



Universität für Bodenkultur Wien

## **Department für Wald- und Bodenwissenschaften**

Institut für Forsttechnik

# **VERGLEICHENDE ÖKOBILANZ (LCA) VON HOLZERNTESYSTEMEN IN STEILLAGEN**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur (Dipl.-Ing.) der Forstwissenschaft

an der Universität für Bodenkultur Wien

Betreuer:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer

Dipl.-Ing. Dr. Martin Kühmaier

Eingereicht von

Maximilian Wanzenböck, BSc.

Wien, Juli 2019



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, Juli 2019

.....



## **Danksagung**

Allen voran möchte ich mich auch auf diesem Weg bei Dipl.-Ing. Dr. Martin Kühmaier bedanken. Seine intensive und kompetente Betreuung stellen das Fundament dieser Arbeit dar. Ohne dessen Hilfe wäre eine derartige Arbeit nicht möglich gewesen. An dieser Stelle sei auch dem Leiter des Departments für Wald- und Bodenwissenschaften Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer für seine Hilfe gedankt.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern Karin und Michael, die mir dieses Studium ermöglicht haben. Mit einer schier unglaublichen Geduld und Liebe haben sie mir immer geholfen mein Ziel zu erreichen. Aber nicht nur meinen Eltern, sondern auch meiner ganzen Familie sei dafür gedankt.

In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der leichteren Lesbarkeit durchgängig die männliche Form benutzt. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.



## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es die Umweltauswirkungen für die Bereitstellung eines Kubikmeters Holzes im Gebirgswald, vom Bestand zur Forststraße zu berechnen. Dies beinhaltet die Fällung, Rückung und Aufarbeitung des Holzes. Durch die Modellierung verschiedener Szenarien wird eine vergleichende Ökobilanzierung (LCA) diverser Holzerntesysteme in Steillagen unter Einsatz von Motorsäge, Seilharvester, Seilgerät und Seilforwarder erstellt.

Durch Einbeziehung von Primärdaten (aus vorliegenden Studien) und der Datenbank Ecoinvent (Version 3.4) wurden mit der Software openLCA (Version 1.7) fünf verschiedene Holzerntesysteme modelliert. Die untersuchten Szenarien variierten hinsichtlich Rückedistanz, Hangneigung und Baumvolumen. Für die Bilanzierung wurden die Wirkungskategorien Klimaerwärmungspotential, Humantoxizität, Metallabbau, Feinstaubbelastung, photochemische Oxidation, terrestrische Versauerung und terrestrische Ökotoxizität mit dem Methodenpaket ReCiPe2016 Midpoint (H) betrachtet.

Das Klimaerwärmungspotential für die Fällung, Aufarbeitung und Rückung eines Festmeters frei Forststraße liegt je nach Szenario und Holzerntesystem zwischen 4,3 und 27,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>. Die Umweltauswirkungen der Erntesysteme hängen vor allem von der Produktivität und dem Treibstoffverbrauch ab. Bei der Erhöhung der Rückedistanz beziehungsweise der Hangneigung, zeigte sich eine zunehmende Verschlechterung der unterschiedlichen Wirkungskategorien.

Die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung und anschließende Rückung mit Seilforwarder im Sortimentsverfahren ist bei den meisten Szenarien am umweltverträglichsten zu sehen. Bei der Erhöhung der Rückedistanz verschlechtert sich jedoch die bodengestützte Rückung im Vergleich zu Seilgeräten überproportional. Aus ökologischer Sicht ist im Gebirge die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung dem Seilharvester vorzuziehen.

**Schlüsselwörter:** Holzernte, Motorsäge, Seilharvester, Seilgerät, Seilforwarder, Ökobilanzierung, Gebirgswald



## Abstract

The aim of this work is to calculate the environmental impacts of providing one cubic meter of wood in mountain forests, from the forest stand to the forest road. It includes the processes felling, extracting and processing (delimiting, cross-cutting). By modelling different scenarios, a comparative life cycle assessment (LCA) of timber harvesting systems on steep terrain using chainsaw, cable-harvester, tower yarder and cable-forwarder is designed.

Using primary data (from existing studies) and the Ecoinvent database (version 3.4), five different timber supply chains were modelled with the openLCA software (version 1.7). The input data of the investigated scenarios varied in terms of extraction distance, slope and tree volume. For this purpose, the impact categories global warming potential (GWP100), human toxicity, fossil depletion, particulate matter formation, photochemical oxidant formation, terrestrial acidification and terrestrial ecotoxicity were calculated using the method package ReCiPe2016 Midpoint (H).

For the individual scenarios and the different wood harvesting systems, the GWP(100) for the supply of one cubic meter of wood to the forest road is between 4.3 and 27.9 kg CO<sub>2</sub> eq. m<sup>-3</sup>. The environmental impact of harvesting systems depends above all on productivity and fuel consumption. An increase of the extraction distance or the slope had a negative effect on the different impact categories.

Motormanual felling and processing and extraction with cable-forwarder (cut to length) is in most scenarios the most environmentally friendly harvesting system. But with increasing extraction distance, the ground-based systems perform worse, compared to tower yarders. From an ecological point of view, in mountain forests, felling and processing with chainsaw is more suitable than with cable-harvester.

**Keywords:** timber harvesting, chainsaw, tower yarder, cable-forwarder, cable-harvester, life cycle assessment, mountain forest

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
<b>2</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>3</b>
2.1	Umweltentwicklung	3
2.2	Holzernte	6
2.2.1	Begriffliche Abgrenzung nach ÖNORM L1020	6
2.2.2	Produktivität und Effizienz	7
2.2.2.1	Fällung und Aufarbeitung – Motorsäge und Harvester	8
2.2.2.2	Rückung – Forwarder und Seilgerät	10
2.2.3	Treibstoffverbrauch und CO <sub>2</sub> -Ausstoß bei der Holzernte	12
2.3	Ökobilanzierung – Life Cycle Assessment (LCA)	15
2.4	DIN EN ISO 14040	16
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>23</b>
3.1	Untersuchungsrahmen	23
3.1.1	Systemgrenze und funktionelle Einheit	23
3.1.2	Holzerntesysteme	24
3.2	Softwarepaket und Datenimplementierung	26
3.3	Sachbilanz	27
3.3.1	Prozess I: Fällen und Aufarbeiten mit MOTORSÄGE	27
3.3.2	Prozess II: Rücken mit SEILGERÄT im Sortimentsverfahren	29
3.3.3	Prozess III: Rücken mit SEILFORWARDER im Sortimentsverfahren	31
3.3.4	Prozess IV: Fällen und Aufarbeiten mit SEILHARVESTER	33
3.3.5	Prozess V: Fällen mit MOTORSÄGE	35
3.3.6	Prozess VI: Rücken mit SEILGERÄT und Aufarbeiten mit integriertem Prozessor	37
3.4	Wirkungskategorien	40
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>41</b>
4.1	Wirkungsabschätzung	41

4.1.1 Klimaerwärmungspotential der Holzerntesysteme	41
4.1.2 Klimaerwärmungspotential der einzelnen Ernteprozesse	42
4.1.2.1 Motorsäge	43
4.1.2.2 Seilharvester	43
4.1.2.3 Seilgerät	44
4.1.2.4 Seilgerät mit integriertem Prozessor	45
4.1.2.5 Seilforwarder	46
4.2 Sensitivitätsanalyse	47
4.2.1 Szenarien mit veränderter Rückegassenneigung	47
4.2.2 Szenarien mit veränderter Rückedistanz	54
4.2.3 Szenarien mit verändertem Baumvolumen	60
4.2.4 Erntesysteme im Vergleich	66
4.2.4.1 Szenario 1: Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände	66
4.2.4.2 Szenario 2: Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände	68
4.2.4.3 Szenario 3: Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad	70
4.2.4.4 Szenario 4: Holzernte in beginnendem Seilgelände und niedrigem Erschließungsgrad	72
<b>5 Schlussfolgerungen und Auswertungen</b>	<b>75</b>
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>77</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
<b>8 Tabellenverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>9 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>89</b>
<b>10 Formelverzeichnis</b>	<b>91</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Österreichs Staatsfläche ist zu 47% bewaldet und zählt damit zu den walddreichsten Ländern Mitteleuropas (WALDINVENTUR, 2011). Die auf vier Millionen Hektar produzierte Holzbiomasse ist ein wichtiger nachwachsender Rohstoff und trägt damit wesentlich zur österreichischen Wirtschaft bei. Darüber hinaus erfüllt der Wald eine Vielzahl an Ökosystemleistungen, beginnend bei der Sequestrierung von Kohlenstoff bis hin zu Erholungs- und Schutzfunktionen (BLATTERT et al., 2017).

Die Gebirgswälder Österreichs mit ihren steilen Lagen erschweren eine ökologische und ökonomische Bewirtschaftung. Das Management von Gebirgswäldern muss einer Vielzahl an Herausforderungen gerecht werden: Besitzerstrukturen, Partizipation von Stakeholdern, technische Limitierung, soziale Akzeptanz und wirtschaftliche Durchführbarkeit spielen eine wesentliche Rolle bei der Entscheidungsfindung (ENACHE, 2016; HOLZLEITNER et al., 2011). Dennoch werden gerade bei der Holzernte in steilen Lagen, nicht die am besten geeigneten Technologien eingesetzt, um die Umwelteinwirkungen so gering wie möglich zu halten (ENACHE et al., 2016).

Die Einstellung zum Umgang mit Technik hat sich in den letzten Jahrzehnten geändert und nicht nur eine ökonomische, sondern auch ökologische Determinante ist von Bedeutung. Die zunehmende Technisierung, die auch in der Fortwirtschaft stattfindet, ist jedoch auch mit negativen Nebenwirkungen (Bodenverwundung, Akzeptanz in der Bevölkerung, etc.) verbunden, die es präventiv zu vermeiden gilt (HEINIMANN, 1998). Es sollte angestrebt werden, endliche Ressourcen zu schonen und durch nachwachsende Rohstoffe zu substituieren. Der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen und das Wirtschaften in Kreisläufen bedürfen neuer zukunftsfähiger Leitbilder und technischer Rationalisierung (ZIMMER und WEGENER, 1997).

Die eingesetzten Systeme bei der Holzernte im Gebirge unterscheiden sich wesentlich von denen im flach bis schwach geneigtem Gelände. Für die Bereitstellung des Holzes bis zur Forststraße bedarf es im steilen Gelände spezieller Techniken. Motorsäge, Seilharvester, Seilgerät und Seilforwader sind hier übliche Maschinen, die eine teil- bis vollmechanisierte Holzernte ermöglichen. Sowohl bei der Produktion und dem Transfer von Maschinen und Hilfs-/Betriebsstoffen als auch bei den einzelnen Ernteprozessen kommt es zur Freisetzung von Emissionen, die negative Einflüsse auf die Umwelt haben.

## **1.2 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Ökobilanz für die Holzernte in Steillagen von der Fällung des Baumes bis zur Bereitstellung an der Forststraße zu erstellen. Es werden Bilanzierungen durchgeführt, die den Einsatz von Ressourcen bewerten. Die wichtigsten Umweltauswirkungen, wie das Klimaerwärmungspotential, Abbau fossiler Brennstoffe, Metallabbau, Versauerung und Eutrophierung von terrestrischen Lebensräumen und Humantoxizität, die bei der Fällung, Aufarbeitung und Rückung entstehen, sollen für einen Kubikmeter Holz berechnet werden.

Unter Berücksichtigung verschiedenster Szenarien wird eine Verbesserung des derzeitigen Nutzverhaltens angestrebt. Eine Identifikation von Stärken und Schwächen der Holzerntesysteme soll dazu führen, eine umweltverträgliche Einsatzplanung im Gebirge zu erleichtern und das Holz mit geringen Ressourceneinsatz an der Forststraße bereitstellen zu können.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Umweltentwicklung

Zu Beginn der 1970er kam es zu einem Paradigmenwandel der Gesellschaft im Umgang mit Ressourcen. Die Wegwerfmentalität der damaligen Bevölkerung hatte die bevorstehenden Probleme wie Abfall und Energieversorgung erkannt (KLÖPFFER und GRAHL, 2009).

Der Umgang mit Umweltressourcen hat an Bedeutung gewonnen und der effiziente Einsatz dieser wurde forciert. 1992 kam es zum Umweltgipfel von Rio de Janeiro und es wurde ein Leitbild erarbeitet, welches eine Sicherstellung von natürlichen Ressourcen ermöglichen soll (HEINIMANN, 1998). In Rio wurde unter anderem auch das erste weltweite Abkommen über eine nachhaltige Forstwirtschaft getroffen. In den folgenden Jahren wurden Konzepte und Kriterien erstellt, die sowohl eine ökologische, ökonomische, als auch eine soziale Akzeptanz bei der Waldbewirtschaftung darstellen (STRAKA und LAYTON, 2010). Im Anschluss an den Umweltgipfel 1992 entstand die Arbeitsgruppe „The Montreal Prozess Working Group“, die im Jahr 1994 diese Kriterien und Indikatoren für temperierte und boreale Wälder manifestierte. Unter Einbeziehung von 12 Mitgliedsländern, die derzeit einen Anteil von 58% der weltweiten Waldfläche repräsentieren, wurden sieben Kriterien und 54 Indikatoren erarbeitet, die eine Bewahrung der Wälder sicherstellen sollen (THE MONTRÉAL PROCESS, 2015).

Auf europäischer Ebene ist es das Ziel, den Ausstoß von Treibhausgasen im Vergleich zu 1990 um 40% bis 2030 zu senken um somit der Klimaerwärmung entgegen wirken zu können. Durch politische Bestrebungen in der EU wird vor allem die Substitution von fossilen Brennstoffen forciert und durch monetäre Förderungsprogramme vorangetrieben. Kernziele bis 2030 sind unter anderem 27% des Gesamtenergieverbrauches durch erneuerbare Energiequellen zu ersetzen und eine Erhöhung der Energieeffizienz um mindestens 27% (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2014).

Somit ist es ein Bestreben der Europäischen Union die Agrar- und Forstwirtschaft zu bestärken. Durch die Produktion nachhaltiger Rohstoffe kann eine Weiterverarbeitung in umweltfreundliche Konsumgüter garantiert werden. Sowohl die Forstwirtschaft als auch die Landwirtschaft sind hier aber auf den Willen der Gesellschaft angewiesen, nachhaltige und „grüne“ Energie und Produkte zu konsumieren (ALBRECHT et al., 2012).

Für eine ganzheitliche Betrachtung ist nicht nur die reine Holzproduktion entscheidend, sondern es gilt die Multifunktionalität der Wälder einzubeziehen und es müssen Kompromisse mit anderen Ökosystemservices getroffen werden (LINDNER und SUOMINEN, 2017). Es ist aber nicht pauschal darauf zu schließen, dass eine intensivere Nutzung unserer Wälder gleichzeitig eine Minderung anderer Leistungen mit sich zieht. Zum Beispiel ist eine gewisse Infrastruktur notwendig die sowohl für die Holzernte, als auch für Erholungssuchende notwendig ist (ZIMMER und WEGENER, 1997).

Die Sensibilisierung der Gesellschaft gegenüber der Klimaerwärmung und eine gewisse Affinität gegenüber natürlichen Rohstoffen, insbesondere kohlenstoffneutralen Werkstoffen wie Holz, können helfen den negativen anthropogenen Einfluss auf das Klima auf verschiedene Weise zu minimieren. Allerdings geht mit der vermehrten Holzernte ein Anstieg des Treibstoffverbrauches einher. Unter anderem sind auch vermehrte Transportwege von Rundholz und Holzwerkstoffen durch eine erhöhte Nachfrage gegeben, die es zu berücksichtigen gibt. Es besteht weiterhin Bedarf und auch realisierbares Potential um Energieflüsse bei der Holzernte zu minimieren und den negativen Einfluss auf das Klima zu reduzieren (SCHWEINLE, 2007).

Durch die Erkenntnis der Konsumenten von der Endlichkeit der natürlichen Ressourcen stieg auch das Verlangen nach „grünem“ Holz. Einhergehend mit der Rodung von Regenwäldern in den 80iger und 90iger Jahren wurde der Wunsch der Kunden immer größer, nachhaltige und klimaneutrale Holzprodukte zu kaufen. Es wurden Zertifizierungen eingeführt um den Verbrauchern die Möglichkeit zu geben, durch Öko-Labeling nachhaltiges Holz zu erkennen (STRAKA und LAYTON, 2010). Um eines dieser Zertifi-

zierungssysteme zu erwähnen, wäre hier zum Beispiel „Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes“ (PEFC) zu nennen. PEFC ist die größte Waldschutzorganisation und kontrolliert unter anderem auch weitere Verarbeitungsketten und dokumentiert das Produkt bis zum Kunden hin. Aspekte, die bei der Bewertung von Bedeutung sind: die Waldressourcen und die globalen Kohlenstoffkreisläufe, Gesundheit und Vitalität der Wälder, Nutzfunktionen der Wälder, biologische Vielfalt, Schutzfunktionen von Wäldern, aber auch sozioökonomische Gesichtspunkte. Je ne Kriterien werden von einem unabhängigen und neutralen Gutachter bewertet, um den Kunden eine ökologische Qualität zu garantieren (PEFC, 2001).

Durch eine Zertifizierung von Holz und Holzprodukten wird in erster Linie eine nachhaltige Forstwirtschaft, wie auch eine klimafreundliche Verarbeitung garantiert (MIRABELLA et al., 2014; HEINIMANN, 1998). Jedoch sind Öko-Labels, wie auch Forstzertifizierungen verhältnismäßig neue Verfahren und es ist daher noch schwierig, konkrete Aussagen über den positiven Effekt dieser auf das Klima und die Umwelt ableiten zu können (STRAKA und LAYTON, 2010).

Eine Umweltentwicklung hin zu „grünere Produkten“ erfordert vor allem eine nachhaltige Bewirtschaftung von Ökosystemen. Nachhaltigkeit steht hier für die bestmögliche Erfüllung von menschlichen Bedürfnissen und gleichzeitig die Berücksichtigung von ökologischen Grenzen (LOREK und SPANGENBERG, 2013). Für Holzwerkstoffe sind Untersuchungen vorhanden, die Umwelteinflüsse darlegen. Bei der Rohholzbereitstellung besteht noch Aufholbedarf, um hier nicht nur eine nachhaltige Forstwirtschaft, sondern auch eine klimaschonende Holzernte gewährleisten zu können (HEINIMANN, 1998; de la FUENTE et al., 2017). Wichtige Aspekte wie Bestandesschäden bei der Holzernte, Biodiversität und andere Ökosystemleistungen des Waldes sollten hier berücksichtigt werden (SCHWEINLE et al., 2007).

## **2.2 Holzernte**

### **2.2.1 Begriffliche Abgrenzung nach ÖNORM L1020**

Die Wertschöpfungskette Holz kann in einzelne Prozesse gegliedert werden. Es bedarf einer Anzahl an Schritten, die notwendig sind, um forstliche Ressourcen in Services und Produkte zu verwandeln. In den einzelnen Prozessen verändert das Holz entweder seine Form und wird bearbeitet oder es kommt zu einer Positionsveränderung des Materials selbst (PÄIVINEN et al., 2012).

#### **Fällen und Aufarbeiten**

Im ersten Schritt der Holzernte muss der stehende Baum gefällt werden. Unter Fällung versteht man das kontrollierte Zufallbringen des Baumes, ohne Wurzelstock oder Wurzel aus dem Boden, zu entfernen. Der liegende Baum kann im Anschluss aufgearbeitet (Entastung und Ausformung in verkaufsfähige Sortimenten) werden (ÖNORM L1020, 1997). Die Fällung und Aufarbeitung erfolgt meistens motormanuell mit Motorsägen oder mechanisiert mittels Harvester (Kapitel 2.2.2.1).

#### **Rückung**

Nach der Fällung und einer möglichen Aufarbeitung, muss die Biomasse gerückt werden. Die Rückung ist die Beförderung dieser bis zur Fein- oder Groberschließungsanlagen (ÖNORM L1020, 1997). Hier unterscheidet man zwischen händischer Lieferung (Handwerkzeuge) und mechanisierter Rückung (Schlepper, Forwarder, Seilgerät; Kapitel 2.2.2.2).

## **Holzernteverfahren**

Hier kommen vorwiegend drei Verfahren (Einteilung nach Bearbeitungsgrad des zu rückernden Holzes) zur Anwendung, die für die Holzernte von Bedeutung sind (ÖNORM L1020, 1997):

- Baumverfahren (Fällen – Rücken BAUM – Aufarbeiten)
- Stammverfahren (Fällen – Entasten – Rücken STAMM – Ausformen)
- Sortimentsverfahren (Fällen – Aufarbeiten – Rücken SORTIMENT)

## **Arbeitssysteme**

Die verschiedenen Systeme werden nach dem Mechanisierungsgrad der einzelnen Prozesse unterschieden (ÖNORM L1020, 1997).

- Nichtmechanisiert (Fällung, Aufarbeitung und Rückung = nicht maschinell)
- Teilmechanisiert (Fällen und Aufarbeiten = motormanuell; Rückung = maschinell)
- Hochmechanisiert (Fällung = motormanuell; Aufarbeitung und Rückung = maschinell)
- Vollmechanisiert (alle Prozesse = maschinell)

### **2.2.2 Produktivität und Effizienz**

Wie wirtschaftlich eine Holzernte ist, hängt neben den Systemkosten vor allem von der Produktivität ab (STAMPFER und STEINMÜLLER, 2004). Die Produktivität ist das Verhältnis von Output zum Input und ist neben der Effizienz ein Maß für die Arbeitsleistung (Formel 1). Bei der Holzernte wird das manipulierte Volumen der aufgewendeten Zeit gegenübergestellt (ERNI et al., 2000).

Formel 1: Produktivität

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{1}{\text{Effizienz}}$$

Die Produktivitätsmodelle bilden die Arbeitsleistung ab und können für ökonomische Entscheidungen herangezogen werden. Sie dienen darüber hinaus als Hilfe, um Parameter wie Hangneigung, Bodenbeschaffenheit etc. für das jeweilige Erntesystem zu beurteilen und dadurch bestmögliche Verfahren aufzeigen (HEINIMANN, 1998).

Abgesehen von den Parametern, welche die Produktivität der Holzernte unterschiedlich beeinflussen (Produktivitätsmodelle Kapitel 3.3.1–3.3.6), ist die Fertigkeit und Motivation des Maschinisten ein wesentlicher Einflussfaktor bei allen Holzernteprozessen (STAMPFER, 2016).

Aber nicht nur der ökonomische Erfolg hängt unter anderem zum Großteil von der Produktivität ab. Je höher die Produktivität eines Holzerntesystems ist, desto geringer ist die Umwelteinwirkung bezogen auf einen Kubikmeter Holz, da bei annähernd gleichem Ressourcenaufwand die geerntete Holzmenge pro Stunde steigt (SCHWAIGER und ZIMMER, 2001).

#### **2.2.2.1 Fällung und Aufarbeitung – Motorsäge und Harvester**

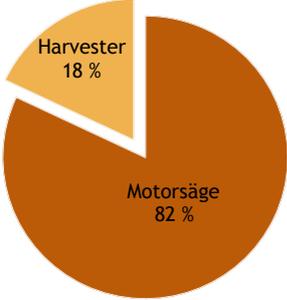
In Österreich werden 82% des Einschlags motormanuell gefällt (BMNT, 2018). Dies zeigt nach wie vor die Wichtigkeit der Motorsäge in Gebirgsländern, wo im Gegensatz zur mechanisierten und bodengestützten Fällung, die Befahrbarkeit des Geländes bei der Planung nur peripher berücksichtigt werden muss (Tabelle 1). Auch starke Holzdimensionen (>50 cm BHD) stellen im Gegensatz zur Harvesternutzung keine Grenze der Ausführbarkeit dar. Jedoch wirken sich hohe Beastungsprozente bei der motormanuellen Aufarbeitung negativ auf die Produktivität aus. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Produktivität sind Baumvolumen, Beastungsprozent, Arbeitsverfahren und Hangneigung (STAMPFER und LIMBECK-LILIENAU, 2003).

