

INFOR-Projekt Nr. 107

Intensivierung der Industrieholzbereitstellung: Verfahrenstechnik, Produktivität, Kosten

Schlussbericht

August 2008

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft

Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker
Projektleiter:
Dipl.-Forstw. Tobias Cremer

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

**Intensivierung der
Industrieholzbereitstellung:
Verfahrenstechnik, Produktivität, Kosten**

INFOR-Forschungsprojekt Nr. 107

**Gefördert durch den
Verband deutscher Papierfabriken e.V. (VDP)**



Bearbeitung: Tobias Cremer

Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker

Freiburg im Breisgau, im August 2008

Danksagung

Im vorliegenden Projektbericht sind die Ergebnisse des Projekts „Intensivierung der Industrielholzbereitstellung: Verfahrenstechnik, Produktivität, Kosten“ (INFOR-Forschungsprojekt Nr. 107) zusammengefasst. Das Projekt wurde durch den Verband deutscher Papierfabriken e.V. (VDP) sehr maßgeblich finanziell gefördert. Für diese Unterstützung möchten wir uns herzlich bedanken.

Den Mitgliedern des projektbegleitenden Lenkungsausschusses, den Herren Otto Bruder, Heinz-Peter Drieschmanns, Dr. Gerhard Gabriel, Helfried Müller, Wolf-Dietrich Ringwald, Stefan Seidler und Martin Stöhr danken wir für die konstruktive Zusammenarbeit. Mit ihren anregenden Diskussionen und Hinweisen bei der Analyse und Bewertung der Versuchsergebnisse haben sie maßgeblich zum Projekterfolg beigetragen. Frau Edelgard Kloß sei sehr für die gute Betreuung und Beratung während der Durchführung des Projekts gedankt.

Für das Überlassen von Leistungsnachweisen ihrer Maschinenbuchführung, ohne die das Projekt nicht in der vorliegenden Form durchgeführt hätte werden können, bedanken wir uns bei der Thurn und Taxis Waldpflege GmbH, dem Forstlichen Maschinenbetrieb Ochsenberg sowie den Niedersächsischen Landesforsten.

Herrn Dr. Roberto Scoz und Herrn Dr. Rüdiger Mutz danken wir für die gute statistische Beratung und Betreuung.

Darüber hinaus sei darauf hingewiesen, dass dieses Projekt Bestandteil der Dissertation von Herrn Tobias Cremer ist, die im August 2008 zur Begutachtung eingereicht wurde.

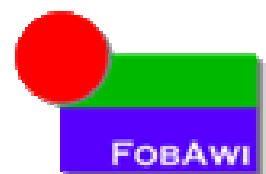
Freiburg, im August 2008

Tobias Cremer

Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker

Kontaktadresse

Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Werthmannstraße 6
79085 Freiburg
Tel.: 0761/203-3764
Fax: 0761/203-3763
Email: institut@fobawi.uni-freiburg.de



Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
TABELLENVERZEICHNIS	X
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2 ZIELSETZUNG	3
3 STAND DES WISSENS.....	4
3.1 Die Metaanalyse	4
3.1.1 Das Konzept der Metaanalyse	4
3.1.2 Metaanalysen in der Forstwissenschaft	5
3.2 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen	6
3.2.1 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen auf der Basis von Metaanalysen	6
3.2.2 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen auf Einzelbaumbasis	8
3.2.2.1 Zusammenstellungen von Produktivitätsmodellen für verschiedene Verfahren	8
3.2.2.2 Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz.....	10
3.2.2.3 Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz.....	13
3.2.2.4 Produktivitätsmodelle für das Hacken von Energieholz	14
4 MATERIAL UND METHODEN	16
4.1 Durchführung der Metaanalyse	16
4.1.1 Datensammlung.....	16
4.1.2 Erfasste Variablen	17
4.1.3 Untersuchte Verfahrensschritte	18
4.1.3.1 Einschlag von Rund- und Energieholz.....	18
4.1.3.2 Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Rund- und Energieholz.....	20
4.1.3.3 Rücken von Rund- und Energieholz an die Waldstraße	20
4.1.3.4 Zwischentransport von Energieholz mit einem Langholz-LKW	21
4.1.3.5 Hacken von Energieholz	23
4.1.4 Datenevaluation und Aufbereitung der Fälle.....	25
4.1.5 Datenanalyse und Auswertung der Fälle	27
4.2 Durchführung der Beispielkalkulationen	28
4.2.1 Ausgewählte Bestände und untersuchte Aushaltungsvarianten	28
4.2.2 Untersuchte Verfahren.....	30
4.2.3 Berechnung der Stückkosten	31
4.2.3.1 Aushaltungsvariante 1.....	31
4.2.3.2 Aushaltungsvariante 2.....	32

4.2.3.3	Aushaltungsvariante 3.....	34
4.2.3.4	Stundensätze zur Kalkulation der Stückkosten	37
4.2.4	Ermittlung des Nettoflächenerlöses	37
5	PRODUKTIVITÄTSMODELLE ALS ERGEBNIS DER METAANALYSE.....	39
5.1	Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz	39
5.1.1	Produktivitätsmodelle für den vollmechanisierten Einschlag von Rundholz mit einem Harvester	39
5.1.1.1	Ergebnisse der Metaanalyse.....	39
5.1.1.2	Diskussion der Produktivitätsmodelle	52
5.1.2	Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz durch Waldarbeiter im motormanuellen Verfahren.....	59
5.2	Modelle für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den Einschlag von Energieholz	65
5.2.1	Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den vollmechanisierten Einschlag von Energieholz mit einem Harvester	65
5.2.2	Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den Einschlag von Energieholz durch Waldarbeiter im motormanuellen Verfahren.....	70
5.3	Produktivitätsmodelle für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone an die Rückegasse.....	74
5.3.1	Produktivitätsmodell für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone an die Rückegasse zur Aushaltung von Rundholz durch einen Harvester	74
5.3.2	Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Energieholz aus der Zwischenzone an die Rückegasse.....	77
5.4	Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz.....	79
5.4.1	Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz mit einem Forwarder	79
5.4.2	Produktivitätsmodell für das Rücken von Rundholz mit einem Forstspezialschlepper	91
5.5	Produktivitätsmodelle für das Rücken von Energieholz	96
5.5.1	Produktivitätsmodell für das Rücken von Energieholz mit einem Forwarder	96
5.5.2	Modell zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für das Rücken von Energieholz mit einem Forstspezialschlepper.....	101
5.6	Produktivitätsmodelle für den Transport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Langholz-LKW	106
5.7	Produktivitätsmodelle für das Hacken von Energieholz	108
5.8	Bewertung der Methode der Metaanalyse zur Erstellung von Produktivitätsmodellen.....	116
5.9	Bewertung der Produktivitätsmodelle	118
6	BEISPIELKALKULATIONEN: ERGEBNISSE UND DISKUSSION	121
6.1	Produktivitäten bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln.....	122
6.2	Stückkosten für die Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln	126

6.2.1	Kostenzurechnung nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (Aushaltungsvariante 2) bzw. unter Zugrundelegung einer kalkulatorischen Produktivität (Aushaltungsvariante 3).....	126
6.2.2	Auswirkungen einer veränderten Kostenzurechnung	132
6.3	Nettoflächenerlöse bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln	138
6.4	Zusammenfassung und Bewertung der Beispielkalkulationen	142
7	ZUSAMMENFASSUNG	145
8	SUMMARY	149
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	152
9.1	Im Rahmen der Metaanalyse verwendete Quellen	152
9.2	Weitere verwendete Quellen	154
10	ANHANG	167
10.1	Histogramme und Normalverteilungsdiagramme	167
10.2	Übersicht über die Produktivitätsmodelle für die einzelnen Verfahrensschritte.....	170
10.3	Nettoflächenerlöse bei veränderten Industrieholz- und Hackschnitzelpreisen	174

Abkürzungsverzeichnis

AZ	Allgemeine Zeit	kW	Kilowatt
BHD	Brusthöhendurchmesser	m	Meter
cm	Zentimeter	MAS	Maschinenarbeitsstunde
Efm	Erntefestmeter	min	Minute
EH	Energieholz	m.R.	mit Rinde
EST	Erweiterter Sortentarif	N	Anzahl
Fm	Festmeter	NAZ	Nicht auszuwertende Zeit
GAZ	Gesamtarbeitszeit	o.R.	ohne Rinde
h	Stunde	pmh ₀	productive machine hour (ohne Störungen und Verteilzeiten)
ha	Hektar	pmh ₁₅	productive machine hour (inkl. Störungen mit einer Dauer < 15 min)
IH	Industrieholz	RAZ	Reine Arbeitszeit
IL	Industrieholz lang	Srm	Schüttraummeter
IN	Industrieholz normaler Qualität	STH	Stammholz
IS	Industrieschichtholz	t	Tonne
kg	Kilogramm	Vfm	Vorratsfestmeter
km	Kilometer		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Langholz-LKW mit eingelegter Wechselbrücke	22
Abbildung 2: Hacker mit hackereigenem Aufsattelcontainer, Einsatz auf der Rückegasse (links) oder an der Waldstraße (Mitte) und beim Überkippen der Hackschnitzel (rechts)	24
Abbildung 3: Hacken an der Waldstraße in einen landwirtschaftlichen Anhänger (Fotos: SEIDL, 2006; VELAZQUEZ, 2006)	24
Abbildung 4: Hacken an einem zentralen Platz auf einen Haufen (links) bzw. in einen landwirtschaftlichen Anhänger (rechts) (Fotos: CREMER, 2006; TEXTOR, 2005)	25
Abbildung 5: Abhängigkeit der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (1.274 Fälle)	39
Abbildung 6: Allgemeines Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz (1.133 bzw. 141 Fälle)	40
Abbildung 7: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Fichtenbeständen (Rückegassenabstand: 20 m; 825 Fälle)	52
Abbildung 8: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Kiefernbeständen (Rückegassenabstand 20 m; 324 Fälle)	53
Abbildung 9: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Laubholzbeständen (Rückegassenabstand 20 m; 84 Fälle)	53
Abbildung 10: Produktivitätsmodell für den Harvestertyp „Skogsjan“ beim Einschlag von Rundholz in Abhängigkeit von der Baumart (Rückegassenabstand 20 m)	55
Abbildung 11: Produktivitätsmodell für den Harvestertyp „Skogsjan“ beim Einschlag von Rundholz (Rückegassenabstand 20 m), im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen	56
Abbildung 12: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Fichtenbeständen (29 bzw. 25 Fälle)	59
Abbildung 13: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Kiefernbeständen (22 bzw. 16 Fälle)	61
Abbildung 14: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Laubholzbeständen (40 bzw. 32 Fälle)	62
Abbildung 15: Steigerung der Produktivität von Waldarbeitern durch einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz	63
Abbildung 16: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (13 Fälle)	65

Abbildung 17: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz.....	69
Abbildung 18: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (21 Fälle).....	70
Abbildung 19: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz.....	73
Abbildung 20: Abhängigkeit der Produktivität beim motormanuellem Fällen und Vorliefern von Rundholz mit Forstspeziialschlepper bzw. Pferd vom BHD des ausscheidenden Bestands.....	75
Abbildung 21: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (7 Fälle)	77
Abbildung 22: Abhängigkeit der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (692 Fälle)	79
Abbildung 23: Allgemeines Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (620 bzw. 72 Fälle).....	80
Abbildung 24: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (200 Fälle).....	84
Abbildung 25: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Rückegassenabstand 20 m).....	88
Abbildung 26: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen.....	89
Abbildung 27: Abhängigkeit der Produktivität von Forstspeziialschleppern beim Rücken von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (17 Fälle).....	91
Abbildung 28: Produktivitätsmodell für Forstspeziialschlepper beim Rücken von Rundholz im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen	95
Abbildung 29: Abhängigkeit der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (27 Fälle)	96
Abbildung 30: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Energieholz	100
Abbildung 31: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Forstspeziialschleppern beim Rücken von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (links) und vom Energieholzanfall je Hektar (rechts) (17 Fälle).....	102
Abbildung 32: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspeziialschleppern beim Rücken von Energieholz.....	105
Abbildung 33: Produktivitätsmodell für Langholz-LKW beim Zwischentransport von Energieholz aus Fichtendurchforstungen auf einen zentralen Hackplatz	107

Abbildung 34: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern vom BHD des ausscheidenden Bestands (links, 95 Fälle) und vom Zopfdurchmesser (rechts, 61 Fälle).....	108
Abbildung 35: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern von deren Motorleistung (76 Fälle).....	108
Abbildung 36: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern beim Hacken an der Waldstraße in einen Aufsattelcontainer von der Motorleistung des Hackers (29 Fälle).....	111
Abbildung 37: Mittlere Produktivitätswerte, ihre Standardabweichung und jeweilige Spannweite, getrennt nach Hacksystemen und Ausgangsmaterial	114
Abbildung 38: Aushaltungsvarianten 1 und 2: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz, getrennt nach Verfahrensschritten (Bestand NH 251).....	126
Abbildung 39: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln, getrennt nach Verfahrensschritten (Bestand NH 251).....	131
Abbildung 40: Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts	133
Abbildung 41: Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln, berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts	134
Abbildung 42: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Stammholz, berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts	134
Abbildung 43: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts	135
Abbildung 44: Entwicklung der Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei sich ändernden Hackschnitzelpreisen.....	136
Abbildung 45: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Harvester beim vollmechanisierten Einschlag von Rundholz	167
Abbildung 46: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Harvester beim Einschlag von Energieholz	167
Abbildung 47: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Waldarbeiter beim Einschlag von Energieholz	167
Abbildung 48: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Modell 1)	168

Abbildung 49: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Modell 2)	168
Abbildung 50: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz	168
Abbildung 51: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Energieholz	169
Abbildung 52: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Forstspezialschlepper beim Rücken von Energieholz	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Rahmen der Metaanalyse erfasste Variable	18
Tabelle 2: Untersuchte Harvestertypen, Anzahl der jeweiligen Fälle und wichtige technische Kennwerte (nach BFW, 2003 bzw. www.kwf-online.de).....	18
Tabelle 3: Untersuchte Forwardertypen, Anzahl der jeweiligen Fälle und wichtige technische Kennwerte (nach BFW, 2003 bzw. www.kwf-online.de).....	20
Tabelle 4: Untersuchte Varianten zum Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz	22
Tabelle 5: Aushaltungskriterien für die Vorkalkulation der Volumenanfälle (siehe auch LECHNER, 2007). .	28
Tabelle 6: Kennwerte der Beispielbestände für die Überprüfung der Produktivitätsmodelle	29
Tabelle 7: Verfahren, die im Rahmen der Beispielkalkulationen untersucht wurden.....	30
Tabelle 8: Stundensätze zur Kalkulation der Stückkosten (inkl. Lohn- und Lohnnebenkosten).....	37
Tabelle 9: Güteverteilung des Stamm- und Industrieholzes für die Berechnung des Bruttoerlöses mit dem HOLZERNT-Programm (FD FREIBURG, 2005, nach LECHNER, 2007).....	38
Tabelle 10: Rundholzpreise für die Berechnung der Bruttoerlöse (in €/Efm).....	38
Tabelle 11: Mittlerer BHD des ausscheidenden Bestands und mittlere Produktivität der Harvestertypen sowie die jeweilige Standardabweichung und Anzahl an Fällen, getrennt nach Baumart, Harvestertyp und Rückegassenabstand	42
Tabelle 12: Mittelwertvergleich der Produktivität von Harvestern beim Rundholzeinschlag in Abhängigkeit von der Baumart nach STUDENT-NEWMAN-KEULS	43
Tabelle 13: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz und möglichen Einflussvariablen	44
Tabelle 14: Beispieldatensatz zu Erläuterung der Funktionsweise von Dummy-Variablen	47
Tabelle 15: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz als abhängige Variable)	49
Tabelle 16: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz.....	50
Tabelle 17: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Harvester beim Einschlag von Rundholz.....	50
Tabelle 18: Gültigkeitsbereiche des Produktivitätsmodells in Abhängigkeit von Baumart, Rückegassenabstand und Harvestertyp	52

Tabelle 19: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (13 Fälle)	66
Tabelle 20: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz als abhängige Variable)	67
Tabelle 21: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz	68
Tabelle 22: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz	68
Tabelle 23: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (19 Fälle)	71
Tabelle 24: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz als abhängige Variable)	71
Tabelle 25: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz	72
Tabelle 26: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz	72
Tabelle 27: Produktivitätswerte für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone zur Aushaltung von Rundholz durch einen Harvester an der Rückegasse (in Efm/h GAZ)	74
Tabelle 28: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz als abhängige Variable)	78
Tabelle 29: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz	78
Tabelle 30: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz	78
Tabelle 31: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz und möglichen Einflussvariablen	81
Tabelle 32: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)	82
Tabelle 33: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz	83
Tabelle 34: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz	83

Tabelle 35: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)	85
Tabelle 36: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz.....	86
Tabelle 37: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz.....	86
Tabelle 38: Gültigkeitsbereiche des Produktivitätsmodells in Abhängigkeit von Rückegassenabstand und Leistungsklasse	87
Tabelle 39: Faktoren zur Korrektur der Produktivität beim Rücken von Rundholz bei einer von 250 m abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997b)	90
Tabelle 40: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz und möglichen Einflussvariablen (17 Fälle)	92
Tabelle 41: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable).....	93
Tabelle 42: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable).....	94
Tabelle 43: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz	94
Tabelle 44: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz.....	94
Tabelle 45: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (27 Fälle)	97
Tabelle 46: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz als abhängige Variable).....	98
Tabelle 47: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Energieholz.....	99
Tabelle 48: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Energieholz.....	99
Tabelle 49: Faktoren zur Korrektur der Produktivität beim Rücken von Energieholz bei einer von 130 m abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997b).....	101
Tabelle 50: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (17 Fälle)	103

