handlungen im Wald und Möglichkeiten der öffentlichen und privaten Honorierung – dargestellt am Beispiel des Kommunalwaldes in Nordrhein-Westfalen*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007

Faber & Grüll 2007
FABER, R.; GRÜLL, M.: Freiwillige Selbstbeschränkung und Opportunitätskosten. In: *AFZ - Der Wald* (2007), Nr. 2, S. 53–54

Faustmann 1849
FAUSTMANN, M.: Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare

Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* (1849), Dezember, S. 44–455. – zitiert in Deegen et al. (2000)

Forbrig et al. 2010a
Forbrig, A.; Hofmann, R.; Seeling, U.: *Bodenschonende Holzernte. Abschlussbericht zum Auftrag der FCK (Forstchefkonferenz) an das KWF.* 2010. – zitiert in Fründ & Gaertig (2017)

Forbrig et al. 2010b
Forbrig, A.; Hofmann, R.; Seeling, U.: Bodenschonende Holzernte. Die Ergebnisse der AG Boden des KWF. In: *Forsttechnische Informationen* (2010), Nr. 1+2, S. 4–6

Forbrig et al. 2011
Forbrig, A.; Seeling, U.; Brümmel, R.; Winkelmann, P.: Maschinenkosten kalkulieren. Betriebs- und Maschinenarbeitsstunde, Gesamtnutzungsdauer von Forstmaschinen. In: *Forsttechnische Informationen* (2011), Nr. 7+8, S. 12–16

ForstBW 2012a
ForstBW: *Konzept zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Rückegassen für den Landesbetrieb ForstBW.* Tübingen, 2012

ForstBW 2012b
ForstBW: *Merkblatt. Bauliche Maßnahmen zur Erhaltung der technischen Befahrbarkeit der Rückegassen.* Tübingen, Oktober 2012

Frauenholz et al. 2011
Frauenholz, O.; Botka, A. ; Wolf, F.; Nemesthothy, N.; Sperrer, S.: *Holzernte im Seilgelände. Organisation.* Wien: FHP Kooperationsplattform Forst Holz Papier, 2011

Frey et al. 2009
Frey, B.; Kremer, J.; Rüdt, A.; Sciacca, S.; Matthies, D.; Lüscher, P.: Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. In: *European Journal of Soil Biology* 45 (2009), Nr. 4, S. 312–320

Fries 1975
Fries, J.: Ökologische Aspekte der mechanisierten Durchforstung. In: *Der Forst- und Holzwirt* (1975), Nr. 30, S. 315–320. – zitiert in Jäger (2012)

Fründ & Gaertig 2017
Fründ, H.-C.; Gaertig, T.: *Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen in Rückegassen.* Hochschule Osnabrück und HAWK Hildesheim, Holzminden, Göttingen, 2017

Froehlich & McNabb 1983
Froehlich, H. A.; McNabb, D. H.: Minimizing Soil Compaction in Pacific Northwest Forests, 1983. – Paper Presented at Sixth North American Forest Soils Conference, July 1983 in Knoxville Tennessee

Frutig et al. 2007
Frutig, F.; Fahrni, F.; Stettler, A.; Egger, A.: Mechanisierte Holzernte in Hanglagen. In: *Wald und Holz* (2007), Nr. 4, S. 47–52

Frutig et al. 2016
Frutig, F.; Thees, O.; Ammann, P.; Lüscher, P.; Rotach, P.: Holzerntekosten und Mindererlöse bei verschiedenen Rückegassenabständen in Fichtenbeständen. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 167 (2016), Nr. 2, S. 64–72. Abgerufen am 21.09.2020 von http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3188/szf.2016.0064

Frutig et al. 2009
Kapitel: Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo - Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In: Frutig, F.; Thees, O.; Lemm, R.; Kostadinov, F.: *Management zukunftsfähiger Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente.* Zürich, 2009

FSC 2018
Forest Stewardship Council: Deutscher FSC-Standard - Version 3-0. (2018). Abgerufen am 21.09.2020 https://www.fsc-deutschland.de/download-box.1212.htm

Gaertig et al. 2018
Gaertig, T.; Ebeling, C.; Riggert, R.: Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. In: *Bodenschutz* 23 (2018), Nr. 1, S. 9–15. Abgerufen am 21.09.2020 https://www.bodenschutzdigital.de/zbos.01.2018.009

Gaertig et al. 2000a
Gaertig, T.; Hildebrand, E. E.; Schäffer, J.; Wilpert, K. v.: Melioration stark verdichteter Waldböden – Wirkung mechanischer Bodenlockerung auf die Bodenbelüftung und Durchwurzelung. In: *AFZ - Der Wald* 21 (2000), S. 1124–1126

Gaertig et al. 2000b
Gaertig, T.; Puls, C.; Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E. E.: Die Beurteilung der Bodenstruktur von Waldböden: Feldbodenkundliche Merkmale und ihre Relevanz für die aktuelle Bodenbelüftung auf Lösslehm-Standorten. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 171 (2000), Nr. 12, S. 227–234

Gaertig et al. 2002
Gaertig, T.; Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E. E.; Wilpert, K. v.: The impact of soil aeration on oak decline in south-western Germany. In: *Forest Ecology and Management* 159 (2002), Nr. 1-2, S. 15–25

Gaertig et al. 2001
Gaertig, T.; Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E. E.: Atemnot im Wurzelraum: Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinwurzeldichte und Vitalität bei Eiche. In: *AFZ - Der Wald* 25 (2001), S. 1344–1347

Gaertig & Green 2009
Kapitel: Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. In: Gaertig,

Thorsten; Green, Katharina: *Walderschließung und Bodenschutz*. 2009. – ISBN ISSN 1436–1566, S. 83–97

Geischeder 2011
Geischeder, R.: *Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen*, Technische Universität München, Dissertation, 2011

Goutal et al. 2012
Goutal, N.; Boivin, P.; Ranger, J.: Assessment of the natural recovery rate of soil specific volume following forest soil compaction. In: *Soil Science Society of America Journal* 76 (2012), Nr. 4, S. 1426–1435

Greacen & Sands 1980
Greacen, E. L.; Sands, R.: Compaction of Forest Soils. A review. In: *Aust. J. Soil Res.* 18 (1980), Nr. 2, S. 163–189