18% des geernteten Holzes in Österreich wurden 2017 durch Harvester gefällt. Im Vergleich zu Nordeuropa ist dieser Wert gering. In Schweden wird das Holz vorrangig mit Harvester manipuliert. Dies hängt unter anderem von der Großstrukturiertheit der Wälder und dem flachen Gelände ab (SCHWAIGER und ZIMMER, 2001). Um auch in steilen Lagen die Harvestertechnologie nutzen zu können, wurden in den letzten Jahren vermehrt Traktionshilfsseilwinden eingesetzt. Dadurch wird hohes realisierbares Potential ermöglicht, um auch im Übergangsbereich zum Seilgelände vermehrt mechanisierte Fällungen durchführen zu können (BRANDTNER, 2018). Laut VISSER und STAMPFER (2015), ist es möglich bei guter Befahrbarkeit der Hänge, Neigungen bis 70% zu bewältigen.

Durch eine Fällung mit Harvester (und möglicher Vorkonzentration an der Rückegasse) kann die Produktivität der Rückung um  $3,8 \text{ m}^3 \text{ PMH}_{15}^{-1}$  gesteigert werden. Durch die Vorkonzentration der Sortimente kann der weitere Ablauf maßgeblich verbessert werden, wie es bei einer motormanuellen Schlägerung nicht möglich ist (STAMPFER und STEINMÜLLER, 2004).

Mit Harvestern können im Vergleich zur motormanuellen Fällung und Aufarbeitung ( $9 \text{ m}^3 \text{ PMH}_{15}^{-1}$ ; Stückvolumen  $0,3 \text{ m}^3$ ) deutlich höhere Produktivitäten erzielt werden (STAMPFER und LIMBECK-LILIENAU, 2003). Als Richtwert liegt der Durchschnitt von Harvestereinsätzen in Finnland bei  $18 \text{ m}^3 \text{ PMH}_{15}^{-1}$  (Stückvolumen  $0,3 \text{ m}^3$ ), wobei bei stärkeren Durchmesserklassen noch höhere Produktivitäten erzielt werden können (GERASIMOV et al., 2001).

Tabelle 1: Motorsäge und Harvester im Vergleich

	<b>Motorsäge</b>	<b>Harvester</b>
Hangneigung	+	-
Manipulierbarkeit BHD > 50 cm	+	-
Produktivität	-	+
Beastungsprozent	-	+
Vorkonzentration an der Rückegasse	-	+
Geländekanten/ Abbrüche	+	-
Einsatz in Österreich 2017	 <p>A pie chart illustrating the distribution of equipment used in Austria in 2017. The chart is divided into two segments: a large dark brown segment representing chainsaws (Motorsäge) at 82%, and a smaller light brown segment representing harvesters (Harvester) at 18%.</p>	

### 2.2.2.2 Rückung – Forwarder und Seilgerät

In den meisten europäischen Ländern, die günstige Lagen haben und eine entsprechende Befahrbarkeit aufweisen, wird vor allem das Rücken mit Forwarder im Sortimentsverfahren angewendet und kann dabei hohe Produktivitäten erzielen (PROTO et al., 2018). In Österreich wurden 38% (BMNT, 2018) des gefällten Holzes mit Forwardern gerückt (inkl. Rückewagen und Krananhänger). Bei günstigen Bedingungen liegt die maximal befahrbare Hangneigung von Forwardern ohne Traktionshilfsmittel bei 45%. In steileren Lagen ist mit sicherheitstechnischen Problemen zu rechnen (STAMPFER, 2002; HITTENBECK, 2011). Um Forwarder auch im Gebirge einsetzen zu können, werden vermehrt, wie auch beim Harvester, seilgestützte Maschinen verwendet und ermöglichen somit eine Befahrbarkeit bis zu 70% Hangneigung (VISSER und STAMPFER, 2015).

In gebirgigen Ländern ist die Holzurückung mittels Seilgerät eine gängige Methode (Tabelle 2). Mehr als ein Fünftel des geschlägerten Holzes wird in Österreich mit Seilgeräten gerückt. Auch in der Schweiz (9,5%), Slowenien (6%) und Deutschland findet diese Technik Anwendung (SCHWAIGER und ZIMMER, 2001; BMNT, 2018). In Abhängigkeit der Rückedistanz, der Neigung der Rückegasse, dem Stückvolumen und dem seitlichen Zuzug, liegen die erreichten Produktivitäten von Seilgeräten bei Durchforstungen zw. 7–11 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>. Diese sind im Regelfall geringer als bei Forwardern, wo 18 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> durchaus üblich sind (ENACHE et al., 2016). Laut einem Produktivitätsmodell für einen Forwarder von HOLZFEIND (2017), sind wesentliche Parameter wie Stückvolumen, Rückedistanz, Neigung der Rückegasse, Ladedistanz und das Fuhrvolumen entscheidend.

Für Forwarder sind durchschnittliche Rückedistanzen zwischen 250–400 m zu empfehlen (ERIKSSON und LINDROOS, 2014). Bei Seilgeräten sind Distanzen von über 300 m in Österreich durchaus üblich (ENACHE et al., 2016).

Tabelle 2: Forwarder und Seilgerät im Vergleich

	<b>Forwarder</b>	<b>Seilgerät</b>										
Hangneigung	-	+										
Rückedistanz	+ -	+ -										
Produktivität	+	-										
Geländekanten/Abbrüche	-	+										
Einsatz in Österreich 2017	<table border="1"> <caption>Einsatz in Österreich 2017</caption> <thead> <tr> <th>Method</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Schlepper</td> <td>40 %</td> </tr> <tr> <td>Forwarder</td> <td>38 %</td> </tr> <tr> <td>Seilgerät</td> <td>21 %</td> </tr> <tr> <td>Sonstige</td> <td>1 %</td> </tr> </tbody> </table>		Method	Percentage	Schlepper	40 %	Forwarder	38 %	Seilgerät	21 %	Sonstige	1 %
Method	Percentage											
Schlepper	40 %											
Forwarder	38 %											
Seilgerät	21 %											
Sonstige	1 %											

*Sonstige = Riesen, Hubschrauber, händische Lieferung, Zugtier; Forwarder = inkl. Rückewagen und Krananhänger*

### 2.2.3 Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Holzernte

Um das Holz im Bestand zu ernten, muss ein gewisser Energieaufwand aufgebracht werden, der unter anderem mit dem Ausstoß von Emissionen verbunden ist. Ökologische Bilanzen zeigen, dass in der Forstwirtschaft durch die Einlagerung von Kohlenstoffdioxid im Pflanzengewebe, die Wälder eine einzigartige Rolle einnehmen. Wenn man den aufgewandten Kohlenstoff, der bei der Ernte emittiert wird, dem gespeicherten Kohlenstoff im Baum gegenüberstellt, kommt es zu einer positiven Kohlenstoffbilanz (ZIMMER und WEGENER, 1997).

Eine Studie aus Deutschland von SCHWEINLE und THOROE (1997) zeigt ein Beispiel einer hochmechanisierten Holzernte eines Fichtenbestandes (*Picea abies*). Es werden die einzelnen Produktionsabschnitte bis zum Fichtenstammholz bezüglich Energieaufwand betrachtet und der nutzbaren Energie (unterer Heizwert  $H_u$ ) des Holzes gegenübergestellt. Zwischen 1,1–4,2% der gespeicherten Energie, wird für die Produktion und Bereitstellung des Holzes benötigt. Hier schneiden starke Durchmesserklassen bei der Ernte bis zu 3,1% besser ab als Schwachholz. Es wurden die durchgeführten Maßnahmen Bestandesbegründung, Kulturpflege, Jungwuchspflege, Läuterung, Durchforstung, Endnutzung, Entrindung, Wegebau, Pestizideinsatz und Kalkung berücksichtigt (ZIMMER und WEGENER, 1997).

In Tabelle 3 sieht man die Prozessdaten von Holzernteeinsätzen und die unterschiedlichen Emissionen in  $\text{g kg}^{-1}$  Treibstoff, die sich aus den eingesetzten Treibstoffen und deren Verbrennungsprozessen zusammensetzen. 0,24 kg Treibstoff pro Kubikmeter werden bei einer Bearbeitung mit einer Motorsäge (Stihl 026/036) verbraucht. Die Rückung mit einem Forwarder (Timberjack 810B) benötigt um 0,47  $\text{kg m}^{-3}$  weniger als das Seilgerät (Wanderfalke), obwohl der Treibstoffverbrauch des Seilgeräts pro  $\text{PMH}_{15}$  niedriger ist. Hier ist die geringere Produktivität entscheidend (SCHWAI-GER und ZIMMER, 2001).

Tabelle 3: Treibstoffverbrauch und Emissionen von Holzernteprozessen  
(nach SCHWAIGER und ZIMMER, 2001)

Maschine	Verbrauch	Produktivität	Treibstoffverbrauch	Emissionen g kg <sup>-1</sup> Treibstoff		
				CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
	l PMH <sub>15</sub> <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> PMH <sub>15</sub> <sup>-1</sup>	kg m <sup>-3</sup>			
Kettensäge Stihl 026/036	2,0	6,0	0,24	3105	0,02	6,91
Harvester Timberjack 1270	11,3	13,0	0,77	3455	2,2	5,23
Forwarder Timberjack 810B	9,8	17,0	0,43	3455	2,2	5,23
Seilgerät Wanderfalke	7,2	6,0	0,90	3455	2,2	5,23

Laut einer europäischen Studie von SCHWAIGER und ZIMMER (2001), ist der Transport des Rundholzes zur Holzverarbeitenden Industrie, der größte Verbraucher bei der Holzernte. In Abhängigkeit von der maximal erlaubten Ladekapazität der LKWs und den Transportwegen in den jeweiligen Ländern werden bei diesem Vorgang zwischen 0,5–3,2% des im Holz gespeicherten Kohlenstoffs verbraucht. Im Durchschnitt werden in Europa für Ernte und Transport 0,83 kg Treibstoff pro m<sup>3</sup> aufgewendet. Wenn man die im Treibstoff enthaltene Energie nun der im Holz gespeicherten Energie gegenüberstellt, werden 0,25–0,75% Energie benötigt. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit 0,3–0,5% als sehr gering anzusehen, wenn man den gespeicherten Kohlenstoff im Holz betrachtet. Der europaweite Treibstoffverbrauch bei der Holzernte (Tabelle 4) zeigt, dass in Ländern, die vermehrt teil- bis vollmechanisierte Systeme bei der Holzernte anwenden, der Verbrauch pro Festmeter ein höherer ist, als in Ländern wie Italien und Slowenien. Auch in Österreich oder in der Schweiz, wo durch das Gebirge und seine steilen Lagen eine vollmechanisierte Ernte nicht im gleichen Ausmaß, wie zum Beispiel in Finnland möglich ist, sieht man bei der Holzernte einen geringeren Verbrauch von kg Treibstoff m<sup>-3</sup>.

Tabelle 4: Treibstoffverbrauch bei der Holzernte in Europa  
(nach SCHWAIGER und ZIMMER, 2001)

	Fällen und Auf- arbeiten	Rücken	Transport	Gesamt
kg Treibstoff m <sup>-3</sup>				
Österreich	0,31	0,59	3,68	4,58
Dänemark	0,51	0,46	1,28	2,25
Finnland	0,73	0,36	2,08	3,17
Deutschland	0,40	0,58	1,42	2,40
Griechenland	0,28	0,45	5,89	6,62
Irland	0,75	0,48	1,98	3,21
Italien	0,24	0,64	0,86	1,74
Norwegen	0,60	0,47	1,41	2,48
Slowenien	0,24	0,62	0,99	1,85
Schweden	0,77	0,43	2,08	3,28
Schweiz	0,25	0,58	1,22	2,05

Der Treibhauseffekt für die Holzernte eines Kubikmeter Holzes in den jeweiligen Ländern liegt zwischen 6,3 und 21,7 kg CO<sub>2</sub> äqu. (Tabelle 5). Für die Wirkungskategorie wurde ein Zeitraum von 100 Jahren betrachtet. Andere Treibhausgase wie CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O wurden mit dem Faktor 21 und 310 multipliziert, um die Ergebnisse in CO<sub>2</sub> äquivalent ausdrücken zu können (SCHWEIGER und ZIMMER, 2001).

Tabelle 5: Treibhausgasemissionen bei der Holzernte in Europa  
(nach SCHWAIGER und ZIMMER, 2001)

	Fällung und Auf- arbeitung	Rücken	Transport	Gesamt
kg CO <sub>2</sub> äqu. m <sup>-3</sup>				
Österreich	1,04	2,50	11,81	15,35
Dänemark	1,70	1,96	4,12	7,78
Finnland	2,40	1,53	6,68	10,61
Deutschland	1,33	2,46	4,55	8,34
Griechenland	0,93	1,91	18,90	21,74
Irland	2,47	2,04	6,37	10,88
Italien	0,80	2,73	2,74	6,27
Norwegen	1,98	2,01	4,54	8,53
Slowenien	0,80	2,62	3,18	6,60
Schweden	2,54	1,84	6,67	11,05
Schweiz	0,82	2,45	3,91	7,18

### 2.3 Ökobilanzierung – Life Cycle Assessment (LCA)

Die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment – LCA) ist eine standardisierte Methode und wird verwendet um die Umweltwirkungen von Produkten und Prozessen strukturiert, transparent und nachvollziehbar zu modellieren (SONNE, 2006). Dieses Verfahren und die Bewertung von Lebenszyklen ist ein junges Verfahren und wurde zu Beginn der 90er Jahre zunehmend eingesetzt und wissenschaftlich aufbereitet. Es kam zu vermehrten Publikationen über die Methode LCA und die Informationsquelle wurde hier vor allem durch die Gründung von Organisationen wie zum Beispiel die *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) vorangetrieben (KLÖPFER und GRAHL, 2009). Laut KNECHTLE (1998) hat die „*End of Pipe Technologie*“ als Ansatz ausgedient. Sowohl der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der ökologische Einfluss stehen mit LCAs in enger Verbindung. Hier wer-

den die relevanten indirekten und direkten Energie- und Ressourcenverbräuche des Produktlebenszyklus ermittelt und die einhergehenden ökologischen Konsequenzen bewertet (PÄIVINEN, 2012).

Es werden alle relevanten Input- und Outputgrößen erfasst und die Umweltwirkung von Produkten oder Systemen auf deren Lebensweg beurteilt. Der „*Gradle to grave*“- Ansatz beginnt bei der Rohstoffgewinnung, die zur Herstellung notwendig ist und endet bei der Entsorgung beziehungsweise bei der Wiederverwendung der Materialien (DIN EN ISO 14040, 2006). Jedoch gibt es auch andere Ansätze wie „*Gradle to gate*“, „*Gradle to gradle*“ oder „*Wheel to wheel*“, die für die Bewertung verschiedener Prozesse und Güter anwendbar sind (STRAKA und LAYTON, 2010).

Vor allem ist aber bei der Erstellung einer Ökobilanz das „*Know why*“ von Bedeutung, um in Folge Vorteile generieren zu können (HUNKLER, 2016). LCAs dienen dazu Produkte weiterzuentwickeln und zu verbessern. Auch unterstützen sie die Optimierung der strategischen Planung und werden bei politischen Entscheidungen herangezogen (DIN EN ISO 14040, 2006). Der ökologische Nutzen einer Ökobilanzierung ergibt sich aus dem Terminus selbst, jedoch hilft sie auch ökonomischen Nutzen, beziehungsweise Möglichkeiten von Kostenreduktionen, zu zeigen (FRÜHWALD, 1995).

Die Ökobilanzierung ist eine anerkannte Methode um auch forstliche Prozesse und deren Umweltwirkung bewerten zu können (SONNE, 2006; KLEIN et al., 2015). Gerade bei Vergleichen von verschiedenen Holzertesystemen wird eine Lebenszyklusbewertung vorgeschlagen. Sie stellt eine optimale Möglichkeit dar um ein fundiertes Umweltmanagement betreiben zu können (KNECHTLE, 1998). Dies kann man auch in den steigenden Zahlen der Ökobilanzstudien sehen, welche eine forstwirtschaftliche Hypothese bearbeiten, wobei hier in erster Linie vermehrt Folgeprodukte wie Möbel, Hackgut etc. untersucht werden (KLEIN et al., 2015).

## **2.4 DIN EN ISO 14040**

Um Ökobilanzierungen zu vereinheitlichen wurde eine Standardmethode nach DIN EN ISO 14040 verfasst und Schritte erarbeitet, die eine systematische Vorgehensweise ermöglichen (KNECHTLE, 1998; KLÖPFFER und

GRAHL, 2009). In den Jahren 1997–2006, hat die International Organization for Standardization, vier weitere Ökobilanznormen erarbeitet (KLÖPPFER und GRAHL, 2009; STRAKA und LAYTON, 2010).

- **DIN EN ISO 14040** Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
- **DIN EN ISO 14041** Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, sowie Sachbilanz
- **DIN EN ISO 14042** Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung
- **DIN EN ISO 14043** Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung
- **DIN EN ISO 14044** Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

Die Durchführung einer Ökobilanz ist in vier Phasen gegliedert (Abbildung 1) und verlangt eine iterative Bearbeitung, wobei die einmalige Abarbeitung aller Punkte eine Voraussetzung ist, um eine normgerechte Ökobilanz zu verfassen (DIN EN ISO 14040, 2006).

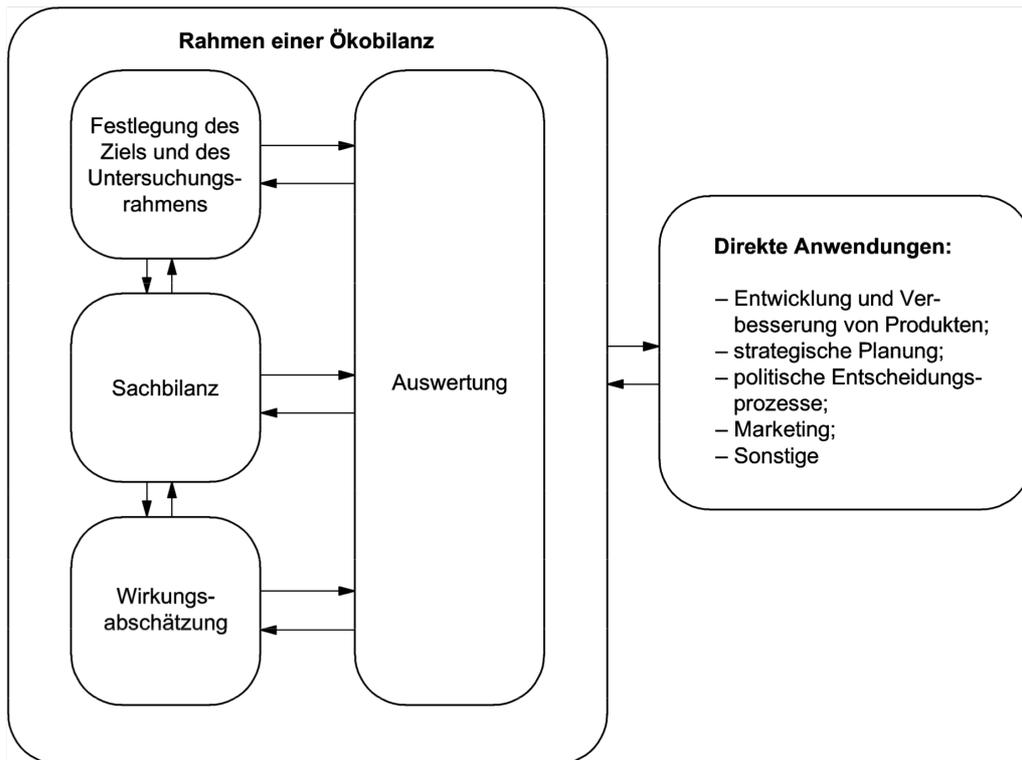


Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz

(Quelle: DIN EN ISO 14040, 2006)

Abgesehen von der Einhaltung der Phasen der Ökobilanz müssen weitere Merkmale nach DIN EN ISO 14040 (2006) eingehalten werden um der Norm zu entsprechen:

- Die Input- und Outputgrößen müssen mit sogenannten Wirkungspotentialen in Verbindung gebracht werden.
- Es werden potentielle Umweltauswirkungen beschrieben, die in die Zukunft prognostiziert werden, daher handelt es sich nicht um Absolutwerte.
- Die Detailgenauigkeit kann bei unterschiedlichen LCAs variieren – in Abhängigkeit vom Ziel.
- Der Bezug zur gewählten funktionellen Einheit muss gegeben sein, diese muss messbar sein und ein Maß für den Nutzen des Systems darstellen.

## Untersuchungsrahmen

Obwohl bei der Durchführung einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 (2006) eine iterative Vorgehensweise vorgesehen ist, bildet die Festlegung des Untersuchungsrahmens und des Zieles den ersten Schritt (KLÖPFFER und GRAHL, 2009). In Abbildung 2 sieht man ein schematisches Beispiel eines Untersuchungsrahmens mit den dazugehörigen Einheitsprozessen (Kästchen), diese beinhalten mindestens einen Input- und/oder einen Outputfluss, die durch Pfeile symbolisiert sind.

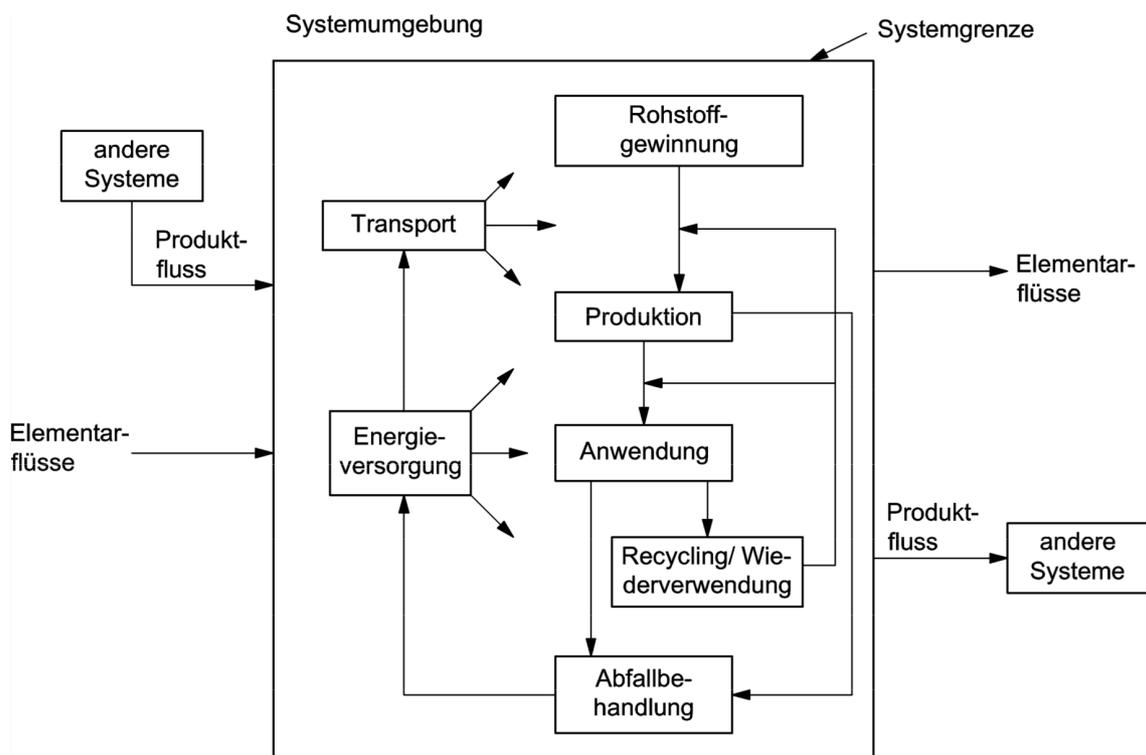


Abbildung 2: Beispiel eines Produktsystems

(Quelle: DIN EN ISO 14040, 2006)

Um das jeweilige Ziel der Ökobilanzstudie zu erreichen, bedient man sich so genannter Abschneideregeln. Dies soll das zu erwartende Ergebnis nicht beeinflussen. Die drei Abschneidekriterien für das System sind Masse, Energie und Umweltrelevanz und werden nicht berücksichtigt, wenn der Anteil von 1% am Gesamtsystem nicht erreicht wird. Dies ermöglicht für sich gewählte Teilsysteme besser beschreiben zu können. Alle Änderungen müssen beschrieben und erklärt werden. Als Beispiel wäre

hier der Umwelteinfluss der Infrastruktur zu nennen, der unberücksichtigt bleiben kann, wenn die Studie nicht gerade dieser gilt (KLÖPFFER und GRAHL, 2009).