Tabelle 51: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz als abhängige Variable).....	104
Tabelle 52: Ergebnisse der Varianzanalyse für das erweiterte Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz	104
Tabelle 53: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz	104
Tabelle 54: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Hackern und möglichen Einflussvariablen	109
Tabelle 55: Mittelwertvergleich der Produktivität von Hackern in Abhängigkeit vom Hacksystem nach STUDENT-NEWMAN-KEULS.....	109
Tabelle 56: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Hackern und möglichen Einflussvariablen, getrennt nach Hacksystemen	110
Tabelle 57: Produktivitätsmittelwerte für Hacker (inkl. Anzahl an Fällen und Standardabweichung) sowie mittlerer BHD bzw. Zopfdurchmesser und mittlere Motorleistung der Hacker, getrennt nach Hacksystem und Ausgangsmaterial	113
Tabelle 58: Aushaltungsvarianten 1 und 2: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz und von Hackschnitzeln (nur Aushaltungsvariante 2) in Bestand NH 251	123
Tabelle 59: Aushaltungsvariante 3: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stammholz und Hackschnitzeln (Verzicht auf Bereitstellung von Industrieholz) in Bestand NH 251	124
Tabelle 60: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Rundholz in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante (in €/Efm)	128
Tabelle 61: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante (in €/Efm)	129
Tabelle 62: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007; Hackschnitzelpreis 25 €/Efm; in €/ha).....	138
Tabelle 63: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007; Hackschnitzelpreis 55 €/Efm; in €/ha).....	140
Tabelle 64: Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz	170
Tabelle 65: Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Energieholz	171
Tabelle 66: Produktivitätsmodelle für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Rund- und Energieholz.....	171
Tabelle 67: Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz.....	172
Tabelle 68: Produktivitätsmodelle für das Rücken und den Zwischentransport von Energieholz	173

Tabelle 69: Produktivitätsmittelwerte der unterschiedlichen Hacksysteme beim Hacken von Energieholz	173
Tabelle 70: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007, jedoch 50 % höhere Industrieholzpreise; Hackschnitzelpreis 55 €/Efm; in €/ha)	174

1 Einleitung und Problemstellung

Der Aufbau zusätzlicher Produktionskapazitäten in der Zellstoff- und Papierindustrie hat bereits heute und wird in den nächsten Jahren weiterhin zu einer deutlich steigenden Nachfrage nach Industrieholz zur stofflichen Verwertung führen. Parallel dazu, hat aufgrund weiter steigender Ölpreise und attraktiver Förderinstrumente auch die Nachfrage nach Waldholz zur energetischen Verwertung (Hackschnitzel und Stückholz) weiter zugenommen. Dabei wird gerade die Bereitstellung von Hackschnitzeln aus dem Wald inzwischen auch von der Forstwirtschaft als ein neues Geschäftsfeld angesehen, auf dem sich Chancen für eine Erweiterung der Produktpalette und somit für eine weitere Einnahmequelle bieten können (BECKER et al., 2008). Infolgedessen ergibt sich bereits jetzt insbesondere für viele traditionelle Papier- und Zellstoffsortimente eine direkte Nutzungskonkurrenz, die durch den geplanten Kapazitätsaufbau und den noch in Entwicklung begriffenen CO₂-Zertifikatehandel weiter verschärft werden wird.

Für die Forstwirtschaft ergeben sich dadurch deutlich verbesserte Absatzmöglichkeiten für ihre Produkte. Wie die Bundeswaldinventur II ausweist, stehen dieser ausgeweiteten Nachfrage durchaus auch entsprechende naturale Nutzungspotenziale gegenüber. Bei der Realisierung dieser Potenziale sehen sich die Forstbetriebe jedoch Unsicherheiten und Schwierigkeiten gegenüber.

So stehen für die Bereitstellung von Rundholz (Stammholz, Industrieholz) zwar erprobte Verfahren für unterschiedliche Nutzungssituationen zur Verfügung. Auch können Forstbetriebe bei der Entscheidungsfindung für ein bestimmtes Verfahren auf eine langjährige Erfahrung und ein umfangreiches Datenmaterial zurückgreifen. Darüber hinaus existieren Produktivitätsmodelle wie sie z. B. in die Software HeProMo der WSL (2007) integriert wurden, mit denen Vorkalkulationen über die zu erwartenden Produktivitäten und Stückkosten durchgeführt und anhand derer Entscheidungen getroffen werden können. Deutlich komplexer wird die Entscheidungssituation jedoch, wenn im Rahmen einer Nutzungsmaßnahme zusätzlich zu den Rundholzsortimenten auch Hackschnitzel bereitgestellt werden. Zwar sind hierfür eine Reihe von Einzeluntersuchungen verfügbar; diese beziehen sich jedoch jeweils auf ganz spezifische Verfahren und Nutzungssituationen, weshalb die aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Produktivitätswerte in einem weiten Bereich streuen. So bewegen sich die Stückkosten für eine vollmechanisierte Bereitstellung von Hackschnitzeln als Kuppelprodukt des Rundholzes in mittelstarken Beständen nach LECHNER (2004) und LECHNER (2007) in einem Rahmen zwischen 21,00–35,40 €/Efm. Da anhand dieser Einzeluntersuchungen der Einfluss bspw. variierender Bestandeskennwerte nicht abgeschätzt werden kann, ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Nutzungssituationen nur sehr eingeschränkt möglich. Deshalb kann auf dieser Grundlage keine sichere Entscheidung darüber getroffen werden, ob sich die Bereitstellung von Hackschnitzeln aus dem Wald wirtschaftlich gestalten lässt, oder ob mit einem unter Umständen großen Defizit gerechnet werden muss. Hierzu sind zunächst zuverlässige Informationen über die Produktivität unterschiedlicher Bereitstellungsverfahren unter variierenden Hiebsbedingungen (Baumart, BHD, Aushaltung) notwendig, aus denen dann in einem zweiten Schritt die jeweils aktuellen Stückkosten abgeleitet werden können.

Nicht bekannt ist auch, inwieweit die Produktivität der eingesetzten Maschinen bei der Bereitstellung des Rundholzes durch die Bereitstellung eines zusätzlichen Sortiments beeinflusst wird. Ungeklärt ist in diesem Zusammenhang außerdem die Kostenzurechnung für Verfahrensschritte wie z. B. den Einschlag, welche sowohl der Bereitstellung von Rundholz wie auch der

Bereitstellung von Hackschnitzeln dienen. Je nach dem, welche Art der Kostenzuordnung gewählt wird, sind hier deutliche Unterschiede in der Kostenbelastung der einzelnen Sortimente zu verzeichnen.

Des Weiteren ergibt sich insofern eine komplexe Entscheidungssituation, als je nach den Preisrelationen von Hackschnitzeln und Industrieholzsortimenten das anfallende Material alternativ in die eine oder andere Verwendung gelenkt werden kann, und es ist unklar, welche Sortimente unter bestimmten Rahmenbedingungen optimalerweise in bestimmten Beständen ausgeformt werden sollen. Dies kann dazu führen, dass qualitativ hochwertiges Fichten-Schwachholz als Energieholz einer minderwertigeren Verwertung als betriebs- bzw. volkswirtschaftlich wünschenswert zugeführt wird, während gleichzeitig versucht wird, aus qualitativ schlechten Laub-Schwachholzbeständen hochwertige Industrieholzsortimente auszuhalten, obwohl hier die Aufarbeitungskosten z.T. höher liegen als die tatsächlichen Holzerlöse. Dies bedeutet, dass auch die ansonsten in der Forstwirtschaft übliche Entscheidungsfindung auf der Basis von Stückkosten insofern nicht zielführend ist, als sich bei unterschiedlicher Art der Aushaltung nicht nur die Produktivität und damit zusammenhängend die Stückkosten ändern, sondern auch mit einem auf die Fläche bezogen unterschiedlichen Holzanfall gerechnet werden muss, weshalb letztlich der Nettoflächenerlös zum entscheidenden Kriterium wird.

Hinreichende Informationen mit Hilfe derer die oben angesprochenen Fragen rational entschieden und die Nutzung von Industrieholz und/oder Hackschnitzeln durch die Forstwirtschaft optimiert werden könnten, stehen den Forstbetrieben jedoch bis heute nicht zur Verfügung und es werden weder die nachhaltig möglichen Nutzungsmengen mobilisiert, noch eine optimale Wertschöpfung erzielt. Deshalb ist es Ziel dieser Arbeit, die im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Industrieholz und/oder Hackschnitzeln zur energetischen Verwertung in mehrfacher Hinsicht unsichere und bislang durch Daten und Produktivitätsmodelle wenig gestützte Entscheidungssituation zu verbessern.

2 Zielsetzung

Aufbauend auf den oben aufgezeigten Problemfeldern ist es übergeordnetes Ziel dieser Untersuchung, Wege für eine ökonomisch optimierte Bereitstellung von Stammholz, Industrieholz und/oder Hackschnitzeln aufzuzeigen. Dazu werden Produktivitätsmodelle erarbeitet, die eine Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Variablen auf die Produktivität und die daraus resultierenden Stückkosten und Nettoflächenerlöse verschiedener Verfahren bei der Kuppelproduktion von Rundholz (d.h. Stammholz und Industrieholz) und Hackschnitzeln in einem konkreten Bestand erlauben. Damit kann beurteilt werden, unter welchen Rahmenbedingungen welche Verfahren aus ökonomischer Sicht vorzugsweise einzusetzen sind und welche Sortimente dabei optimalerweise ausgeformt werden sollten.

Zur Erstellung der **Produktivitätsmodelle** wird eine breit angelegte **Metaanalyse** durchgeführt. Damit können die in den vorliegenden, in zahlreichen Einzeluntersuchungen gewonnenen Forschungsergebnisse verallgemeinert und damit wichtige Einflussvariablen auf die Produktivität von Verfahren bei der Kuppelproduktion von Rundholz und Hackschnitzeln identifiziert werden. Dazu werden möglichst umfassend Forschungsergebnisse aus der Literatur in Kombination mit den Resultaten eigener Untersuchungen zusammengefasst, aufbereitet und analysiert. Die Produktivität wird dabei getrennt für die Sortimente Rundholz und Hackschnitzel sowie getrennt für die einzelnen Verfahrensschritte (i. d. R. Einschlag, ggf. motormanuelles Fällen und Vorliefern, Rücken, Hacken) erfasst. In einem weiteren Schritt ist es dann Ziel der Metaanalyse, mit Hilfe statistischer Analysen (multiple Regression) modulare Modelle zur Produktivität dieser einzelnen Verfahrensschritte unter bestimmten Bedingungen abzuleiten.

Abschließend werden mit Hilfe der erarbeiteten Produktivitätsmodelle auf der Grundlage von Kennwerten konkreter Bestände für verschiedene Verfahren **Beispielkalkulationen** für die bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln zu erwartenden Produktivitäten und Stückkosten durchgeführt. Daraus abgeleitet ist es auch Ziel der Beispielkalkulationen, die in einem Bestand jeweils zu erwartenden Nettoflächenerlöse darzustellen und vor dem Hintergrund sich ändernder Hackschnitzelpreise zu bewerten. Damit können technisch-ökonomisch optimale Bereitstellungsverfahren für Rundholz und Hackschnitzel für charakteristische und flächenmäßig relevante Nutzungssituationen identifiziert werden. Außerdem kann gezeigt werden, unter welchen Bedingungen sich die Bereitstellung von Hackschnitzeln überhaupt lohnt und ab welchen Hackschnitzelpreisen es bspw. sinnvoll sein kann, nicht nur die bisher ungenutzt im Bestand verbleibenden Baumteile, sondern zusätzlich dazu auch bislang stofflich genutzte Industrieholzsortimente für die Herstellung von Hackschnitzeln für eine energetische Verwertung heranzuziehen.

3 Stand des Wissens

3.1 Die Metaanalyse

3.1.1 Das Konzept der Metaanalyse

Mit der Durchführung einer Metaanalyse wird versucht, „... einen integrativen Überblick über die Forschungsliteratur in einem bestimmten Gebiet zu erhalten.“ (FRICKE und TREINIES, 1985). Damit zielt das Konzept der Metaanalyse darauf ab, statt der aufwändigen Durchführung weiterer Primäruntersuchungen als Einzelfallstudien die bereits existierenden Ergebnisse zu interpretieren, d. h. nach einem gemeinsamen Konzept zu analysieren und daraus allgemeingültige Schlüsse zu ziehen (HUNTER und SCHMIDT, 1990). Darüber hinaus werden unter dem Begriff Metaanalyse eine Vielzahl von Maßnahmen subsumiert, mit Hilfe derer die Gültigkeit zusammenfassender Aussagen für ein Forschungsgebiet erhöht werden kann. Welche Verfahren jeweils zur Anwendung kommen hängt nach FRICKE und TREINIES (1985) davon ab, „... wie vollständig die Ergebnisse aus den einzelnen Originalarbeiten zur Verfügung stehen.“

Nach FARIN (1994) bedient sich die Metaanalyse „... quantitativ-statistischer Methoden, um die zentrale Tendenz und die Variabilität der Ergebnisse von empirischen Untersuchungen zu analysieren sowie die Variabilität der Resultate zu erklären.“ Können quantitative Techniken nicht, bzw. nicht sinnvoll eingesetzt werden, können zur Metaanalyse auch qualitative Verfahren eingesetzt werden (FARIN, 1994). Nach der Definition von DRINKMANN (1990) wiederum soll eine Metaanalyse „... eine an den Kriterien empirischer Forschung orientierte Methode zur quantitativen Integration der Ergebnisse empirischer Untersuchungen sowie zur Analyse der Variabilität dieser Ergebnisse“ sein. Im Gegensatz zu einem traditionellen Literaturreview wird also bei einer Metaanalyse versucht, nicht nur einem mit dem Fachgebiet nicht Vertrauten eine Übersicht zu bieten, sondern es wird darüber hinaus der Versuch unternommen, die Variabilität der Studienergebnisse „... durch eine Analyse des Zusammenhangs von Studienergebnissen mit Studienmerkmalen zu erklären.“ (FARIN, 1994).

Der Ablauf einer Metaanalyse kann wie folgt gegliedert werden (nach FARIN, 1994 bzw. BEELMANN und BLIESENER, 1994):

1. Problemformulierung
2. Datensammlung (Systematische Erhebung empirischer Primärbefunde)
3. Datenevaluation (Kodierung und Bewertung der Studienmerkmale)
4. Datenanalyse und -interpretation
5. Ergebnisdarstellung (Dokumentation der Ergebnisse)

Diesem Schema wurde auch in der vorliegenden Arbeit gefolgt.

3.1.2 Metaanalysen in der Forstwissenschaft

In der Forstwissenschaft werden Metaanalysen vor allem in den klassisch naturwissenschaftlichen Disziplinen durchgeführt. Im Bereich der Forstbotanik und Baumphysiologie nutzten bspw. THOMAS und WINNER (2002) das Instrument der Metaanalyse zur Untersuchung von photosynthetischen Unterschieden zwischen jungen und älteren Bäumen. Andere Autoren, wie bspw. KERSTIENS (2001), MEDLYN et al. (1999) oder CURTIS und WANG (1998) untersuchten im Rahmen von Metaanalysen die verschiedenen Effekte einer erhöhten CO₂-Konzentration auf das Wachstum verschiedener Baum- und Pflanzenarten.

Auch im Bereich der Forstzoologie (siehe z.B. NICHOLS et al., 2007) oder in der forstlichen Bodenkunde (siehe z.B. PUGET und LAL, 2005) wurden in der Vergangenheit zahlreiche Studien unter Einsatz von Metaanalysen durchgeführt. Im forstlichen Bereich sind weiterhin Metaanalysen aus den Bereichen Waldbau und Waldwachstum zu nennen, im Rahmen derer z.B. Biomassefunktionen für nordamerikanische Baumarten erarbeitet wurden (JENKINS et al., 2004; ZIANIS und MENCUCCINI, 2004), die sich mit dem Wachstum und der Überlebensrate von denjenigen Bäumen beschäftigten, die unter Schirm zur Einleitung der Verjüngung angepflanzt wurden (PAQUETTE et al., 2006), oder die die Effekte des Einsatzes von Feuer auf die nachfolgende Verjüngung untersuchten (JOHNSTONE und CHAPIN, 2006). Aus Deutschland stammen die Untersuchungen von WIRTH et al. (2003), die im Rahmen einer Metaanalyse Biomassefunktionen für Fichte in Zentraleuropa erstellten oder von DIETER und ELSASSER (2002), die das Instrument der Metaanalyse zur Abschätzung der Kohlenstoffvorräte und -veränderungen in der Biomasse der Waldbäume in Deutschland verwendeten.

Auch die Kosten und Gewinne, mit denen die Forstwirtschaft rechnen muss, um auf die Bedürfnisse von Erholungssuchenden einzugehen, wurden im Rahmen einer Metaanalyse analysiert (BOSTEDT und MATTSSON, 2005). Außerdem wurden Metaanalysen in der Fernerkundung, bei der Integration von LIDAR Daten und multispektralen Bildern zur verbesserten Erfassung von Weideland eingesetzt (BORK und SU, 2007).

Im Bereich der Holzernte sind nur wenige Metaanalysen bekannt, die auf der Auswertung publizierter Untersuchungen basieren: So war es das Ziel von HARTSOUGH und STOKES (1990), in Anlehnung an die Untersuchungen von KOTEN et al. (1984) und GUIMIER (1985) mit einer Metaanalyse die Produktivität und damit auch die Kosten und die Einsatzbereiche bestimmter Verfahren bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln in Nordamerika abzuschätzen. Dazu sichteten die Autoren die zu diesem Thema vorhandene Literatur und speisten die relevanten Daten nach einheitlichen Kriterien in eine Datenbank ein. Anschließend wurden Streudiagramme erstellt, um Zusammenhänge zwischen der Produktivität, den Kosten und weiteren Variablen darzustellen.