Grüll 2011
Grüll, M.: Den Waldboden schonen – Vorsorgender Bodenschutz beim Einsatz von Holzerntetechnik. In: *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* (2011), Nr. 47, S. 37–44

Grüll 2014
Grüll, M.: Grundlagen für ein Bodenschutzkonzept des Landesbetriebs Forst Brandenburg. In: *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* (2014), Nr. 55, S. 49–58

Haas et al. 2015
Haas, J.; Hagge-Ellhöft, K.; Schack-Kirchner, H.; Lang, F.: Gleisbildung bei der Befahrung mit Forwardern. In: *Forst & Technik* (2015), Nr. 2, S. 20 – 24

Haas et al. 2017
Haas, J.; Kühne, A.; Schack-Kircher, H.; Lang, F.: Does Juncus effusus L. and Carex brizoides L. help to regenerate a sufficient aeration in copacted forest soils? In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 188 (2017), Nr. 5/6, S. 85–94

Hamberger 1999
Hamberger, J.: Ist GPS geeignet um Befahrungen schwerer Holzerntemaschinen auf Rückegassen zu dokumentieren? In: *Forsttechnische Informationen* (1999), Nr. 5+6, S. 39–45

Hanewinkel & Navarro 2005
Hanewinkel, M. ; Navarro, G.: *Kapitel:* Finanzielle Konsequenzen des Waldumbaus - Analyse mit Methoden der Investitionsrechnung. In: von Teufel et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft*. Springer-Verlag, 2005, S. 248–260

Hartmann et al. 2014
Hartmann, M.; Niklaus, P. A.; Zimmermann, S.; Schmutz, St.; Kremer, J.; Abarenkov, K.; Lüscher, P.; Widmer, F.; Frey, B.: Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. In: *The ISME Journal* 8 (2014), Nr. 1, S. 226–244

Hauptvogel 2004
HAUPTVOGEL, A.: *Untersuchungen von betriebswirtschaftlichen und ökologischen Parametern bei der maschinellen Holzernte unter Verwendung temporärer Gassen.* TU Dresden, Diplomarbeit, 2004

Hehn 2004
HEHN, M.: Befahrbarkeit von Rückegassen erhalten. In: *Badische Bauernzeitung* (2004). Abgerufen am 22.9.2020 von http://www.badische-bauern-zeitung.de/1336120231384

Hehn & Sauter 2005
HEHN, M.; SAUTER, U. H.: *Kapitel:* Holzernterechnik im Nicht-Altersklassenwald – Entschteidungskriterien und Steuerungsmöglichkeiten. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 367–372

Herold et al. 2009
HEROLD, P.; JUNG, J.; SCHARNHÖLZ, R.: *Arbeitspferde im Naturschutz.* Bonn - Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz, 2009

Hetsch et al. 1990
HETSCH, W.; HESSE, S.; MÜNTE, M.: Absterben von Buchen auf pseudovergleyten Böden nach starker Befahrung. In: *Allg. Forstzeitschrift* 45 (1990), Nr. 20, S. 481–483

Heubaum & Padberg 2014
HEUBAUM, F.; PADBERG, A.: Praxisprojekt zur bodenschonenden Holzernte mit Bogie-Bändern. In: *AFZ - Der Wald* (2014), Nr. 17, S. 16–20. Abgerufen am 22.9.2020 von https://www.forstpraxis.de/wp-content/uploads/AFZ-2014-17_Praxisprojekt_Bogiebaender.pdf

Hildebrand 1983
HILDEBRAND, E. E.: Der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktion im forstlichen Standort. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 102 (1983), S. 111–125

Hildebrand 1987
HILDEBRAND, E. E.: Die Struktur von Waldböden – ein gefährdetes Fließgleichgewicht. In: *Allg. Forstzeitschrift* 42 (1987), Nr. 16/17, S. 424–426

Horn & Fleige 2003
HORN, R.; FLEIGE, H.: A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. In: *Soil and Tillage Research* (2003), Nr. 73, S. 89–99

Hostettler 2003
HOSTETTLER, M.: Opportunitätskosten. In: *Wald und Holz* 9 (2003), S. 43

Jacke et al. 2008
JACKE, H.; BROKMEIER, H.; SENGPIEL, A.: PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisigarmierung. In: *ifa-Mitteilungen Reihe A* (2008), Heft 5

Jacke & Ebel 2006
Jacke, H.; Ebel, A.: PrAllCon: Neues über Forstreifen (Teil 3). Zur Druckverteilung auf hartem Untergrund. In: *Forst und Technik* (2006), Nr. 3, S. 10–15

Jäger 2012
Jäger, T.: *Quantifizierung der monetären Vorteile von intakten Waldböden und allfälliger Mehraufwände bei der Holzernte*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Department Umweltsystemwissenschaften, Diplomarbeit, Februar 2012

Johannsson & Löfgren 1985
Johannsson, P.-O.; Löfgren, K.-G.: *The Economics of Forestry & Natural Ressources*. Blackwell Publishers, 1985. – zitiert in Deegen et al. (2000)

Kaiser 2001
Kaiser, R.: Berechnung der Sorten eines Hiebes. In: *AFZ - Der Wald* 56. Jahrg. (2001), Nr. 14, S. 748–750

Kieser & Teuffel 2002
Kieser, W.; Teuffel, H.-D.: Das Königsbronner Harvester-Verfahren. In: *AFZ - Der Wald* (2002), Nr. 17, S. 893–894

Kietz et al. 2017
Kietz, B.; Riggert, R.; Bombosch, F.; Nollau, R.; Gaertig, T.: Spannungseinträge in den Boden unter Holzerntemaschinen. In: *AFZ - Der Wald* 72 (2017), Nr. 6, S. 41–45

Klemperer 1996
Klemperer, D.; Graw-Hill, Mc. (Hrsg.): *Forest Ressource Economics and Finance*. New York, St. Louis, 1996

Koch 1998
Koch, R.: *Methodische Konzeption eines Modells zur komplexen, mehrdimensionalen Beurteilung forsttechnischer Produktionsverfahren*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1998

Kostadinov et al. 2012
Kostadinov, F.; Lemm, R.; Thees, O.: Ein Instrument zur Schätzung von Holzernteproduktivitäten mittels der kNN-Methode. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* (2012), Nr. 163, S. 119–129