### **Sachbilanz**

In der Sachbilanz werden alle Materialien und Energieflüsse erfasst, die zur Berechnung der LCA notwendig sind. Dazu bedient man sich primärer und sekundärer Daten und bei Bedarf auch geschätzter Werte (MIRABELL et al., 2014; DIN EN ISO 14040, 2006). Die Datenqualität kann in den einzelnen Sachbilanzen variieren und muss daher ausreichend beschrieben werden (ZIMMER und WEGENER, 1997).

Es sollen alle Flüsse im Verlauf des Lebensweges erfasst werden und beruhen im Allgemeinen auf folgenden Gesetzen (KLÖPFFER und GRAHL, 2009):

- Erhaltung der Energie
- Erhaltung der Masse
- Stöchiometrie
- Vermehrung der Entropie

Um Allokationen bei der Sachbilanz zu vermeiden, werden folgende Empfehlungen für die Aufgliederung gegeben (DIN EN ISO 14044, 2006):

- Systemerweiterung
- Allokation nach Eigenschaften
- Allokation nach physikalischen Gesetzen

### **Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) zeigt die Auswirkungen der Sachbilanz auf die Umwelt und ist als naturwissenschaftliche Komponente der Ökobilanz zu sehen. Bei der Wahl der gewählten Wirkungsabschätzung wird keine konkrete Vorschreibung getroffen

(KLÖPFFER und GRAHL, 2009). Laut DIN EN ISO 14040 (2006) beinhaltet die Wirkungsabschätzung sowohl optionale als auch verpflichtende Punkte (Abbildung 3).

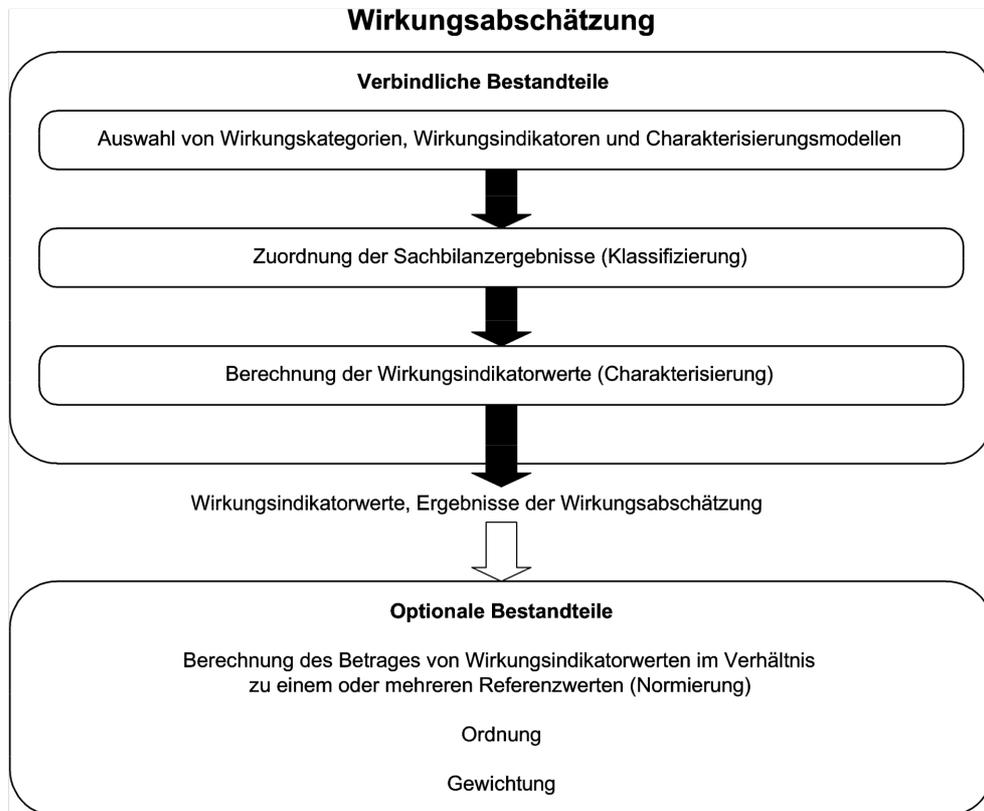


Abbildung 3: Bestandteile der Wirkungsabschätzung

(Quelle: DIN EN ISO 14040, 2006)

Die Ergebnisse werden in Midpoint- und Endpointkategorien (höhere Unsicherheit; schadensorientiert) unterteilt und in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung der Ökobilanzstudie ausgewertet (GOEDKOPP et al. 2013).

Bei der Wirkungsabschätzung ist jedoch nicht nur der quantitative Einfluss von Bedeutung, sondern auch der qualitative. Gerade bei Forstprodukten spielen die Funktionen des Waldes eine wichtige Rolle, die es nicht zu vernachlässigen gilt (ZIMMER und WEGENER, 1997).

### **Auswertung**

Als Abschluss der Ökobilanz werden in der Auswertung Schlussfolgerungen gezogen. Diese sind in der Abhängigkeit der Zielsetzung, beziehungsweise

der späteren Verwendung, der Ökobilanz zu treffen. Ergebnisse und deren Schlussfolgerungen stehen hier im Mittelpunkt, wobei eine „Überinterpretation“ aufgrund der Tatsache, da es sich hier nicht um Absolutwerte handelt, zu vermeiden gilt (KLÖPFFER und GRAHL, 2009; DIN EN ISO 14040, 2006). Arbeitsschritte, welche die Auswertung beinhalten sollen, sind in DIN EN ISO 14040 (2006) in folgende Unterpunkte gegliedert:

- Identifizierung signifikanter Parameter
- Beurteilung
- Schlussfolgerungen
- Einschränkungen
- Empfehlungen

Die Beurteilung umfasst drei verschiedene Methoden, die es anzuwenden gilt (DIN EN ISO 14040, 2006).

- Vollständigkeitsprüfung
- Konsistenzprüfung
- Sensitivitätsprüfung

Bei der Vollständigkeitsprüfung werden die Parameter und alle einhergehenden Daten geprüft. Wenn hier Lücken bestehen, wird die Empfehlung gegeben, durch iterative Verfahren die Sachbilanz, beziehungsweise die Wirkungsabschätzung anzupassen und zu modifizieren. Unter Konsistenzprüfung versteht man die Kontrolle, ob Daten, Methoden und weitere Annahmen sich im Untersuchungsrahmen, beziehungsweise mit der Zielformulierung übereinstimmen. Die Sensitivitätsprüfung zeigt, wie gegebene Punkte auf das Ergebnis wirken. Vor allem, wenn mehrere Allokationsverfahren möglich sind, ist eine Sensitivitätsprüfung anzuwenden (KLÖPFFER und GRAHL, 2009).

## **3 Material und Methoden**

### **3.1 Untersuchungsrahmen**

#### **3.1.1 Systemgrenze und funktionelle Einheit**

Die Systemgrenze beinhaltet die Holzernte (vom Fällen des Baumes bis zum Rücken an die Forststraße), die Produktion und Überstellung der Maschinen sowie die Produktion und Bereitstellung von Treibstoffen und Schmiermitteln (Abbildung 4). Einerseits werden Systeme untersucht, welche die Rückung im Sortimentsverfahren durchführen (Fällen – Aufarbeiten – Rücken), andererseits wird eine Rückung im Baumverfahren (Fällen – Rücken – Aufarbeiten) und deren Umweltwirkung berechnet.

Es wird unterstellt, dass der Einsatz der Holzerntesysteme aus technischer Sicht, das heißt aufgrund der Erschließung, Topographie etc. möglich ist. Die Bodenverwundung und die einhergehende Bodenverdichtung, die den Wasserhaushalt verändern und einen erhöhten Oberflächenabfluss erzeugen kann, ist nicht Teil dieser Studie. Auch ökologische Auswirkungen, wie Nährstoffausträge, werden nicht berücksichtigt.

Als funktionelle Einheit wird ein Kubikmeter Holz frei Forststraße gewählt. Die Umweltauswirkungen während der Maschinenproduktion werden auf Basis der angenommenen Lebensdauer auf die „Funktionelle Einheit“ umgerechnet. Die Überstellung der Maschine wird maschinenspezifisch pro  $PMH_{15}$  bezogen. Die Maschinenentsorgung, beziehungsweise das Recycling, wird in dieser Arbeit nicht kalkuliert.

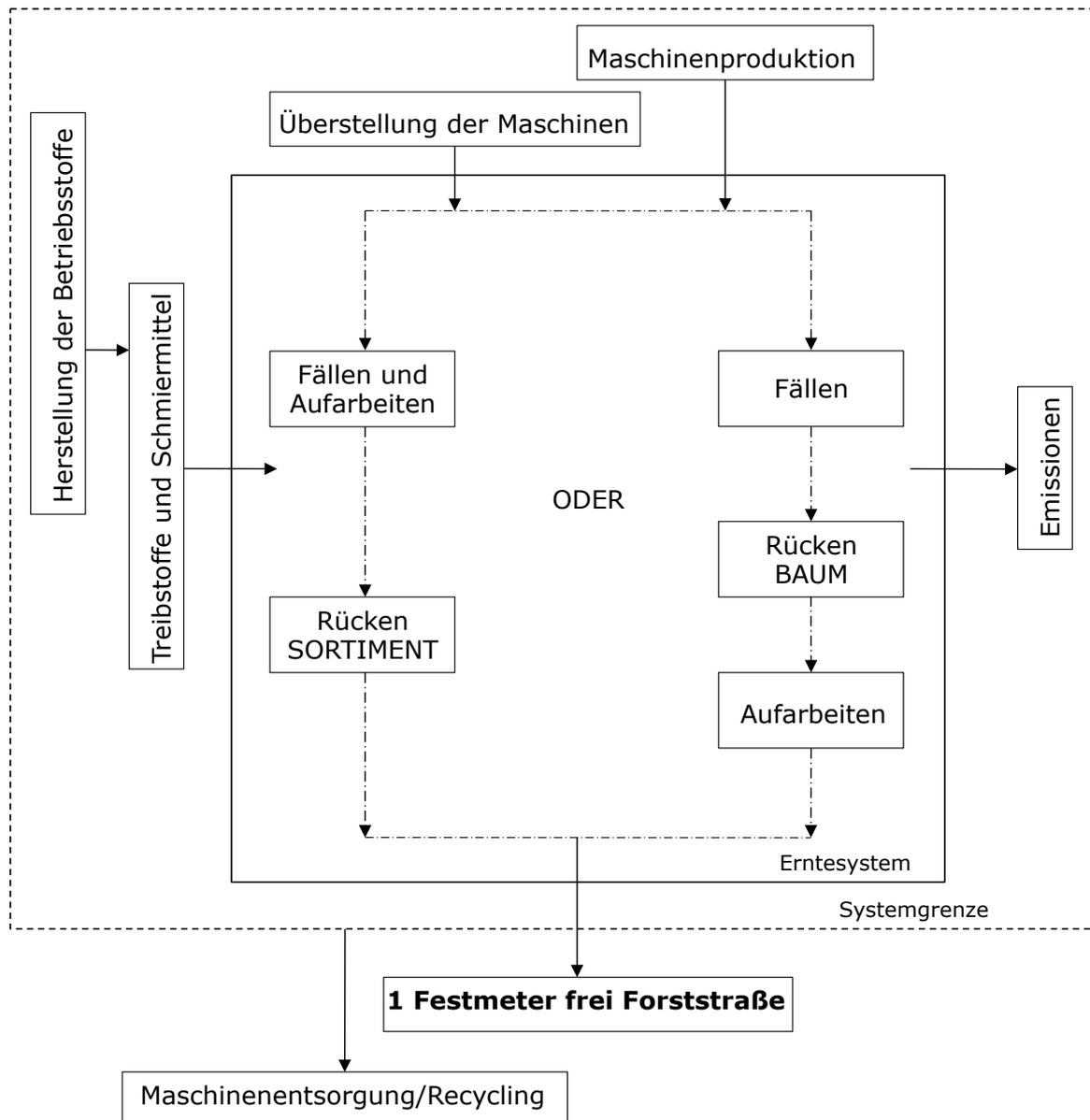


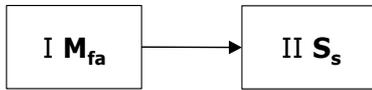
Abbildung 4: Systemgrenze der Ökobilanzierung – Holzernte in Steillagen

### 3.1.2 Holzerntesysteme

Es werden fünf häufige Holzerntesysteme (Abbildung 5) ausgewählt um die Holzernte im Gebirge darzustellen. Die Systeme werden in verschiedene Prozesse (I–VI), wie Fällen, Aufarbeiten und Rücken unterteilt (Kapitel 3.3.1–3.3.6).

### Holzerntesystem 1:

Fällen und Aufarbeiten mit **MOTORSÄGE** – Rücken mit **SEILGERÄT**  
im Sortimentsverfahren



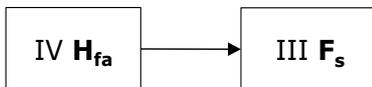
### Holzerntesystem 2:

Fällen und Aufarbeiten mit **MOTORSÄGE** – Rücken mit **SEILFORWARDER**  
im Sortimentsverfahren



### Holzerntesystem 3:

Fällen und Aufarbeiten mit **SEILHARVESTER** – Rücken mit **SEILFORWARDER**  
im Sortimentsverfahren



### Holzerntesystem 4:

Fällen und Aufarbeiten mit **SEILHARVESTER** – Rücken mit **SEILGERÄT**  
im Sortimentsverfahren



### Holzerntesystem 5:

Fällen mit **MOTORSÄGE** – Rücken mit **SEILGERÄT** im Baumverfahren – Aufarbeiten mit integriertem **PROZESSOR**



Abbildung 5: Holzerntesysteme in Steillagen

### 3.2 Softwarepaket und Datenimplementierung

Die vorliegende Ökobilanzierung wurde mit der open-source-software openLCA (Version 1.7) von der GreenDelta GmbH bearbeitet. OpenLCA ermöglicht eine komplette Modellierung von Life Cycle Assessments.

LCAs sind datenintensive Studien und benötigen detaillierte Werte um der internationalen Norm zu entsprechen. Ecoinvent bietet eine gute Grundlage, um Energie- und Materialbilanzen für Life Cycle Inventories zu erstellen (KNECHTLE, 1998; WERNET et al., 2016).

Bei der Modellierung der folgenden Prozesse wurden die Datensätze aus Ecoinvent Version 3.4 auf die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse angepasst. Hierzu wurden Primärdaten aus Studien in die Datenbanken implementiert. Des Weiteren wurden Prozesse mit Produktivitäts- und/oder Treibstoffverbrauchsmodellen versehen, um den Treibstoff- und Schmiermittelverbrauch korrekt kalkulieren zu können und die Systeme auf Parameter wie Rückedistanz, Neigung und Baumvolumen testen zu können.

Da je nach untersuchtem Prozess und verwendetem Modell verschiedene Maßeinheiten für Volumen (Baumvolumen, Stückvolumen) benötigt werden, wird die Formel zur Berechnung des Verhältnisses von Baum- zu Stückvolumen (Formel 2) benötigt (STAMPFER und LIMBECK-LILIENAU, 2003).

Formel 2: Verhältnis Baum- zu Stückvolumen

$$stkvol (m^3) = 0,008 + 0,1987 * baumvol^{0,7}$$

*stkvol* = Stückvolumen; *baumvol* = Baumvolumen ( $m^3$ ); Standardfehler = 0,03806 ( $m^3$ );  $R^2 = 0,761$

Der BHD wird in den Kalkulationen in Abhängigkeit zum Baum-/Stückvolumen angenommen. Dazu werden die Volumina Sortentafeln gegenübergestellt und passende Durchmesser ausgewählt.

Um die Holzurückung in steilen Lagen modellieren zu können, wird eine Seilwinde bei der Produktion von Harvester (Kapitel 3.3.4) und Forwarder (Kapitel 3.3.3) zusätzlich einbezogen. Diese Extrapolation der Maschinen wird rein massenmäßig kalkuliert (Seilunterstützung = zusätzliches Gewicht).

### 3.3 Sachbilanz

#### 3.3.1 Prozess I: Fällen und Aufarbeiten mit MOTORSÄGE

Für den Prozess I bietet die Datenbank Ecoinvent 3.4 die Daten einer durchschnittlichen Motorsäge ohne Katalysator von sieben Kilogramm, mit einer Leistung von 3,1–3,2 kW (Tabelle 6). Die Lebensdauer wird mit 2.500 Stunden angenommen, was ein relativ hoher Wert ist und eine gründliche Instandhaltung und Wartung der Motorsäge voraussetzt. Das Schwert der Motorsäge wird laut Datensätzen alle 200 Betriebsstunden getauscht, die Kette alle 65 h.

Tabelle 6: Prozessdaten I – Fällen und Aufarbeiten mit MOTORSÄGE

I M <sub>fa</sub>	Maschine	Modell	Ecoinvent	Motorsäge ohne Katalysator
		Gewicht (kg)	Ecoinvent	7
		Leistung (kW)	Ecoinvent	3,2
	Treibstoff	Art	Ecoinvent	Zweitaktergemisch
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Schweinle und Thoro (2001)	1,5
		Treibstoffverbrauchsmodell	-	-
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Kettenöl
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Schweinle und Thoro (2001)	0,3
	Leistung	Produktivitätsmodell	Stampfer und Limbeck (2003)	Formel 3

Es wird in der Datenbank ein Treibstoffverbrauch von 1,6 kg h<sup>-1</sup> (Gemisch = 0,75 kg l<sup>-1</sup>) und ein Ölverbrauch von 0,54 kg h<sup>-1</sup> (Kettenöl = 0,92 kg l<sup>-1</sup>)

angegeben, der in den Modellen jedoch angepasst wird, um mit praxisbezogenen Primärdaten, eine bestmögliche Ergebnisqualität zu erzielen (WERNER, 2013a; KELLENBERGER, 2010). Hierzu wurde der Massenunterschied der Betriebsstoffe pro Stunde kalkuliert und bei den entstehenden Emissionen berücksichtigt (Tabelle 7). Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch basiert auf einer Studie von SCHWEINLE und THORE (2001) und unterstellt, für die Abläufe Fällen, Entasten und Trennschnitte  $1,13 \text{ kg h}^{-1}$  Gemisch. Der Schmiermittelverbrauch wird mit  $0,28 \text{ kg h}^{-1}$  angenommen. Die Verbräuche liegen somit 30 bzw. 49% unter denen aus Ecoinvent.

Tabelle 7: Prozess I – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Motorsäge	6,31E-05	Stück
Treibstoff	1,77E-01	kg
Kettenöl	4,34E-02	kg
<b>OUTPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Acetaldehyd	7,61E-05	kg
Aceton	1,74E-05	kg
Acrolein	4,89E-06	kg
Benzaldehyd	5,11E-05	kg
Benzo(a)pyren	2,64E-08	kg
Kohlenstoffdioxid	2,38E-01	kg
Kohlenstoffmonoxid	1,09E-01	kg
Distickstoffmonoxid	9,58E-06	kg
Formaldehyd	3,89E-03	kg
Methan	4,58E-03	kg
Stickoxide	9,53E-04	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	3,30E-02	kg
Öle	4,34E-03	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	6,59E-06	kg
Pentan	3,79E-03	kg
Propanal	1,37E-05	kg
Schwefeldioxid	3,55E-06	kg
Toluol	3,68E-03	kg
<b>FM-Motorsäge ausgeformt</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Baumvolumen	0,87	m <sup>3</sup>
Hangneigung	40	%

Das verwendete Produktivitätsmodell stammt von STAMPFER und LIMBECK-LILIENAU (2003). Dieses Modell beinhaltet die Fällung und Aufarbei-

tung des Baumes (bei Neigungen zwischen 36–83%), das Beastungsprozent wird mit 60% angenommen und bei den verschiedenen Szenarien (Kapitel 4.2.4.1–4.2.4.4) als Konstante betrachtet (Formel 3). Die Produktivitäten liegen bei Brusthöhendurchmessern von 20 bis 40 cm, bei diesem Modell zwischen drei und neun Festmeter pro PMH<sub>15</sub> (neig = 40%).

Formel 3: Produktivitätsmodell Prozess I M<sub>fa</sub>

$$prod_{MS} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{k * (-3,3010 + 3,9409 * baumvol^{-0,9} + 0,0621 * beast + 0,1160 * neig + 1,7321 * VERF)}$$

*baumvol* = Baumvolumen (m<sup>3</sup>); *beast* = Beastungsprozent (%); *neig* = Geländeneigung (%); *VERF* = (0) Halbstammverfahren und (1) Sortimentungsverfahren; *k* = 1,25

### 3.3.2 Prozess II: Rücken mit SEILGERÄT im Sortimentungsverfahren

Für das Rücken mit Seilgerät im Sortimentungsverfahren wird ein Seilgerät (Tabelle 8) mit 175 kW ausgewählt. Das Gesamtgewicht beträgt 13.500 kg, wovon 2.608 kg Seile sind. Die Masthöhe beträgt ungefähr 12 m. Die Lebenserwartung wird mit 20.000 PMH<sub>15</sub> angenommen. Das Modell berücksichtigt im Schnitt eine tägliche Überstellung der Maschine von 6,2 km (WERNER, 2013b).

Tabelle 8: Prozessdaten II – Rücken mit SEILGERÄT im Sortimentungsverfahren

II S <sub>s</sub>	Maschine	Modell	Ecoinvent	Seilgerät auf Hänger
		Gewicht (kg)	Ecoinvent	13.500
		Leistung (kW)	Ecoinvent	175
	Treibstoff	Art	Engel (2016)	Diesel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Engel (2016)	16,38
		Treibstoffverbrauchsmodell	-	-
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Schmiermittel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Ecoinvent	0,078
	Leistung	Produktivitätsmodell	Stampfer und Limbeck (2003)	Formel 4

Der Verbrauch von Treibstoff (Diesel = 0,84 kg l<sup>-1</sup>) aus der Ecoinvent Datenbank (14,7 kg h<sup>-1</sup>) stimmt weitestgehend mit den Primärdaten von ENGEL (2016) in der Höhe von 13,8 kg h<sup>-1</sup> überein. Daher werden die

Emissionen in den einzelnen Modellen nur geringfügig um 6,3% erniedrigt (Tabelle 9). Diese Annahme wurde getroffen, da es sich um ein schweres Anbau-Seilgerät handelt. Es werden durchaus auch Verbräuche (bei kleineren Seilgeräten) von 4–9 kg h<sup>-1</sup> in der Literatur beschrieben. Wobei in den meisten Fällen, keine Auskunft über die Datenqualität gegeben wird.