SPINELLI und VISSER (2008) untersuchten im Rahmen einer Metaanalyse von 34 Zeitstudien mit Harvestern die Gründe für die bei einer Erntemaßnahme auftretenden unproduktiven Zeiten. Durch Erstellen von Streudiagrammen und mit Hilfe einfacher linearer Regressionen konnten so Zusammenhänge zwischen dem Auftreten unproduktiver Zeiten und den Bestandestypen (Mischbestand, Plantage), aber auch zwischen dem Auftreten unproduktiver Zeiten und dem jeweils eingesetzten Maschinentyp (Radharvester, Baggerharvester) identifiziert werden.

Neben den genannten Untersuchungen existieren im Bereich der Holzernte weitere Untersuchungen, in denen Metaanalysen meist auf der Basis von Leistungsnachweisen der Maschinenbuchführung durchgeführt werden, um daraus Produktivitätsmodelle für die jeweiligen Maschinen abzuleiten. Diese Untersuchungen sind im folgenden Kapitel 3.2.1 aufgeführt.

3.2 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen

Aufgabe eines Modells ist es nach Aussage von BRUCHNER (2004) „... Systeme aus der realen Welt möglichst identisch abzubilden.“ Demnach findet während der Modellbildung eine „Abstraktion und Idealisierung des Ursprungssystems statt, was dazu beiträgt, dass komplexe Systeme „handhabbar“ werden.“ Nach BRUCHNER (2004) bestehen analytische Modelle grundsätzlich aus einem Gleichungssystem, „... in das bestimmte, angenommene Werte eingesetzt werden, um in einem geschlossenen Lösungsdurchlauf den zu ermittelnden Systemzustand direkt zu bestimmen.“

Bezogen auf Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen für die Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln bedeutet dies, dass mit Hilfe von einfachen oder multiplen Regressionen Gleichungen (=Produktivitätsmodelle) erarbeitet werden, die die Produktivität einzelner Verfahrensschritte in Abhängigkeit von einer oder mehreren Variablen als mathematische Funktion beschreiben.

3.2.1 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen auf der Basis von Metaanalysen

Von OHRNER (1999) und HEINIMANN (1999) werden Produktivitätsmodelle für Harvester beim Einschlag von Rundholz erarbeitet, in beiden Fällen basierend auf gut 2.000 Leistungsnachweisen der Maschinenbuchführung aus mehreren Bundesländern Deutschlands. In beiden Untersuchungen zeigt sich bei multiplen Regressionsanalysen insbesondere in schwächeren Durchmesserbereichen eine hohe Abhängigkeit der Produktivität von dem mittleren Baumvolumen. Es zeigt sich außerdem, dass auch die Baumart (Fichte und Kiefer) und der Maschinentyp produktivitätsbeeinflussende Variable sind und somit in das Produktivitätsmodell eingehen. HEINIMANN (1999) nimmt darüber hinaus auch das Gesamtvolumen des Schlags sowie dessen Fläche in sein Modell auf. Diese Ergebnisse wurden 2003 – ergänzt durch Studien von RIECHSTEINER (2000) – in das Programm HeProMo der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft integriert (WSL, 2007).

Im Rahmen einer KWF-Projektarbeit erstellte FORBRIG (2000) ein Informationssystem für Forstmaschinen, in das ebenfalls Produktivitätsmodelle für Harvester eingehen. Auch diese Modelle basieren auf Leistungsnachweisen der Maschinenbuchführung der Landesforstverwaltungen Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen. Dabei verzichtete der Autor auf die Anwendung multipler Regressionen. Stattdessen wurden die Rohdaten im Vorfeld nach Baumart (Fichte, Kiefer, Laubholz) und Motorleistung des Harvesters klassifiziert. Anschließend wurde die Abhängigkeit der Produktivität vom mittleren Baumvolumen des ausscheidenden Bestands als einzige Einflussvariable mittels einfacher Regressionen analysiert.

Eine weitere Metaanalyse zur Erstellung von Produktivitätsmodellen für Harvester wurde von PAUSCH und PONITZ (2002) in Nadel- und Laubholzbeständen durchgeführt (siehe auch PAUSCH, 2002). Diese Autoren basieren ihre Auswertungen auf mehr als 450 Tagesaufschriebe

von 12 Maschinen. Durch multiple Regressionsrechnung ermitteln die Autoren den Einfluss des mittleren Baumvolumens der Entnahmebäume auf die Produktivität von Harvestern. Als weitere Einflussvariablen auf die Produktivität gehen der X-Holz-Anteil, die mittlere Fahrstrecke pro Baum, der Anteil der grünen Krone an der Baumhöhe sowie die mittlere Anzahl an Sortenstücken pro Baum in das Modell ein. Für stärkere Laubholzbestände müssen nach Angaben der Autoren Zuschläge auf die mit diesem Modell abgeleiteten Zeitbedarfswerte vergeben werden. Diese Zuschläge, die auf den Ergebnissen anderer Untersuchungen basieren, werden nach Berechnung der Produktivität mit dem oben beschriebenen Modell als Zuschlagsprozent auf den Zeitbedarf angerechnet.

Eine breit angelegte Metaanalyse zur Identifikation der wichtigsten Einflussvariablen auf die Produktivität von Schleppern, Messer- und Lochrotorentbindungsmaschinen beim Rücken und Entrinden von Nadelholz wurde auf der Basis von Leistungsnachweisen der Landesforstverwaltung Baden-Württembergs Anfang der 1980er Jahre von RIEGER (1983) durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe multipler Regressionen Produktivitätsmodelle für die genannten Maschinen abgeleitet. Für Schlepper (1.222 Einzelleistungsnachweise) wurden die mittlere Stückmasse als wichtigste Variable, daneben aber u.a. auch die Seilauzugsentfernung, der Schleppertyp und die Rückeentfernung als wichtige Einflussvariablen auf die Produktivität identifiziert. Bei den Messerentbindungsmaschinen (267 Einzelleistungsnachweise) wurden – genauso wie für die Lochrotorentbindungsmaschinen (867 Einzelleistungsnachweise) – die Stückmasse, die Poltergröße sowie der Maschinentyp als Haupteinflussvariablen auf die Produktivität identifiziert und in das entsprechende Modell aufgenommen.

Ein Modell zur Kalkulation der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz erarbeitete die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (BORT et al., 1992). Zur Erstellung dieses Modells wurden nach Angaben der Autoren umfangreiche Versuche mit einem Rückevolumen von 580.000 m³ durchgeführt. Durch Mitarbeiter der WSL wurden Modifikationen am ursprünglichen Modell vorgenommen und dieses dann in das Programm HeProMo integriert (siehe z. B. LEMM und ERNI, 1995; NÄF, 1998; RECHBERGER, 1999). In diesem Modell wird mit Hilfe einer einfachen Regressionsgleichung die Produktivität in Abhängigkeit von der mittleren Stückmasse berechnet. In einem zweiten Schritt kann die Produktivität durch Vergabe zahlreicher Zu- und Abschläge an die Verhältnisse eines konkreten Bestands angepasst werden. Diese Zu- und Abschläge sind reine Tabellenwerte: So wird bspw. die Produktivität eines Forwarders bei einer mittleren Fahrentfernung von >201–400 m pauschal um 0,1 Efm/MAS reduziert. Steigt die mittlere Fahrentfernung auf > 400 m, wird die Produktivität um 0,2 Efm/MAS reduziert. Andererseits erhöht sich die Produktivität bei Einsatz einer zweiten Person zur Unterstützung des Maschinenführers um 0,15 Efm/MAS. Vergleichbare Zu- und Abschläge können für die Anpassung der mittleren Zuzugsdistanz, der Zuzugsart (aufwärts/abwärts), der Anzahl an Sortimenten sowie in Abhängigkeit von weiteren Variablen (z. B. Nicht-Einhalten der Schlagordnung) vergeben werden. Das Modell unterscheidet nicht zwischen Schleppern mit Seilwinde oder Rückezange und es ist keine Unterscheidung nach Baumarten vorgesehen. Optimale Ergebnisse liefert das Modell nach Angaben der Autoren vor allem in Durchforstungen im Stangen- und Baumholz. Ein Einsatz in End- oder Flächennutzungen ist nach Angaben der WSL grundsätzlich ebenfalls denkbar, wurde aber von den Autoren nicht überprüft.

Ein Modell zur Abschätzung der Produktivität von Knickschleppern wurde von PAUSCH (2002) erstellt. In dieses Modell gingen mehr als 1.000 hiebsweise Aufschriebe über die Produktivität

verschiedener Knickschlepper mit einem Gesamtrückevolumen von ca. 230.000 Efm ein. Mit Hilfe multipler Regressionsanalysen leitete der Autor daraus ein umfassendes Modell ab, in das die Baumart sowie das Gesamtvolumen und die Stückzahl verschiedener Sortimente (Sägerundholz, Industrieholz) eingehen. Weitere Variablen sind die mittlere Rückeentfernung, sowie der Geländetyp und die Verjüngungssituation (beide als Dummy-Variable).

Von HARTSOUGH et al. (1998) wurden im Rahmen einer Metaanalyse Produktivitätswerte verschiedener Verfahrensschritte bei der Bereitstellung von Rundholz aus *Pinus Ponderosa*-Beständen zusammengetragen und aufbereitet. Anschließend wurden mit Hilfe einfacher und multipler Regressionen Modelle entwickelt, um damit die Produktivität der einzelnen Verfahrensschritte in Abhängigkeit von verschiedenen Variablen abschätzen zu können. In die Modelle, die auf einer Stichprobenzahl zwischen 5–42 Fällen basieren, gehen bis zu fünf Variable ein. Eine wichtige Variable ist auch hier der mittlere BHD des ausscheidenden Bestands bzw. das mittlere Baumvolumen. Des Weiteren gehen in die Modelle bspw. die Reichweite des Harvesterkrans, die Motorleistung der Maschine, die Rückeentfernung oder die Anzahl an Bäumen je Ladevorgang ein. Insgesamt definieren HARTSOUGH et al. (1998) mehr als 50 verschiedene Variablen, mit Hilfe derer die Produktivitäten der einzelnen Verfahrensschritte berechnet werden können. Basierend darauf wurde eine Software entwickelt, die nach Angaben der Autoren besonders zur groben Planung von Ernteeingriffen geeignet ist (siehe auch FIGHT et al., 1999). Diese Software wiederum ist Grundlage des Fuel Reduction Cost Simulator (FRCS) von FIGHT et al. (2006). Mit diesem Programm können die Produktivität und Kosten verschiedener Verfahren bei der Entnahme von Bäumen zur Reduzierung der Biomasse in einem Bestand (z.B. zur Verringerung des Waldbrandrisikos) abgeschätzt werden. Das Programm ist für amerikanische Verhältnisse optimiert und kann mit Hilfe zahlreicher Variablen an die Verhältnisse vor Ort angepasst werden. Dabei können jedoch die Verfahren nicht individuell zusammengestellt werden, sondern es muss stattdessen auf vordefinierte Verfahren zurückgegriffen werden.

3.2.2 Produktivitätsmodelle für Forstmaschinen auf Einzelbaumbasis

3.2.2.1 Zusammenstellungen von Produktivitätsmodellen für verschiedene Verfahren

Produktivitätsmodelle für konkrete Verfahren wurden in modularer Form, d. h. getrennt für die jeweiligen Verfahrensschritte, von DUMMEL und BRANZ (1986) und darauf aufbauend von MORAT et al. (1998) gesammelt, aufbereitet und in einheitlicher Form veröffentlicht. Diese Modelle basieren auf Untersuchungen in einem oder wenigen Einzelbeständen und wurden mit Hilfe einfacher Regressionen erstellt, d. h. die Produktivität wird stets in ausschließlicher Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands bzw. dem mittleren Baumvolumen oder der mittleren Stückmasse beschrieben. Gleiches trifft zu auf die in den Unterlagen zu den Tagungen des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) veröffentlichten Produktivitätsmodelle zur Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln (siehe KWF 1998; KWF, 2000; KWF, 2004; KWF, 2008a). Sowohl in diesen Tagungsführern wie auch in den Zusammenstellungen von DUMMEL und BRANZ (1986) bzw. MORAT et al. (1998) sind die mit den Modellen errechneten Produktivitäten in Tabellenform, in Abhängigkeit von bestimmten BHD dargestellt; auf die zugrunde liegenden Modelle selbst wird nicht weiter eingegangen.

Eine vergleichbare Zusammenstellung über Produktivitätsmodelle für Verfahrensschritte speziell für die Pflege von Fichtenbeständen gibt RAAB (1999). In dieser Zusammenstellung, in die auch Studien aus den Zusammenstellungen von DUMMEL und BRANZ (1986) bzw. MORAT et al. (1998) einbezogen wurden, sind Produktivitätsmodelle zahlreicher Autoren u.a. für die Stammzahlreduktion in Fichten-Naturverjüngungen mit dem Freischneider, für die motormanuelle Jungbestandspflege, die motormanuelle und vollmechanisierte Durchforstung von Fichtenbeständen (mit und ohne Zufällen bzw. motormanuellem Fällen und Vorliefern), für Kurzholz-Kranlinien- und Seillinienv Verfahren, die Seilkranbringung sowie das dazugehörige Rücken (mit Forstspeziialschlepper bzw. Forwarder) zusammengefasst. Wie in die oben beschriebenen Modelle gehen auch in diese Modelle der BHD bzw. das mittlere Baumvolumen oder die mittlere Stückmasse des ausscheidenden Bestands als einzige Einflussvariable ein. Auch hier werden die Modelle selbst nicht dargestellt. Stattdessen werden die Produktivitäten der Verfahrensschritte ausnahmslos in Tabellenform präsentiert.

Eine Zusammenstellung von Produktivitätsmodellen für verschiedene Verfahrensschritte zur Bereitstellung von Rundholz gibt das BUWAL (1997). Diese Zusammenstellung von 15 Modellen aus den 1980er und 1990er Jahren ist das Ergebnis einer Literaturrecherche – eigene Zeitstudien werden nicht durchgeführt. Die Zusammenstellung ist so aufgebaut, dass die Produktivitätsmodelle der einzelnen Verfahrensschritte in verschiedenen Kombinationen zu einem Gesamtverfahren verknüpft werden können. In allen Modellen wird die Produktivität mittels einfacher Regression beschrieben. In der Vielzahl der Fälle wird die Produktivität in Abhängigkeit vom mittleren Baumvolumen dargestellt. Nur im Ausnahmefall (händisches Rücken bzw. Bringung mit Helikopter) wird die Produktivität stattdessen in Abhängigkeit von der Ruckeentfernung beschrieben. Je nach Modell werden außerdem Korrekturfaktoren oder Zuschläge wirksam. Dabei stellen die Korrekturfaktoren diejenigen Faktoren dar, mit denen der Zeitaufwand multipliziert wird, während die Zuschläge additiv zum Zeitaufwand eingesetzt werden. Die Korrekturfaktoren für den motormanuellen Holzeinschlag sind bspw. die Hangneigung, der Unterwuchs, die Kronenlänge, die Aushaltungskriterien und die Wegzeit. Zusätzlich wird ein Zuschlag angegeben, wenn ein Teil der Bäume mit Seilzug gefällt werden muss. Demgegenüber stellt beim Produktivitätsmodell für das motormanuelle Fällen und Vorliefern die Hangneigung den einzigen Korrekturfaktor dar. Für einzelne Modelle (z.B. Harvester oder Prozessor) stehen keine Korrekturfaktoren zur Verfügung und es sind auch keine Zuschläge vorgesehen.

Von der Wood Supply Research Group der Universität Aberdeen (Schottland) wurden im Rahmen eines Kooperationsprogramms der Internationalen Energieagentur (IEA Bioenergy Task 12) seit Ende der 1980er Jahre Produktivitätsmodelle verschiedener Forschungseinrichtungen aus Kanada, Skandinavien, Spanien und Großbritannien für unterschiedliche Verfahrensschritte gesammelt, aufbereitet und kontinuierlich aktualisiert. Auf Basis dieser Modelle wurde das Computerprogramm HDSS (Harvesting decision support system) entwickelt, eine Software, mit deren Hilfe die Produktivität und daraus abgeleitet die Kosten verschiedener Verfahrensschritte für die Bereitstellung von Rundholz¹ kalkuliert werden können (WSRG, 1998). Die Verfahrensschritte können in einem zweiten Schritt modular zu Verfahren zur Bereitstellung von Rundholz zusammengestellt werden. Die Modelle basieren nach Angaben von MITCHELL (2000) auf Ergebnissen einer Versuchsreihe zur Bereitstellung von Rundholz und

¹ In eingeschränktem Maße können auch Produktivitäten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln kalkuliert werden.

Hackschnitzeln. Nähere Angaben zu den Modellen und ihrer Herkunft werden nicht gemacht. Alle Modelle scheinen aber mit Hilfe einfacher bzw. multipler Regressionen erstellt worden zu sein. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Modell und dessen Herkunft gehen der mittlere BHD des ausscheidenden Bestands bzw. das entsprechende mittlere Baumvolumen als wichtigste Einflussvariable in das Modell ein. Weitere Eingangsvariablen in die Modelle sind bei Harvestern die Stammzahl je Hektar sowie der Anteil an nichtverwertbarem Derbholz, bei Forwardern die Rückeentfernung und bei den Modellen zur Berechnung der Produktivität von Hackern beim Einsatz auf der Rückegasse sowie von LKW beim Transport von Hackschnitzeln das Gewicht der Hackschnitzel, der Wassergehalt und die Transportentfernung. Eine detaillierte Beschreibung der Vor- und Nachteile dieses Programms findet sich, genauso wie eine genaue Beschreibung seiner Funktionsweise, unter MITCHELL (2000).