Kremer 1999
Kremer, J.: Auswirkungen der Befahrung auf das Wachstumsverhalten von Fichten, Kiefern und Buchen auf ausgewählten Standorten. In: *Forsttechnische Informationen* 1+2 (1999), S. 13–16

Kremer 2008
Kremer, J.: Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. In: *LWF aktuell* (2008), Nr. 67, S. 13–15.
Abgerufen am 22.9.2020 von https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik/

dateien/a67-regenerationsvermoegen-befahrungsbedingt-veraenderter-boeden.pdf

Kremer & Matthies 1997
Kremer, J.; Matthies, D.: Auswirkungen der Befahrung auf das Wachstum der forstlichen Vegetation. In: *AFZ - Der Wald* 9 (1997), S. 474–477

Kremer et al. 2003
Kremer, J.; Matthies, D.; Wolf, B.; Ohrner, G.; Uhl, E.: Bodenstrukturveränderungen und Wurzelverletzungen. In: *AFZ - Der Wald* (2003), Nr. 17, S. 847–850

Kremer et al. 2005
Kremer, J.; Uhl, E.; Ganter, C.: Optimierte Raupenharvester – Kunststoffplatten schonen Boden und Bestand. In: *Wald und Holz* (2005), Nr. 11, S. 29–32

Küthe et al. 2010
Küthe, M.; Föller, J.; Flechsig, B.: Bodenschutz im Wald durch organisatorische Maßnahmen. In: *Forsttechnische Informationen* (2010), Nr. 1+2, S. 15–17

Kuptz et al. 2015
Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, E.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H.: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel/ Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Berichte aus dem TFZ, Straubing, April 2015 (40)

KWF 2008
Forbrig, A.; Encke, B.-G.: *Holz heiß begehrt – eine Branche macht mobil. Tagungsführer zur 15. KWF-Tagung 2008 Schmallenberg/ Nordrhein-Westfalen.* Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF) und AFZ - Der Wald (Allgemeine Forstzeitschrift), 2008

KWF 2013
Forbrig, A.; Büttner, I.: *Forstmaschinen vorauskalkulieren. Hintergründe, KWF-Richtwerte und Berechnungsbeispiele.* KWF Merkblatt Nr. 17/2013. Spremberger Str. 1, D-64823 Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF), 2013

KWF 2015
Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik: *Marktübersicht Seilkräne.* Version 2015 abgerufen am 2.3.2015 von http://www.kwf-online.org/fileadmin/markt/08_seilkran/seilkran.html

Labelle et al. 2015
Labelle, E. R.; Jaeger, D.; Poltorak, B. J.: Assessing the Ability of Hardwood and Softwood Brush Mats to Distribute Applied Loads. In: *Croatian Journal of Forest Engineering* (2015), Nr. 36, 227-242. Abgerufen am 22.9.2020 von http://hrcak.srce.hr/file/223303

LAF 2002
Butter; König; Eisenhauer; Schulze; Glowna; Ende; Eichhorst; Boeckhoff; Gärtner; Zimmermann; Trommer: *Bestandespflege. Richtlinie zur Bestandespflege und Wertästung im Staatswald des Freistaates Sachsen.* Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna, OT Graupa: Sächsische Landesanstalt für Forsten (LAF), April 2002

Lemm et al. 2005
Lemm, R.; Vogel, M.; Feller, A.; Thees, O.: Eignung der k-Nearest Neighbours (kNN-)Methode zur Schätzung von Produktivitäten in der Holzernte – Grundsätzliche überlegungen und erste Erfahrungen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 176. Jahrgang (2005), Nr. 11/12, S. 189–200

Lüscher et al. 2010
Lüscher, P.; Frutig, F.; Sciacca, S.; Spjevak, S.; Thees, O.: Physikalischer Bodenschutz im Wald – Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. In: *Merkblatt für die Praxis – von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL* 45 (2010), August, S. 1–12

Lüscher et al. 2008
Lüscher, P.; Sciacca, St.; Halter, M.: Regeneration von Wurzelraumfunktion nach mechanischer Beanspruchung – In Fahrspuren gepflanzte Erlen fördern die Regeneration in verdichteten Böden. In: *LWF aktuell* 67 (2008), S. 11–12

Marggraf & Streb 1997
Marggraf, R.; Streb, S.: *Ökonomische Bewertung der natürlichen Umwelt: Theorie, politische Bedeutung, ethische Diskussion.* Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, Berlin, 1997

Matthies et al. 1995
Matthies, D.; Weixler, H.; Hess, U.: Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden. In: *AFZ - Der Wald* (1995)

Meyer et al. 2014
Meyer, C.; Lüscher, P.; Schulin, R.: Recovery of forest soil from compaction in skid tracks planted with black alder (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.). In: *Soil and Tillage Research* 143 (2014), S. 7–16

Meyer et al. 2011
Meyer, Chr.; Lüscher, P.; Schulin, R.: Verdichteten Boden mit Schwarzerlen regenerieren? In: *Wald und Holz* 92 (2011), Nr. 10, S. 40–43

Mühlhaus & Weis 2010
Mühlhaus, B.; Weis, J.: Dauerhafte Kennzeichnung und Dokumentation von Rückegassen – wesentliche Voraussetzungen für ein permanentes Erschließungsnetz. In: *Forsttechnische Informationen* (2010), Nr. 1+2, S. 9–11

Möhring & Rüping 2006
Verlag, J. D. S. (Hrsg.): Möhring, B.; Rüping, U.: *Bewertungskonzept für forstliche*

Nutzungsbeschränkungen. Bd. 32. Frankfurt am Main: Prof. Dr. rer. pol. Volker Bergen Universität Göttingen und Prof. Dr. rer. nat. Horst Dieter Brabänder Universität Göttingen, 2006

Müller 2015
Müller, V.: *Untersuchungen zur Arbeitsleistung der Teilvorgänge Harvester- und Prozessorarbeit des Harvesters bei der Holzernte in mittelaltem Nadelholz bei 40 m Gassenabstand*. Tharandt, TU Dresden, Bachelorarbeit, 2015

Morat et al. 1998
Morat, J.; Forbrig, A.; Graupner, J.: *Holzernteverfahren - Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland*. Spremberger Straße 1, 64823 Groß Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF), 1998