Tabelle 9: Prozess II – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Seilgerät	8,22E-06	Stück
Diesel	1,92	kg
Schmiermittel	1,23E-02	kg
Überstellung	1,30	t*km
Altöl	-1,37E-02	kg
FM-M <sub>fa</sub> oder FM-H <sub>fa</sub>	1	m <sup>3</sup>
<b>OUTPUT</b>		
<b>OUTPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Ammoniak	3,84E-05	kg
Benzo(a)pyren	5,77E-08	kg
Cadmium	1,92E-08	kg
Kohlenstoffdioxid	6,00	kg
Kohlenstoffmonoxid	2,14E-02	kg
Kupfer	3,27E-06	kg
Distickstoffmonoxide	2,30E-04	kg
Dioxin	1,15E-13	kg
Methan	6,63E-05	kg
Nickel	1,35E-07	kg
Stickoxide	2,20E-02	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	2,69E-03	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	6,46E-06	kg
Partikel < 2,5 µm	8,11E-04	kg
Partikel > 10 µm	5,40E-05	kg
Partikel > 2,5 µm, und < 10 µm	3,60E-05	kg
Selen	1,92E-08	kg
Zink	1,92E-06	kg
<b>FM-Seilgerät gerückt</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Stückvolumen	0,19	m <sup>3</sup>
Hangneigung	40%	
Rückedistanz	120	m

Die Produktivitäten liegen bei dem verwendeten Modell (Formel 4) von STAMPFER und LIMBECK-LILIENAU (2003) zwischen 3,9 (BHD 20 cm) und 10 (BHD 40 cm) Festmeter pro PMH<sub>15</sub> (neig = 40%; RD = 120m).

Formel 4: Produktivitätsmodell Prozess II S<sub>s</sub>

$$prod_{SEIL} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{k * (-0,7458 + 0,0122 * distanz + 0,7782 * stkvoll^{-1,05} + 0,0377 * neig)}$$

*stkvoll* = Stückvolumen (m<sup>3</sup>); *distanz* = Rückedistanz (m); *neig* = Geländeneigung (%);  
*k* = 1,25

### 3.3.3 Prozess III: Rücken mit SEILFORWARDER im Sortimentsverfahren

Der Datensatz für Forwarder (Ecoinvent 3.4) wird auf einen seilgestützten Forwarder (Tabelle 10) angepasst. Hierzu wurde ein Massenunterschied von 36% ermittelt und für den Herstellungsprozess des Seilforwarders extrapoliert. Der neu modellierte Seilforwarder entspricht einem John Deere 1110E mit einem Gesamtgewicht von 17.300 kg und 136 kW (HOLZFEIND, 2017).

Tabelle 10: Prozessdaten III – Rücken mit SEILFORWARDER im Sortimentsverfahren

III F <sub>s</sub>	Maschine	Modell	Holzfeind (2017)	John Deere 1110E
		Gewicht (kg)	Holzfeind (2017)	17.300
		Leistung (kW)	Holzfeind (2017)	136
	Treibstoff	Art	Holzfeind (2017)	Diesel
		Treibstoffverbrauchsmodell	Gruber (2018)	Formel 6
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Schmiermittel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Ecoinvent	0,31
	Leistung	Produktivitätsmodell	Holzfeind (2017)	Formel 5

Die Lebensdauer aus Ecoinvent wird mit 17.600 PMH<sub>15</sub> beibehalten. Auch die angenommene Überstellung der Maschine mittels Tieflader von durchschnittlich 25 km pro Tag, geht in die Kalkulation mit ein (WERNER, 2013c).

Bei dem Produktivitätsmodell (Formel 5) für den seilgestützten Forwarder (HOLZFEIND, 2017), werden alle Szenarien (Kapitel 4.1–4.2) im Sortimentsverfahren berechnet. Das Fuhrvolumen wird konstant mit 9,25

Festmeter festgelegt. Bei einem BHD von 20–40 cm (neig = 40%, RD = 120 m) liegt die Produktivität zwischen 13 und 16,5 Festmeter pro PMH<sub>15</sub>.

Formel 5: Produktivitätsmodell III F<sub>s</sub>

$$prod_{Forwarder} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{(k * (effiz_{laden} + effiz_{fahren} + effiz_{entladen})}$$

$$effiz_{laden} (min m^{-3}) = 0,706 * StV^{-0,3} + 0,012 * LD$$

$$effiz_{fahren} (min m^{-3}) = \frac{0,050 * RD + 0,037 * NRD}{FV}$$

$$effiz_{entladen} (min m^{-3}) = 0,411 * StV^{-0,3}$$

*StV* = Stückvolumen (m<sup>3</sup>); *RD* = Rückedistanz (m); *NRD* = Neigung der Rückedistanz (%); *LD* = Ladedistanz (m); *k* = 1,3; *FV* = Fuhrevolumen (m<sup>3</sup>)

Für den Treibstoffverbrauch wird ein Modell (Formel 6) von GRUBER (2018) für einen Seilforwarder eingesetzt (bei einem Stückvolumen von 0,189 m<sup>3</sup> = 0,98 l m<sup>-3</sup>; Tabelle 11).

Formel 6: Treibstoffverbrauchsmodell Prozess III F<sub>s</sub>

$$Dieselverbrauch (l m^{-3}) = 0,0005475309 * Stückvolumen^{-3,0} + 0,8977711104$$

Tabelle 11: Prozess III – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Seilforwarder	5,14E-06	Stück
Diesel	8,23E-01	kg
Schmiermittel	2,35E-02	kg
Überstellung	2,29	t*km
Altöl	-2,61E-02	kg
FM-M <sub>fa</sub> oder FM-H <sub>fa</sub>	1	m <sup>3</sup>
<b>OUTPUT</b>		
	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Ammoniak	1,64E-05	kg
Benzo(a)pyren	2,47E-08	kg
Cadmium	8,24E-09	kg
Kohlenstoffdioxid	2,6	kg
Kohlenstoffmonoxid	9,16E-03	kg
Kupfer	1,40E-06	kg
Distickstoffmonoxide	9,86E-05	kg
Dioxin	4,93E-14	kg
Methan	4,06E-05	kg
Nickel	5,78E-08	kg
Stickoxide	1,67E-02	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	1,65E-03	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	2,76E-06	kg
Partikel < 2,5 µm	7,16E-04	kg
Partikel > 10 µm	4,77E-05	kg
Partikel > 2,5 µm, und < 10 µm	3,18E-05	kg
Selen	8,24E-09	kg
Zink	8,24E-07	kg
<b>FM-Seilforwarder gerückt</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Stückvolumen 0,19 m <sup>3</sup>		
Hangneigung 40%		
Rückedistanz 120 m		

### 3.3.4 Prozess IV: Fällen und Aufarbeiten mit SEILHARVESTER

Der Harvester-Datensatz aus Ecoinvent 3.4 wurde wie der Seilforwarder angepasst, um auch eine Fällung und Aufarbeitung in Steillagen darstellen zu können. Der verwendete seilgestützte Harvester (Tabelle 12) entspricht einem John Deere 1170E mit einem Gesamtgewicht von 17.030 kg und einer Leistung von 145 kW (BRANDTNER, 2018). Der Massenunterschied des modellierten Harvesters ergibt eine Extrapolation von 18% für die seilgestützte Maschine.

Tabelle 12: Prozessdaten IV – Fällen und Aufarbeiten mit SEILHARVESTER

IV H <sub>fa</sub>	Maschine	Modell	Brandtner (2018)	John Deere 1170E
		Gewicht (kg)	Brandtner (2018)	17.030
		Leistung (kW)	Brandtner (2018)	145
	Treibstoff	Art	Ecoinvent	Diesel
		Treibstoffverbrauchsmodell	Plessl (2013)	Formel 8
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Schmiermittel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Ecoinvent	0,45
	Leistung	Produktivitätsmodell	Brandtner (2018)	Formel 7

Die Überstellung des Harvesters wird mit 25 km pro Tag und die Lebensdauer wird mit 17.600 PMH<sub>15</sub> vorgegeben (WERNER, 2013d).

Die Produktivität des Seilharvester für das Fällen und Aufarbeiten (Formel 7) wird mit dem Modell von BRANDTNER (2018) berechnet (13,1 (BHD 20 cm)–49,9 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> (BHD 40 cm)).

Formel 7: Produktivitätsmodell Prozess IV H<sub>fa</sub>

$$prod_{Harvester} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{k * 1,386 * Baumvol^{-0,688}}$$

Baumvolumen = m<sup>3</sup>; k = 1,35

Als Treibstoffmodell (Formel 8) werden hier die Berechnungen von PLESSL (2013) herangezogen und zeigt den Verbrauch in Abhängigkeit der Neigung für einen Harvester ohne Seilunterstützung. Obwohl dieses Modell ein geringes Bestimmtheitsmaß aufweist und nur 11% der Variabilität des Kraftstoffes erklärt werden können, findet dieses Modell Anwendung in der Ökobilanzierung, um den Parameter der Hangneigung mit einbeziehen zu können (Tabelle 13). Ermittelt man den Verbrauch bei einer Hangneigung von 55% ergibt es einen Verbrauch von 19,5 l h<sup>-1</sup> und stimmt weitestgehend mit anderen Seilharvesterverbräuchen überein (PLESSL, 2013; BRANDTNER, 2018).

Formel 8: Treibstoffverbrauchsmodell Prozess IV  $H_{fa}$

$$\text{Verbrauch (l h}^{-1}\text{)} = 14,725 + 0,086 * \text{Neig}$$

Neig = Neigung (%)

Tabelle 13: Prozess IV – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Seilharvester	2,293E-06	Stück
Diesel	0,5228596	kg
Schmiermittel	0,0175637	kg
Überstellung	1,50	t*km
Altöl	-1,95E-02	kg
Kettenöl	0,0121119	kg
<b>OUTPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Ammoniak	1,045E-05	kg
Benzo(a)pyren	1,569E-08	kg
Cadmium	5,237E-09	kg
Kohlenstoffdioxid	1,63	kg
Kohlenstoffmonoxid	0,0058184	kg
Kupfer	8,884E-07	kg
Distickstoffmonoxide	6,266E-05	kg
Dioxin	3,133E-14	kg
Methan	2,013E-05	kg
Nickel	3,67E-08	kg
Stickoxide	0,0082669	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	0,0008182	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	1,757E-06	kg
Partikel < 2,5 µm	0,0003556	kg
Partikel > 10 µm	2,368E-05	kg
Partikel > 2,5 µm, und < 10 µm	1,58E-05	kg
Selen	5,237E-09	kg
Zink	5,237E-07	kg
Öle	0,0012112	kg
<b>FM-Seilharvester ausgeformt</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Baumvolumen 0,87 m <sup>3</sup>		
Hangneigung 40%		

### 3.3.5 Prozess V: Fällern mit MOTORSÄGE

Für die motormanuelle Fällung werden die meisten Daten vom Prozess I (Kapitel 3.3.1) beibehalten und lediglich das Produktivitätsmodell ange-

passt (Tabelle 14). Hier wird das Modell von ALBRECHT (2018) verwendet, in dem jedoch kein Umrechnungsfaktor von  $PMH_0$  auf  $PMH_{15}$  für den Teilprozess Fällen angegeben ist. In diesem Fall wurde derselbe Faktor, wie für das Gesamtmodell Fällen und Aufarbeiten, von ALBRECHT (2018),  $k = 1,36$  eingesetzt ( $8,2$  (BHD 20 cm) –  $16,4$   $m^3 h^{-1}$  (BHD 40 cm)).

Tabelle 14: Prozessdaten V – Fällen mit MOTORSÄGE

V M <sub>f</sub>	Maschine	Modell	Ecoinvent	Motorsäge ohne Katalysator
		Gewicht (kg)	Ecoinvent	7
		Leistung (kW)	Ecoinvent	3,2
	Treibstoff	Art	Ecoinvent	Zweitaktergemisch
		Verbrauch ( $l h^{-1}$ )	Schweinle und Thoro (2001)	1,5
		Treibstoffverbrauchsmodell	-	-
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Kettenöl
		Verbrauch ( $l h^{-1}$ )	Schweinle und Thoro (2001)	0,3
	Leistung	Produktivitätsmodell	Albrecht (2018)	Formel 9

Formel 9: Produktivitätsmodell Prozess V M<sub>f</sub>

$$prod_{MS-Fällen} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{\left(\frac{0,0067 * BHD^{1,8}}{bvol}\right) * k}$$

$BHD =$  Brusthöhdurchmesser (cm);  $bvol =$  Baumvolumen ( $m^3$ );  $k = 1,36$

(Quelle: nach ALBRECHT, 2018)

Da in diesem Prozess keine Aufarbeitung des Holzes wie im Prozess I berücksichtigt wird, verringern sich die Input- und Outputflüsse pro Festmeter (Tabelle 15).

Tabelle 15: Prozess V – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Motorsäge	3,18E-05	Stück
Treibstoff	8,93E-02	kg
Kettenöl	2,19E-02	kg
<b>OUTPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Acetaldehyd	3,835E-05	kg
Aceton	8,764E-06	kg
Acrolein	2,462E-06	kg
Benzaldehyd	2,573E-05	kg
Benzo(a)pyren	1,329E-08	kg
Kohlenstoffdioxid	0,1198527	kg
Kohlenstoffmonoxid	0,0547426	kg
Distickstoffmonoxid	4,823E-06	kg
Formaldehyd	0,0019593	kg
Methan	0,0023054	kg
Stickoxide	0,0004801	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	0,0166346	kg
Öle	0,0021864	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	3,321E-06	kg
Pentan	0,0019091	kg
Propanal	6,922E-06	kg
Schwefeldioxid	1,786E-06	kg
Toluol	0,0018533	kg
<b>FM-Motorsäge gefällt</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Baumvolumen 0,87 m <sup>3</sup>		
BHD 30 cm		

### 3.3.6 Prozess VI: Rücken mit SEILGERÄT und Aufarbeiten mit integriertem Prozessor

Für diesen Prozess stellt Ecoinvent 3.4 ein Seilgerät, montiert auf einem LKW mit integriertem Prozessor (Tabelle 16), für die Rückung und Aufarbeitung zur Verfügung. Das Gesamtgewicht liegt bei 31.000 kg, wobei 2.005 kg die Seile betragen. Das Seilgerät hat eine Leistung von 353 kW und eine Masthöhe von 10,5 m. Die Lebensdauer für die Maschine wird mit 20.000 PMH<sub>15</sub> angenommen. Die Überstellung wird mit 6,2 km pro Tag angenommen.

Tabelle 16: Prozessdaten VI – Rücken mit SEILGERÄT und Aufarbeiten mit integriertem Prozessor

VI S <sub>b</sub> P <sub>a</sub>	Maschine	Modell	Ecoinvent	Seilgerät auf LKW und Prozessor
		Gewicht (kg)	Ecoinvent	31.000
		Leistung (kW)	Ecoinvent	353
	Treibstoff	Art	Ecoinvent	Diesel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	ÖBf (2017)	18,0
		Treibstoffverbrauchsmodell	-	-
	Schmiermittel	Art	Ecoinvent	Schmiermittel
		Verbrauch (l h <sup>-1</sup> )	Ecoinvent	0,078
	Leistung	Produktivitätsmodell	Stampfer et al. (2003)	Formel 10

Dieser Datensatz unterstellt einen Treibstoffverbrauch der Maschine von 35,3 l h<sup>-1</sup> (WERNER, 2013e). Aufgrund einer Datenerhebung der Österreichischen Bundesforste von 2016–2017, in der Treibstoffverbräuche bei der Rückung von Seilgeräten und anschließender Aufarbeitung mit Prozessoren erhoben wurden, wird der Verbrauch auf 17,95 l h<sup>-1</sup> angepasst. Dies verringert auch die Emissionen (Tabelle 17) durch die Verbrennung des Diesels um 49,2% (ÖBF, 2017). Zusätzlich wurde bei diesem Prozess der Verbrauch von 0,35 kg h<sup>-1</sup> Kettenöl, der auch bei Prozess IV (Kapitel 3.3.4) verwendet wird, hinzugefügt. Dieser Input wurde bei dem Original-Datensatz von Ecoinvent nicht berücksichtigt.

Tabelle 17: Prozess VI – Input- und Outputliste

<b>INPUT</b>	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Seilgerät und Prozessor	5,20E-06	Stück
Diesel	1,33	kg
Schmiermittel	7,80E-03	kg
Überstellung	8,23E-01	t*km
Altöl	-8,67E-03	kg
Kettenöl	3,13E-02	kg
FM-M <sub>f</sub>	1	m <sup>3</sup>
<b>OUTPUT</b>		
	<b>m<sup>-3</sup></b>	<b>Einheit</b>
Ammoniak	2,67E-05	kg
Benzo(a)pyren	4,00E-08	kg
Cadmium	1,34E-08	kg
Kohlenstoffdioxid	4,2	kg
Kohlenstoffmonoxid	1,48E-02	kg
Kupfer	2,27E-06	kg
Distickstoffmonoxide	1,60E-04	kg
Dioxin	7,99E-14	kg
Methan	6,57E-05	kg
Nickel	9,36E-08	kg
Stickoxide	2,18E-02	kg
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan	2,67E-03	kg
Öle	3,13E-03	kg
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	4,48E-06	kg
Partikel < 2,5 µm	8,04E-04	kg
Partikel > 10 µm	5,35E-05	kg
Partikel > 2,5 µm, und < 10 µm	3,57E-05	kg
Selen	1,34E-08	kg
Zink	1,34E-06	kg
<b>FM-Seilgerät gerückt und aufgearbeitet</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>INPUT Parameter</b>		
Baumvolumen	0,87 m <sup>3</sup>	
Hangneigung	40%	
Rückedistanz	120 m	

Das verwendete Produktivitätsmodell (Formel 10) von STAMPFER et al. (2003) zeigt ein Gesamtmodell einer geschlossenen Arbeitskette. Hier wird der Baum motormanuell gefällt, im Baumverfahren mit Seilgerät gerückt und anschließend mit einem Prozessor aufgearbeitet. Die Produktivitäten liegen zwischen 6 (BHD 20 cm) und 15,4 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> (BHD 40 cm), bei einer Hangneigung von 40% und einer Rückedistanz von 120 m.

Formel 10: Produktivitätsmodell Prozess VI S<sub>b</sub>P<sub>a</sub>

$$prod_{SEIL} (m^3 PMH_{15}^{-1}) = \frac{60}{k * (-0,7458 + 0,0122 * distanz + 0,7782 * stkvoll^{-1,05} + 0,0377 * neig)}$$

$k = 0,8$ ;  $PSH_{15}$  = Produktive Systemstunden mit Unterbrechungen bis zu 15min;  
 $baumvol = m^3$ ;  $dist$  = Rückedistanz (m);  $neig$  = Hangneigung (%)

### 3.4 Wirkungskategorien

In dieser Arbeit wird das Methodenpaket ReCiPe2016 Midpoint (H) verwendet und ist nach Aussage von Mark HUIJBREGTS (Radboud Univerität Nijmegen, Niederlande) bei der SETAC Konferenz 2018 in Wien: „...eine Methode, die State of the Art, für Mid- und Endpoint Wirkungsabschätzungen verwendet werden kann“.

Das Klimaerwärmungspotential (GWP100) stellt die wichtigste Wirkungskategorie für forstliche Prozesse dar und wird zur Vergleichbarkeit der Holzerntesysteme, in den meisten modellierten Ernteeinsätzen, herangezogen. Bei der Berechnung des GWP100, wird ein Zeitraum von 100 Jahren berücksichtigt (KLEIN et al., 2015). Für die Sensitivitätsanalyse (Kapitel 4.2) werden zusätzlich folgende Wirkungskategorien für die Bewertung ausgewählt:

- Abbau fossiler Brennstoffe (kg Öl äqu.)
- Humantoxizität (kg 1,4-DCB äqu.)
- Metallabbau (kg Fe äqu.)
- Feinstaubbelastung (kg PM10 äqu.)
- Photochemische Oxidation (kg NMVOC)
- Terrestrische Versauerung (kg SO<sub>2</sub> äqu.)
- Terrestrische Ökotoxizität (kg 1,4-DCB äqu.)

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Wirkungsabschätzung

#### 4.1.1 Klimaerwärmungspotential der Holzerntesysteme

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Prozessbeiträge (Fällen; Fällen und Aufarbeiten; Rücken; Rücken und Aufarbeiten) der Holzerntesysteme im Hinblick auf das dabei entstehende Klimaerwärmungspotential untersucht (Abbildung 6).

Für diesen Vergleich wurde ein beispielhafter Ernteeinsatz für einen Bestand, mit einem durchschnittlichen BHD von 30 cm, einer Rückedistanz von 120 m und einer Hangneigung von 40% gewählt. Diese Hangneigung, stellt den Übergangsbereich dar, in dem vermehrt seilgestützte Maschinen zum Einsatz kommen. Das Baumvolumen von 0,872 m<sup>3</sup> spiegelt Bestände wieder, die für Zweitdurchforstungen typisch sind. Die mittlere Rückedistanz von 120 m stellt in Österreich eine geläufige Länge für alle untersuchten Holzerntesysteme dar, wobei bei Seilgeräten durchaus höhere üblich sind.

Wenn man sich die Prozessbeiträge der einzelnen Holzerntesysteme ansieht, fällt der größte Anteil des GWP(100) bei der Rückung an. Die Holzrückung mit Seilgerät im Sortimentsverfahren ist mit 8,02 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> derjenige Prozess, der am meisten Treibhausgase ausstößt. Die Rückung im Sortimentsverfahren mit Seilforwardern emittiert mit 3,94 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> am wenigsten.

Die Fällung und Aufarbeitung mit Seilharvestern ist mit 2,58 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>, das 3,7-fache GWP(100) der motormanuellen Fällung und Aufarbeitung in **Holzerntesystem 1** und **Holzerntesystem 2**. Das GWP(100) der Fällung im **Holzerntesystem 5** ist um 50% geringer als die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung. Daher wird beim Entasten und Ausformen in Sortimente nochmals das gleiche CO<sub>2</sub> äqu. emittiert, welches auch bei der Fällung ausgestoßen wird.

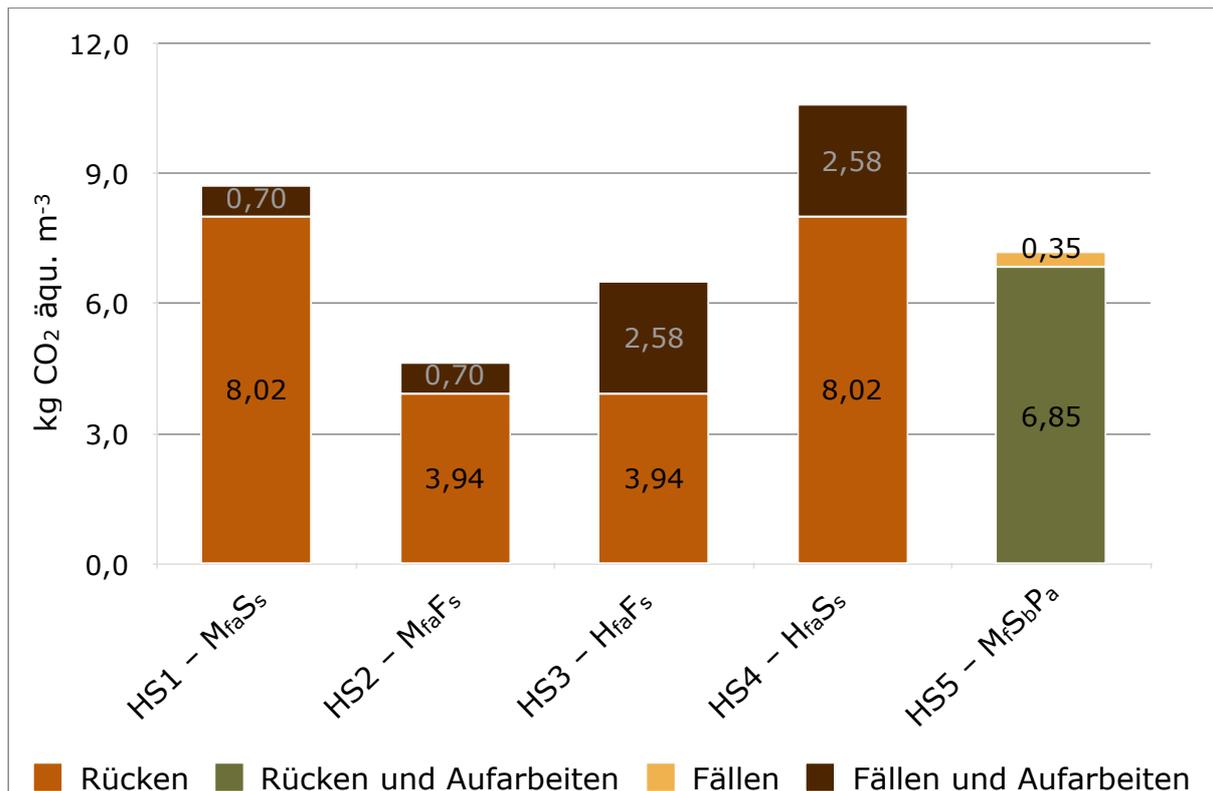


Abbildung 6: Prozessbeiträge der Holzerntesysteme – Klimaerwärmungspotential (GWP100)

Wenn man, aufgrund der hohen Variabilität des Treibstoffverbrauchs in der Literatur (Kapitel 3.3.3), den Verbrauch von Prozess II (S<sub>s</sub>) mit 6,1 kg h<sup>-1</sup> (kleineres Seilgerät; SCHWAIGER und ZIMMER, 2001) annimmt, würde das GWP100 von **Holzerntesystem 1** und **4**, wie folgt ausfallen. Das Klimaerwärmungspotential würde im **Holzerntesystem 1** auf 4,7 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> erniedrigt werden und im **Holzerntesystem 4** würde für Fällung, Aufarbeitung und Rückung 6,6 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro Festmeter emittieren. Hier würde der CO<sub>2</sub> Ausstoß bei der Rückung um die Hälfte verringert werden.