Für Schweizerische Verhältnisse wurden von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) Produktivitätsmodelle für die unterschiedlichen Verfahrensschritte bei der Bereitstellung von Rundholz zusammengestellt (WSL, 2007). Hier sind u. a. Modelle für den motormanuellen und den vollmechanisierten Einschlag von Rundholz zu finden, genauso wie Modelle für das Rücken von Rundholz mit einem Forwarder oder Forstspeziialschlepper oder auch für die Bringung von Rundholz mit einem Seilkran oder Hubschrauber. Auch können hier in eingeschränktem Maße Produktivitäten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln kalkuliert werden. Diese Modelle wurden mit Hilfe einfacher und multipler Regressionen erstellt und bilden die Basis für die Software „HeProMo“. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Verifizierung der eigenen Ergebnisse immer wieder auf diese Modelle zurückgegriffen wird, wurde auf die wichtigsten Modelle bereits in Kapitel 3.2.1 eingegangen. Weitere Modelle die in die Software HeProMo integriert sind, werden in Kapitel 3.2.2.3 vorgestellt.

3.2.2.2 Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz

Das bekannteste Produktivitätsmodell für den Einschlag von Rundholz ist der so genannte Erweiterte Sortentarif (EST), der 1975 als Nachfolgemodell des Holzerntetarifs (HET) entwickelt und seitdem mehrfach aktualisiert wurde (siehe z. B. EST, 2000 oder DUMMEL et al., 1995). Der EST wurde zur Ermittlung von Akkordlöhnen auf Basis umfangreicher Zeitstudien erstellt und enthält vielfältige Möglichkeiten, um die errechneten Produktivitätswerte durch Vergabe von prozentualen Zu- und Abschlägen (z. B. aufgrund eines starken Unterwuchses, aufgrund von übermäßig starker Astigkeit der Bäume oder wegen starker Hangneigung) an die Gegebenheiten vor Ort anzupassen. Dieser Tarif war bis zur Einführung des Zeitlohns in der Waldarbeit vor wenigen Jahren noch weit verbreitet und kommt teilweise auch heute noch zur Anwendung.

In jüngster Zeit erstellten ŽELJKO und JURIJ (2005) für eine Gruppe von sechs Waldarbeitern beim Einschlag (und Rücken) von Stammholzsortimenten in einem Buchendurchforstungsbestand ein Produktivitätsmodell. Dieses Modell, das durch Kombination von detaillierten Zeitstudien mit multiplen Regressionsanalysen entwickelt wurde, beschreibt die Produktivität einer solchen Gruppe in Abhängigkeit von u. a. dem BHD des ausscheidenden Bestands, der Baumhöhe, der Fahrentfernung, dem durchschnittlichen Ladevolumen des Traktors und der durchschnittlich transportierten Stückzahl.

BACHER-WINTERHALTER (2004) untersuchte in mehreren Praxisversuchen die Produktivität eines neu entwickelten mechanisierten Holzernteverfahrens beim Einschlag und Rücken von Kurzholz in Überführungs- und Dauerwaldmischbeständen. In diese Studie wurden mehrere unterschiedlich leistungsstarke Harvester und Forwarder einbezogen und daraus mittels einfacher Regression Produktivitätsmodelle abgeleitet. In diese Modelle geht das mittlere Baumvolumen als einzige erklärende Variable ein. Der Einfluss weiterer Variablen wie bspw. des Hiebsanfalls (Menge und Dimensionsverteilung), des Anteils zugefallter Bäume oder der Aushaltungskriterien wird in der Untersuchung durch den Vergleich der Modelle miteinander ermittelt; im Einzelmodell kann dieser Einfluss nicht quantifiziert werden.

Für den vollmechanisierten Rundholzeinschlag mit Harvestern wurden in der Vergangenheit zahlreiche – i. d. R. maschinenspezifische – Produktivitätsmodelle abgeleitet. So erarbeiteten sowohl KORTEN et al. (2003), als auch STAMPFER und STEINMÜLLER (2004) auf Basis von Zeitstudien mit Hilfe multipler Regressionsanalysen ein Produktivitätsmodell für einen Raupenharvester vom Typ Valmet 911.1 X3 M in fichtendominierten Beständen im Steilhang. Beide Untersuchungen kamen zu dem Schluss, dass das Baumvolumen den höchsten Einfluss auf die Produktivität hat. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt STAMPFER (2001) bei der Untersuchung weiterer Raupenharvester beim Einsatz im Steilhang. In dieser Untersuchung wird zudem die Bodentragfähigkeit als weitere Variable in das Produktivitätsmodell aufgenommen. STAMPFER und STEINMÜLLER (2004) quantifizieren außerdem den Einfluss der Hangneigung, der Bestandesdichte und der Anzahl an Bäumen, die pro Stopp des Harvesters bearbeitet werden, auf die Produktivität.

Weitere Produktivitätsmodelle für einzelne Harvestertypen wurden u. a. von FELLER und WEIXLER (1998) für den Starkholz-Raupenharvester „Hannibal“ (IMPEX 1880), von FELLER et al. (1998) für den Starkholz-Raupenharvester „Königstiger (IMPEX 1650 T) sowie von FELLER et al. (1999b) für einen Raupenharvester der Kompaktklasse (Neuson 11002 HV) entwickelt. Alle Modelle basieren auf Arbeitszeitstudien in Fichten- bzw. Fichten-Kiefernbeständen und wurden mit Hilfe einfacher Regressionen entwickelt. In die Modelle geht der BHD des ausscheidenden Bestands als wichtigste Einflussvariable ein, der Einfluss weiterer Variablen (z. B. Aushaltungskriterien oder Baumart) kann nur durch einen Vergleich der Modelle miteinander quantifiziert werden. PAUSCH (2002) stellt weitere Produktivitätsmodelle für Harvester vom Typ Ponsse HS 15, Timberjack 1270 und FMG 707/280 ÖSA vor. Diese basieren ebenfalls auf detaillierten Zeitstudien in Fichten- bzw. Fichten-Buchen-Mischbeständen, die mittels einfacher und multipler Regression analysiert wurden. Der BHD bzw. das mittlere Baumvolumen gehen in alle Modelle als erklärende Variable ein. In die Modelle zur Berechnung der Produktivität des Timberjack 1270 und des FMG 707/280 ÖSA geht darüber hinaus noch die Variable Laubholz (als Dummy-Variable) ein, während die mittlere Fahrstrecke des Harvesters je Baum ausschließlich in das Produktivitätsmodell des Timberjack 1270 aufgenommen wird.

BEYER und SCHIECK (2001) entwickeln auf Basis eigener Zeitstudien in mehreren Beständen ein Produktivitätsmodell für Radharvester der Firma Caterpillar. Dieses Modell ist explizit auf die Baumart Fichte beschränkt und es wird davon ausgegangen, dass eine Feinerschließung vorhanden ist, dass nur Kurzholzsortimente anfallen und dass der Bestand vor der Maßnahme ausgezeichnet wurde. Nach Kombination mehrerer einfacher Regressionen steht als Ergebnis ein Produktivitätsmodell, mit dem die Anzahl bearbeiteter Bäume pro Arbeitsstunde berechnet werden kann. In dieses Modell gehen zahlreiche Variable ein, die es ermöglichen, die Bedingungen in einem konkreten Bestand bei Berechnung der Produktivität möglichst genau

abzubilden. Diese Variablen sind u. a. die durchschnittliche Geschwindigkeit des Harvesters im Bestand in Abhängigkeit vom Gelände (z. B. Hangneigung, Blocküberlagerung) und der BHD des ausscheidenden Bestands. Darüber hinaus wurden aus den Zeitstudien Werte für eine Variable „Maschinenführer“ abgeleitet, mit Hilfe derer die Produktivität in Abhängigkeit vom jeweils eingesetzten Maschinenführer korrigiert werden kann.

In der jüngeren Vergangenheit wurde von HEIDE (2005) bzw. HEIDE et al. (2005) ein Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz erarbeitet. Für dieses Modell wurden mehr als 30.000 Einzelbaumdaten aus Bordcomputern von Harvestern mittels einfacher Regression analysiert und so die Abhängigkeit der Produktivität von Harvestern von dem mittleren Baumvolumen bzw. dem mittleren BHD des ausscheidenden Bestands dargestellt. Diese Auswertungen fanden getrennt für die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche statt. In Kombination dazu wurden ausgewählte Literaturquellen ausgewertet, um so weitere Einflussvariable auf die Produktivität zu identifizieren. Die Ergebnisse dieser Literaturquellen wurden vom Autor aufbereitet und daraus der Einfluss der jeweiligen Variablen auf die Produktivität in Form von Zu- bzw. Abschlagsprozenten abgeleitet. Die wichtigsten Variablen, deren Einfluss auf diese Weise quantifiziert werden kann sind insbesondere die Aushaltung (Langholz – Kurzholz), die Art der Auszeichnung (positiv und negativ, nur positiv, keine Auszeichnung), die Erschließungsdichte sowie die Hangneigung. Weitere Variablen sind die durchschnittliche Sortenzahl und die mittlere Fahrstrecke pro Baum sowie der Anteil der grünen Krone an der gesamten Baumlänge, der Anteil an nicht verwertbarem X-Holz und die Ausprägung der Naturverjüngung in einem Bestand. Daraus wurde eine Software erstellt, mit der nach Angaben des Autors eine „... betriebswirtschaftliche Kalkulation von Leistung und Kosten bei der vollmechanisierten Holzernte“ möglich ist (HEIDE, 2005).

Auch im internationalen Bereich wurden in der Vergangenheit zahlreiche Produktivitätsmodelle für Harvester beim Einschlag von Rundholz erarbeitet. So entwickelten NURMINEN et al. (2006) auf der Basis von Einzelbaumdaten aus 14 Beständen mit Hilfe einfacher Regressionen Modelle, mit denen die Produktivität von Harvestern bei unterschiedlicher Baumart (Fichte, Kiefer, Birke) und unterschiedlicher Eingriffsart (Durchforstung, Kahlschlag) in Abhängigkeit von dem mittleren Baumvolumen bestimmt werden kann. Dabei kann der Einfluss der Baumart bzw. der Eingriffsart dann durch den Vergleich der jeweiligen Modelle quantifiziert werden². Den Einfluss der Eingriffsart (Kahlschlag, Schirmschlag) auf die Produktivität von Harvestern unter schwedischen Verhältnissen untersuchten auch ELIASSON et al. (1999) in drei fichten-dominierten Durchforstungsbeständen. Dazu wurden einfache Regressionen für das Fällen und Aufarbeiten von Bäumen berechnet, um dann durch einen Vergleich dieser Modelle miteinander den Einfluss der Durchforstungsart ableiten zu können. Die Produktivität von Harvestern in Abhängigkeit von der Durchforstungsart (Niederdurchforstung, freie Durchforstung und Hochdurchforstung) untersuchte auch BRUNBERG (1997). Ausgehend von Zeitstudien in sechs Beständen (die jeweils wieder in mehrere Varianten unterteilt waren) entwickelte er mit Hilfe einer multiplen Regressionsanalyse ein Produktivitätsmodell, in das das mittlere Baumvolumen als wichtigste Einflussvariable aufgenommen wurde. Weitere Modellvariablen sind u. a. der

² Auf derselben Datenbasis wurde durch multiple Regression ein Modell für die Produktivität von Forwardern entwickelt, in welches das anfallende Holzvolumen je Hektar, die Art des Eingriffs (als Dummy-Variable), die Rückeentfernung sowie die Anzahl und Art an Sortimenten (letztere ebenfalls als Dummy-Variable) als Variable eingehen.

Nadel- bzw. Laubholzanteil, die Anzahl der auf der Fläche verbleibenden Bäume und die Durchforstungsart.

Sowohl LAGESON (1997), wie auch SIRÉN und AALTIO (2003) und KÄRHÄ et al. (2003) erstellten mit Hilfe einfacher Regressionen Produktivitätsmodelle für Harvester in Kieferndurchforstungen unter schwedischen bzw. finnischen Bedingungen. Alle Modelle beschreiben die Produktivität in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands bzw. dem mittleren Baumvolumen. Während LAGESON (1997) beim Vergleich seiner Modelle untereinander weitere Aussagen über den Einfluss verschiedener Durchforstungsarten trifft, können KÄRHÄ et al. (2003) durch den Vergleich ihrer Modelle untereinander den Einfluss verschiedener Arbeitsmethoden, Maschinenführer und Maschinenfabrikate quantifizieren. Auf die gleiche Art und Weise ermitteln auch SIRÉN und AALTIO (2003) den Einfluss verschiedener Maschinenfabrikate auf die Produktivität.

Den Unterschied in der Produktivität zwischen Eingriff- und Zweigriffharvestern untersuchte GLÖDE (1999). Dazu erstellte er auf Basis detaillierter Zeitstudien in 6 Bearbeitungsblöcken mittels einfacher Regression Produktivitätsmodelle, getrennt nach Baumart und Typ des Harvesters (Eingriff-/Zweigriffharvester). In diese Modelle wurde das mittlere Baumvolumen als einzige Einflussvariable aufgenommen. Der Vergleich der Harvestertypen wurde dann – genauso wie die Abschätzung des Einflusses der Baumart (Fichte, Kiefer, Birke) – durch einen Vergleich der Modelle miteinander vorgenommen.

Die Einflüsse des Maschinenführers und seiner Arbeitstechnik auf die Produktivität beim Einschlag von Rundholz wurden von OVASKAINEN et al. (2004) näher untersucht. Dazu wurden in zwei unterschiedlichen Kiefernbeständen Zeitstudien mit insgesamt sechs Maschinenführern durchgeführt und durch einfache Regressionsanalysen Produktivitätsmodelle für die einzelnen Maschinenführer in den jeweiligen Beständen erarbeitet. Auch in diesen Modellen wird die Produktivität in Abhängigkeit von dem mittleren Baumvolumen beschrieben und der Einfluss des Maschinenführers durch Vergleich der Modelle untereinander abgeschätzt.

Modelle für die Produktivität eines Harvester-Forwarder-Systems in Nadelholzbeständen erstellte MCNEEL (1994) auf der Basis detaillierter Zeitstudien. Zur Abschätzung der baumbezogenen Produktivität des Harvesters kombiniert er mehrere einfache Regressionsmodelle zu einem Produktivitätsmodell, in das der BHD und die Baumhöhe sowie die mittlere Fahrzeit pro Baum als Variable eingehen. In das entsprechende Produktivitätsmodell für den Forwarder gehen ebenfalls der BHD sowie unterschiedliche Fahrentfernungen des Forwarders ein (mittlere Fahrentfernung zwischen den Raubeugen auf der Rückegasse, mittlere Fahrentfernung am Polterplatz sowie die mittlere Leer- und Lastfahrentfernung).

3.2.2.3 Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz

In einem 3-jährigen Forschungsprojekt erarbeitete LÜTHY (1997b) auf Basis eines für schwedische Verhältnisse optimierten Modells von BERGSTRAND (1985) ein Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz. Durch die Kombination mehrerer einfacher Regressionen leitet er daraus ein Modell ab, in das der BHD des ausscheidenden Bestands, das zu rückende Holzvolumen (je Laufmeter Straße bzw. Rückegasse), die Eigenschaften der zu rückenden Sortimente (Baumart, Anteil krummes Holz, Länge der Sortimente) sowie der Forwardertyp und die Fahrdistanzen auf der Rückegasse, dem Maschinenweg und der Straße

als erklärende Variablen eingehen. Die Plausibilität und Funktionstauglichkeit dieses Modells wurde vor allem für Stangenhölzer und Durchforstungen im schwächeren Durchmesserbereich festgestellt. Auch wurden die mit dem Modell vorkalkulierten Produktivitäten vom Autor in Praxisversuchen überprüft. Dabei lagen die Abweichungen zwischen tatsächlicher und errechneter Produktivität in 11 von 18 Einsätzen bei weniger als 15 %. Mit Hilfe dieses Modells wurde die Software LUNA erarbeitet (siehe dazu LÜTHY et al., 1997), die inzwischen wiederum Bestandteil der Software HeProMo ist (WSL, 2007).

Ein Modell zur Abschätzung der Produktivität eines Harwarders (Kombimaschine aus Harvester und Forwarder), der als Forwarder eingesetzt wurde (Ponsse Buffalo Dual), und eines Forwarders (Gremo 950R) wurde von GHAFARIAN et al. (2007) auf der Basis von insgesamt 82 Arbeitszyklen entwickelt. Von den Autoren wurden dabei mit Hilfe einer multiplen Regressionsanalyse die Rückeentfernung, die Hangneigung sowie die mittlere Stückmasse als die wichtigsten Einflussvariablen auf die Produktivität identifiziert. Als weitere Variable wurde der Maschinentyp als so genannte Dummy-Variable in das Modell aufgenommen, d.h. auch zwischen den beiden Maschinen wurden signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer jeweiligen Produktivität festgestellt.