Naturland 2014
Naturland – Verband für ökologischen Landbau e. V.: Naturland Richtlinien zur Ökologischen Waldnutzung. (2014). Abgerufen am 22.9.2020 von https://www.naturland.de/images/Naturland/Richtlinien/Naturland-Richtlinien_Waldnutzung.pdf

Neef 2011
Neef, L.: *Vergleich unterschiedlich großer Forwarder hinsichtlich ihrer Produktivität und Bodenbeanspruchung*, TU Dresden, Bachelorarbeit, 2011

Nill et al. 2011
Nill, M.; Kohnle, U.; Sauter, U. H.: Rindenschäden mit mutmaßlichem Bezug zur Holzernte im Spiegel der Betriebsinventuren in Baden-Württemberg. In: *Forstarchiv* (2011), Nr. 82, S. 216–224

Nimz & Erler 2014
Nimz, R. ; Erler, J.: *Seilkranrückung in Steilhanglagen*. Tharandt: Fachinstitut für Waldarbeit e.V., 2014

Nipkow 1983
Nipkow, F.: Vorteile von Breitreifen für Forstschlepper auf schlecht tragfähigen Waldböden. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* (1983), Nr. 102, S. 126–142

NLF 2017
Niedersächsische Landesforsten: *Bodenschutz bei der Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten. Merkblatt*. AG Bodenschutz der Niedersächsischen Landesforsten, 2017. Abgerufen am 22.9.2020 von https://www.landesforsten.de/wp-content/uploads/2018/06/merkblatt_bodenschutz_apr_2017.pdf

Ohrner et al. 2003
Ohrner, G.; Matthies, D.; Kremer, J.; Wolf, B.; Uhl, E.; Blaschke, M.: Rad- oder Raupenfahrwerke bei Forstmaschinen? In: *Wald und Holz* (2003)

Page-Dumroese et al. 2006
Page-Dumroese, D. S.; Jurgensen, M. F.; Tiarks, A. E.; Ponder, F.; Sanchez, F. G.; Fleming, R. L.; Kranabetter, J. M.; Powers, R. F.; Stone, D. M.; Elioff, J. D.; Scott, D. A.: Soil physical property changes at the North American long-term soil productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. In: *Canadian Journal of Forest Research* 36 (2006), Nr. 3, S. 551–564

Pausch 2007
Pausch, R.: Wer die Wahl hat, hat die Qual. Holzernteverfahren richtig auswählen; Holzerntemaschinen schonend, aber dennoch effizient einsetzen. In: *LWF aktuell* (2007), Nr. 59, S. 17–19

Pausch & Heindl 2007
Pausch, R.; Heindl, U.: Profi-Waldarbeiter + Harvester: effiziente Einheit im starken Nadelholz. In: *LWF aktuell* 59 (2007), S. 8–10

PEFC 2014
Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes: PEFC-Standards für nachhaltige Waldbewirtschaftung - Normatives Dokument PEFC D 1002-1:2014 - Deutscher PEFC-Standard. (2014). Abgerufen am 22.9.2020 von https://pefc.de/media/filer_public/ef/2c/ef2cb4a6-5fea-4fc4-801b-875a87484d63/standard2016_online2.pdf

Purfürst 2009
Purfürst, T.: *Der Einfluss des Menschen auf die Leistung von Harvestersystemen.* Tharandt, TU Dresden, Dissertation, 2009

Rab 2004
Rab, M.: Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. In: *Forest Ecology and Management* 191 (2004), Nr. 1-3, S. 329–340

REFA 1978
Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums Teil 1.* München: Carl-Hanser-Verlag, 1978

Richter 2008
Richter, P.: Bogiebänder für Forstmaschinen. In: *Forst & Technik* 20 (2008), Nr. 7, S. 30–34

Riggert 2015
Riggert, R.: *Spannungseinträge unter Holzerntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter*, Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel 107, Dissertation, 2015

Riggert et al. 2016
Riggert, R.; Fleige, H.; Kietz, B.; Gaertig, T.; Horn, R.: Stress distribution under

forestry machinery and consequences for soil stability. In: *Soil Science Society of America Journal* 80 (2016), S. 38–47

Riggert et al. 2017
Riggert, R.; Fleige, H.; Kietz, B.; Gaertig, T.; Horn, R.: Dynamic stress measurements and the impact of timber harvesting on physical soil properties. In: *Australian Forestry* 80 (2017), Nr. 4, S. 255–263. Abgerufen am 21.9.2020 von http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2017.1347981.

Sachsenforst 2006
Staatsbetrieb Sachsenforst: *Holzerntetechnologien. Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen.* Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna, OT Graupa: Staatsbetrieb Sachsenforst, Mai 2006

Sachsenforst 2012
Staatsbetrieb Sachsenforst: *Standortsformengruppen des Staatswaldes des Freistaates Sachsen und Klassifizierung nach der Richtlinie Holzerntetechnologien.* Schriftliche Information, 2012

Sachsenforst 2013
Staatsbetrieb Sachsenforst: *Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen des Freistaates Sachsen Teil 1 – unveröffentlicht.* Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna, OT Graupa: Staatsbetrieb Sachsenforst, Mai 2013

Sachsenforst 2014
Staatsbetrieb Sachsenforst: *Durchschnittliche Holzpreise im Jahr 2014.* Schriftliche Information, 2014

Sachsenforst 2016
Staatsbetrieb Sachsenforst: *Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen des Freistaates Sachsen Teil 2 – unveröffentlichte Entwurfsfassung.* Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna, OT Graupa: Staatsbetrieb Sachsenforst, Februar 2016

Samuelson 1976
Samuelson, P. A.: Economics of forestry in an ecvolving society. In: *Economic Inquiry* XIV (1976), S. 466–492

Schack-Kirchner et al. 2020
Schack-Kirchner, H.; Borchert, H.; Gaertig, Th.; Puhlmann, H.; Schüffer, J.; Talkner, U.: Bodenschutz im Spannungsfeld forstlicher Entscheidungsprozesse. In: *Forsttechnische Informationen* (2020), Nr. 3, S. 12–14

Schack-Kirchner & Hildebrand 1994
Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E.: Bodenschäden beim Harvester- und Forwardereinsatz. In: *Forst & Technik* (1994), Nr. 2, S. 18–19