#### 4.1.2 Klimaerwärmungspotential der einzelnen Ernteprozesse

Das Klimaerwärmungspotential der einzelnen Holzernteprozesse (Kapitel 3.3.1–3.3.6) wurde bei gleichen Bestandes- und Eingangsparameter, wie in Kapitel 4.1.1, berechnet. Hierzu wurden die Beiträge zum GWP(100) aufgeschlüsselt, die zur Rückung, Fällung und Aufarbeitung eines Festmeters mitwirken.

#### 4.1.2.1 Motorsäge

48% des Klimaerwärmungspotentials ist auf die Bereitstellung von Treibstoff, Öle und Schmiermittel zurückzuführen (Abbildung 7). Bei der angenommenen Lebensdauer (Kapitel 3.3.1) fällt lediglich 1% auf die Maschinenproduktion. Im Vergleich zu Seilharvester (11%), Seilforwarder (10%) und Seilgerät (7%) ist dies als sehr gering anzusehen (Kapitel 4.1.2.2–4.1.2.5). Das erklärt sich aber durch den viel geringeren Materialeinsatz bei der Herstellung einer Motorsäge (7 kg) im Vergleich zu den anderen Maschinen (Seilharvester = 17.030 kg; Seilforwarder = 17.300 kg; Seilgerät = 13.500 kg; Seilgerät auf LKW mit Prozessor = 31.000 kg).

Beim eigentlichen Holzernteprozess, Fällen und Aufarbeiten, werden 0,36 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> ausgestoßen. Der gesamte Prozess, inklusive der Maschinenproduktion und der Bereitstellung der Betriebsstoffe verursacht ein GWP(100) von 0,68 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>.

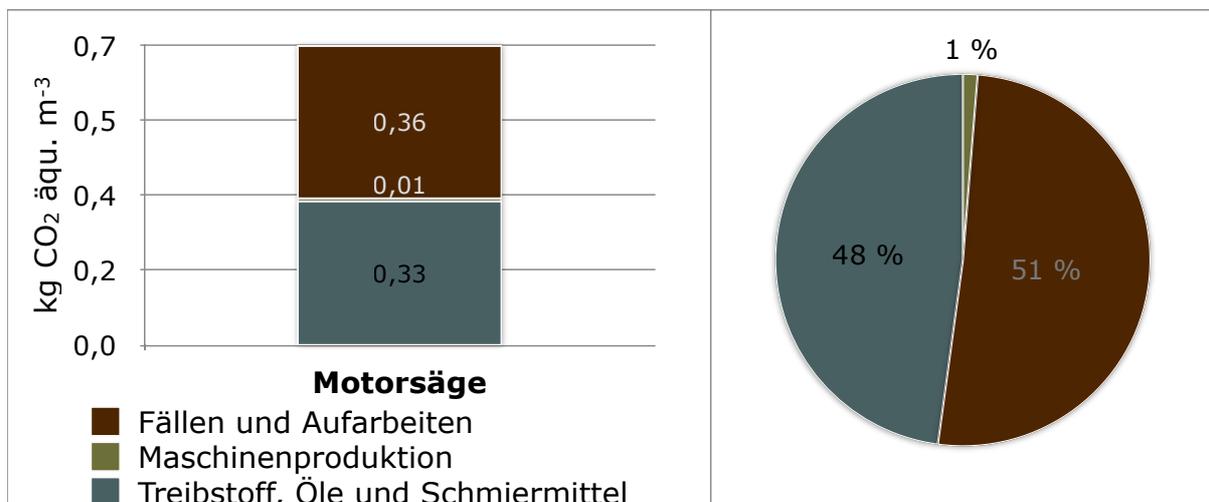


Abbildung 7: Motorsäge – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100)

#### 4.1.2.2 Seilharvester

Fällen und Aufarbeiten mit einem Seilharvester und die Bereitstellung von Treibstoff, Öle und Schmiermittel, machen den größten Anteil des GWP(100) aus (Abbildung 8). Die Betriebsstoffe verursachen 0,41 kg CO<sub>2</sub>

äqu.  $\text{m}^{-3}$  (10%). Die Überstellung und die Maschinenproduktion sind mit 10% und 11% am Klimaerwärmungspotential beteiligt. Für den Gesamtprozess, Rücken und Aufarbeiten mit einem Seilharvester, werden hier 2,58 kg  $\text{CO}_2$  äqu. pro ausgeformten Festmeter emittiert.

Die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung ist bei den beschriebenen Bedingungen (Kapitel 4.1.2.1), um 1,9 kg  $\text{CO}_2 \text{ m}^{-3}$  geringer (74%). Alleine 0,25 kg  $\text{CO}_2$  pro Festmeter fallen auf die Überstellung des Seilharvesters, die beim Einsatz der Motorsäge entfällt. Darüber hinaus benötigt die Bereitstellung von Betriebsstoffen für den Seilharvester, im Vergleich zur Motorsäge, um ein Fünftel mehr an  $\text{CO}_2$  äquivalent. Der relative Beitrag von Treibstoff, Öle und Schmiermittel ist 10% und somit geringer als bei Prozess I (GWP(100) Betriebsmittel der Motorsäge = 48%). Dies erklärt sich aber durch den höheren  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck von Gemischen und anderen Ölen, die beim Einsatz von Motorsägen gebraucht werden.

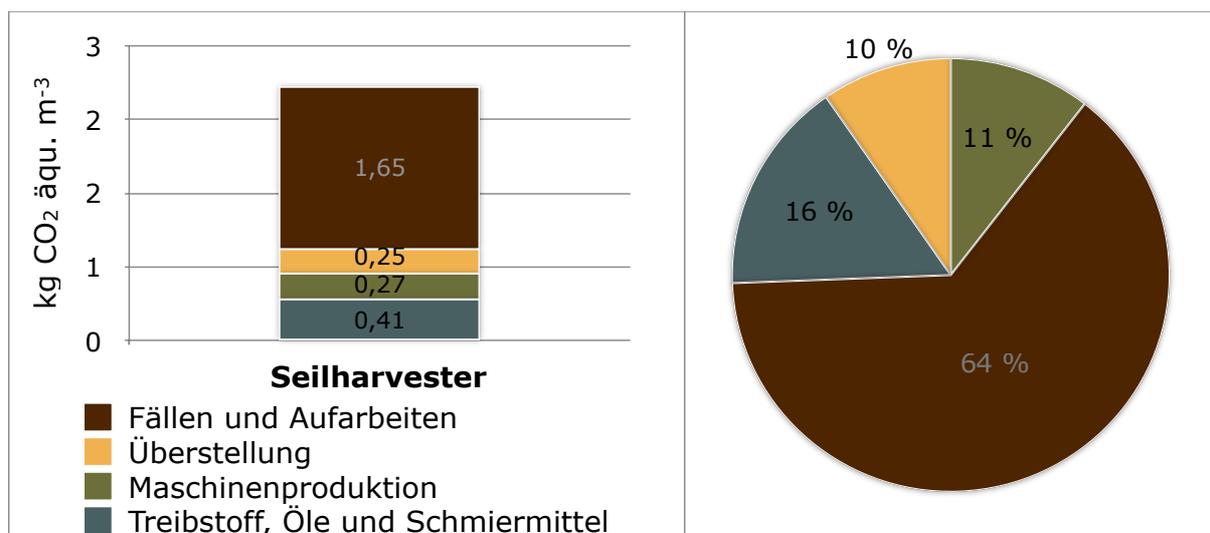


Abbildung 8: Seilharvester – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100)

#### 4.1.2.3 Seilgerät

Die Rückung eines Festmeters Holz mit dem Seilgerät im Sortimentsverfahren emittiert 8,03 kg  $\text{CO}_2$  äquivalent. Die Rückung selbst macht 76% des Klimaerwärmungspotentials aus. Die Produktion und Bereitstellung von Treibstoffen, Ölen und Schmiermitteln ergeben mit

1,13 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> den zweitgrößten Teil. Die Herstellung der Maschine ist mit 7% am GWP(100) beteiligt. Die Überstellung schlägt sich mit 0,22 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> in der Berechnung nieder (Abbildung 9).

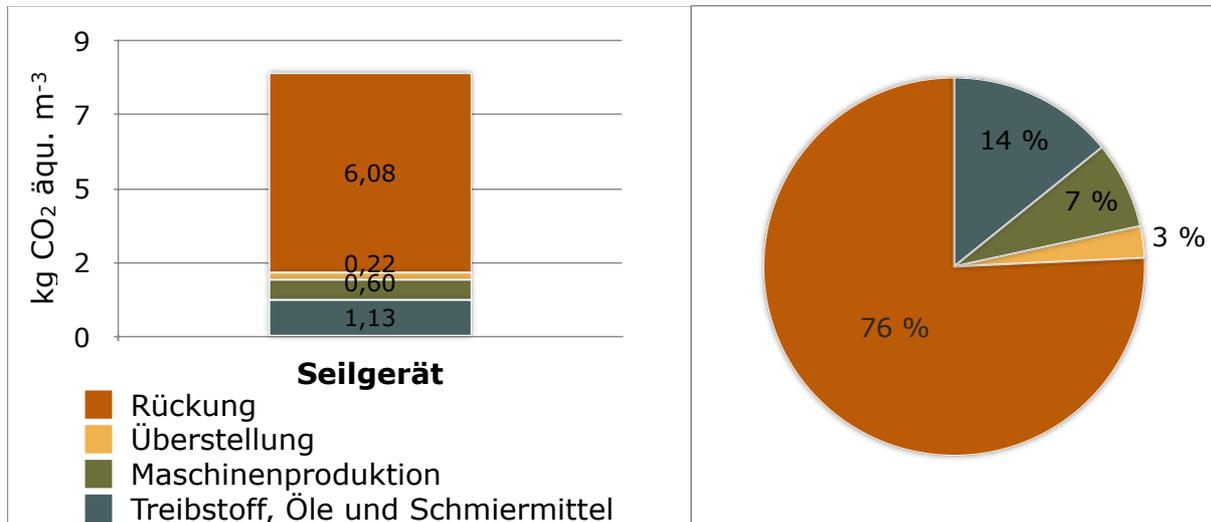


Abbildung 9: Seilgerät – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100)

Das verwendete Produktivitätsmodell berücksichtigt keine mögliche Vorkonzentration des Holzes, bei einer mechanisierten Fällung mit Harvester, in den einzelnen Szenarien. Wenn man eine Produktivitätssteigerung von 7%, durch eine Vorkonzentration annimmt, würde die Rückung mit Seilgerät um 0,56 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro gerückten Festmeter weniger emittieren.

#### 4.1.2.4 Seilgerät mit integriertem Prozessor

Die Rückung im Baumverfahren und Aufarbeitung mit integriertem Prozessor – Prozess VI (Kapitel 3.3.6) – stößt pro Festmeter frei Forststraße 6,85 kg CO<sub>2</sub> äqu. aus (Abbildung 10). Die Überstellung der Maschine ist mit 2% (0,14 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>) am GWP(100) beteiligt. Hier ist dieser Prozess VI um 0,08 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> niedriger als die Überstellung des Seilgeräts in Prozesses II (Kapitel 3.3.2). Dies erklärt sich durch die günstigere Überstellung mit dem gebundenen LKW. Das Klimaerwärmungspotential von 0,98 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> für die Maschinenproduktion (31.000 kg), ist für alle untersuchten Maschinen das größte. Der Verbrauch von Betriebsstof-

fen pro Kubikmeter, für Aufarbeiten und Rücken, ist 1,51 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>. Der relative Beitrag von 62% für die Rückung und Aufarbeitung, ist im Vergleich zu den anderen Prozessen II–IV, im unteren Bereich und ist auf die hohe Produktivität (11,3 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>) zurückzuführen.

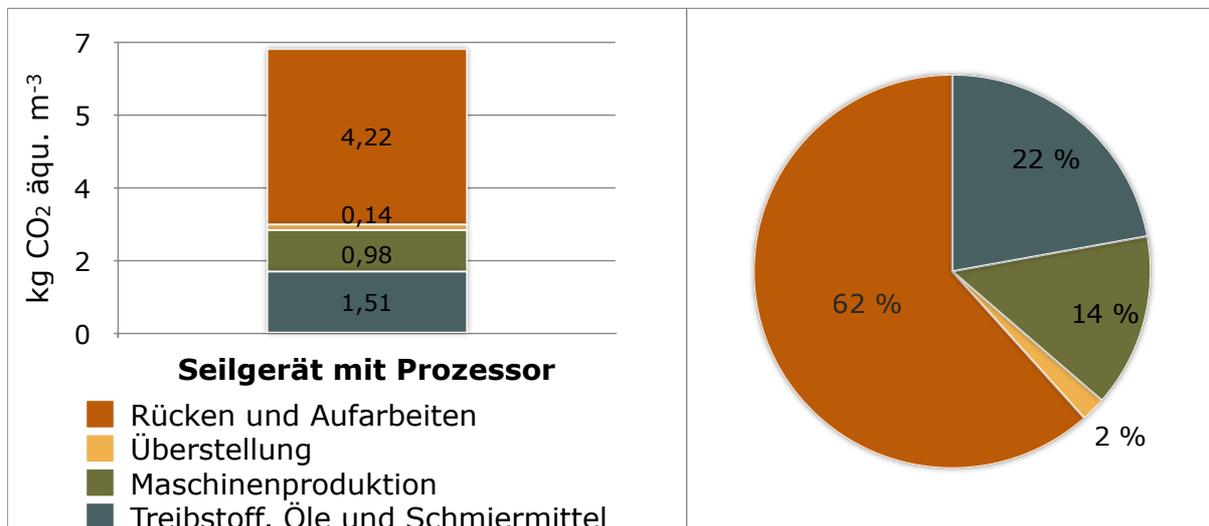


Abbildung 10: Seilgerät mit integriertem Prozessor – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100)

#### 4.1.2.5 Seilforwarder

Die Beiträge zum Klimaerwärmungspotential bei der Rückung mit Seilforwardern sind ähnlich wie beim Seilgerät aufgeteilt. 66% des GWP(100) sind auf den Einsatz des Seilforwarders beim Rücken zurückzuführen (Abbildung 11). Treibstoffe, Öle und Schmiermittel sind mit 14% beteiligt. Der gesamte Vorgang des Rückens bei den gegebenen Parametern emittiert 3,94 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>. Die Rückung mit Forwarder ist um 4,09 CO<sub>2</sub> äqu. pro Festmeter besser zu bewerten, wie die Holzurückung mittels Seilgerät. Die Überstellung ist aufgrund des höheren Massenanteils des Seilforwarders mit 10%, höher als bei der Rückung mit Seilgerät (3%). Die Maschinenherstellung verursacht 0,41 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> (10%). Hier ist die Maschinenproduktion des Seilgeräts um 0,19 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro Festmeter mehr am GWP(100) beteiligt. Da jedoch das Seilgerät bei der Rückung mehr CO<sub>2</sub> emittiert (6,08 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>), ist der relative Wert der Her-

stellung nur 7% am Gesamtprozess und somit um 3% geringer als beim Seilforwarder.

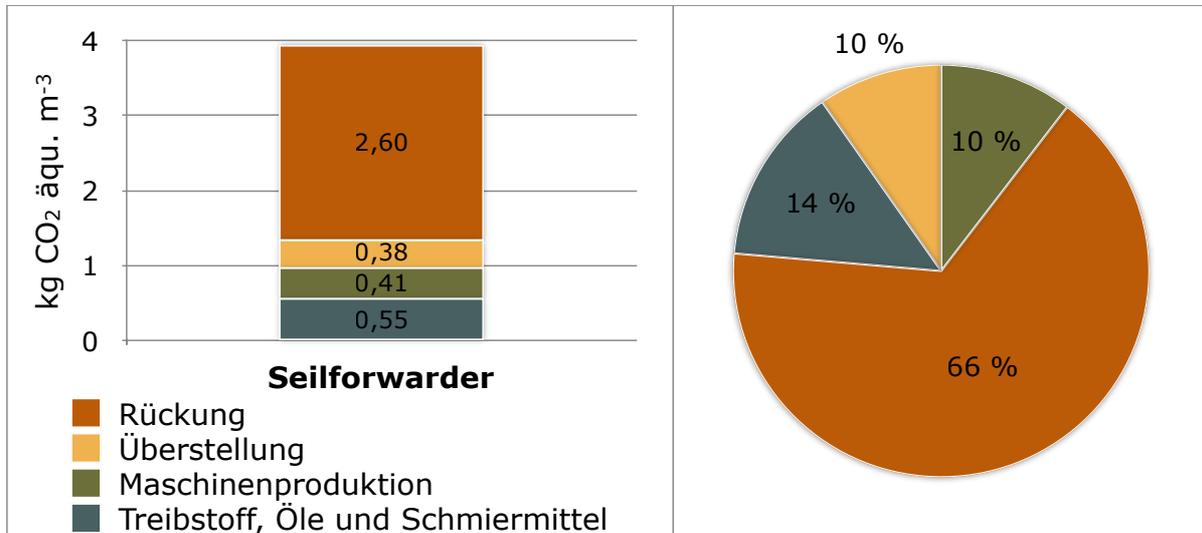


Abbildung 11: Seilforwarder – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100)

Das Produktivitätsmodell unterstellt, dass die Sortimente an der Rückegasse vorkonzentriert sind. Bei einer Annahme, dass es zu einem Produktivitätsverlust von 7%, bei einer motormanuellen Fällung kommen könnte (= keine Vorkonzentration), würde das GWP100 pro Festmeter um 0,28 kg CO<sub>2</sub> äqu. steigen.

## 4.2 Sensitivitätsanalyse

### 4.2.1 Szenarien mit veränderter Rückegassenneigung

Die ausgewählten Holzerntesysteme (HS1–HS5) wurden bei Hangneigungen von 10–70% untersucht. 70% Rückegassenneigung wurde als Maximum gewählt, weil das die oberste Grenze der bodengestützten Ernte darstellt (Kapitel 2.2.2.1–2.2.2.2). Die Parameter Rückedistanz (120 m) und Baumvolumen (0,872 m<sup>3</sup>) wurden bei diesen Berechnungen konstant betrachtet.

Der Einfluss der Rückegassenneigung auf die Produktivität und die einhergehenden Wirkungskategorien sind in den Tabelle 18 bis Tabelle 22 abge-

bildet. Mit steigender Hangneigung verringern sich die Produktivitäten bei gleichbleibendem oder erhöhtem Treibstoffverbrauch und erhöhen sich die Umwelteinwirkungen für die Bereitstellung eines Kubikmeters frei Forststraße.

Beim **Holzerntesystem 1** werden nur die Rückegassenneigungen von 40–70% betrachtet. Das Produktivitätsmodell für Fällen und Ausformen mit Motorsäge ist nicht für geringere Hangneigungen geeignet (Kapitel 3.3.1). Im steilen Gelände (70% Hangneigung) ist die Produktivität beim Fällen und Aufarbeiten mit Motorsäge um mehr als 32% geringer als im flachen Gelände (40% Hangneigung). Beim Rücken mit dem Seilgerät verringert sich die Produktivität um 15%. Beim Erntesystem Motorsäge-Seilgerät, im Sortimentsverfahren, ist das Klimaerwärmungspotenzial im Steilgelände um 1,7 kg CO<sub>2</sub> äqu. höher als im flachen Gelände (Tabelle 18). Bei einer Erhöhung der Rückegassenneigung von 40% auf 70%, werden pro Festmeter frei Forststraße um 0,6 kg Öl äqu. mehr verbraucht.

Tabelle 18: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 1

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>40%</b>	<b>70%</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	8,720	10,394	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,991	3,569	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,829	1,007	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,287	0,340	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,012	0,014	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,086	0,115	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,028	0,034	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,008	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>6,3</b>	<b>4,3</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>7,2</b>	<b>6,1</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

In Tabelle 19 werden die entstehenden Umweltauswirkungen bei der Holzernte mit Motorsäge (Fällen und Aufarbeiten) und anschließender Rückung mit Seilforwarder im Sortimentsverfahren abgebildet und zeigen die Verschlechterung dieser bei zunehmender Hangneigung (40–70%). Die Produktivität des Seilforwarders nimmt hier nur geringfügig um 4% ab, wenn die Hangneigung von 40% auf 70% angehoben wird. Bei dem **Holzerntesystem 2** – Motorsäge-Seilforwarder – ist das GWP(100) im steilen Gelände um 0,5 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> höher als im flach geneigtem. Auch die anderen Wirkungskategorien verschlechtern sich mit zunehmender Hangneigung. Die Wirkungskategorie terrestrische Versauerung (0,019–0,020 kg SO<sub>2</sub> äqu.) wird hier nur geringfügig erhöht.

Tabelle 19: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 2

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>40%</b>	<b>70%</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	4,640	5,097	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	1,596	1,724	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,549	0,623	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,221	0,237	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,009	0,009	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,075	0,099	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,019	0,020	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,008	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>6,3</b>	<b>4,3</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>15,1</b>	<b>14,5</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Bei der Holzernte mit Seilharvester und Seilforwarder – **Holzerntesystem 3** – (Tabelle 20) bleibt die Produktivität des Seilharvesters für alle Szenarien konstant, da das Produktivitätsmodell die Neigung als nicht signifikant beschreibt (Kapitel 3.3.4). Jedoch wird der Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Neigung erhöht. Somit kommt es auch zu einer Erhöhung der ausgestoßenen Emissionen. Das GWP(100) des HS3 setzt pro bereitgestelltem Festmeter, frei Forststraße, 6,12–6,94 kg CO<sub>2</sub> äqu. (10–70%) frei. Die anderen Wirkungskategorien verschlechtern sich geringfügig um bis maximal 15% (Feinstaubbelastung = 0,013 kg PM10 äqu.).