3.2.2.4 Produktivitätsmodelle für das Hacken von Energieholz

Für das Hacken von Energieholz wurde in der Vergangenheit von STAMPFER et al. (1997) auf Basis von Zeitstudien mittels multipler Regression ein Produktivitätsmodell erarbeitet, in das das zu hackende Volumen, der Hackertyp (als Dummy-Variable) sowie das Ausgangsmaterial (ebenfalls als Dummy-Variable) eingehen. Dieses Modell wurde durch Mitarbeiter der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft durch die Verknüpfung mit Ergebnissen von LÜTHY (1997a) weiterentwickelt und in die Software HeProMo integriert (WSL, 2007). Dieses Modell hat aber – wie BONT (2005) näher erläutert – deutliche Schwächen, wie z.B. eine sehr geringe und unsichere Datengrundlage. Auch wurde bislang keine Überprüfung der Produktivitätswerte in der Praxis vorgenommen. Gemäß BONT (2005) ist ein weiterer Schwachpunkt, „... dass das Modell davon ausgeht, dass die jeweils betrachteten Bäume vollständig gehackt werden. Eine Aufwandbetrachtung für Bäume (v.a. größerer Dimensionen), bei denen nur einzelne Teile gehackt werden ist nicht, oder nur durch Verwendung weiterer (unsicherer) Annahmen, möglich.“ Auch kann nur die Produktivität von Hackern mit einem Aufsattelcontainer ermittelt werden – andere Verfahren wie bspw. das weit verbreitete Hacken an der Waldstraße in einen externen Container werden nicht berücksichtigt.

Das Decision Support System „ChipCost“, wie es von SPINELLI und PETTENELLA (2001) beschrieben wird, basiert hingegen auf einer deutlich breiteren Datenbasis von mehr als 100 Versuchseinsätzen (siehe auch SPINELLI und HARTSOUGH, 2001; SPINELLI, 2003). Aus diesen Daten wurde mittels multipler Regression ein Produktivitätsmodell abgeleitet, in das die Motorleistung des Hackers sowie das durchschnittliche Gewicht des Hackmaterials als erklärende Variablen eingehen. Darüber hinaus können in dem Modell Angaben zum Ort des Hackens gemacht werden, wobei unterschieden wird zwischen dem „Hacken im Bestand“ und dem „Hacken an einem zentralen Platz“ („landing“). Außerdem besteht die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen selbstfahrenden Hackern und Anhängenhackern. Wird ein so genannter „kleiner Forwarderhacker“ (small chipforwarder) eingesetzt, kann auch dies definiert werden. Nach Angaben der Autoren kann mit diesem Modell aufgrund seiner hohen

statistischen Signifikanz die Produktivität eines Hackers ausreichend genau bestimmt werden. Auch wurde das Modell inzwischen anhand weiterer Praxisversuche validiert, in denen sich bestätigte, dass das Modell verlässliche Werte für die Abschätzung der Produktivität von Hackern liefert (SPINELLI und MAGAGNOTTI, 2008). Problematisch ist allerdings, dass der Einfluss von Variablen wie bspw. der Vorkonzentration des Energieholzes oder der Organisation des Hackschnitzel-Abtransports nur unzureichend abgebildet werden können. Zwar können Abschläge für Verzögerungen und Stillstandzeiten eingegeben werden, die Vorgaben für diese Angaben bewegen sich jedoch mit 35–70 % in einem sehr weiten Rahmen. Die Abschätzung des durchschnittlichen Gewichts des Energieholzes zur Berechnung der Produktivität scheint ebenfalls schwierig, auch wenn hier von den Autoren Orientierungswerte angegeben werden (siehe auch SPINELLI, 2001).

4 Material und Methoden

4.1 Durchführung der Metaanalyse

4.1.1 Datensammlung

Zur Durchführung der Metaanalyse wurde zunächst eine umfassende Erhebung und Analyse aktueller nationaler und internationaler Studien durchgeführt, die sich mit der Produktivität³ von Verfahren bei der Rundholz- und der Hackschnitzelbereitstellung in ebenen Lagen befassen.⁴ Dazu wurden die letzten Jahrgänge (ab 1996) einschlägiger nationaler und internationaler Fachzeitschriften mit dem Fokus auf inhaltlich relevante Veröffentlichungen von Untersuchungsergebnissen durchsucht. Ältere Jahrgänge wurden nur im Ausnahmefall berücksichtigt. Außerdem wurden Online-Kataloge von Bibliotheken und Literaturdatenbanken (z. B. Forest Science Database) im Hinblick auf relevante Publikationen überprüft sowie eine umfangreiche Internetrecherche (z. B. mit der Suchmaschine Google) durchgeführt. Um auch Untersuchungsergebnisse von Publikationen aus so genannter grauer Literatur (z. B. Diplomarbeiten, Tagungsberichte, Forschungsberichte etc.) einzubeziehen, wurden Jahresberichte und Homepages von wissenschaftlichen Instituten durchsucht, die sich mit vergleichbaren Fragestellungen beschäftigen. Konnten die identifizierten Artikel nicht via Fernleihe bestellt werden, wurden die Autoren persönlich kontaktiert, um auf diese Weise an die betreffende Arbeit zu gelangen.

In die Metaanalyse wurden weiterhin die Ergebnisse der in den Jahren 2003–2007 am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft durchgeführten Versuchsreihen (siehe z. B. CREMER, 2007; CREMER et al. 2007; LECHNER, 2004; LECHNER, 2007; SCHULER et al. 2007) einbezogen. Darüber hinaus wurde eine Vielzahl an Produktivitätswerten insbesondere für den Einschlag und das Rücken von Rundholz von Einschlagsunternehmen der Zellstoff- und Papierindustrie (z. B. Thurn und Taxis Waldpflege GmbH) sowie von staatlichen Forstmaschinenbetrieben (z. B. Forstlicher Maschinenbetrieb Ochsenberg) oder Landesforstverwaltungen (z. B. Niedersächsische Landesforsten) als Datensätze zur Verfügung gestellt und in die Auswertungen integriert.

Grundsätzlich wurden nur solche Produktivitätswerte in die Metaanalyse einbezogen, die Resultat einer empirisch ausgerichteten Primäruntersuchung sind. Dies bedeutet z. B., dass Produktivitäten, die aus Modellen abgeleitet wurden, nicht in die Metaanalyse einbezogen wurden. Zur Sicherung der Qualität wurden außerdem nur solche Werte von Primäruntersuchungen in die Analysen integriert, die auf tatsächlich gemessenen Zeiten bzw. auf nachprüfbaren Erhebungen basieren: Angaben, die auf reinen Schätzwerten oder Herstellerangaben beruhen, wurden nicht in die Analyse einbezogen. Generell ist dennoch zu beachten, dass die statistische Qualität – bspw. von Leistungsnachweisen der Maschinenbuchführung –

³ Die Metaanalyse wird auf Basis der Produktivität und nicht bspw. auf Basis der Kosten eines Verfahrens durchgeführt. Dies hat seinen Grund nicht nur in der Volatilität der Kosten, sondern auch darin, dass die Herkunft von Produktivitätswerten leichter nachvollziehbar und eine Vereinheitlichung dieser Daten leichter durchführbar ist, beides insbesondere vor dem Hintergrund, dass auch Quellen aus dem Ausland in die Metaanalyse einbezogen werden. Zudem finden sich in vielen Veröffentlichungen Angaben zur Produktivität eines Verfahrens, nicht aber zwangsläufig auch zu den Kosten.

⁴ Zwar wurden auch Untersuchungen recherchiert, die sich mit der Bereitstellung von Hackschnitzeln und Rundholz im Steilhang befassen. Da zu dieser Thematik jedoch nur sehr wenige Studien gefunden wurden, wurden diese in die weiteren Auswertungen nicht einbezogen.

oft geringer ist als z. B. Ergebnisse medizinischer Untersuchungen, in denen in aller Regel eine Vielzahl von statistischen Kennwerten und Größen angegeben werden. Solche Angaben sind in den Leistungsnachweisen und anderen Veröffentlichungen, die in die folgende Metaanalyse einbezogen wurden, nur in einem sehr geringen Umfang zu finden. Aus diesem Grund kommen einige der Instrumente, wie z. B. die Berechnung von Effektstärken, die in Metaanalysen auf bspw. medizinischem Gebiet zum Tragen kommen, in der vorliegenden Untersuchung nicht zum Einsatz.

4.1.2 Erfasste Variablen

Die Analysen wurden getrennt für die Bereitstellung von Rundholz und die Bereitstellung von Hackschnitzeln durchgeführt. Dabei wurden die Verfahren stets bis zur Bereitstellung des Endprodukts (Rundholz oder Hackschnitzel) an der Waldstraße betrachtet. Da die Produktivität bei Transportvorgängen in erster Linie distanzabhängig und somit nur schwer standardisierbar ist, wurde der Transport aus dem Wald an den jeweiligen Abnehmer außer Acht gelassen.

Nach GRAMMEL (1988) und WARKOTSCH (1975) setzt sich ein Verfahren grundsätzlich zusammen aus mehreren Verfahrensschritten (= Arbeitsablaufschritt; z. B. Einschlag, Rücken, Hacken), die wiederum durch einzelne Maschinen (z. B. Harvester, Forwarder, Hacker) charakterisiert sind. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde unterschieden zwischen dem Einschlag, ggf. dem motormanuellen Fällen und Vorliefern, dem Rücken sowie (nur bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln) ggf. dem Zwischentransport und dem Hacken des Holzes (siehe folgendes Kapitel 4.1.3). Damit können die Auswirkungen veränderter Bestandes- oder Aushaltungsbedingungen auf die einzelnen Verfahrensschritte dargestellt und analysiert werden. Mit einem solchen „modularen“ Vorgehen ist es außerdem möglich, Produktivitätsmodelle für einzelne Verfahrensschritte zu entwickeln, in unterschiedlicher Kombination zu einem Verfahren zusammenzufassen und diese Verfahren dann miteinander zu vergleichen.

Zusätzlich zu den einzelnen Produktivitätswerten wurden auch Angaben zu den in Tabelle 1 gezeigten Variablen erhoben und diese dann mit den Produktivitätswerten zu einem gemeinsamen Fall zusammengeführt. Ein Fall besteht also aus der Produktivitätsangabe für einen bestimmten Verfahrensschritt, gleichzeitig sind in diesem Fall aber auch die entsprechenden Angaben zu den in Tabelle 1 dargestellten Variablen enthalten.⁵

⁵ Ein Fall ist damit definiert als Gesamtheit der Werte, die die erhobenen Variablen in einer konkreten Nutzungssituation annehmen (siehe BROSIUS, 2004).

Tabelle 1: Im Rahmen der Metaanalyse erfasste Variable

Bestandeskennwerte	Hiebsparameter
Hauptbaumart des Bestands [Fichte ⁶ , Kiefer, Laubholz ⁷]	Rundholzanfall je Hektar [Efm/ha] ⁸
Mittlerer BHD des Ausgangsbestands [cm]	Energieholzanfall je Hektar [Efm/ha]
Mittlerer BHD des ausscheidenden Bestands [cm]	Zopfdurchmesser der Rundholzsortimente [cm]
Größe des Untersuchungsbestands [ha]	Aushaltung von Langholz oder Kurzholz
Holzvorrat des Ausgangsbestands [Vfm/ha]	Anzahl der Rundholzsortimente (Hauptbaumart)
Hangneigung [%]	Rückeentfernung [m]
	Rückegassenabstand [m]

4.1.3 Untersuchte Verfahrensschritte

4.1.3.1 Einschlag von Rund- und Energieholz

Vollmechanisiert

Die Produktivitätswerte von Harvestern beim Einschlag von **Rundholz** konnten im Rahmen der Metaanalyse nach den in Tabelle 2 gezeigten Harvestertypen differenziert werden. Dabei umfasst der Einschlag von Rundholz stets das Fällen und Aufarbeiten, während der Einschlag von Energieholz nur das Fällen beinhaltet, die Bäume dann aber nicht aufgearbeitet werden.

Tabelle 2: Untersuchte Harvestertypen, Anzahl der jeweiligen Fälle und wichtige technische Kennwerte (nach BFW, 2003 bzw. www.kwf-online.de)

	Anzahl Fälle	Anzahl Zylinder	Motorleistung	Anzahl Räder	Gewicht
Ponsse HS 16 bzw. Ergo	148	4	180 kW	6	15,9 t
Rottne H20	319	6	187 kW	6	21 t
Silvatec 866	121	6	160 kW	8	17,6 t
Skogsjan 695	249	6	165 kW	6	17,5 t
Timberjack (John Deere) 1270	198	6	160 kW	6	17,5 t
Timberjack (John Deere) 1470	181	6	180 kW	6	18,8 t
Sonstige	58	---	---	---	---

⁶ Unter dem Begriff „Fichte“ sind vor allem Fälle der Baumart Fichte zusammengefasst, es sind aber auch Fälle enthalten, bei denen die Baumart lediglich als „Nadelholz“ klassifiziert wird, bei denen aber keine näheren Angaben zur Baumart gemacht werden.

⁷ Unter dem Begriff „Laubholz“ sind Fälle der Baumarten Buche und Eiche zusammengefasst.

⁸ Wenn nicht anders angegeben, werden Angaben zum Rundholzanfall immer in Efm o.R./ha und Angaben zum Energieholzanfall immer in Efm m.R./ha gemacht.

In der Gruppe „Sonstige“ sind Harvestertypen mit einer jeweils sehr geringen Anzahl an Fällen (< 20) zusammengefasst.

Für die Produktivität von Harvestern beim Einschlag von **Energieholz** lagen sehr viel weniger Fälle (17) vor, sodass im Rahmen der Metaanalyse keine Differenzierung nach Harvestertypen vorgenommen wurde.

Motormanuell

Der enge Zusammenhang zwischen der Produktivität beim motormanuellen Einschlag von **Rundholz** und dem BHD des ausscheidenden Bestands und anderen Variablen ist bekannt und wurde in der Vergangenheit hinreichend untersucht (siehe dazu die ausführliche Beschreibung des Erweiterten Sortentarifs (EST, 2000) in Kapitel 3.2.2.2). Da sich die motormanuelle Fällarbeit und die Motorsägenteknik in den letzten Jahren jedoch nur geringfügig weiterentwickelt haben, bestand deshalb für diesen Verfahrensschritt keine Notwendigkeit, eine Metaanalyse durchzuführen.

Da jedoch im EST die Produktivität nur in Form von Zeittabellen ausgegeben wird, war es zur Beschreibung der Produktivität als kontinuierlicher Funktion notwendig, auf Basis des EST ein sehr einfach gehaltenes Modell zur Abschätzung der Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Rundholz zu berechnen. Auch zur einfachen Quantifizierung des Einflusses einer veränderten Aushaltung (Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz), die im EST nur sehr aufwändig über die Kombination mehrerer Zeittabellen möglich ist, bietet sich die Berechnung eines solchen Produktivitätsmodells an.

Dazu wurde mit Hilfe des HOLZERnte-Programms der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg in der Version 7.0 (FVA, 2007), in das die Produktivitätswerte des EST integriert sind, die Produktivität von Waldarbeitern bei motormanuellem Einschlag in denjenigen Beständen berechnet, die im Rahmen zahlreicher Versuchseinsätze von CREMER (2007), CREMER et al. (2007) und LECHNER (2007) vollgekluppt wurden und für die somit detaillierte Informationen über den ausscheidenden Bestand vorlagen. Für die Waldarbeiter wurde in Anlehnung an JACKÉ (2003) ein Zeitgrad von 160 % zugrunde gelegt. Weitere Zu- und Abschläge, die für Hiebserschwerisse im EST vorgesehen sind, wurden nicht vergeben.

Die so ermittelten Produktivitätswerte wurden für 2 Varianten berechnet: In der ersten Variante wurde die in Tabelle 5 (Seite 28) dargestellte Sortimentsgestaltung zugrunde gelegt (Aushaltung von Stammholz und Industrieholz (IL/IS)). In der zweiten Variante wurde davon ausgegangen, dass nur Stammholz aufgearbeitet wird (ebenfalls nach den Kriterien aus Tabelle 5), dass aber auf eine Aushaltung von Industrieholz (IL/IS) verzichtet wird. Damit wird einerseits die in einem konkreten Bestand eingeschlagene Gesamtmenge verringert. Gleichzeitig steigt jedoch die mittlere Stückmasse an, wodurch wiederum die Produktivität der Waldarbeiter erhöht wird.

In einem zweiten Schritt wurden, basierend auf den kalkulierten Produktivitätswerten der einzelnen Bestände, mit dem Programm WinStat (Version 2003.1) Produktivitätsmodelle für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Abhängigkeit von der Baumart und der Aushaltungsvariante kalkuliert.

Da der EST bzw. das darauf aufbauende HOLZERnte-Programm keine Produktivitätswerte für Waldarbeiter beim Einschlag von **Energieholz** enthält, wurde zur Ableitung eines entsprechenden Modells auf die im Rahmen der Metaanalyse erfassten Produktivitätswerte zurückgegriffen.

4.1.3.2 Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Rund- und Energieholz

Für den Verfahrensschritt des kombinierten motormanuellen Fällens und Vorlieferns von Bäumen aus der Zwischenzone⁹ an die Rückegasse mit einem Pferd oder unterstützt durch eine Seilwinde bzw. einen Forstspezialschlepper (zur weiteren Aushaltung von **Rundholz** durch einen Harvester) wurden in der Vergangenheit bereits mehrfach Untersuchungen durchgeführt und daraus Produktivitätsmodelle abgeleitet. Diese werden im Ergebnisteil dieser Arbeit vorgestellt. Da die Modelle nach Angaben der Autoren verlässliche Werte liefern, wurden zu diesem Verfahrensschritt im Rahmen der Metaanalyse keine weiteren Produktivitätswerte erhoben und stattdessen die existierenden Modelle angewendet.

Für das kombinierte motormanuelle Fällen und Vorliefern von **Energieholz** konnten in der Literatur keine Produktivitätswerte gefunden werden. Deshalb wurden Produktivitätswerte eigener Studien verwendet und analysiert.