Schäffer 2005
Schäffer, J.: *Kapitel:* Bodenverformung und Wurzelraum. In: von Teufel et al. 2005:

Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Springer-Verlag, 2005, S. 345–362

Schäffer et al. 1991
Schäffer, J.; Hildebrand, E.; Mahler, G.: Bodenverformung beim Befahren – Wirkung der Armierung durch Reisigmatten. In: *AFZ - Der Wald* (1991), Nr. 11, S. 550–554

Schmidt et al. 2001
Schmidt, M.; Spellmann, H.; Nagel, J.: Waldwachstumskundliche Entscheidungshilfe zur Ästung der Douglasie. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 172. Jahrgang (2001), Nr. 7, S. 126–136

Schreiber 2012
Schreiber, J.: Klein oder Groß? In: *Forstunternehmer Jahrbuch* (2012), S. 30–32

Schroll 2008
Schroll, E. (Hrsg.): *Holzrücken mit Pferden – Handbuch für die Waldarbeit mit Pferden*. Lemgo: - Starke Pferde - Verlag, 2008. – zitiert in Herold et al. (2009)

Schöttle et al. 1997
Schöttle, R.; Pfeil, C.; Sauter, F.: Leistung und Einsatzmöglichkeiten des Raupenharvesters in der Durchforstung. In: *AFZ - Der Wald* 52 (1997), Nr. 22, S. 1179–1181

SMUL 2018
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: *5. Forstbericht der Sächsischen Staatsregierung - Berichtszeitraum 1. Januar 2013 bis 31. Dezember 2017*. Abgerufen am 21.9.2020 von https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32400/documents/49472

Söhne 1952
Söhne, W.: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. In: *Grundlagen der Landtechnik* 2. Auflage (1952), Heft 3, S. 51–59

Sommer 1985
Sommer, C.: Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen, sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. In: *Landtechnik* Vol. 40 (1985), Heft 9, S. 378–383

Spellmann et al. 1999
Spellmann, H.; Nagel, J.; Böckmann, T.: Summarische Nutzungsplanung auf der Basis von Betriebsinventuren. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 170. Jahrgang (1999), Nr. 7, S. 122–128

Spenner 2014
Spenner, R.: *Vergleich von Produktivitätsmodellen für Seilschlepper auf Basis einer Literaturrecherche*. Tharandt, TU Dresden, Bachelorarbeit, 2014

Stampfer 1999
Stampfer, K.: Harvester und Seilgerät. In: *Forst & Technik* 11 (1999), Nr. 2, S. 8–10

Stitz 2012
Stitz, G.: *Vergleich von Produktivitätsmodellen für Forwarder auf Basis einer Literaturrecherche*. Tharandt, TU Dresden, Bachelorarbeit, 2012

Stutz et al. 2015
Stutz, K. P.; Schack-Kirchner, H.; Kändler, G.; Lang, F.: Phosphorus in accumulated harvest residues on skid trails. In: *Forest Ecology and Management* 356 (2015), 136-143. Abgerufen am 21.9.2020 von http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.025

Stutz 2004
Stutz, M.: Lohnt sich der Sortierkran am Forstspezialschlepper? In: *Forst und Holz* 59. Jahrgang (2004), Nr. 6, S. 294–297

Sündermann & Röhe 2014
Sündermann, J.; Röhe, P.: Vollmechanisierte Holzernteverfahren auf Nassstandorten. Projektbericht / Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (LU), Referat 240 (Waldbau). Schwerin, 2014

Sündermann et al. 2013
Sündermann, J.; Schröder, J.; Röhe, P.: *Bodenschonende Holzernte in geschädigten Eschenbeständen auf Nassstandorten – Erkenntnisse und Empfehlungen aus Fallstudien in Mecklenburg-Vorpommern*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz. Schwerin, 2013

Thieme 1999
Thieme, F.: Naturgemäße Waldwirtschaft und moderne Forsttechnik. In: *Forst & Technik* (1999), Nr. 2, S. 12–13

Trumpa & Gaertig 2008
Trumpa, M.; Gaertig, T.: Einbindung alter Fahrlinien in neue Feinerschließungssysteme. In: *AFZ - Der Wald* 63 (2008), Nr. 6, S. 302–303

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

Uhl et al. 2005
Uhl, E.; Kremer, J.; Ohrner, G.; Matthies, D.: Auch Raupenharvester können wurzelschonend arbeiten – Kunststoffketten „Felastec“ im Vergleich mit Stahlsteg-Ketten. In: *AFZ - Der Wald* (2005), Nr. 18, S. 965–968

Uhl et al. 2003
Uhl, E.; Ohrner, G.; Matthies, D.; Kremer, H.; Wolf, B.: Einsatzempfehlungen für Rad- und Raupenfahrwerke – Ergebnisse von Boden- und Wurzeluntersuchungen. In: *LWF aktuell* (2003), Nr. 39, S. 11–14

VDI 2007
Verein Deutscher Ingenieure: Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtlinie 6101. VDI-Verlag Düsseldorf.

Viitala 2006
VIITALA, E.-J.: An early contribution of Martin Faustmann to natural resource economics. In: *Journal of Forest Economics* (2006), Nr. 12, S. 131–144

Vossbrink & Horn 2005
VOSSBRINK, J.; HORN, R.: *Kapitel:* Bodenmechanische Wirkung von im Rahmen des Waldumbaus eigesetzten Maschinen. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 316–329

Wagner 2008
WAGNER, S.: Rechtliche Beurteilung von Bodenschäden in der Forstwirtschaft. In: *LWF aktuell* (2008), Nr. 67, S. 28–30

Wächter 2016
WÄCHTER, M.: *Öffentliche Ausschreibung der Holzernte-Dienstleistungen für das Jahr 2016 im Forstbezirk Bärenfels, Freistaat Sachsen.* 2016 – unveröffentlicht

Wächter & Erler 2012
WÄCHTER, M.; ERLER, J.: Income Effects of Harvesting. In: *45th International Symposium on Forestry Mechanisation: „Forest engineering: Concern, Knowledge and Accountability in Today's Enviroment", October, 2012 in Dubrovnik, Croatia.*, 2012

Wehner 2005a
WEHNER, T.: *Kapitel:* Konsequenzen aus der Holznutzung für Boden und Bestand im Sinne einer Technikfolgenabschätzung. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 315 f.