Tabelle 20: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 3

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>10%</b>	<b>40%</b>	<b>70%</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	6,115	6,528	6,941	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,101	2,208	2,315	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,667	0,688	0,709	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,327	0,336	0,344	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,012	0,013	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,036	0,039	0,041	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,025	0,026	0,028	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,002	0,002	0,002	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>15,7</b>	<b>15,1</b>	<b>14,5</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Der Einfluss der Rückegassenneigung auf das **Holzerntesystem 4**, Fällen und Aufarbeiten mit Seilharvester und Rücken mit Seilgerät im Sortimentsverfahren reagiert stärker auf die Erhöhung der Neigung als die vorherigen (HS1–HS3; Tabelle 21). Dieser starke Anstieg ist auf den vermehrten Treibstoffverbrauch des Seilharvesters in Kombination mit den geringen Produktivitäten des Seilgeräts (Prod. bei 70% Neigung = 6,1 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>) zurückzuführen. Die Wirkungskategorien verschlechtern sich um bis zu 27%. 12,24 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> ist bei einer Rückegassenneigung von 70% der größte Wert der untersuchten Systeme (HS1–HS5).

Tabelle 21: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 4

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>10%</b>	<b>40%</b>	<b>70%</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	8,978	10,608	12,238	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	3,045	3,603	4,161	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,842	0,967	1,093	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,355	0,401	0,448	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,013	0,015	0,018	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,042	0,049	0,057	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,030	0,036	0,041	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,002	0,002	0,002	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>8,6</b>	<b>7,2</b>	<b>6,1</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Beim **Holzerntesystem 5** nimmt die Arbeitsleistung des Prozesses V (Kapitel 3.3.5), das Fällen mit Motorsäge, laut verwendetem Produktivitätsmodell nicht ab (Tabelle 22). Die Produktivität des Seilgeräts mit Prozessor verringert sich bei 70% Hangneigung um 31%. Dadurch verschlechtern sich die Wirkungskategorien um bis zu 32% (terrestrische Versauerung) pro bereitgestelltem Festmeter. Auch der Metallabbau erhöht sich um 0,21 kg Fe äqu. m<sup>-3</sup> (Steigerung um 31%). Das GWP(100) reicht von 5,6–8,1 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro Kubikmeter Holz.

Tabelle 22: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 5

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>10%</b>	<b>40%</b>	<b>70%</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	5,603	6,603	8,074	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	1,850	2,178	2,660	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,821	0,965	1,176	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,448	0,531	0,654	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,010	0,012	0,014	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,054	0,060	0,068	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,021	0,025	0,031	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,007	0,008	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge FÄLLEN</b>	<b>12,6</b>	<b>12,6</b>	<b>12,6</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät mit Prozessor</b>	<b>13,5</b>	<b>11,3</b>	<b>9,2</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

In Abbildung 12 sieht man einen Vergleich der LCIA Kategorie Klimaerwärmungspotential (GWP100), der unterschiedlichen Holzerntesysteme im Gebirge, bei Rückegassenneigungen von 10 (ausgenommen HS1 und HS2), 40 und 70%. Die Rückung mit Seilgerät und vorheriger Fällung und Aufarbeitung mittels Seilharvesters, produziert am meisten kg CO<sub>2</sub> äquivalent pro Festmeter frei Forststraße. Aufgrund der geringen Produktivitätsveränderung des Prozesses III (Seilforwarder; Kapitel 3.3.3) kommt es nur zu einer geringen Erhöhung des GWP(100) bei der Veränderung der Rückegassenneigung.

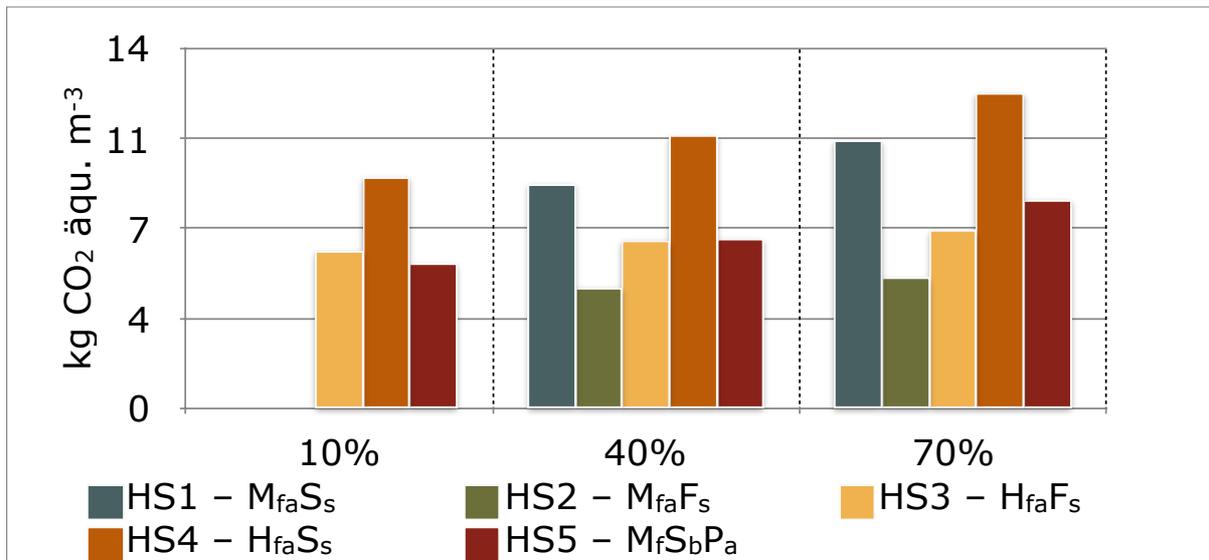


Abbildung 12: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der **Rückegassenneigung**

#### 4.2.2 Szenarien mit veränderter Rückedistanz

Der Parameter Rückedistanz (RD) wurde für drei Szenarien mit 60, 180 und 540 m angenommen und die Auswirkungen der einzelnen Holzerntesysteme auf die Umwelt berechnet (Tabelle 23–Tabelle 27). Die Rückegassenneigung (40%) und das Baumvolumen ( $0,872 \text{ m}^3$ ) wurden hier konstant beibehalten.

Die Rückedistanz hat keinen Einfluss auf die Leistung des Fällens und Aufarbeitens mit Motorsäge. Das Seilgerät verringert seine Produktivität von  $8,0$  (RD 60) auf  $4,1 \text{ m}^3 \text{ PMH}_{15}^{-1}$  (RD 540) und somit erhöhen sich die Umwelteinwirkungen pro geernteten Festmeter wesentlich (Tabelle 23). Die Wirkungskategorien erhöhen sich im Durchschnitt (RD 60–540 m) um 38%.  $14,9 \text{ kg CO}_2 \text{ äqu. m}^{-3}$  werden bei einer Rückedistanz von 540 m für das **Holzerntesystem 1** (Motorsäge-Seilgerät) frei Forststraße emittiert.

Tabelle 23: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 1

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>RD 60 m</b>	<b>RD 180 m</b>	<b>RD 540 m</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	7,844	9,595	14,851	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,692	3,289	5,083	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,752	0,905	1,361	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,257	0,316	0,491	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,013	0,020	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,082	0,090	0,113	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,025	0,031	0,048	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,006	0,006	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>8,0</b>	<b>6,5</b>	<b>4,1</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Die Umweltauswirkung beim **Holzerntesystem 2** (Tabelle 24) nehmen bei einer Erhöhung der Rückedistanz ebenfalls stark zu. Die Arbeitsleistung des Seilforwarders verringert sich um 48% bei einer Erhöhung der Rückedistanz von 60 auf 540 m. Das GWP(100) steigt um 2,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> bei der getesteten Motorsägen-Seilforwarder-Kombination in diesem Szenario. Die Humantoxizität von 0,8 kg 1,4-DCB äqu. pro Festmeter bei einer Rückedistanz von 540 m ist der geringste Wert bei allen Szenarien. Einerseits da die Produktivität der Motorsäge konstant ist und andererseits, weil der Seilforwarder noch immer eine Arbeitsleistung von 8,7 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> erzielt.

Tabelle 24: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 2

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>RD 60 m</b>	<b>RD 180 m</b>	<b>RD 540 m</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	4,272	5,007	7,213	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	1,567	1,626	1,803	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,514	0,584	0,796	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,201	0,241	0,359	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,008	0,009	0,013	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,073	0,078	0,092	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,017	0,020	0,028	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,006	0,006	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>16,8</b>	<b>13,6</b>	<b>8,7</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Bei der Fällung und Aufarbeitung mit Seilharvester, im **Holzerntesystem 3** und **Holzerntesystem 4**, hat die Rückedistanz keinen Einfluss auf die Produktivität. Im Gegensatz zur Rückegassenneigung ist die Rückedistanz kein Parameter des Treibstoffverbrauchs für Harvester. Daher ist die Erhöhung der Umweltwirkung mit steigender Rückedistanz im Holzerntesystem 3 (Tabelle 25) rein auf den Prozess III (Seilforwarder SORT; Kapitel 3.3.3) zurückzuführen. Die unterschiedlichen Wirkungskategorien werden, durch die Erhöhung der Rückedistanz (60–540 m) um bis zu 35% (Feinstaubbelastung) erhöht. Das Klimaerwärmungspotential wird von 6,2 (RD 60 m)–9,1 (RD 540 m) kg CO<sub>2</sub> äqu. pro Festmeter erhöht. Die terrestrische Versauerung erreicht einen Wert von 0,04 kg SO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>.

Tabelle 25: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 3

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>RD 60 m</b>	<b>RD 180 m</b>	<b>RD 540 m</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	6,160	6,895	9,101	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,179	2,238	2,415	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,653	0,723	0,934	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,316	0,355	0,474	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,013	0,017	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,036	0,041	0,055	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,025	0,027	0,035	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,002	0,002	0,002	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>16,8</b>	<b>13,6</b>	<b>8,7</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Eine Erhöhung der Rückedistanz beim **Holzerntesystem 4** (Seilharvester-Seilgerät) führt zu einer Verringerung der Produktivität des Seilgerätes (Tabelle 26). 16,7 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> frei Forststraße werden bei einer Rückedistanz von 540 m ausgestoßen. Dies ist das größte GWP(100) von allen untersuchten Holzerntesystemen. Auch die Humantoxizität hat mit 1,5 kg 1,4-DCB äqu. pro Festmeter die schädlichste Auswirkung aller Erntesysteme. Vor allem die niedrige Produktivität des Seilgerätes (4,1 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>; RD 540 m) ist hier ausschlaggebend.

Tabelle 26: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 4

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>RD 60 m</b>	<b>RD 180 m</b>	<b>RD 540 m</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	9,732	11,484	16,739	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	3,304	3,902	5,695	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,891	1,043	1,500	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,372	0,431	0,606	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,014	0,017	0,024	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,045	0,053	0,076	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,033	0,038	0,056	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,002	0,002	0,002	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>29,2</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>8,0</b>	<b>6,5</b>	<b>4,1</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Die Veränderung der Rückedistanz hat einen geringen Einfluss auf die Produktivität des Prozesses VI (Kapitel 3.3.6). Bei einer Erhöhung der Distanz von 60 m um den Faktor 9 wird die Leistung um lediglich 14,8% erniedrigt. Daher steigen die Umweltwirkungen des **Holzerntesystems 5** bei einer Rückedistanz von 540 m nur gering (max. 15%) an (Tabelle 27). Am geringsten steigt hier die Photochemische Oxidation (9%) und emittiert bei einer Steigerung der Rückedistanz auf 540 m um 0,006 mehr kg NMVOC als bei einer Länge von 60 m.

Tabelle 27: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 5

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>RD 60 m</b>	<b>RD 180 m</b>	<b>RD 540 m</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	6,484	6,728	7,593	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,138	2,219	2,502	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,948	0,983	1,107	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,521	0,541	0,614	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,012	0,013	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,059	0,060	0,065	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,025	0,026	0,029	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,007	0,007	0,008	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge FÄLLEN</b>	<b>12,6</b>	<b>12,6</b>	<b>12,6</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät mit Prozessor</b>	<b>11,5</b>	<b>11,1</b>	<b>9,8</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Wenn man das GWP(100) der Holzerntesysteme, in Abhängigkeit der Rückedistanz (Abbildung 13) betrachtet, wird ersichtlich, dass der Anstieg des Klimaerwärmungspotentials im **Holzerntesystem 5** (Motorsäge-Seilgerät mit Prozessor) geringer ausfällt, als bei den anderen Systemen. Die hohe konstante Produktivität beim Fällen (12,6 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>; Prozess V, Kapitel 3.3.5) und der geringe Leistungsverlust von Prozess VI (Kapitel 3.3.6), von 1,7 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup>, ist hier ausschlaggebend. Bei einer Rückedistanz von 540 m kommt es zu einer anderen Reihung der Erntesysteme und **Holzerntesystem 3** wirkt schlechter als **Holzerntesystem 5** auf die Umwelt. Wiederum ist die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung und

anschließende Rückung im Sortimentsverfahren mit Seilforwardern bei den getesteten Rückedistanzen (60–540 m) am positivsten zu beurteilen.

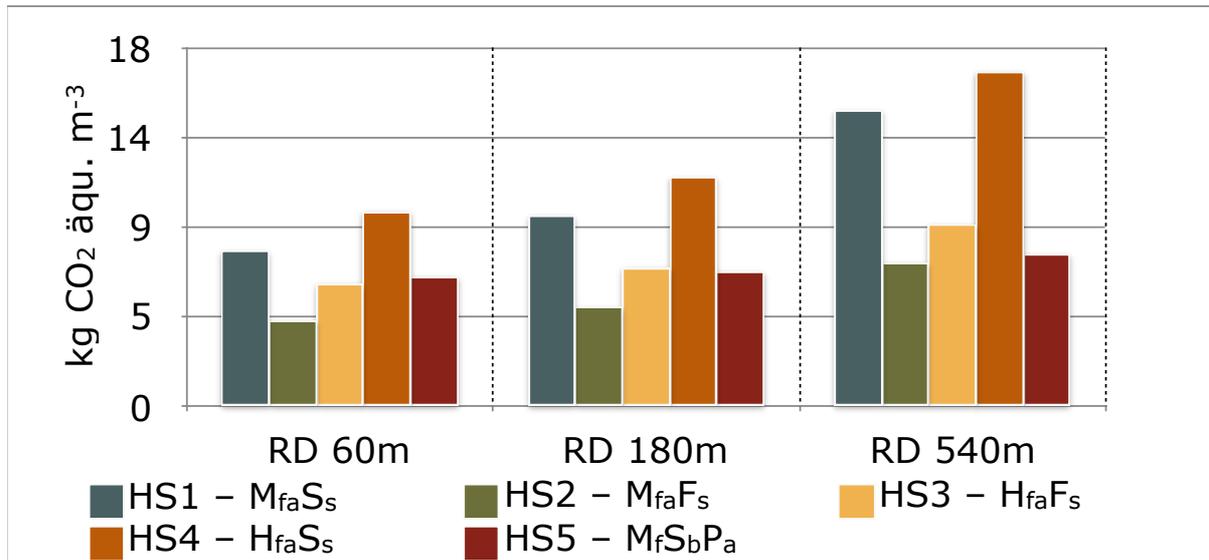


Abbildung 13: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der **Rückedistanz**

#### 4.2.3 Szenarien mit verändertem Baumvolumen

Das Baumvolumen hat meistens den stärksten Einfluss auf die Produktivität und in Folge auch auf die Umwelteinwirkung bei der Holzernte (Tabelle 28–Tabelle 32). Die Parameter Rückedistanz von 120 m und die Hangneigung 40% werden hier als Konstante betrachtet. Das Baumvolumen wird durch den BHD repräsentiert. Es werden drei Szenarien mit Werten von 20, 30 und 40 cm unterschieden.

Die Produktivitäten im **Holzerntesystem 1** (Motorsäge-Seilgerät; Kapitel 3.3.1–3.3.2) nehmen bei einer Erhöhung des BHDs von 20 auf 40 cm wesentlich zu. Die Arbeitsleistung der Motorsäge (Fällen und Aufarbeiten) steigt um 66%, die Rückung mit Seilgerät im Sortimentsverfahren um 61%. Alle Wirkungskategorien des Erntesystems 1 (Tabelle 28) verbessern sich somit um mehr als die Hälfte bei einer Erhöhung des BHDs von 20 cm.

Tabelle 28: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 1

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>BHD 20 cm</b>	<b>BHD 30 cm</b>	<b>BHD 40 cm</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	16,080	8,720	6,229	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	5,519	2,991	2,136	kg Öl äqu.
Humantoxizität	1,545	0,829	0,591	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,527	0,287	0,205	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,022	0,012	0,009	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,170	0,086	0,061	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,052	0,028	0,020	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,012	0,006	0,004	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>3,0</b>	<b>6,3</b>	<b>9,0</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>3,9</b>	<b>7,2</b>	<b>10,0</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Beim Prozess III (Seilforwarder SORT; Kapitel 3.3.3) im **Holzerntesystem 2** erhöht sich die Produktivität von 13 (BHD 20 cm) auf 16,5 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> (BHD 40 cm). Diese hohe Produktivität führt zu geringeren Umweltauswirkungen frei Forststraße (Tabelle 29). Hinzu kommt eine Verringerung der Emissionen, die aufgrund geringeren Treibstoffverbrauches resultieren. Dieser ist abhängig von dem Stückvolumen und erniedrigt den Verbrauch pro Kubikmeter bei einer Zunahme des Baumvolumens. 4,2 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> frei Forststraße, ist der niedrigste Wert von allen Holzerntesystemen im Kapitel 4.2.3. Das **Holzerntesystem 2** emittiert nur mehr ein Drittel von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (photochemische Oxidation) bei einem BHD von 40 cm (0,06 kg NMVOC), im Vergleich zu einem BHD von 20 cm (0,15 kg NMVOC).

Tabelle 29: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 2

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>BHD 20 cm</b>	<b>BHD 30 cm</b>	<b>BHD 40 cm</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	7,809	4,640	4,152	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,703	1,596	1,426	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,808	0,549	0,475	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,282	0,221	0,198	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,014	0,009	0,008	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,147	0,075	0,059	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,032	0,019	0,017	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,012	0,006	0,004	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge</b>	<b>3,0</b>	<b>6,3</b>	<b>9,0</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>13,0</b>	<b>15,1</b>	<b>16,5</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Die Produktivität des Seilharvesters steigt bei einer Zunahme des Baumvolumens (entsprechend einem BHD von 40 cm) auf 49,9 m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup> (Tabelle 30). Die Kombination von Seilharvester und Seilforwarder (**Holzerntesystem 3**) stellt somit dasjenige Holzerntesystem mit den höchsten Produktivitäten dar. Die Wirkungskategorien werden um bis zu 57% erniedrigt, wenn der BHD 40 statt 20 cm beträgt. Das GWP(100) sinkt um 6,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro Festmeter. Die terrestrische Versauerung pro geernteten Kubikmeter ist bei einem BHD von 40 cm, mit lediglich 0,001 kg 1,4-DCB äqu. kalkuliert worden.

Tabelle 30: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 3

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>BHD 20 cm</b>	<b>BHD 30 cm</b>	<b>BHD 40 cm</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	12,113	6,528	5,174	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	4,102	2,208	1,754	kg Öl äqu.
Humantoxizität	1,135	0,688	0,541	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,541	0,336	0,263	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,022	0,012	0,010	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,072	0,039	0,031	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,048	0,026	0,021	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,004	0,002	0,001	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>13,1</b>	<b>29,2</b>	<b>49,9</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilforwarder</b>	<b>13,0</b>	<b>15,1</b>	<b>16,5</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Das GWP(100) für das **Holzerntesystem 4** ist bei einem BHD von 20 cm (20,4 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>) der größte Wert von allen getesteten Holzerntesystemen (Tabelle 31). Aber auch hier werden alle Wirkungskategorien verbessert. Die Humantoxizität sinkt pro Festmeter von 1,9 auf 0,7 kg 1,4-DCB äquivalent. Am stärksten verbessert sich die Feinstaubbelastung der Seilharvester-Seilgerät-Kombination und sinkt um 67% bei einem BHD von 40 cm (0,01 kg PM10 äqu. m<sup>-3</sup>).

Tabelle 31: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 4

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>BHD 20 cm</b>	<b>BHD 30 cm</b>	<b>BHD 40 cm</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	20,384	10,608	7,251	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	6,917	3,603	2,464	kg Öl äqu.
Humantoxizität	1,873	0,967	0,657	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,786	0,401	0,270	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,030	0,015	0,010	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,095	0,049	0,033	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,069	0,036	0,024	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,004	0,002	0,001	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Seilharvester</b>	<b>13,1</b>	<b>29,2</b>	<b>49,9</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät</b>	<b>3,9</b>	<b>7,2</b>	<b>10,0</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

Die Erhöhung des BHDs wirkt sich auch positiv (Tabelle 32) auf die Prozesse V und VI (Motorsäge-Seilgerät mit integriertem Prozessor; Kapitel 3.3.5–3.3.6) beim **Holzerntesystem 5** aus. Die Bearbeitungszeit der motormanuellen Fällung nimmt zwar mit einem erhöhten BHD zu, jedoch steigt die Produktivität durch das erhöhte Baumvolumen (von 20 cm auf 40 cm) um die Hälfte an. Auch die Rückung mit Seilgerät im Baumverfahren und die Aufarbeitung mit Prozessor wird bei einer Verdoppelung des BHD um mehr als die Hälfte gesteigert. Das Klimaerwärmungspotential sinkt in diesem Szenario von 12,3 auf 4,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>. Vor allem der Metallabbau pro Festmeter nimmt um 0,6 kg Fe äqu. ab (60%). Bei einem BHD von 20 cm werden für jeden Kubikmeter Holz 1 kg Fe äqu. verbraucht.

Tabelle 32: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 5

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>BHD 20 cm</b>	<b>BHD 30 cm</b>	<b>BHD 40 cm</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	12,243	6,603	4,867	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	4,034	2,178	1,605	kg Öl äqu.
Humantoxizität	1,784	0,965	0,712	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,991	0,531	0,391	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,022	0,012	0,009	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,103	0,060	0,045	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,047	0,025	0,019	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,012	0,007	0,005	kg 1,4-DCB äqu.
<b>Prod. Motorsäge FÄLLEN</b>	<b>8,2</b>	<b>12,6</b>	<b>16,4</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>
<b>Prod. Seilgerät mit Prozessor</b>	<b>6,0</b>	<b>11,3</b>	<b>15,4</b>	<b>m<sup>3</sup> PMH<sub>15</sub><sup>-1</sup></b>

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid*

In Abbildung 14 sieht man das Klimaerwärmungspotential der unterschiedlichen Holzerntesysteme bei verschiedenen Brusthöhendurchmessern. Bei allen Szenarien ist das GWP(100) des **Holzerntesystems 2** (Motorsäge-Seilforwarder) am geringsten (7,8–4,2 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>). Das meiste CO<sub>2</sub> äquivalent pro Festmeter wird bei der Fällung und Aufarbeitung mit Seilharvester und anschließender Rückung mit Seilgerät im Sortiment ausgestoßen. Jedoch kommt es auch bei diesem Holzerntesystem zu einer wesentlichen Verbesserung bei einem höheren BHD und der damit verbundenen Erhöhung des Baumvolumens.