4.1.3.3 Rücken von Rund- und Energieholz an die Waldstraße

Forwarder

Tabelle 3 zeigt die im Rahmen der Metaanalyse untersuchten Forwardertypen zur Ableitung eines Modells für das Rücken von **Rundholz**, die jeweilige Anzahl an Fällen, die in die Metaanalyse eingingen, sowie die Motorleistung und die Ladekapazität der einzelnen Forwardertypen.

Tabelle 3: Untersuchte Forwardertypen, Anzahl der jeweiligen Fälle und wichtige technische Kennwerte (nach BFW, 2003 bzw. www.kwf-online.de)

	Anzahl Fälle	Motorleistung	Ladekapazität
Rottne Rapid/F 12	460	93 kW	12 t
Rottne SMV/F 14	142	138 kW	16 t
Timberjack (John Deere) 1010	15	86 kW	10 t
Timberjack (John Deere) 1110	32	120 kW	12 t
Valmet 840.1	8	94 kW	11 t
Valmet 840.3	17	125 kW	12 t
Sonstige	19	---	---

⁹ Aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m; die Produktivität beim Fällen und Vorliefern bei einem Rückegassenabstand von 20 m wurde nicht untersucht.

Es wird deutlich, dass die einzelnen Forwardertypen unterschiedlich stark vertreten sind. So lagen 15 Fälle für die Produktivität des Timberjack (John Deere) 1010 vor, der mit einer verhältnismäßig geringen Ladekapazität (10 t) und Motorleistung (86 kW) ausgestattet und daher im unteren Bereich der Leistungsfähigkeit von Forwardern anzusiedeln ist. Demgegenüber lagen 32 Fälle für den Timberjack (John Deere) 1110 und 460 Fälle für den Rottne Rapid (mit dem Rottne F12 vergleichbar) vor, die, genauso wie die Forwardertypen Valmet 840.1 und Valmet 840.3 (8 bzw. 17 Fälle) mit einer Ladekapazität von 10–12 t und einer Motorleistung von 94–125 kW die Forwarder der mittleren Leistungsklasse repräsentieren. In der oberen Leistungsklasse konnten 142 Fälle für den Rottne SMV und das Nachfolgemodell, den Rottne F14 (Ladekapazität 16 t; Motorleistung 138 kW) in die Auswertungen einbezogen werden.

Für die Produktivität von Forwardern beim Rücken von **Energieholz** wurden im Rahmen der Metaanalyse insgesamt knapp 30 Fälle erfasst und analysiert. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Zahl an Fällen wurde der Einfluss unterschiedlicher Forwardertypen auf die Produktivität beim Rücken von Energieholz nicht untersucht.

Forstspezialschlepper

Auch das Rücken von **Rundholz** mittels Forstspezialschlepper, das stets auch das Vorliefern beinhaltet, konnte im Rahmen der Metaanalyse nicht differenziert nach Schleppertypen dargestellt werden, da insgesamt nur wenige Produktivitätswerte (knapp 20) vorlagen. Zudem wurden in der Mehrzahl dieser Fälle keine Angaben zum Schleppertyp gemacht.

Für das Rücken von **Energieholz** mit einem Forstspezialschlepper, das ebenfalls auch das Vorliefern des Energieholzes einschließt, konnten 26 Fälle erfasst werden. Aus diesem Grund wurde auch hier keine weitere Unterscheidung nach Schleppertypen vorgenommen.

4.1.3.4 Zwischentransport von Energieholz mit einem Langholz-LKW

Soll das Energieholz an einem zentralen Platz im Wald gehackt werden, muss es z. T. erst über längere Strecken transportiert werden. Da hierzu bislang keine Untersuchungen über geeignete Maschinen und deren Produktivität existieren, wurden am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft orientierende Studien zum Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz durchgeführt.

Ein solcher Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz kann grundsätzlich in Containern, mit einem Forwarder oder mit einem Langholz-LKW durchgeführt werden. Dabei ist ein Unterschied in der Produktivität der Maschinen in Abhängigkeit von der Baumart (Nadelholz/Laubholz) zu erwarten. Grundsätzlich sind damit sechs Varianten (3 Maschinen * 2 Baumarten) möglich. Drei dieser Varianten wurden am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft untersucht (siehe Tabelle 4, mit einem „X“ gekennzeichnet).

Dabei zeigte sich, dass der Transport von Buchenkronen aus der Durchforstung in Containern sehr zeitaufwändig und damit teuer ist und deshalb keine ökonomisch sinnvolle Option sein dürfte (siehe ZAHN, 2006).

Tabelle 4: Untersuchte Varianten zum Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz

	Nadelholz	Laubholz
Zwischentransport in Containern	---	X
Zwischentransport mit Langholz-LKW	X	---
Zwischentransport mit Forwarder	X (kalkulatorisch)	---

Demgegenüber zeigten SCHULER und CREMER (2007) und SCHULER et al. (2007), dass der Zwischentransport von Energieholz (Kronenmaterial aus Durchforstungen bzw. Endnutzungen in Fichten- bzw. Tannenbeständen) auf einen zentralen Hackplatz mit einem konventionellen Langholz-LKW mit eingelegter Wechselbrücke (Abbildung 1) insbesondere in Steilhanglagen wirtschaftlicher als herkömmliche Verfahren (Hacken an der Waldstraße) sein kann. Aus diesem Grund wurden, basierend auf der Untersuchung von SCHULER und CREMER (2007), Produktivitätsmodelle für den Zwischentransport von Energieholz mit einem Langholz-LKW erarbeitet.



Abbildung 1: Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Langholz-LKW mit eingelegter Wechselbrücke

Als dritte Variante wurde am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft auf kalkulatorische Weise der Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Forwarder untersucht (siehe ebenfalls SCHULER und CREMER, 2007 und SCHULER et al., 2007). Wird das Energieholz auf diese Weise transportiert, entfällt der Schritt des Umladens auf den Langholz-LKW. Andererseits erreicht der Forwarder auf der Fahrt zu dem zentralen Hackplatz nur eine deutlich geringere Fahrgeschwindigkeit als der Langholz-LKW. Deshalb ist zu erwarten, dass sich der Vorteil des Forwarders durch das Einsparen der Zeit für das Umladen des Energieholzes ab einer gewissen Fahrentfernung zugunsten des Langholz-LKW ins Gegenteil verkehrt. Diese Überlegungen wurden in den genannten Untersuchungen bestätigt: Es zeigte sich, dass der Zwischentransport des Energieholzes mit einem Forwarder je

nach Aushaltungskriterien für das Rundholz bis zu einer Entfernung von 1,0–1,8 km einfacher Fahrtentfernung die vorteilhaftere Variante ist. Bei weiter steigenden Transportentfernungen ist aus wirtschaftlichen Gründen der Zwischentransport des Energieholzes mit einem Langholz-LKW zu bevorzugen. Da die Ergebnisse dieser dritten Variante auf rein kalkulatorische Weise abgeleitet wurden, wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auf die Erstellung von Produktivitätsmodellen für diese Variante verzichtet.

4.1.3.5 Hacken von Energieholz

Zur Produktivität von Hackern konnten insgesamt knapp 100 Fälle in die Metaanalyse einbezogen werden. Dabei wurden grundsätzlich nur kranbesockte Hacker berücksichtigt, d. h. solche Hacker, die bei der Produktion von Hackschnitzeln in großem Maßstab zum Einsatz kommen.

In Abhängigkeit vom Hackertyp (Anhängenhacker oder Aufbauhacker, letzterer montiert auf einen LKW oder Forwarder) und vom Ort des Hackens konnte zwischen den folgenden vier Hacksystemen unterschieden werden:¹⁰

Hacken auf der Rückegasse in einen hackereigenen Aufsattelcontainer

Bei diesem System ist das Hackaggregat auf einen Forwarder montiert und es kann direkt auf der Rückegasse in den hackereigenen Aufsattelcontainer gehackt werden. Dann werden die Hackschnitzel durch den Hacker an die Waldstraße gerückt und in einen an der Waldstraße bereitstehenden Standardcontainer überkippt.¹¹ Der Abtransport dieser Container wird durch einen LKW oder Traktor durchgeführt (siehe Abbildung 2, links; 16 Fälle).

Hacken an der Waldstraße in einen hackereigenen Aufsattelcontainer

Bei diesem System ist das Hackaggregat auf einen Forwarder oder LKW montiert und das Hacken in den hackereigenen Aufsattelcontainer findet an der Waldstraße statt. Anschließend werden die Hackschnitzel in einen in der Nähe bereitstehenden Standardcontainer überkippt. Der Abtransport der Container wird durch einen LKW oder Traktor durchgeführt (siehe Abbildung 2, Mitte und rechts; 29 Fälle).

¹⁰ Eine weitere Aufteilung der Hacker in Abhängigkeit von der Motorleistung wurde nicht vorgenommen, da die Motorleistung eines Hackers nicht zwangsläufig vom Hackertyp bzw. dem Ort des Hackens abhängt. So sind laut KWF (2008b) bei Anhängenhackern, die eine vermeintlich geringere Motorleistung als Aufbauhacker aufweisen, Motorleistungen von bis zu 500 kW zu finden, während andererseits auch bei Hackaggregaten, die auf einen LKW oder Forwarder aufgebaut sind, Motorleistungen von „nur“ 200 kW zu finden sind.

¹¹ Für das Rücken der Hackschnitzels auf der Rückegasse mit einem so genannten Dumper (Shuttle-Fahrzeug) lagen keine Fälle vor, weshalb dieses Verfahren nicht berücksichtigt wurde.



Abbildung 2: Hacker mit hackereigenem Aufsattelcontainer, Einsatz auf der Rückegasse (links) oder an der Waldstraße (Mitte) und beim Überkippen der Hackschnitzel (rechts)

Hacken an der Waldstraße in einen Standardcontainer bzw. landwirtschaftlichen Anhänger

Bei diesem System ist das Hackaggregat auf einen LKW montiert oder als Anhängenhacker auf einen Traktor als Zugmaschine angewiesen. Das Hacken findet an der Waldstraße statt. Dabei werden die Hackschnitzel direkt in einen bereitstehenden Standardcontainer oder landwirtschaftlichen Anhänger produziert. Der Abtransport der Hackschnitzel wird durch einen LKW oder Traktor durchgeführt (siehe Abbildung 3; 42 Fälle).



Abbildung 3: Hacken an der Waldstraße in einen landwirtschaftlichen Anhänger (Fotos: SEIDL, 2006; VELAZQUEZ, 2006)

Hacken an einem zentralen Platz in einen Standardcontainer bzw. landwirtschaftlichen Anhänger oder auf einen Haufen als Zwischenlager

Bei diesem System ist das Hackaggregat auf einen LKW montiert oder als Anhängenhacker auf einen Traktor als Zugmaschine angewiesen. Das Hacken findet an einem zentralen Platz mit optimalen logistischen Bedingungen für den Abtransport mit einem LKW oder Traktor statt (siehe Abbildung 4; 8 Fälle).



Abbildung 4: Hacken an einem zentralen Platz auf einen Haufen (links) bzw. in einen landwirtschaftlichen Anhänger (rechts) (Fotos: CREMER, 2006; TEXTOR, 2005)

4.1.4 Datenevaluation und Aufbereitung der Fälle

Da die im Rahmen der Metaanalyse erfassten Fälle unterschiedlichen Quellen entstammten, mussten vor den weiteren Analysen die Bezugswerte (d. h. die produzierten Rundholz- bzw. Hackschnitzelvolumina sowie der BHD bzw. das mittlere Baumvolumen) und die Produktivitätswerte aufbereitet und vereinheitlicht werden. Alle Aufbereitungsschritte wurden – genauso wie die nachfolgenden Analysen – mit der Statistik-Software SPSS (Version 14.0.2) durchgeführt, zum Teil ergänzt durch das in MS Excel integrierte Programm WinStat, Version 2003.1.

Umrechnung verschiedener Volumeneinheiten

Die Umrechnung der unterschiedlichen Volumeneinheiten wurde nach folgenden Regeln durchgeführt:

1 Vorratsfestmeter (Vfm) = 0,8 Erntefestmeter (Efm)
(→ 1 Erntefestmeter = 1,25 Vorratsfestmeter)

1 Erntefestmeter (Efm) = 2,5 Schüttraummeter (Srm)
(→ 1 Schüttraummeter = 0,4 Erntefestmeter)

(siehe KANZIAN, 2005; DIETER und ENGLERT, 2001; Ö-NORM 7132)

Berechnung des BHDs aus dem mittleren Baumvolumen

Da für einige Fälle nur Angaben über das mittlere Baumvolumen, in anderen Fällen nur Angaben über den mittleren BHD des jeweils ausscheidenden Bestands vorlagen, wurde für alle Fälle der mittlere BHD abgeleitet. Zwar empfehlen PAUSCH und PONITZ (2002) für die Berechnung von Produktivitätsmodellen statt des mittleren BHDs die Verwendung des mittleren Baumvolumens; da aber der BHD in der Praxis einfacher und schneller zu erheben ist und da in den verwendeten Studien in der Mehrzahl der Fälle Angaben zum BHD, nicht aber zum mittleren Baumvolumen gemacht wurden, wurde in der vorliegenden Untersuchung stets mit dem mittleren BHD des ausscheidenden Bestands gearbeitet.

Zur Umrechnung des mittleren Baumvolumens in den mittleren BHD wurden mit Hilfe des Programms „BDAT Schafffunktionen“ (Version 1.2) der FVA Baden-Württemberg in Kombination mit Ertragstafeln für Fichte, Kiefer und Buche mittlerer Ertragsklasse (LFV BADEN-

WÜRTTEMBERG, 1993) der jeweilige BHD bei einem gegebenen mittleren Baumvolumen errechnet.

Umrechnung verschiedener Produktivitätswerte

Grundsätzlich wurden alle Produktivitätswerte auf die reine Arbeitszeit (RAZ) bezogen (siehe dazu auch REFA, 1998). Die RAZ entspricht dabei der so genannten "pmh₀", d.h. der "productive machine hour" (siehe dazu z. B. SPINELLI et al., 2004). Sowohl die RAZ wie auch die pmh₀ bezeichnen die reine Arbeitszeit, d.h. hier sind Störungen, Verteilzeiten u.Ä. nicht berücksichtigt.

Produktivitätswerte, die als Maschinenarbeitsstunde (MAS) angegeben waren, wurden auf die RAZ umgerechnet. Dazu wurde, in Anlehnung an RIEGER (1983) davon ausgegangen, dass die MAS der "pmh₁₅" entspricht. Beide setzen sich zusammen aus der RAZ (bzw. der pmh₀) sowie sämtlichen Unterbrechungen mit einer Dauer von weniger als 15 min (siehe z. B. STAMPFER, 2000). Zur Umrechnung der MAS auf die RAZ (bzw. der pmh₁₅ auf die pmh₀) wurde davon ausgegangen, dass die auf die RAZ bezogene Produktivität um 15 % höher liegt im Vergleich zu der auf die MAS bezogenen Produktivität. So gehen auch SPINELLI und VISSER (2008) von einem Anteil der Unterbrechungen mit einer Dauer von weniger als 15 min an der MAS von 11 % aus.

Zur Umrechnung von Produktivitätswerten, die als Gesamtarbeitszeit (GAZ) angegeben waren (dies trifft vor allem auf die Produktivität von Waldarbeitern bei motormanueller Arbeit zu), wurde davon ausgegangen, dass die auf die RAZ bezogene Produktivität um 20 % höher liegt im Vergleich zu der auf die GAZ bezogenen Produktivität. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die sachlichen und persönlichen Verteilzeiten der Waldarbeiter einen Anteil von ca. 17 % an der GAZ haben. Dass diese Werte realistisch sind, zeigt bspw. ein Vergleich mit PAUSCH (2007), der bei seinen Kalkulationen von einem 20-prozentigen Anteil der Allgemeinen Zeiten an der GAZ ausgeht.

Aufbereitung der Produktivitätswerte für das Hacken von Energieholz

Beim Hacken von Energieholz ist zu berücksichtigen, dass bei suboptimaler Organisation der Logistik sehr hohe Stillstandzeiten für den Hacker auftreten können. Diese Stillstandszeiten sind dann jedoch nicht primär durch den Hacker selbst verursacht, sondern resultieren bspw. aus einer zu geringen Verfügbarkeit von Fahrzeugen oder Containern zum Abtransport der Hackschnitzel oder sind insbesondere beim Hacken an der Waldstraße die Folge beengter Verhältnisse am Arbeitsort. Dies bedeutet aber, dass diese Zeiten bei einer weiteren Professionalisierung der Bereitstellung von Hackschnitzeln und einer daraus resultierenden Optimierung der Logistik mindestens zum Teil vermeidbar wären.

Aus dem im Rahmen der Metaanalyse herangezogenen Datenmaterial war zu ersehen, dass bei den Produktivitätsangaben von Hackern die Stillstandzeiten aufgrund von bspw. fehlenden Containern zwar ausgewiesen, aber in voller Höhe in die RAZ eingerechnet wurden. Dies führt zu einer sehr hohen Varianz und zu einer Überlagerung von technik- und verfahrensbedingten Abhängigkeiten. Um hier eine Vergleichbarkeit der Produktivitätsangaben zu ermöglichen, wurden die Wartezeiten grundsätzlich auf einen Anteil von 10 % an der RAZ gekürzt.