Wehner 2005b
WEHNER, T.: *Kapitel:* Systeme und Verfahren als Belastungsfaktoren - Probleme mit dem Einsatz moderner Holzerntetechnik. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 330–345

Wehner & Sauter 2005
WEHNER, T.; SAUTER, U. H.: *Kapitel:* Aspekte der Holznutzung und der Technikfolgenabschätzung beim Waldumbau im südlichen Schwarzwald. In: VON TEUFEL et al. 2005: *Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft.* Springer-Verlag, 2005, S. 301–303

Wehner et al. 2010
WEHNER, Th.; JACKE, H.; DREEKE, R.: Maschinentechnische Maßnahmen - Realitäten und Visionen beim bodenverträglichen Einsatz von Forstmaschinen. In: *Forsttechnische Informationen* (2010), Nr. 1+2, S. 11–14

Weiß 2007
WEISS, M.: *Entwicklung eines flächenbezogenen Entscheidungsunterstützungssystems für Holzernteverfahren unter Berücksichtigung der Wertvorstellungen des Waldbesitzers*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007

Weise 2002
Weise, G.: Bewertungsschema zur Bodenbelastung von Großmaschinen im Forst. In: *Forsttechnische Informationen* (2002), Nr. 1+2, S. 10–12

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

Weise & Graupner 2006
Weise, G.; Graupner, J.: Bericht über vergleichende Untersuchungen zur Bodelbelastung durch Rad- und Raupenfahrwerken von Forstmaschinen/ Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 2006

Weixler et al. 1997
Weixler, H.; Feller, S.; Schauer, H.: Der Raupen-Harvester IMPEX 1650 T „Königstiger“ im Einsatz. In: *AFZ - Der Wald* 52 (1997), Nr. 22, S. 1182–1184

Weltecke & Gaertig 2011
Weltecke, K.; Gaertig, T.: Methods for the assessment of soil deformation in forest stands: interrelationships and ecological relevance. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (2011), Nr. 9/10, S. 187–204

Wicke 1993
Wicke, L.: *Umweltökonomie: Eine praxisorientierte Einführung.* 4. überarb., erw. und aktualisierte Auflage. München: Verlag Vahlen, 1993

von Wilpert & Schäffer 2006
Wilpert, K. von; Schäffer, J.: Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. In: *European Journal of Forest Research* 125 (2006), Nr. 2, S. 129–138

Wippermann 2000
Wippermann, D.: Einsatz von Raupenbändern bei Forstmaschinen. In: *Forst & Technik* (2000)

Wirth & Wolff 2008
Wirth, J.; Wolff, D.: Vergleich von Pferde- und Seilschleppereinsatz beim Vorliefern von Vollbäumen. In: *AFZ - Der Wald* 63. Jahrg. (2008), Nr. 18, S. 968–971

Wolter 2013
Wolter, F.: *Richtlinie Feinerschließung.* Le Gouvernement Du Grand-Duche de Luxembourg, 2013, (Circulaire 10). Abgerufen am 21.9.2020 von https://environnement.public.lu/dam-assets/documents/natur/forets/Circulaire-10-2013-Waldfeinerschliessung-annexe-signee.pdf

Wüthrich 1992
Wüthrich, W.: *Die Feinerschließung von Waldbeständen. Planung, Anlage und Benützung.* Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 1992

Zander et al. 1988
ZANDER, J.; AMMER, U.; BREITSAMER, J.: Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß des Befahrens auf die Oberbodenverdichtung. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 107 (1988), S. 112–122

Ziesak 1999
ZIESAK, M.: Ein Informationssystem für den bodenschonenden Einsatz von Forstmaschinen. In: *Forsttechnische Informationen* (1999), Nr. 5+6, S. 45–47

Symbol-, Einheiten- und Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
$A_{Wpfl.}$	Auszahlungen aus Waldpflege (Vornutzungen)
An_{∞}	Annuität
BEW_{a_j}	Kapitalhaltungswert
bar	Bar
bzw.	beziehungsweise
CaO	Calziumoxid
$C_{0_{\infty}}$	Bodenertragswert (Kapitalwert) einer endlosen Waldwirtschaft
cm	Zentimeter
cm^3	Kubikzentimeter
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DB I	holzerntekostenfreier Erlös (Deckungsbeitrag I)
DGZ	durchschnittlicher Gesamtzuwachs
E	Erlös
e.V.	eingetragener Verein
Efm	Erntefestmeter
E_{Ver}	Restwert
$E_{Wpfl.}$	Einzahlungen aus Waldpflege (Vornutzungen)
etc.	et cetera
Eur	Euro
f_{Abbau}	Faktor zur Errechnung der Abbauzeit einer Trasse
$F_{g\,gesamt}$	Gewichtskraft der beladenen Maschine
$F_{g\,leer}$	Gewichtskraft der unbeladenen Maschine
f_{Lnk}	Lohnnebenkosten-Faktor
$f_{RepWart}$	Reparaturkostenfaktor

f_{SchmSt} ..... Schmierstofffaktor
f_{Sonst} ..... Faktor für sonstige Kosten
$f_{Umsetz^{Pers}}$ ..... Umsetzfaktor
f_{Ver} ..... Faktor zur Ermittlung des Restwertes
g ..... Gramm
H ..... Gesamtnutzungsdauer
h ..... Stunde
h_{opt} ..... Auslastungsschwelle
h_{real} ..... Auslastung
ha ..... Hektar
i ..... Zinssatz
K ..... Kosten
K_{Abschr} ..... Abschreibung
K_{An} ..... Anschaffungskosten
$K_{AufAbbau}$ ..... Kosten für Auf- und Abbau
$K_{aUntern}$ ..... anteilige Unternehmerkosten
K_{BetrSt} ..... Betriebsstoffkosten
K_{HE} ..... Holzerntekosten
$K_{Lohn^{AufAbbau}}$ ..... Lohnkosten für Auf- und Abbau einer Seiltrasse
K_{Lohn} ..... Lohnkosten
$K_{RepWart}$ ..... Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten
K_{Sach} ..... Sachkosten
K_{Sonst} ..... Sonstige Kosten
$K_{System^{AufAbbau}}$ ..... Systemkosten für Auf- und Abbau einer Seiltrasse
K_{System} ..... Systemkosten
$K_{Umsetz^{Masch}}$ ..... Maschinenkosten beim Umsetzen
$K_{Umsetz^{Pers}}$ ..... Personalkosten beim Umsetzen
K_{Umsetz} ..... Umsetzkosten
$K_{Verfahrensstufe}$ ..... Kosten der Verfahrensstufe
$K_{Vorbereitung}$ ..... Vorbereitungskosten
K_{Zins} ..... Zinskosten
kf ..... gesättigte Wasserleitfähigkeit
kg ..... Kilogramm