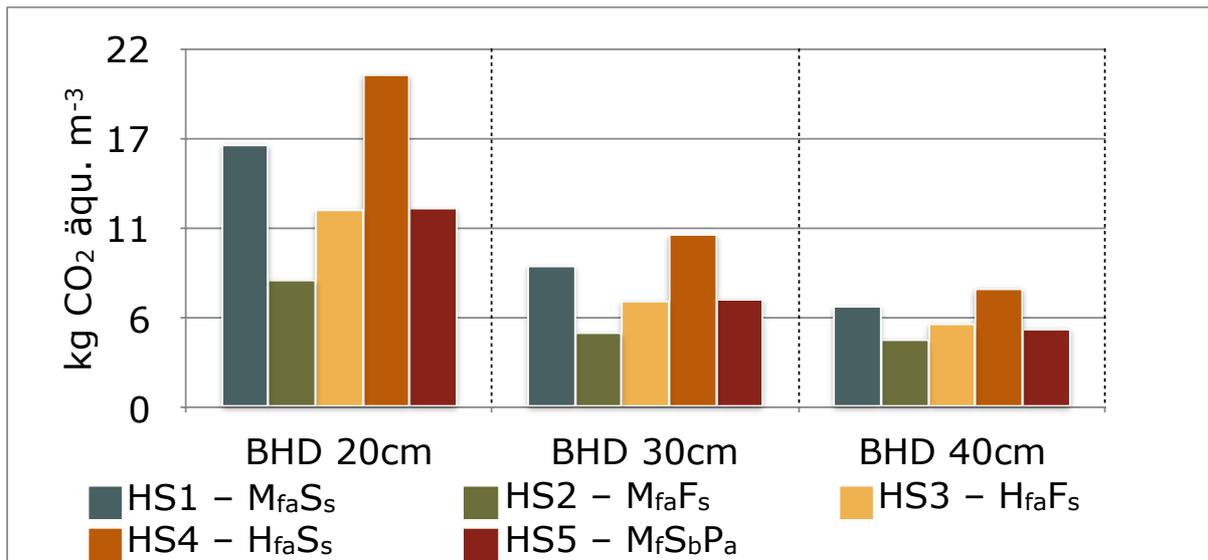


Abbildung 14: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der **Baumvolumina**

#### 4.2.4 Erntesysteme im Vergleich

In den Szenarien 1–4 (Kapitel 4.2.4.1–4.2.4.4) werden die Erntesysteme, mit den wichtigsten LCIA Kategorien, verglichen. Wirkungskategorien wie die Toxizität und Eutrophierung von aquatischen Lebensräumen, ionisierende Strahlung etc. wurden nicht dargestellt, da die Ergebnisse nahe Null lagen und keine Relevanz für diese Art von forstlichen Prozessen darstellen (KLEIN et al., 2015).

##### 4.2.4.1 Szenario 1: Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände

Dieses Szenario simuliert eine Durchforstung (BHD 18 cm) im Steilgelände. Die Hangneigung wird mit 70% angenommen und stellt die maximal befahrbare Neigung für die bodengestützte Ernte (Kapitel 2.2.2.1–2.2.2.2) dar. Die Rückedistanz wurde mit 120 m angenommen.

Alle untersuchten Wirkungskategorien (Tabelle 33) zeigen die schlechtesten Werte in allen Szenarien. Das **Holzerntesystems 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) emittiert 27,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> und ist im Vergleich zu den anderen um bis zu 61% schlechter. Durch die Kombination von geringem Baumvolumen und der steilen Hangneigung kommt es zu einem ho-

hen Input von Betriebsstoffen und einem geringen Output von Festmeter pro PMH<sub>15</sub>.

Tabelle 33: LCIA Ergebnisse – Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände

Wirkungskategorie	HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	HS 5	Einheit m <sup>-3</sup>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	20,993	10,927	16,717	26,784	27,888	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	7,210	3,722	5,608	9,096	9,165	kg Öl äqu.
Humantoxizität	2,045	1,031	1,394	2,408	4,034	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,687	0,328	0,645	1,004	2,294	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,029	0,019	0,030	0,039	0,050	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,240	0,215	0,100	0,126	0,190	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,068	0,044	0,067	0,091	0,107	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,018	0,018	0,005	0,006	0,022	kg 1,4-DCB äqu.

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid; HS 1-5 = Holzerntesysteme*

Die Rückung im Baumverfahren mit Seilgerät und anschließender Aufarbeitung mit Prozessor ist bei den meisten Wirkungskategorien am schlechtesten zu bewerten (Abbildung 15). Lediglich bei der Kategorie Photochemische Oxidation schneiden das **Holzerntesystem 1** und **Holzerntesystem 2** am schlechtesten ab. Hier ist die Fällung und Aufarbeitung mit der Motorsäge und der Ausstoß von aromatischen Kohlenwasserstoffen, Barium, Nickel, Schwefeldioxide und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan entscheidend.

Bei den anderen LCIA Kategorien in diesem Durchforstungsszenario ist die Fällung mit Motorsäge und Rückung mit Seilforwarder (**Holzerntesystem 2**) am positivsten zu beurteilen. Auch bei der Fällung und Aufarbeitung

mit dem Seilharvester und anschließender Seilforwarderrückung ist das **Holzerntesystem 3** an zweiter Stelle zu sehen. Lediglich bei der Feinstaubbelastung wird dieses System vom **Holzerntesystem 1** (Motorsäge-Seilgerät) auf die dritte Stelle verdrängt. Im Vergleich zu den anderen Holzerntesystemen ist vor allem der Abbau von Metallen des **Holzerntesystems 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) am kritischsten zu sehen.

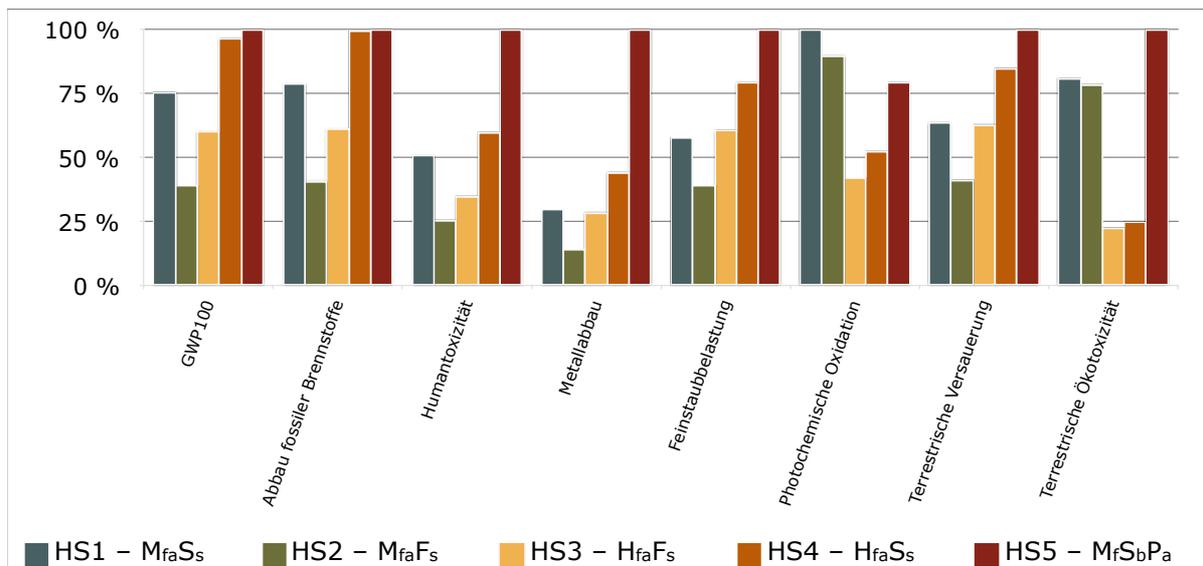


Abbildung 15: Relative Ergebnisse – Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände

#### 4.2.4.2 Szenario 2: Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände

Die Endnutzung in diesem Modell wird wie bei Szenario 1 (Kapitel 4.2.4.1) bei einer Hangneigung von 70% und einer Rückgassendistanz von 120 m simuliert. Der BHD wurde mit 40 cm gewählt und entspricht einem Baumvolumen von circa 1,9 m<sup>3</sup>.

Die Umweltbelastungen pro Festmeter sinken bei allen Systemen durch die hohen Produktivitäten stark (Tabelle 34). Das **Holzerntesystem 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) sinkt beim CO<sub>2</sub> äqu. Ausstoß um 80% im Vergleich zum Durchforstungsszenario. Die Holzerntesysteme benötigen zwischen 4,6–8,8 kg CO<sub>2</sub> äquivalent pro Kubikmeter frei Forststraße.

Tabelle 34: LCIA Ergebnisse – Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände

Wirkungskategorie	HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	HS 5	Einheit m <sup>-3</sup>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	7,903	4,612	5,475	8,766	5,615	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,714	1,553	1,821	2,982	1,851	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,769	0,549	0,558	0,779	0,819	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,259	0,214	0,271	0,316	0,453	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,008	0,010	0,013	0,010	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,090	0,083	0,033	0,040	0,049	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,026	0,018	0,022	0,029	0,021	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,007	0,007	0,001	0,001	0,006	kg 1,4-DCB äqu.

CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid; HS 1-5 = Holzerntesysteme

Die relativen Ergebnisse in Abbildung 16 zeigen, dass sich die Wirkungskategorien vor allem bei der Rückung im Baumverfahren und anschließender Aufarbeitung, im Vergleich zu den anderen Holzerntesystemen, stärker verbessern. Die Kombination von Seilharvestern und Seilgerät und die entstehenden Schwefeldioxide lassen das **Holzerntesystem 4** auch bei der terrestrischen Versauerung am negativsten wirken. Diese stößt 0,029 kg SO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> aus.

Das **Holzerntesystem 2** (Motorsäge-Seilforwarder) ist bei den meisten Kategorien gleich wie beim Szenario 1 (Kapitel 4.2.4.1) am positivsten zu beurteilen. Bei diesen Bedingungen werden pro Festmeter frei Forststraße 4,6 kg CO<sub>2</sub> äquivalent freigesetzt.

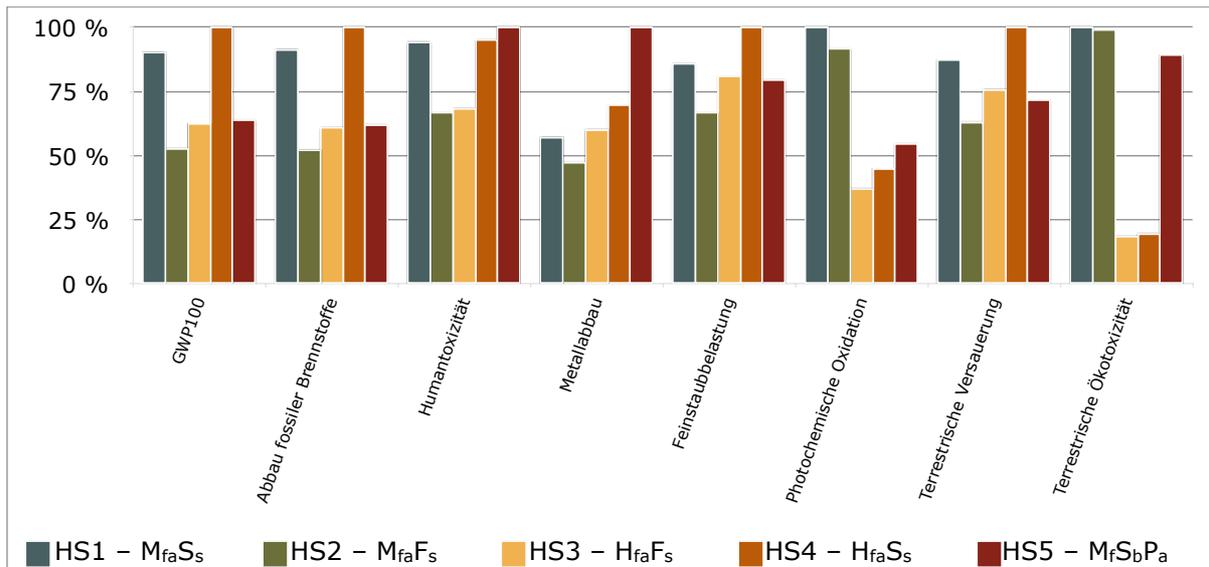


Abbildung 16: Relative Ergebnisse – Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände

#### 4.2.4.3 Szenario 3: Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad

Szenario 3 simuliert eine Holzernte im Übergangsbereich von Schlepper- zu Seilgelände bei 40% Hangneigung und einem hohen Erschließungsgrad, die Rückedistanz beträgt somit 60 m. Das Baumvolumen wird mit 0,872 m<sup>3</sup> (BHD 30 cm) angenommen.

Die Kombination von hohem Baumvolumen und der niedrigen Rückedistanz wirkt sich positiv auf die Umwelteinwirkungen aus (Tabelle 35). Das **Holzerntesystem 2** hat hier den niedrigsten CO<sub>2</sub> äqu. Ausstoß im Vergleich zu den anderen Szenarien (Kapitel 4.2.4). 4,3 kg CO<sub>2</sub> äqu. werden pro bereitgestellten Festmeter emittiert. Mit 9,7 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> ist das GWP(100) bei der Fällung und Aufarbeitung und Rückung mit Seilgerät im Sortimentsverfahren in diesem Modell am höchsten.

Tabelle 35: LCIA Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>HS 1</b>	<b>HS 2</b>	<b>HS 3</b>	<b>HS 4</b>	<b>HS 5</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	7,844	4,272	6,160	9,732	6,484	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	2,692	1,567	2,179	3,304	2,138	kg Öl äqu.
Humantoxizität	0,752	0,514	0,653	0,891	0,948	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,257	0,201	0,316	0,372	0,521	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,011	0,008	0,011	0,014	0,011	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,082	0,073	0,036	0,045	0,059	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,025	0,017	0,025	0,033	0,025	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,006	0,002	0,002	0,007	kg 1,4-DCB äqu.

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid; HS 1-5 = Holzerntesysteme*

Die Reihung der einzelnen Holzerntesysteme verhält sich gleich wie bei der Endnutzung in Szenario 2 (Kapitel 4.2.4.2). Lediglich bei der Feinstaubbelastung kommt es zu einer anderen Anordnung der Systeme (Abbildung 17). Hier ist das **Holzerntesystem 4** (Seilharvester-Seilgerät) dasjenige Erntesystem, welches die meisten feindispersen Schwebstoffe produziert. Bezüglich dieser Wirkungskategorie verbessert sich das **Holzerntesystem 1** (Motorsäge-Seilgerät) und ist vor der Seilharvester- und Seilforwarder-Kombination zu sehen. Die Wirkungskategorie Terrestrische Ökotoxizität ist bei dem **Holzerntesystem 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) am schlechtesten.

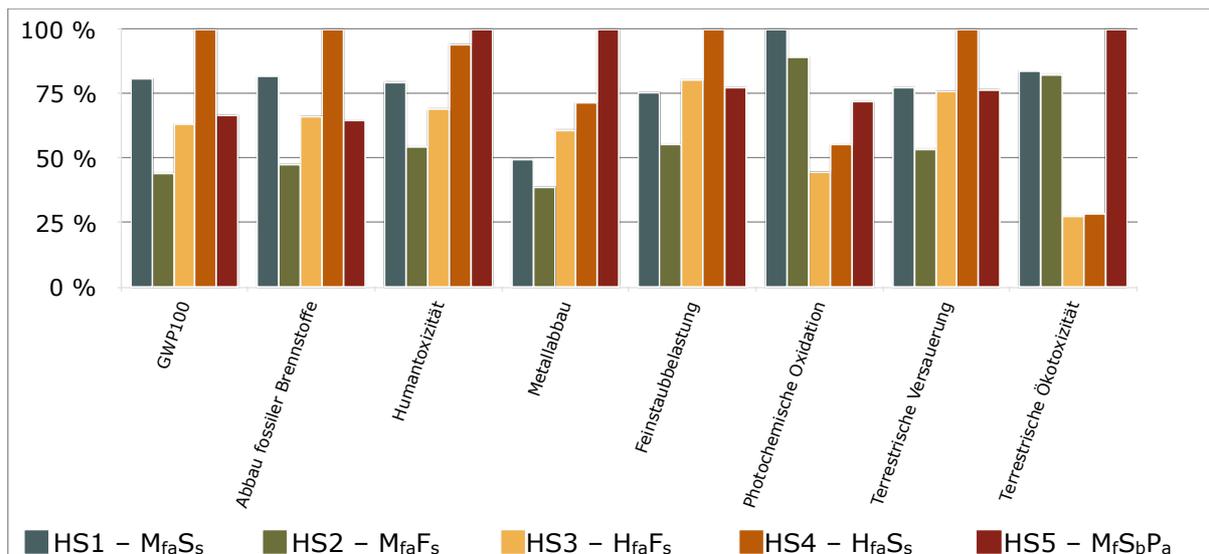


Abbildung 17: Relative Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad

#### 4.2.4.4 Szenario 4: Holzernte in beginnendem Seilgelände und niedrigem Erschließungsgrad

Bei diesem Szenario bleiben die Parameter Baumvolumen (0,872 m<sup>3</sup>) und die Rückegassenneigung (40%) wie bei Szenario 3 (Kapitel 4.2.4.3) konstant. Die Rückedistanz beträgt 800 m. Nun ist das **Holzerntesystem 2** (Motorsäge-Seilforwarder) nicht mehr am positivsten zu bewerten und das GWP(100) ist im Vergleich zu Szenario 3 um 58% höher (Tabelle 36). Auch die anderen Systeme 1, 3 und 4 weisen zumindest eine Erhöhung des Klimaerwärmungspotentials um 42% auf. Lediglich das **Holzerntesystem 5**, die Rückung im Baumverfahren und anschließender Aufarbeitung mit Prozessor, steigt um weniger, nämlich um 23% an und ist mit 8,4 kg CO<sub>2</sub> äqu. pro bereitgestellten Festmeter das Holzerntesystem mit dem geringsten GWP(100).

Tabelle 36: LCIA Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und niedrigem Erschließungsgrad

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>HS 1</b>	<b>HS 2</b>	<b>HS 3</b>	<b>HS 4</b>	<b>HS 5</b>	<b>Einheit m<sup>-3</sup></b>
Klimaerwärmungspotential (GWP100)	18,646	8,806	10,695	20,534	8,380	kg CO <sub>2</sub> äqu.
Abbau fossiler Brennstoffe	6,378	1,931	2,543	6,990	2,760	kg Öl äqu.
Humantoxizität	1,691	0,948	1,087	1,830	1,220	kg 1,4-DCB äqu.
Metallabbau	0,617	0,444	0,559	0,732	0,679	kg Fe äqu.
Feinstaubbelastung	0,026	0,016	0,020	0,029	0,015	kg PM10 äqu.
Photochemische Oxidation	0,130	0,102	0,065	0,093	0,069	kg NMVOC
Terrestrische Versauerung	0,061	0,034	0,041	0,068	0,032	kg SO <sub>2</sub> äqu.
Terrestrische Ökotoxizität	0,006	0,006	0,002	0,003	0,008	kg 1,4-DCB äqu.

*CO<sub>2</sub> = Kohlenstoffdioxid; 1,4-DCB = Dichlorbenzol; U-235 = Uranium-235; Fe = Eisen; PM10 = feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer; NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid; HS 1-5 = Holzerntesysteme*

Auch die relative Reihung der Holzerntesysteme bei einem niedrigen Erschließungsgrad ändert sich wie folgt (Abbildung 18). Durch die niedrige Erhöhung des Klimaerwärmungspotentials des **Holzerntesystem 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) ist dieses System nun als bestes einzustufen. Mit einer Differenz von 0,43 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup> ist die Ernte mit Motorsäge und Seilgerät im Sortimentsverfahren als zweitbestes zu werten. Das **Holzerntesystem 4** (Seilharvester-Seilgerät) ist weiterhin am kritischsten zu sehen. Auch bei den Wirkungskategorien Abbau fossiler Brennstoffe, Humantoxizität, Metallabbau, Feinstaubbelastung, Photochemische Oxidation und Terrestrische Versauerung kommt es zu einer Verbesserung bei dem **Holzerntesystem 5** (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor).

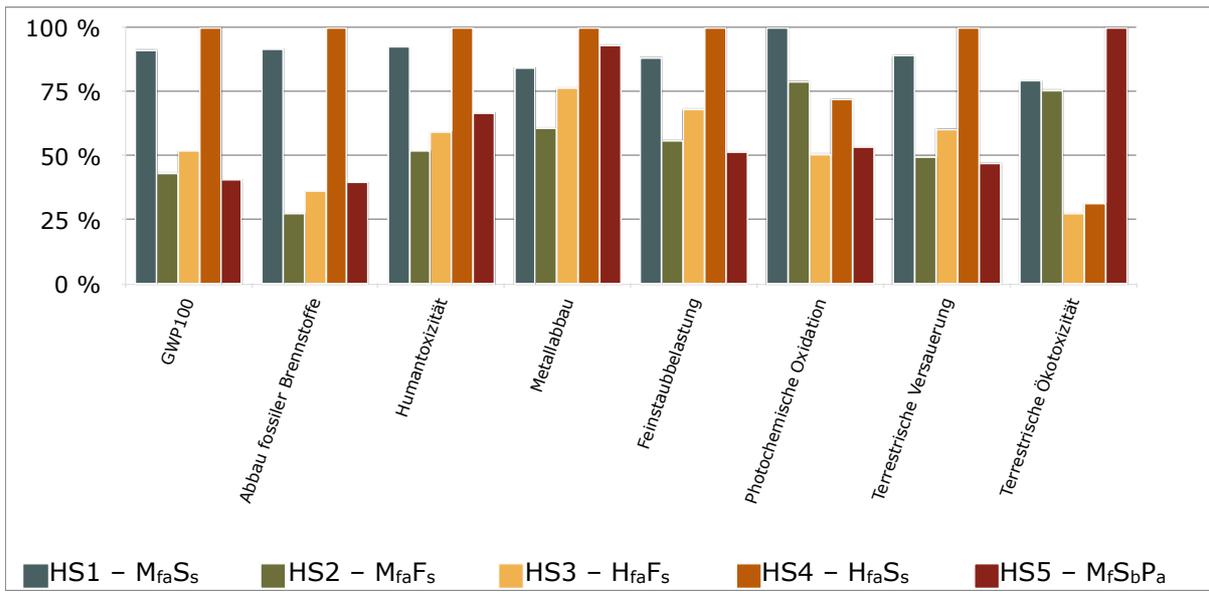


Abbildung 18: Relative Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und niedrigem Erschließungsgrad

## 5 Schlussfolgerungen und Auswertungen

Die Holzernte im Gebirge mit Motorsäge, Seilharvester, Seilgerät und Seilforwarder ist mit mehreren Umweltwirkungen verbunden. Die Umweltbelastung des geernteten Festmeters, bereitgestellt auf der Forststraße, sinkt mit zunehmender Produktivität des Erntesystems. Je größer das Baumvolumen ist, desto geringer sind die Umweltbelastungen pro Festmeter (Kapitel 4.2.3). Auch eine geringere Rückedistanz bzw. Hangneigung wirken sich positiv auf alle Systeme aus (Kapitel 4.2.1–4.2.2). Die Erkenntnis von KNECHTLE (1998), dass die Umweltauswirkungen der Holzernte, vor allem vom Input Treibstoffverbrauch und vom Output Produktivität abhängen, konnten in dieser Arbeit bestätigt werden.

Bei Durchforstungseingriffen in Steilgelände ist aus umweltverträglicher Sicht die Fällung mit Motorsäge und anschließender Rückung mit Seilforwarder im Sortimentsverfahren zu empfehlen. Vor allem bei niedrigen Durchmesserklassen ist die Umwelteinwirkung durch die Rückung im Baumverfahren mittels Seilgerät und anschließender Aufarbeitung mit einem Prozessor am kritischsten zu sehen (Kapitel 4.2.4.1).

Bei Endnutzungen im Steilgelände (Kapitel 4.2.4.2) ist die Rückung mit Seilgerät im Sortimentsverfahren mit höheren Umwelteinwirkungen im Vergleich zu den anderen Systemen verbunden.

Die Rückedistanz (Kapitel 4.2.2) hat auf das Holzerntesystem 5 (Motorsäge-Seilgerät-Prozessor) den geringsten Einfluss. Obwohl die Rückung im Sortimentsverfahren mit Seilforwardern in den meisten Fällen vorzuziehen ist, steigt hier vor allem das Klimaerwärmungspotential im Vergleich zu den anderen Holzerntesystemen am stärksten an, wenn die Rückedistanz erhöht wird.