4.1.5 Datenanalyse und Auswertung der Fälle

Zur weiteren Analyse wurden die Produktivitätswerte der vergleichbaren Verfahrensschritte zu einem neuen (Meta-)Datensatz zusammengefasst und mit Hilfe statistischer Berechnungen auf die relevanten Variablen hin analysiert. Dazu wurden, um einen ersten Überblick zu erhalten, Boxplots und Streudiagramme der Produktivität in Abhängigkeit von den vorliegenden Variablen erstellt. Anschließend wurden Korrelationen (in Abhängigkeit von der Datenlage nach PEARSON bzw. nach SPEARMAN¹²) und in einem weiteren Schritt schrittweise (i. d. R. multiple) Regressionen berechnet, um so weitere Aussagen über die Stärke (Korrelation) und die Art (Regression) eines Zusammenhangs zwischen der Produktivität und einer bzw. mehrerer Variablen treffen zu können (siehe auch KÖHLER et al., 2002).

Um die Geltung der Produktivitätsmodelle zu überprüfen, wurden in Anlehnung an BARTH (1997) insbesondere die Residuenverteilungen der einzelnen Modelle auf ihre Normalverteilung hin kontrolliert. Dies geschah zum einen mittels Histogrammen, anhand derer die Normalverteilung der standardisierten Residuen grafisch abgelesen werden kann, zum anderen wurde die Verteilung der standardisierten Residuen einer kumulierten Normalverteilung (dargestellt durch eine Gerade) gegenübergestellt. Dabei sind geringfügige Abweichungen der Residuen von der Normalverteilung nicht ungewöhnlich und insofern auch tolerierbar (siehe z. B. BROSIUS, 2004). Problematisch wäre hingegen, wenn bestimmte Muster wie bspw. eine Trichterform zu erkennen sind, da dann davon ausgegangen werden muss, dass die Residuen nicht zufällig auftreten. Dies kann z. B. bedeuten, dass in das gewählte Modell nicht alle relevanten erklärenden Variablen aufgenommen wurden oder dass eine falsche funktionale Form gewählt wurde (z. B. ein linearer statt eines quadratischen Zusammenhangs).

Alle schrittweisen Regressionen wurden mit dem von der Software SPSS standardmäßig vorgegebenen, so genannten listenweisen Fallausschluss berechnet. Dabei werden Fälle, die nicht zu allen Variablen eine Angabe machen, aus der Regression ausgeschlossen. Auf diese Weise wurde der Stichprobenumfang für diejenigen Variablen, die in die Regression einbezogen wurden, gleich gehalten (siehe dazu BROSIUS, 2004). So konnte das Problem unterschiedlicher Stichprobengrößen ausgeschlossen werden, wodurch sich Korrelationskoeffizienten von größer als 1 (siehe z. B. ROHRSCHEIDER, 2007) oder auch mathematische Inkonsistenzen, d. h. empirisch unmögliche Ergebnisse, hätten ergeben können (siehe dazu auch WIRTZ, 2004). Um den Nachteil des listenweisen Fallausschlusses, die Reduktion der Anzahl an Fällen, zu minimieren, wurden die Regressionen dahingehend variiert, dass Variablen mit einem besonders hohen Anteil an fehlenden Werten in den Analysen nicht zwangsweise berücksichtigt wurden (siehe auch ROHRSCHEIDER, 2007). Auch die übrigen Standardeinstellungen der Software SPSS wie z. B. Prüfungswahrscheinlichkeiten wurden beibehalten.

¹² Der Korrelationskoeffizient nach PEARSON wurde dann berechnet, wenn von einem linearen Zusammenhang zwischen den Variablen ausgegangen werden konnte (siehe z. B. KÖHLER et al., 2002). Wurde diese Voraussetzung nicht erfüllt, wurde der Korrelationskoeffizient nach SPEARMAN berechnet.

4.2 Durchführung der Beispielkalkulationen

Um die Funktionsweise und die Plausibilität der im Rahmen der Metaanalyse für die einzelnen Verfahrensschritte entwickelten Produktivitätsmodelle zu überprüfen, wurden diese in Beispielkalkulationen auf konkrete Bestände und Aushaltungsvarianten angewendet. Dazu wurden die Verfahrensschritte zu sechs beispielhaften, in der Praxis gebräuchlichen Verfahren zusammengefasst. Mit den Bestandeskennwerten als Eingangsvariablen konnten dann bestandesbezogene Produktivitätswerte für die einzelnen Verfahrensschritte berechnet werden. Daraus wiederum konnten für die sechs Verfahren die jeweils für das Rundholz und die Hackschnitzel anfallenden Stückkosten und Nettoflächenerlöse abgeleitet werden.

4.2.1 Ausgewählte Bestände und untersuchte Aushaltungsvarianten

Für die Beispielkalkulationen wurden sechs Bestände ausgewählt, die als typisch für die jeweilige Baumart und Altersklasse gelten können. Die wichtigsten Kennwerte dieser Bestände wurden im Rahmen von Vollkluppungen detailliert erhoben (siehe dazu auch CREMER, 2007; LECHNER, 2007). In einem zweiten Schritt wurden für diese Bestände mit Hilfe des HOLZ-ERNT-Programms (FVA, 2007) unter Zugrundelegung der in Tabelle 5 gezeigten Aushaltungskriterien die theoretischen Volumenanfälle, vorkalkuliert, getrennt nach den Sortimenten Stammholz (STH), Industrieholz (IH) und Hackschnitzeln (HS).

Tabelle 5: Aushaltungskriterien für die Vorkalkulation der Volumenanfälle (siehe auch LECHNER, 2007)

	HKS-Klasse	Güte	Länge [m]	Zopf [cm]
Nadelholz (Fichte/ Kiefer)	STH	B-C	5,00	15
	STH	B-C	2,40	13
	IL	IN	3,00	8
	IS	IN	2,00	8
Laubholz	STH	B-C	5,40	18
	STH	B-C	2,70	18
	IL	IN	4,00 – 6,00	10
Energieholz	Nutzungsgrad ¹³ 95 % (nicht-verwertbares Derbholz, inkl. potenziellem X-Holz)			
	Nutzungsgrad 60 % (Nichtderbholz)			

Bei der Berechnung der Volumenanfälle wurde zwischen drei beispielhaften Aushaltungsvarianten unterschieden (siehe dazu auch LECHNER, 2007). Diese stellen sich dar wie folgt:

¹³ In der Praxis verbleiben nutzungsbedingt stets gewisse Anteile des Derbholzes und des Nichtderbholzes im Bestand.

- **Aushaltungsvariante 1:** Es findet eine Bereitstellung von Stammholz (STH) und Industrieholz (IH) statt und es werden keine Hackschnitzel (HS) bereitgestellt.
- **Aushaltungsvariante 2:** Es findet eine Bereitstellung von Stammholz (STH) und Industrieholz (IH) statt und das als Kuppelprodukt anfallende Kronenmaterial wird zur Produktion von Hackschnitzeln (HS) genutzt.
- **Aushaltungsvariante 3:** Es findet eine Bereitstellung von Stammholz (STH) und Hackschnitzeln (HS) statt, auf die Aushaltung von Industrieholz (IH) wird verzichtet.

Der Stammholzanfall bleibt in allen drei Aushaltungsvarianten derselbe. Auch der Industrieholzanfall der Aushaltungsvarianten 1 und 2 unterscheidet sich nicht, da die Aushaltungskriterien die gleichen sind. In Aushaltungsvariante 2 wird die bislang ungenutzt im Bestand verbleibende Restkrone sowie das übrige Ast- bzw. Reisigmateriel als Hackschnitzel *zusätzlich* zum Stamm- und Industrieholz genutzt. Demgegenüber steht Aushaltungsvariante 3, bei der nur die Sortimente Stammholz und Hackschnitzel ausgehalten werden. Hier wird das gesamte potenziell anfallende Industrieholz (inkl. schwacher Vollbäume aus denen kein Stammholz ausgehalten werden kann) dem Hackschnitzelsortiment zugerechnet. Die wichtigsten Kennwerte der Bestände, in denen die Beispielkalkulationen durchgeführt wurden, sowie die jeweiligen Volumenfälle sind in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Kennwerte der Beispielbestände für die Überprüfung der Produktivitätsmodelle

	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
Baumart	Fichte	Fichte	Buche	Buche	Kiefer	Kiefer
Alter	37	95	41	80	40	77
Mittl. BHD ¹⁴	21,0 cm	32,7 cm	17,6 cm	30,6 cm	24,2 cm	35,2 cm
Volumenanfall (1)	STH: 67,0 Efm/ha	STH: 84,2 Efm/ha	STH: 14,2 Efm/ha	STH: 43,9 Efm/ha	STH: 42,8 Efm/ha	STH: 75,0 Efm/ha
	IH: 16,6 Efm/ha	IH: 5,1 Efm/ha	IH: 25,4 Efm/ha	IH: 12,9 Efm/ha	IH: 20,4 Efm/ha	IH: 6,5 Efm/ha
	HS: 21,9 Efm/ha	HS: 13,6 Efm/ha	HS: 30,2 Efm/ha	HS: 21,5 Efm/ha	HS: 22,0 Efm/ha	HS: 13,1 Efm/ha
Volumenanfall (2)	STH: 67,0 Efm/ha	STH: 84,2 Efm/ha	STH: 14,2 Efm/ha	STH: 43,9 Efm/ha	STH: 42,8 Efm/ha	STH: 75,0 Efm/ha
	HS: 40,8 Efm/ha	HS: 19,4 Efm/ha	HS: 58,0 Efm/ha	HS: 35,7 Efm/ha	HS: 44,8 Efm/ha	HS: 20,3 Efm/ha

„Volumenanfall (1)“ entspricht dem Volumenanfall von Aushaltungsvariante 1 (STH und IH) und Aushaltungsvariante 2 (STH, IH und HS), während „Volumenanfall (2)“ dem Volumenanfall von Aushaltungsvariante 3 (STH und HS) entspricht.

¹⁴ Ausscheidender Bestand.

4.2.2 Untersuchte Verfahren

Im Rahmen der Beispielkalkulationen wurde ein teilmechanisiertes Verfahren untersucht, das bei einem Rückegassenabstand von 40 m von einem motormanuellen Einschlag, Vorliefern und Rücken mit einem Forstspezialschlepper und Hacken des Energieholzes an der Waldstraße ausgeht. Als Abkürzung des Verfahrens wurde entsprechend die Bezeichnung TM40WS (teilmechanisiert, 40-m-Rückegassenabstand, Hacken an der Waldstraße) gewählt. Entsprechend sind die Verfahren 2 und 3 mit VM40WS und VM40RG bezeichnet (vollmechanisierte Verfahren, d. h. Einsatz von Harvester und Forwarder, 40-m-Rückegassenabstand (aufgrund dessen ein motormanuelles Fällen und Vorliefern notwendig ist) und Hacken an der Waldstraße respektive Rückegasse). Die Verfahren 4–6 (VM20WS, VM20RG und VM20ZP) repräsentieren vollmechanisierte Verfahren bei einem Rückegassenabstand von 20 m und unterscheiden sich lediglich im Hinblick auf den jeweiligen Ort des Hackens (Waldstraße, Rückegasse, Zentraler Platz) sowie die damit verbundenen vorangestellten Verfahrensschritte für das Energieholz. Tabelle 7 zeigt die genannten Verfahren in der Übersicht:

Tabelle 7: Verfahren, die im Rahmen der Beispielkalkulationen untersucht wurden

	Verfahrensschritte Rundholz			Verfahrensschritte Hackschnitzel			
	Einschlag	Motorman. Fällen und Vorliefern	Rücken	Einschlag	Motorman. Fällen und Vorliefern	Rücken	Ort des Hackens
1 TM40WS	Motormanuell (s. Kap. 5.1.2)	---	Forstspezial- schlepper ¹⁵ (s. Kap. 5.4.2)	Ggf. motor- manuell (s. Kap. 5.2.2)	---	Forstspezial- schlepper ¹⁵ (s. Kap. 5.5.2)	Waldstraße (s. Kap. 5.7)
2 VM40WS	Voll- mechanisiert (s. Kap. 5.1.1)	Forstspezial- schlepper ¹⁶ (s. Kap. 5.3.1)	Forwarder (s. Kap. 5.4.1)	Ggf. voll- mechanisiert (s. Kap. 5.2.1)	Ggf. Forstspezial- schlepper (s. Kap. 5.3.2)	Forwarder (s. Kap. 5.5.1)	Waldstraße (s. Kap. 5.7)
3 VM40RG	Voll- mechanisiert (s. Kap. 5.1.1)	Forstspezial- schlepper (s. Kap. 5.3.1)	Forwarder (s. Kap. 5.4.1)	Ggf. voll- mechanisiert (s. Kap. 5.2.1)	Ggf. Forstspezial- schlepper (s. Kap. 5.3.2)	---	Rückegasse (s. Kap. 5.7)
4 VM20WS	Voll- mechanisiert (s. Kap. 5.1.1)	---	Forwarder (s. Kap. 5.4.1)	Ggf. voll- mechanisiert (s. Kap. 5.2.1)	---	Forwarder (s. Kap. 5.5.1)	Waldstraße (s. Kap. 5.7)
5 VM20RG	Voll- mechanisiert (s. Kap. 5.1.1)	---	Forwarder (s. Kap. 5.4.1)	Ggf. voll- mechanisiert (s. Kap. 5.2.1)	---	---	Rückegasse (s. Kap. 5.7)
6 VM20ZP	Voll- mechanisiert (s. Kap. 5.1.1)	---	Forwarder (s. Kap. 5.4.1)	Ggf. voll- mechanisiert (s. Kap. 5.2.1)	---	Forwarder/LKW ¹⁷ (s. Kap. 5.6)	Zentraler Platz (s. Kap. 5.7)

¹⁵ Schließt auch das Vorliefern des Holzes an die Rückegasse ein.

¹⁶ Aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m.

¹⁷ Einsatz eines LKW zum Zwischentransport des Energieholzes auf einen zentralen Hackplatz.

Die in Tabelle 7 mit dem Zusatz „ggf.“ gekennzeichneten Produktivitätsmodelle für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Energieholz kommen nur bei Aushaltungsvariante 3 zur Anwendung. Grund hierfür ist, dass bei dieser Aushaltungsvariante auf die Aushaltung von Industrieholz verzichtet wird (siehe z. B. LECHNER, 2007; KUPRAT und WENZELIDES, 2002). In diesem Fall werden diejenigen Bäume, aus denen zwar ein Industrieholzsortiment, aber kein Stammholzsortiment ausgehalten werden könnte (da sie dessen Aushaltungskriterien nicht erfüllen), ausschließlich und vollständig als Energieholz zur Hackschnitzelproduktion aufgearbeitet und es muss eine entsprechende Produktivität zugerechnet werden. Die Berechnung dieser Produktivität wird im folgenden Kapitel im Detail dargestellt. Wird hingegen Industrieholz ausgehalten (Aushaltungsvarianten 1 und 2), werden die Bäume, wie in Tabelle 5 gezeigt, im Nadelholz bis zu einem Zopf von 8 cm und im Laubholz bis zu einem Zopf von 10 cm aufgearbeitet. Damit kann auch aus den schwachen Bäumen zumindest ein Industrieholzsortiment ausgehalten werden. Deshalb wird bei Aushaltungsvariante 2 davon ausgegangen, dass für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern keine auf das Energieholz bezogenen Produktivitätswerte zugerechnet werden müssen.

Zur Anwendung der Produktivitätsmodelle wurden, zusätzlich zu den Bestandeskennwerten in Tabelle 6, weitere Eingangsvariablen definiert:

- **Einschlag Rundholz, vollmechanisiert:** Hier wurde von einem Harvester des Typs „Skogsjan“ ausgegangen.
- **Rücken Rundholz, Forwarder:** Hier wurde ein Forwarder der mittleren Leistungsklasse sowie eine Ruckeentfernung von 250 m zugrunde gelegt.
- **Rücken Rundholz, Forstspezialschlepper:** Zugrunde gelegt wurde eine Ruckeentfernung von 250 m.
- **Zwischentransport des Energieholzes mit Langholz-LKW:** Hier wurde die Produktivität ausgehend von einer mittleren einfachen Fahrdistanz von 2 km kalkuliert.

Alle Produktivitätsberechnungen wurden mit der Software MS Access (Version 5.1) durchgeführt.

4.2.3 Berechnung der Stückkosten

Bei der Berechnung der Stückkosten eines Verfahrens muss sowohl bei der teilmechanisierten wie auch bei der vollmechanisierten Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln zwischen den folgenden Aushaltungsvarianten unterschieden werden (siehe auch Kapitel 4.2.1):

4.2.3.1 Aushaltungsvariante 1

Bei Aushaltungsvariante 1 findet eine Bereitstellung von Stammholz und Industrieholz statt und es werden keine Hackschnitzel bereitgestellt.

Hier können die Stückkosten direkt über die Produktivität der Verfahrensschritte beim Einschlag und Rücken des Rundholzes und die angenommenen Stundensätze (siehe Tabelle 8, S. 37) kalkuliert werden.

4.2.3.2 Aushaltungsvariante 2

Bei Aushaltungsvariante 2 findet eine Bereitstellung von Stammholz und Industrieholz statt und das als Kuppelprodukt anfallende Kronenmaterial wird zur Produktion von Hackschnitzeln genutzt.