kW	Kilowatt
KWF	Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.
L	Leistung
$lfdm$	laufender Meter
LK	Luftkapazität
m	Masse/ Meter
MgO	Magnesiumoxid
MAS_{15}	Maschinenarbeitsstunden
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
m_{leer}	Leermasse
m_{nutz}	Nutzmasse
$max.$	maximal
min	Minuten
mm	Millimeter
N	Veralterungszeit
n	Anzahl/ Abschreibungsdauer
$n_{Personal}$	Anzahl des zum Auf- und Abbau notwendigen Personals
$n_{Trassen}$	Anzahl der Seiltrassen
$P_{Bruttolohn}$	Bruttostundenlohn
P_{KrSt}	Kraftstoffpreis
Pv	Vorbelastung
$S.$	Seite
$S1$	Sensibilitätsklasse 1
$S2$	Sensibilitätsklasse 2
$Stck$	Stück
$SystemZeitDirekt$	von HeProMo ausgegebene Produktivität
T	Umtriebszeit
t	Tonne/ Zeit(-punkt/ -verbrauch)
TAP	Technische Arbeitsproduktivität
t_{Aufbau}	Aufbauzeit je Trasse
$t_{Vorbereitung}$	Vorbereitungszeit je Trasse
$t_{Maschine}$	notwendige Maschinenlaufzeit zum Aufbau einer Trasse

$TEur$	Tausend Euro
U	Nutzen
$U(e)$	Nutzen des Geldeinkommens
$U(w)$	nichtmonetärer Nutzen
V	Volumen
Vfm	Vorratsfestmeter
V_{Hieb}	Volumen des gesamten Hiebs
V_{KrSt}	Kraftstoffverbrauch
$z_{Bbg.}$	Begründungskosten
z_{EN}	Deckungsbeitrag aus der Endnutzung
$z_{Wpfl.}$	Deckungsbeitrag aus Waldpflege (Vornutzungen)
ρB	Vorbelastung
$\sigma 1$	Vorbelastung
τ	Scherwiderstand

Abbildungsverzeichnis

1 Visuelle Typisierung der Spurtypen nach Lüscher et al. 9
2 Modell zur Beurteilung der Bodenverdichtung nach Riggert 11

3 Eingabefenster „Bäume hinzufügen“ in BWinPro 7.7 47
4 Bestandesansicht der fünfjährigen Verjüngung in BWinPro 7.7 48
5 Bestandesansicht des 30jährigen Bestandes mit Feinaufschluss in BWinPro 7.7 48
6 Eingabefenster „Simulationseinstellungen“ in BWinPro 7.7 49
7 Eingabefenster „Sorting Dialog“ zur Eingabe der Sortimente in BWinPro 7.7 50
8 Vollmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Harvester und Forwarder 53
9 Verfahrensstufen des Kurzholzverfahrens mit Harvester und Forwarder . . . 53
10 Übersicht der Geräte und Maschinen zur Fertigung der Sortimente 54
11 Übersicht der Tiere und Maschinen zur Vorrückung und Rückung 55
12 Übersicht der Maschinen zur fahrend tragenden Rückung des Holzes 56
13 Übersicht der Maschinen zur schwebenden Rückung 57
14 Gegenüberstellung von Annuität und einer weiteren Leistung 73
15 Drei verbleibende Handlungsalternativen 74

16 Ergebnisse der ertragskundlichen Simulation [Naturaldaten] 75
17 recherchierte Anschaffungskosten der verschiedenen Maschinenkategorien . . 79
18 Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Fertigungssysteme 80
19 Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Schlepper 81
20 Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Forwarder u. Rückezüge 82
21 Häufigkeitsverteilung der Systemkosten der Seilkrane 82
22 Vorbereitungs- sowie Auf- und Abbaukosten der Seilkran-Verfahrensstufen . 83
23 Zeitverbäuche der Verfahrensstufen des Fertigens 85
24 Zeitverbräuche der Verfahrensstufen mit Pferd und Schlepper 86
25 Produktivität beim Holztransport mit dem Forwarder 87
26 Zeitverbräuche beim Holztransport mit dem Seilkran 88
27 Standardverfahren auf S1-Standorten 90
28 vollmechanisiertes Kurzholzverfahren mit leichten Raupenfahrzeugen 90
29 hochmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Zufällung, Harvester und Forwarder 91
30 hochmechanisiertes Kurzholzverfahren mit Zufällung und tlw. Vorrückung . . 91
31 20 m-Gassenabstand: Kurzholzverfahren mit Rückezug 92
32 Kosten der Fertigungs-Verfahrensstufen für 20 m-Gassenabstände 93
33 Systemkosten der Forwarder-Verfahrensstufen für 20 m-Gassenabstände . . . 94
34 20 m-Gassenabstand: Langholzverfahren mit Kranschlepper 95
35 Systemkosten der Schlepper-Verfahrensstufen für 20 m-Gassenabstände . . . 95
36 40 m-Gassenabstand: Kurzholzverfahren 97