Der Einsatz von Motorsägen bei der Fällung und Aufarbeitung spielt vor allem bei der Wirkungskategorie Photochemische Oxidation eine große Rolle und wirkt sich wesentlich auf diese aus. Bei allen anderen untersuchten Kategorien ist die motormanuelle Fällung, der hochmechanisierten Fällung mit Seilharvester vorzuziehen.

Das Baumvolumen (Kapitel 4.2.3) hat auf alle Systeme einen entscheidenden Einfluss auf die Umwelteinwirkung pro Festmeter. Die Fällung und Aufarbeitung mit dem Seilharvester verbessert sich durch eine Erhöhung des BHDs im Vergleich zu den anderen Systemen überproportional.

Bei der Ernte im Übergangsbereich Schlepper- zu Seilgelände, bei einer Rückedistanz von 120 m und einem Baumvolumen von  $0,9 \text{ m}^3$  werden je nach Erntesystem zwischen 4,64 und 10,61 kg CO<sub>2</sub> äqu.  $\text{m}^{-3}$  freigesetzt. Aus der europaweiten Studie von SCHWAIGER und ZIMMER (2001) wurde ein Klimaerwärmungspotential für die Fällung, Aufarbeitung und Rückung (beinhaltet auch flaches Gelände) in Österreich von 3,54 kg CO<sub>2</sub> äqu.  $\text{m}^{-3}$  für Fällen und Rücken ermittelt. In Schweden, wo vor allem vollmechanisierte Systeme zum Einsatz kommen, wurden 4,38 kg CO<sub>2</sub> äqu.  $\text{m}^{-3}$  berechnet. Wenn man das günstigste Holzerntesystem im Steilgelände, die Fällung und Aufarbeitung mit Motorsäge und anschließender Rückung mit Seilforwarder im Sortimentsverfahren vergleicht, ist dieses Erntesystem um 1,1 kg CO<sub>2</sub> äqu. (Österreich) und 0,26 kg CO<sub>2</sub> äqu. (Schweden) höher.

Die Wertung, beziehungsweise die Gewichtung von den relevanten Wirkungskategorien würde ermöglichen, konkrete Benchmarks für forstwirtschaftliche Tätigkeiten zu entwickeln. Dies würde die Möglichkeit bieten, Holzerntesysteme untereinander und praxisorientiert bewerten zu können.

Durch die Extrapolationen der Erntemaschinen zu seilgestützten Maschinen in dieser Arbeit, werden reine Massenunterschiede betrachtet. Es kommt jedoch zu keiner Differenzierung der verbauten Materialien. Hier würden maschinenbasierte Datensätze für Erntemaschinen im Gebirge dienlich sein, um die speziellen Materialien der Seilunterstützung aufzuzeigen. Zusätzlich stellt sich die Frage, was mit den Maschinen nach der angenommenen Nutzungsdauer weiter geschieht, um einen „Gradle to grave“- Ansatz berechnen zu können.

Die Ökobilanzierung ist ein gutes Tool, um komplexe forstwirtschaftliche Systeme und deren Umweltauswirkungen, abschätzen zu können. Durch die Bilanzierung wird ermöglicht, Verbesserungspotential beim Umgang mit Ressourcen darzulegen.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist eine vergleichende Ökobilanzierung von Holzern-tesystemen in Steillagen. Es kommt zu einer Bewertung von Motorsäge, Seilharvester, Seilgerät und Seilforwarder bei unterschiedlichen Gegebenheiten der Holzernte im Gebirge. Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine Öko-bilanzierung die Umwelteinwirkungen aufzuzeigen, die bei der Fällung, Aufarbeitung und Rückung eines Festmeters entstehen und Möglichkeiten der effizienteren Einsatzplanung darzulegen.

Mit der Software openLCA (Version 1.7) der Datenbank Ecoinvent 3.4 und aktuellen Studien wurden fünf verschiedene Holzernsysteme modelliert. Die Systeme wurden bezüglich Rückedistanz, Hangneigung und Baumvo-lumen untersucht und verglichen. Dazu wurden die Wirkungskategorien, das Klimaerwärmungspotential, Humantoxizität, Metallabbau, Feinstaubbelastung, photochemische Oxidation, terrestrische Versauerung und ter-restrische Ökotoxizität mit dem Methodenpaket ReCiPe2016 Midpoint (H) berechnet.

Das Klimaerwärmungspotential für die Fällung, Aufarbeitung und Rückung eines Festmeters frei Forststraße liegt bei den einzelnen Szenarien und den Holzernsystemen zwischen 4,3 und 27,9 kg CO<sub>2</sub> äqu. m<sup>-3</sup>. Die Um-weltauswirkung der Erntesysteme hängt vor allem von der Produktivität und dem Treibstoffverbrauch ab. Hier hat das Baumvolumen den größten Effekt und zeigt einen positiven Trend bei starken Durchmesserklassen. Bei der Erhöhung der Rückedistanz, beziehungsweise der Hangneigung verschlechterten sich die unterschiedlichen Wirkungskategorien.

Die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung und anschließende Rückung mit Seilforwardern im Sortimentsverfahren ist bei den meisten Szenarien als günstigstes zu sehen. Vor allem bei Durchforstungseingriffen liegt die-ses Holzernsystem bei den meisten Wirkungskategorien niedriger als die Rückung mit Seilgerät. Bei der Erhöhung der Rückedistanz verschlechtert sich jedoch die bodengestützte Rückung im Vergleich zu Seilgeräten stark.

Bei dem Einsatz von Motorsägen bei der Fällung und Aufarbeitung ist die Wirkungskategorie photochemische Oxidation im Vergleich zu den anderen

Erntesystemen um bis zu 63% höher. Bei allen anderen Kategorien ist die motormanuelle Fällung, der mechanisierten Fällung mit Seilharvestern vorzuziehen.

Die Einflüsse der Klimaänderung und eine mögliche Zunahme von Schadholzmengen bedürfen einer raschen Aufarbeitung, um ein effizientes Forstschutzmanagement betreiben zu können. Das erhöhte Arbeitsrisiko ist hier bei der Einsatzplanung zu beachten. Hochmechanisierte Ernteverfahren bieten einerseits die Möglichkeit der schnellen Aufarbeitung und erhöhen andererseits die Sicherheit. Daher ist anzunehmen, dass auch in Gebirgswäldern in der Zukunft, der Einsatz von Seilharvester und Seilforwarder, stärker forciert werden könnte. Dies zeigt die Wichtigkeit und den Bedarf von weiteren Ökobilanzierungen in diesem Bereich.

Um Umwelteinwirkungen, hier vor allem die Reduktion von Treibhausgasen, minimieren zu können, sollte man den Gedanken von Förderungen günstiger Ernteverfahren in speziellen Lagen überdenken.

## 7 Literaturverzeichnis

- ALBRECHT S.; GOTTSCHICK M.; SCHÖRLING M. und STIRN S. (2012): Bioökonomie am Scheideweg. Industrialisierung von Biomasse oder nachhaltige Produktion? Bio-Economy at a Crossroad. GAIA 21/1, 33–37.
- ALBRECHT P.G. (2018): Motorsäge 4.0 – von der klassischen Produktivitätsstudie zur elektronischen Treibstoff- und Laufzeitenanalyse. Diplomarbeit; Universität für Bodenkultur. Department für Wald- und Bodenwissenschaften; Institut für Forsttechnik, Wien; 80 Seiten.
- BLATTERT C.; LEMM R.; THEES O.; LEXER M.J.; HANEWINKEL M. (2017): Management of ecosystem services in mountain forests: Review of indicators and value functions for model based multi-criteria decision analysis. Ecological Indicators 79, 391–409.
- BRANDTNER N. (2018): Produktivitätsevaluierung des seilgestützten Harvesters John Deere 1170E. Diplomarbeit; Universität für Bodenkultur Wien Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Forsttechnik; 55 Seiten.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS (2018): Holzeinschlagsmeldung über das Jahr 2017. Abteilung III/1 – Waldpolitik und Waldinformation. Eigenverlag, Stubenring 1, 1010 Wien.
- DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. DIN Deutsches Institut für Normung. DIN, Deutsches Institut für Normung e. V.- Berlin; Wien; Zürich; Beuth, 40 Seiten.
- DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. DIN Deutsches Institut für Normung. DIN, Deutsches Institut für Normung e. V.- Berlin; Wien; Zürich; Beuth.

- DI NOI C.; CIROTH A. und SROCKA M. (2017): openLCA 1.7, Comprehensive User Manual. GreenDelta GmbH, Müllerstraße 135, 13349 Berlin, Deutschland; 104 Seiten.
- ENACHE A.; KÜHMAIER M.; VISSER R. und STAMPFER K. (2016): Forestry operations in the European mountains: a study of current practices and efficiency gaps. Scandinavian journal of forest research Vol. 31, No. 4, 412–427.
- ENACHE A. (2016): Multi-criteria efficiency gaps analysis of forest road networks and harvesting systems in the European mountains. Wien: Diss. Universität für Bodenkultur.
- ENGEL M. (2016): Treibstoffverbrauche bei der Holzernte. Interne Datenerhebung der Österreichischen Bundesforste; unveröffentl. Skript.
- ERIKSSON M. und LINDROOS O. (2014): Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. Int. J. For. Eng. 25, 179–200.
- ERNI V., FRUTIG F., LEMM R., OSWALD K. und THEES O. (2000): Produktivitätsmodelle für Verjüngung, Jungwaldpflege und Holzernte mit Hilfe komponentenbasierter Softwaretechnologie. Schlussbericht zum Projekt Nr.98.03 des Wald- und Holzforschungsförderungs fonds. Forschungsanstalt WSL; 71 Seiten.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030. Brüssel, den 22.1.2014 COM(2014) 15 final.
- FEDRAU S. (2000): Erstellung einer Sachbilanz für das Forstamt Kempten. München: Diplomarbeit Holzforchung München; Technische Universität München.

- FRÜHWALD A. (1995): Life-Cycle Analysis – A challenge for forestry, introduction, proceedings of the international workshop organised by the European Forest Institute and the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, 10. Hamburg.
- de la FUENTE T.; ATHANASSIADIS D.; GONZÁLEZ-GARCÍA S. und NORD-FJELL T. (2017): Gradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. *Journal of Cleaner Production* 143, 866–881.
- GEODKOPP M.; HEIJUNGS R.; HUIJBREGTS M.; SCHRYVER A.D.; STRUJIS J. und VAN ZELM R. (2013): ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition, Niederlande.
- GERASIMOV Y.; SENKIN V. und VÄÄTÄINEN K. (2012): Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the northern European part of Russia. *European Journal of Forest Research*, 131 (3), 647–654.
- GRUBER P. (2018): Treibstoffverbrauch Seilforwarder. Universität für Bodenkultur. Department für Wald- und Bodenwissenschaften; Institut für Forsttechnik, Wien; unveröffentl. Skript.
- HEINIMANN H. (1998): Ökobilanzierung von forstlichen Produktionssystemen-Beziehungen zu Umweltmanagementsystemen und Übersicht über das methodische Konzept. *Schweiz. Z. Forstwes.* 150 (1999) 3, 73–80.
- HITTENBECK J. (2011): Überprüfung von Einsatzgrenzen für die hochmechanisierte Holzernte in geeignetem Terrain. *AFZ-Der Wald* 5, 30–33.
- HOLZFEIND T. (2017): Produktivitätsevaluierung des seilgestützten Forwarders John Deere 1110E. Diplomarbeit; Universität für Bodenkultur Wien Department für Wald- und Bodenwissenschaften Institut für Forsttechnik; 58 Seiten.

- HOLZLEITNER F.; STAMPFER K. und VISSER. (2011): Utilization rates and cost factors in timber harvesting based on long-term machine data. Croatian J. For. Eng. 32, 501–508.
- HUIJBREGTS M. (2018): Keynot Speaker; SETAC Europe, 24<sup>th</sup> LCA Symposium. Uncertainty and variability in environmental life cycle assessment. 25. September, Wien.
- HUNKLER D. (2016): Book review. KLÖPFFER W. und GRAHL B.: Life Cycle Assessment (LCA): A guide to best practice. Int. J. Cycle Assess 21. 1063–1066, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KELLENBERGER (2010): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; power saw production, without catalytic converter – RER; Data generator; 3 Seiten.
- KNECHTLE N. (1997): Materialprofile von Holzerntesystemen als Ausgangspunkt für Ökoinventare. Diplomarbeit ETH-Zürich, Department für Wald und Holzforschung; 66 Seiten.
- KNECHTLE N. (1998): Materialprofile von Holzerntesystemen als Ausgangspunkt für Ökoinventare. Schweiz. Z. Forstwes. 150 (1999) 3, 81–87.
- KLEIN D.; SCHULZ C. und WEBER-BLASCHKE G. (2015): 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. Int. J. Life Cycle Assess 20, 556–575.
- KLÖPFFER W. und GRAHL B. (2009): Ökobilanz (LCA) - Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 438 Seiten.
- LINDNER M. und SUOMINEN T. (2017): Towards a sustainable bioeconomy, Scandinavian Journal of Forest Research, 32, 549–550.

- LOREK S. und SPANGENBERG J.H. (2013): Sustainable consumption within a sustainable economy - beyond green growth and green economies. Sustainable Europe Research Institute, Germany. Journal of Cleaner Production 63, 33–44.
- MIRABELLA N.; CASTELLANI V. und SALA S. (2014): Forestry operations in the alpine context. Life cycle assessment to support the integrated assessment of forestry wood short supply chain. Int J Life Cycle Assess 19. 1524–1535, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- ÖBF - ÖSTERREICHISCHE BUNDESFORSTE (2017): Energieaudit, Treibstoffverbrauch bei der Holzernte von 2016–2017; unveröffentl. Skript.
- ÖNORM L1020 (1997): Holzernte – Benennungen und Definitionen. Österreichisches Normungsinstitut; e. V., 1021 Wien, 5 Seiten.
- PÄIVINEN R.; LINDNER M.; ROSÉN K. und LEXER M.J. (2012): A concept for assessing sustainability impacts of forestry-wood chains. Eur. J. Forest. Res. 131, 7–9; Springer-Verlag.
- PEFC (2001): Auf die Herkunft kommt es an. Broschüre, XPrint Medienproduktion, Verlagsgruppe Mainz GmbH Aachen.
- PLESSL W. (2013): Maschinendatenbasiertes Produktivitäts- und Treibstoffverbrauchsmodell für Harvester. Diplomarbeit; Universität für Bodenkultur Wien Department für Wald- und Bodenwissenschaften Institut für Forsttechnik; 44 Seiten.
- PROTO A.; MACRÌ G.; VISSER R.; HARRILL H.; RUSSO D. und ZIMBALLATI G. (2018): Factors affecting forwarder productivity. European Journal of Forest Research 137, 143–151. Springer-Verlag GmbH Germany.
- SCHWAIGER H. und ZIMMER B. (2001): A comparison of fuel consumption and greenhouse gas emissions from forest operations in europe. In: KARJALAINEN T.; ZIMMER B.; BERG S.; WELLING J.; SCHWAIGER H.; FINÉR L. und CORTIJO P. (Hrsg.): Energy, carbon and other material flows in the life cycle assessment of forestry and forest products. Discussion Paper 10. 33–50, European Forest Institute.

- SCHWEINLE J. und THOROE C. (1997): Zur Ökobilanzierung der Rohholzproduktion in Deutschland. *Forstarchiv* 52, 110–116.
- SCHWEINLE J. und THOROE C. (2001): Vergleichende Ökobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben, Mitteilung der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg; 87 Seiten.
- SCHWEINLE J.; WERNER F. und NEBEL B. (2007): Wood and other renewable resources. *Int. J. LCA* 12 (7), 462–463. Verlagsgruppe: Hüthig Jehle Rehm.
- SONNE E. (2006): Greenhouse Gas Emissions from Forestry Operations: A Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Quality* 35. Natural Science Collection 1439–1450.
- STAMPFER K. (2002): Einsatzmöglichkeiten von Harvestern im Steilgelände. *Bündnerwald* 55 (4), 28–35.
- STAMPFER K. und LIMBECK-LILIENAU B. (2003): Computergestützte Entscheidungshilfe für Nutzungseingriffe im Seilgelände. Modelle für die Seilrückung im Gebirge. Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen; Institut für Waldbau. Universität für Bodenkultur, Wien; 5 Seiten.
- STAMPFER K., LIMBECK-LILIENAU B., KANZIAN C. und VIERTLER K. (2003): Baumverfahren im Seilgelände – Verfahrensbeispiele. Eigenverlag: Kooperationsabkommen Forst-Papier-Platte Wien, 27 Seiten.
- STAMPFER K. und STEINMÜLLER T. (2004): Harvester und Seilgerät am Steilhang – Valmet 911.1 X3 M und Syncrofalke. Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien; 25 Seiten.
- STAMPFER K. (2016): Vorlesungsunterlagen zu Forstlichem Ingenieurwesen. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur; Wien.

- STRAKA T.J. und LAYTON P.A. (2010): Natural resources management: Life Cycle Assessment and forest certification and sustainability issues. Department of forestry and natural resources, Clemson University. Sustainability 2, 604–623.
- THE MONTRÉAL PROCESS (2015): Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests. 5 Edition, International Forestry Cooperation Office, Forestry Agency.
- VISSER R. und STAMPFER K. (2015): Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: a review. Croatia Journal of Forest Engineering. 36 (2): 321–331.
- WALDINVENTUR (2011): BFW Praxis Information; Waldinventur 2007/09. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft. Nr.24; Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1131 Wien, Österreich.
- WEGENER G. und ZIMMER B. (1997): Die Ökobilanzierung liefert gute Argumente für eine vermehrte Holznutzung. Holzzentralblatt 123, 89; 1345–1346.
- WERNER F. (2013a): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; power sawing, without catalytic converter – RER; Data generator; 6 Seiten.
- WERNER F. (2013b): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; yarding, mobile cable yarder on trailer – RER; Data generator; 7 Seiten.
- WERNER F. (2013c): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; forwarding, forwarder – RER; Data generator; 6 Seiten.
- WERNER F. (2013d): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; harvesting, forestry harvester – RER; Data generator; 7 Seiten.
- WERNER F. (2013e): Ecoinvent 3.4 dataset documentation; yarding and processing, mobile cable yarder on truck – RER; Data generator; 7 Seiten.

- WERNET G.; BAUER C.; STEUBING B.; REINHARD J.; MORENO-RUIZ E. und WEIDEMA B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 13 Seiten.
- WINKLER C. (1997): Ökoinventare von Holzerntesystemen. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule; Forstliches Ingenieurwesen. Interne Berichte Nr.7; 51 Seiten.
- ZIMMER B. und WEGENER G. (1997): Ökobilanzierung – Fundament für eine zukunftsfähige Entwicklung in der Forst- und Holzwirtschaft. In: BERGER V.; FÄHSER L.; LUHMANN H.; SPAHN A.; WEGENER G. und ZIMMER B. (Hrsg.): Forstwirtschaft mit Zukunft. Integration von Ökologie, Ökonomie und Arbeit im ländlichen Raum, 44–74. Verband Weihenstephaner Forstingenieure.

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Motorsäge und Harvester im Vergleich.....	10
Tabelle 2: Forwarder und Seilgerät im Vergleich .....	11
Tabelle 3: Treibstoffverbrauch und Emissionen von Holzernteprozessen .....	13
Tabelle 4: Treibstoffverbrauch bei der Holzernte in Europa .....	14
Tabelle 5: Treibhausgasemissionen bei der Holzernte in Europa .....	15
Tabelle 6: Prozessdaten I – Fällen und Aufarbeiten mit MOTORSÄGE .....	27
Tabelle 7: Prozess I – Input- und Outputliste .....	28
Tabelle 8: Prozessdaten II – Rücken mit SEILGERÄT im Sortimentsverfahren .....	29
Tabelle 9: Prozess II – Input- und Outputliste .....	30
Tabelle 10: Prozessdaten III – Rücken mit SEILFORWARDER im Sortimentsverfahren ...	31
Tabelle 11: Prozess III – Input- und Outputliste .....	33
Tabelle 12: Prozessdaten IV – Fällen und Aufarbeiten mit SEILHARVESTER .....	34
Tabelle 13: Prozess IV – Input- und Outputliste.....	35
Tabelle 14: Prozessdaten V – Fällen mit MOTORSÄGE.....	36
Tabelle 15: Prozess V – Input- und Outputliste .....	37
Tabelle 16: Prozessdaten VI – Rücken mit SEILGERÄT und Aufarbeiten mit integriertem Prozessor .....	38
Tabelle 17: Prozess VI – Input- und Outputliste.....	39
Tabelle 18: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 1 .....	49
Tabelle 19: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 2 .....	50
Tabelle 20: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 3 .....	51
Tabelle 21: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 4 .....	52
Tabelle 22: Einfluss der Rückegassenneigung auf das Holzerntesystem 5 .....	53
Tabelle 23: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 1 .....	55
Tabelle 24: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 2 .....	56

Tabelle 25: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 3 .....	57
Tabelle 26: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 4 .....	58
Tabelle 27: Einfluss der Rückedistanz auf das Holzerntesystem 5 .....	59
Tabelle 28: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 1.....	61
Tabelle 29: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 2.....	62
Tabelle 30: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 3.....	63
Tabelle 31: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 4.....	64
Tabelle 32: Einfluss der Baumvolumina auf das Holzerntesystem 5.....	65
Tabelle 33: LCIA Ergebnisse – Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände .....	67
Tabelle 34: LCIA Ergebnisse – Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände .....	69
Tabelle 35: LCIA Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad .....	71
Tabelle 36: LCIA Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und niedrigem Erschließungsgrad .....	73

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz.....	18
Abbildung 2: Beispiel eines Produktsystems .....	19
Abbildung 3: Bestandteile der Wirkungsabschätzung .....	21
Abbildung 4: Systemgrenze der Ökobilanzierung – Holzernte in Steillagen.....	24
Abbildung 5: Holzerntesysteme in Steillagen .....	25
Abbildung 6: Prozessbeiträge der Holzerntesysteme – Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	42
Abbildung 7: Motorsäge – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	43
Abbildung 8: Seilharvester – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	44
Abbildung 9: Seilgerät – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	45
Abbildung 10: Seilgerät mit integriertem Prozessor – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	46
Abbildung 11: Seilforwarder – Absolute (links) und relative (rechts) Beiträge zum Klimaerwärmungspotential (GWP100) .....	47
Abbildung 12: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der <b>Rückegassenneigung</b> .....	54
Abbildung 13: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der <b>Rückedistanz</b> .....	60
Abbildung 14: Klimaerwärmungspotential (GWP100) bei der Holzernte von einem Festmeter in Abhängigkeit der <b>Baumvolumina</b> .....	66
Abbildung 15: Relative Ergebnisse – Durchforstung in maximal befahrbarem Gelände...68	
Abbildung 16: Relative Ergebnisse – Endnutzung in maximal befahrbarem Gelände .....	70
Abbildung 17: Relative Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und hohem Erschließungsgrad .....	72

Abbildung 18: Relative Ergebnisse – Holzernte in beginnendem Seilgelände und  
niedrigem Erschließungsgrad .....74

## 10 Formelverzeichnis

Formel 1: Produktivität .....	8
Formel 2: Verhältnis Baum- zu Stückvolumen .....	26
Formel 3: Produktivitätsmodell Prozess I $M_{fa}$ .....	29
Formel 4: Produktivitätsmodell Prozess II $S_s$ .....	31
Formel 5: Produktivitätsmodell III $F_s$ .....	32
Formel 6: Treibstoffverbrauchsmodell Prozess III $F_s$ .....	32
Formel 7: Produktivitätsmodell Prozess IV $H_{fa}$ .....	34
Formel 8: Treibstoffverbrauchsmodell Prozess IV $H_{fa}$ .....	35
Formel 9: Produktivitätsmodell Prozess V $M_f$ .....	36
Formel 10: Produktivitätsmodell Prozess VI $S_bP_a$ .....	40