37 Kran- und Zwischenzonenverteilung bei unterschiedlichen Gassenabständen . 98
38 Kosten der Fertigungs-Verfahrensstufen für 40 m-Gassenabstände 99
39 Kosten der Verfahrensstufen „Vorrücken“ 99
40 40 m-Gassenabstand: Langholzholzverfahren 100
41 gassenunabhängige Kurzholzernteverfahren 101
42 Kosten der Fertigungsverfahrensstufen bei den Seilkranverfahren 102
43 gassenunabhängige Langholzernteverfahren 102
44 Zusammenstellung der Funktigramme der Holzernteverfahren mit den niedrigsten Kosten je Sortiervariante und Erschließungssystem 103
45 Deckungsbeiträge der zwei Sortiervarianten 104
46 Verhältnis der Bodenertragswerte der zwei Sortiervarianten 105
47 Kumulierte Vornutzungserlöse der drei Erschließungsalternativen 108
48 Abtriebserlöse der drei Erschließungsalternativen 109
49 Abstand der Annuität der 40 m-Erschließung zur Annuität der 20 m-Erschließung in Relation zu dieser (relativer Annuitätenabstand) 111
50 Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Volumenfaktor je Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung der drei Zinssätze 117
51 Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Qualitätsfaktor je Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung der drei Zinssätze 118
52 Zusammenhang der Schäden in den unterschiedlichen Erschließungssystemen 121
53 Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 0,01% 124
54 Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 1,0% 125
55 Annuitätenverlauf der verschiedenen Erschließungen über der Schadausmaß unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 2,5% 126
56 relative Annuität des 40 m-Gassensystems bei vollständiger Schädigung und in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schwere des Schadens (die Bezugslinie wurde auf Höhe der relativen Annuität (0,9) für den Zinssatz 1,0%, ohne Schäden eingezeichnet) 129
57 Optimalität des Rückegassenabstandes in Abhängigkeit von Schadschwere, -ausmaß und -proportionalität ohne Berücksichtigung weiterer Effekte 130
58 Gegenüberstellung der Annuität und der Bodenressourcenschonung der drei Handlungsalternativen für den Zinssatz 0,01% 133
59 Gegenüberstellung der Annuität und der waldbaulichen Freiheit der drei Handlungsalternativen für den Zinssatz 0,01% 136
60 Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel schwerer streckenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0% 138
61 Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel leichter streckenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0% 140
62 Optimalität der 40 m -Rückegassenerschließung am Beispiel schwerer massenproportionaler Schäden und dem Kalkulationszinssatz 1,0% 141

63 Rahmenbedingungen des angewandten Modells und ihre Wirkungen auf die Rentabilität der Bewirtschaftung 166

64 Kleinsysteme des finnischen Herstellers Farmi (Produktion eingestellt) IV
65 Zeitungsartikel der Morgenpost am 2. Oktober 2010 nach einer Holzerntemaßnahme im Nationalpark Sächsische Schweiz IV
66 relative Annuitäten der verschiedenen Erschließungen über dem Schadausmaß unter Berücksichtigung der drei verwendeten Kalkulationszinssätze V
67 Einstellungen der Produktivitätsanalyse des Forwarders im Programm HeProMo VI

Tabellenverzeichnis

1 Richtwerte zur Berechnung der Vorbereitungs-, Auf- und Abbaukosten . . . 67

2 Naturaldaten [Pflegeregime: mäßige Durchforstung, Gassenabstand: 20 m] . . 76
3 Sortimente und Holzerlöse 77
4 Bodenertragswerte der verschiedenen Sortiervarianten 105
5 Bodenertragswerte der verschiedenen Sortiervarianten für die Erschließungsalternativen 106
6 Bodenertragswerte der mäßigen und der starken Durchforstung 106
7 Optimale Umtriebszeit, Bodenertragswerte und Annuitäten der drei Erschließungsalternativen nach Zinssatz 107
8 Optimale Umtriebszeit, Bodenertragswerte und Annuitäten der unterschiedlichen Feinerschließungssysteme nach der Harmonisierung der Naturaldaten . . 110
9 Relative Bodenertragswerte und Annuitäten (40 m-Rückegassen- und 40 m-Seiltrassen-Erschließung in Relation zur 20 m-Rückegassen-Erschließung) . . 110
10 Auswirkungen der Flächeninanspruchnahme auf die biologische Produktion durch Veränderung des qualitativen Faktors 114
11 Relative Bodenertragswerte und Annuitäten bei vollständigem Verlust der biologischen Produktionsfunktion auf der Rückegasse (d.h. Faktor = 1) . . . 115
12 Volumenreduktion am Break-Even-Point 117
13 Preisreduktion am Break-Even-Point 119
14 Für Annuitätengleichheit notwendiges Schadausmaß in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schadschwere 126
15 Annuität des 40 m-Gassensystems in Relation zur Annuität des 20 m-Gassensystems ohne und mit voller (streckenproportionaler) Schädigung der technischen Befahrbarkeit in Abhängigkeit vom Zinssatz und der Schadschwere . . 127
16 absolute und relative Opportunitätskosten der Bodenressourcenschonung durch 40 m-Gassensysteme 134
17 absolute und relative Opportunitätskosten der Bodenressourcenschonung durch 40 m-Seiltrassensysteme 134
18 absolute und relative Opportunitätskosten der waldbaulichen Freiheit durch 40 m-Gassensysteme 137
19 Mindestwerte für Volumen- und Qualitätsdifferenz sowie Schadausmaß zur Optimalität der 40 m-Rückegassenerschließung 140

20 Sortierungseinstellungen VIII
21 Richtwerte für die Maschinenkostenkalkulation IX
22 Anschaffungskosten der recherchierten Maschinen-Systeme sowie die zu Grunde liegenden Quellen X

23 Systemkosten der Mensch-Maschinen-Systeme XI
24 Regressionen für die Verfahrensstufen des Fertigens XII
25 Regressionen zum Holztransport mit dem Schlepper bzw. dem Pferd XII
26 Regressionen zum Holztransport mit dem Forwarder XIII
27 Regressionen für die Verfahrensstufen des Transportes mit Seilkran XIII
28 Unterschiede bezüglich der Sortiervarianten am Beispiel der mäßigen Durchforstung im 20 m-Gassensystem XIV
29 Optimierte und harmonisierte Naturaldaten XV
30 Erlöse und Kosten XVI
31 Optimale Umtriebszeiten und Annuitäten der beiden terrestrischen Erschließungssysteme bei voller Schädigung der technischen Befahrbarkeit XVII
32 Flächenanteile der technologischen Standortsklassen im sächsischen Staatswald XVIII

Erklärung zur Eröffnung des Promotionsverfahrens

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten: ./.

3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist – sofern es sich nicht um eine kumulative Dissertation handelt – auch noch nicht veröffentlicht worden.

5. Sofern es sich um eine kumulative Dissertation gemäß § 10 Abs. 2 handelt, versichere ich die Einhaltung der dort genannten Bedingungen.

6. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

. . . .

Ort, Datum Unterschrift des Doktoranden