Damit können die Stückkosten für das getrennte Rücken von Rund- und Energieholz sowie die Stückkosten für das Hacken aus der jeweiligen Produktivität in Kombination mit den entsprechenden Stundensätzen abgeleitet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass das Energieholz als Kuppelprodukt des Rundholzes eingeschlagen wird und dass dafür kein zusätzlicher Aufwand entsteht.¹⁸ Damit können die Gesamtkosten für den Einschlag über die Produktivität der jeweiligen Verfahrensschritte beim Einschlag von Rundholz in Kombination mit den entsprechenden Stundensätzen ermittelt werden.¹⁹ Für die Aufteilung dieser Gesamtkosten auf die Sortimente ergibt sich jedoch keine a priori zwingende Kalkulationsregel. Stattdessen kann für die Berechnung der Kosten, die jeweils auf das Rundholz und die Hackschnitzel entfallen, auf die folgenden drei Vorgehensweisen zurückgegriffen werden (verändert nach HUDSON et al., 1990 und STUROS et al., 1983):

Joint products allocation

Hier werden alle Kosten, die nicht eindeutig dem einen oder anderen Endprodukt zugerechnet werden können, gleichmäßig auf die Gesamtmenge aller Produkte verteilt. Dazu werden die gesamten Einschlagskosten durch das gesamte Erntevolumen (Rundholz und Hackschnitzel) geteilt. Als Resultat erhält man die Einschlagskosten je Festmeter. Die übrigen Stückkosten werden berechnet, wie bei Aushaltungsvariante 1 beschrieben.

Im vorliegenden Fall wäre die Kostenzurechnung wie folgt (nach HUDSON et al., 1990):

$$\text{Stückkosten Rundholz [€/Efm]} = E_{VB} + R1$$

$$\text{Stückkosten Hackschnitzel [€/Efm]} = E_{VB} + R2 + H$$

E_{VB} = Einschlagskosten [€/Efm_{Vollbaum}]

$R1$ = Rückekosten Rundholz [€/Efm_{Rundholz}]

$R2$ = Rückekosten Energieholz [€/Efm_{Hackschnitzel}]

H = Hackkosten [€/Efm_{Hackschnitzel}]

Somit würden dem Rundholz und den Hackschnitzeln je Einheit Einschlagskosten in gleicher Höhe zugerechnet.

¹⁸ Zwar ermitteln STISSEL (2002) und SCHULER und CREMER (2007) für den Harvester einen Mehraufwand durch das geordnete Ablegen der Krone auf Rauhbeugen entlang der Rückegasse zwischen 5,7–11 % bezogen auf die RAZ (im Vergleich zum Belassen der Krone am Ort des Sortimentsschnitts). Dem gegenüber stehen jedoch Untersuchungen von GEWECKE (2004), STERNER (2004) und THEES, et al. (2003), die aufgrund der zunehmenden Übung der Maschinenführer mit steigender Einsatzdauer davon ausgehen, dass kein Mehraufwand für das geordnete Ablegen der Krone zu verzeichnen ist, zumal auch ohne die Aushaltung von Energieholz die Kronen in Stücke geschnitten und geordnet an der Rückegasse abgelegt werden müssten.

¹⁹ Gleiches gilt für den Verfahrensschritt des motormanuellen Fällen und Vorliefern.

By-products allocation

Kommt diese Option zur Anwendung, werden die Endprodukte in Haupt- und Nebenprodukte unterteilt. Als Hauptprodukt gelten jene Produkte, deren Verkaufswert den der Nebenprodukte deutlich übersteigt. Dabei werden die Kosten, die nicht eindeutig einem der Endprodukte zugerechnet werden können, vom Hauptprodukt getragen. Als Kosten für die Nebenprodukte zählen somit nur die Kosten jener Arbeitsprozesse, die zusätzlich und ausschließlich für das Nebenprodukt nach der Trennung vom Hauptprodukt anfallen. Diese werden, genauso wie die übrigen Stückkosten des Hauptprodukts, auf die bei Aushaltungsvariante 1 beschriebene Weise berechnet.

Im vorliegenden Fall würde eine Kostenberechnung also wie folgt durchgeführt:

$$\text{Stückkosten Rundholz [€/Efm]} = E_{RH} + R1$$

$$\text{Stückkosten Hackschnitzel [€/Efm]} = R2 + H$$

E_{RH} = Einschlagskosten [€/Efm_{Rundholz}]

$R1$ = Rückekosten Rundholz [€/Efm_{Rundholz}]

$R2$ = Rückekosten Energieholz [€/Efm_{Hackschnitzel}]

H = Hackkosten [€/Efm_{Hackschnitzel}]

Man erkennt, dass die Einschlagskosten vollständig auf das Rundholz umgelegt werden und den Hackschnitzeln als Nebenprodukt keine Kosten für den Einschlag zugerechnet werden.

Apportioned inputs allocation

Wird dieses Verfahren angewendet, so werden die Kosten, die sich nicht eindeutig einem der Endprodukte zurechnen lassen, nach dem Verhältnis bestimmter Kennwerte auf die einzelnen Produkte aufgeteilt (d.h. im Verhältnis z.B. zum Gewicht, zum Volumen, zum späteren Verkaufswert). Die übrigen Stückkosten werden berechnet, wie bei Aushaltungsvariante 1 beschrieben.

Angenommen, der durchschnittliche, gewogene Preis für Stamm- und Industrieholz betrüge 75 €/Efm und der durchschnittliche Preis für Hackschnitzel 25 €/Efm und es erfolgt eine Aufteilung der Kosten nach dem Preis, so wäre die Kostenberechnung wie folgt:

$$\text{Stückkosten Rundholz [€/Efm]} = (E * 75/(75+25))/V_{RH} + R1$$

$$\text{Stückkosten Hackschnitzel [€/Efm]} = (E * 25/(75+25))/V_{HS} + R2 + H$$

E = Einschlagskosten [€]

V_{RH} = Volumenanteil Rundholz

$R1$ = Rückekosten Rundholz [€/Efm_{Rundholz}]

V_{HS} = Volumenanteil Hackschnitzel

$R2$ = Rückekosten Energieholz [€/Efm_{Hackschnitzel}]

H = Hackkosten [€/Efm_{Hackschnitzel}]

Damit würden die Kosten für den Einschlag in Anlehnung an das anfallende Volumen zu 75 % dem Rundholz und zu 25 % den Hackschnitzeln zugerechnet.

Problematisch im Hinblick auf dieses Verfahren ist insbesondere die Wahl der „korrekten“ Verhältniszahl, anhand derer die Kosten aufgeteilt werden. Würden bei der Kostenverteilung statt der Preise bspw. das Gewicht zugrunde gelegt, würden den Hackschnitzeln deutlich andere Einschlagskosten als bei Anwendung der Preise als Kennzahl angerechnet werden.

Bewertung der Kalkulationsregeln

Auch wenn HUDSON et al. (1990) das letztgenannte Verfahren der „Apportioned inputs allocation“ favorisieren, wird in der vorliegenden Arbeit zur Berechnung der Kosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in erster Linie auf das Verfahren der „By-products-allocation“ zurückgegriffen. Dies auch im Hinblick darauf, dass dieses Verfahren (in Deutschland als das so genannte Restwertverfahren oder auch Subtraktionsverfahren bezeichnet) auch nach FANDEL et al. (2004) dann Anwendung findet, wenn „... eines der Kuppelprodukte eindeutig als Hauptprodukt aus dem Kuppelproduktionsprozess hervorgeht, während es sich bei den anderen Kuppelprodukten um Nebenprodukte handelt.“²⁰ Das Kuppelprodukt, das als Hauptprodukt aus dem Produktionsprozess entsteht, zeichnet sich dadurch aus, dass seine Herstellung geplant ist, weil sein ökonomischer Wert den Wert der Nebenprodukte weit übersteigt“ (FANDEL et al., 2004).²¹ Beides trifft auf das Rundholz im Vergleich zu den Hackschnitzeln eindeutig zu und auch SPINELLI und MAGAGNOTTI (2007) berechnen die Kosten für Hackschnitzel und Rundholz nach diesem Verfahren.

4.2.3.3 Aushaltungsvariante 3

Bei Aushaltungsvariante 3 findet eine Bereitstellung von Stammholz und Hackschnitzeln statt, auf die Aushaltung von Industrieholz wird verzichtet.

Bei dieser Aushaltungsvariante sind die auf das Stammholz und die Hackschnitzel entfallenden Rückekosten bei getrennter Rückung von Stamm- und Energieholz ebenso wie die Kosten des nachfolgenden Hackens eindeutig zuordenbar. Damit können die entsprechenden Stückkosten auf die bei Aushaltungsvariante 1 beschriebene Weise berechnet werden.

Für die Verfahrensschritte, deren Kosten nicht eindeutig dem Stammholz oder den Hackschnitzeln zugeordnet werden können, werden die Stückkosten unter Zugrundelegung von kalkulatorischen Produktivitäten wie folgt berechnet:

Einschlag von Energieholz durch Waldarbeiter

Die kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern für den Einschlag des Energieholzes wird durch Bildung von Differenzen hergeleitet. Dazu wurden die auf das Stammholz entfallenden Arbeitszeiten mit Hilfe der EST-Zeittabellen und den jeweils gültigen Leistungsgraden und Zuschlägen ermittelt. Aus der Gesamtarbeitszeit abzüglich der so berechneten Arbeitszeit für

²⁰ Damit umfasst der Begriff des Kuppelprodukts nach FANDEL, et al. (2004) also sowohl das Hauptprodukt, wie auch das Nebenprodukt.

²¹ Demgegenüber kommt das Äquivalenzziffern- oder Verteilungsverfahren (entspricht dem Verfahren der „Apportioned inputs allocation“) dann zur Anwendung, „...wenn keines der Kuppelprodukte als eindeutiges Hauptprodukt aus dem Kuppelproduktionsprozess hervorgeht.“ (FANDEL et al., 2004). Dies ist im Hinblick auf die hier vorliegende Kuppelproduktion, wo Rundholz bislang noch eindeutig das Hauptprodukt und Hackschnitzel das Nebenprodukt sind, nicht der Fall.

das Stammholz ergibt sich dann die Arbeitszeit für das Fällen des zusätzlich anfallenden Energieholzes (siehe auch PETERSEN, 2004). Aus dieser Arbeitszeit werden dann die Stückkosten abgeleitet.

Einschlag von Energieholz durch Harvester

Um für den Einschlag des Energieholzes durch Harvester ebenfalls eine kalkulatorische Produktivität herzuleiten, wurden die Zeiten für das Fällen derjenigen Bäume, aus denen kein Stammholz ausgehalten werden kann und die somit als Vollbaum dem Energieholz zugerechnet werden, separat aufgenommen bzw. über Leistungstabellen nachträglich ermittelt. Alle übrigen Zeiten des Harvesters, die sich nicht eindeutig dem Stammholz- oder dem Energieholzsortiment zurechnen lassen (z. B. Fahrbewegungen im Bestand), wurden dem Stammholzsoriment zugerechnet. Damit kann die Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz wie folgt hergeleitet werden:

$$Produktivität_{EH} = \frac{(Hiebsanfall_{oSTH} + Kronenvolumen_{mSTH})}{t_{oSTH}}$$

$Produktivität_{EH} =$	Produktivität von Waldarbeitern oder Harvestern beim Einschlag von Energieholz [Efm/h RAZ]
$Hiebsanfall_{oSTH} =$	Volumen der Bäume, aus denen kein Stammholz ausgehalten werden kann und die somit als Vollbaum dem Energieholz zugerechnet werden [Efm/ha]
$Kronenvolumen_{mSTH} =$	Volumen des Kronenmaterials der Bäume, aus denen Stammholz ausgehalten wird [Efm/ha] ²²
$t_{oSTH} =$	Zeitbedarf für das Fällen der Bäume, aus denen kein Stammholz ausgehalten wird und die somit als Vollbaum dem Energieholz zugerechnet werden [h/ha]

In dieser Formel wird also dem Zeitbedarf für das Fällen der Bäume ohne Stammholzanfall sowohl der Volumenanteil der Bäume ohne Stammholzanfall als auch das gesamte Volumen des Kronenmaterials der Bäume mit Stammholzanfall gegenübergestellt. Damit ist diese Produktivität zwangsläufig sehr hoch. Wie oben erwähnt, ist diese Produktivität jedoch rein kalkulatorischer Natur und dient vor allem dazu, um daraus in Kombination mit den Stundensätzen die den Hackschnitzeln zuzurechnenden Einschlagskosten kalkulieren zu können.

Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Energieholz

Die kalkulatorische Produktivität der Waldarbeiter beim motormanuelle Fällen und Vorliefern, deren Kosten sich bei Aushaltungsvariante 3 ebenfalls nicht eindeutig den Sortimenten Stammholz und Energieholz zurechnen lassen, werden auf die gleiche Weise hergeleitet, wie die kalkulatorische Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz.

²² In der Praxis ist keine Unterscheidung zwischen den Parametern „Hiebsanfall_{oSTH}“ und „Kronenvolumen_{mSTH}“ möglich, aber auch nicht notwendig.

Einschlag von Stammholz durch Waldarbeiter

Durch den Verzicht auf die Aushaltung eines Industrieholzsortiments aus schwächeren Bäumen (die damit, wie beschrieben, als Vollbaum dem Energieholz zugerechnet werden) ist für Waldarbeiter eine gesteigerte Produktivität beim Einschlag des Stammholzes zu erwarten. Diese wird mit Hilfe des EST berechnet (siehe dazu Kapitel 4.1.3.1, S. 18 und Kapitel 5.1.2, S. 59).

Einschlag von Stammholz durch Harvester

Für Harvester wird die gesteigerte Produktivität für den Einschlag von Stammholz ermittelt, indem die Differenz zwischen der Zeit für den Einschlag von Stammholz *und* Industrieholz abzüglich der Zeit für den Einschlag von Energieholz gebildet wird. Die entsprechende Formel lautet wie folgt:

$$Produktivität_{STH} = \frac{(Hiebsanfall_{STH})}{t_{RH} - t_{oRH}}$$

$Produktivität_{STH}$ = Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Stammholz [Efm/h RAZ]

$Hiebsanfall_{STH}$ = Stammholzanfall [Efm/ha]

t_{RH} = Zeitbedarf für den Einschlag von Stamm- *und* Industrieholz [h/ha]
(Berechnet als Quotient aus dem Anfall von Stamm- und Industrieholz [Efm/ha] und der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Stamm- und Industrieholz [Efm/h RAZ], siehe Kapitel 5.1.1)

t_{oRH} = Zeitbedarf für Einschlag des Energieholzes [h/ha]
Berechnet als Quotient aus dem Energieholzanfall und der Produktivität beim Einschlag des Energieholzes [Efm/ha] (siehe Kapitel 5.2.1)

Daraus werden dann in Kombination mit den Stundensätzen die entsprechenden Stückkosten für den Einschlag des Stammholzes abgeleitet.

Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Stammholz

Die gesteigerte Produktivität beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Stammholz im Vergleich zum motormanuellen Fällen und Vorliefern von Stamm- *und* Industrieholz wird auf die gleiche Weise ermittelt wie die gesteigerte Produktivität beim Einschlag von Stammholz durch Harvester.

Rücken von Stammholz und Energieholz mit einem Forstspezialschlepper

Werden die Bäume mit und die Bäume ohne Stammholzanfall gemeinsam mit einem Forstspezialschlepper vorgeliefert und an die Waldstraße gerückt und erfolgt erst dort die weitere Aufarbeitung getrennt nach den Sortimenten Stammholz und Energieholz, wie es in Versuchen von LECHNER (2004) praktiziert wurde, so wird die Herleitung der Produktivität und die Kostenzurechnung für das Rücken des Stamm- und Energieholzes nach OLIVIER, 2004 durchgeführt. Dabei wird die Zeit, die der Forstspezialschlepper für die Lastbildung und das Poltern aufwenden muss, in Anlehnung an die Anzahl der gerückten Stamm- und Energieholzstücke aufgeteilt. Die für die Leer- und Lastfahrt aufgewendete Zeit wird hingegen anteilig zur Erntemenge von Stamm- und Energieholz aufgeteilt.

4.2.3.4 Stundensätze zur Kalkulation der Stückkosten

Zur Berechnung der Stückkosten wurden in Anlehnung an LECHNER (2007) modifizierte Stundensätze des Lohntarifvertrags für Waldarbeiter (LTW, 2003), des KWF (2004) und der „Orientierungsliste Maschinenmietsätze“ des Regierungspräsidiums Freiburg verwendet (RP FREIBURG, 2002; s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Stundensätze zur Kalkulation der Stückkosten (inkl. Lohn- und Lohnnebenkosten)

		Stundensatz
Einschlag	Waldarbeiter	30 €/h GAZ
	Harvester	120 €/MAS
Vorliefern	Motormanuelles Fällen und Vorliefern mit Seilschlepper	75 €/h GAZ ²³
Rücken	Forstspeziialschlepper	55 €/MAS
	Forwarder	65 €/MAS
Zwischen-transport	LKW	75€/MAS
Hacken	Hacker	200 €/MAS ²⁴

Zur Ableitung der Stückkosten mussten die Produktivitätswerte auf die Einheit [Efm/MAS] bzw. [Efm/h GAZ] bezogen werden. Dazu wurde davon ausgegangen, dass die auf die RAZ bezogene Produktivität um 15 % höher als die auf die MAS bezogene Produktivität (siehe Kapitel 4.1.4). Beim motormanuellen Einschlag wurde die Produktivität ebenso wie beim motormanuellen Fällen und Vorliefern bereits auf die GAZ bezogen, sodass hier keine Umrechnung zur Ableitung der Stückkosten notwendig war.

4.2.4 Ermittlung des Nettoflächenerlöses

Bei der Entscheidung für oder gegen die Anwendung eines bestimmten Verfahrens in einem konkreten Bestand sollte neben den Stückerlösen (dem holzerntekostenfreien Erlös je produzierter Einheit) auch der Nettoflächenerlös herangezogen werden, da bei unterschiedlichem mengenmäßigem Anfall an Produkten nur auf dieser Grundlage eine fundierte Entscheidung

²³ Zwei-Mann-Rotte mit Seilschlepper.

²⁴ Unabhängig vom Ort des Hackens; siehe auch Fußnote 10, S. 18.

5 Produktivitätsmodelle als Ergebnis der Metaanalyse

5.1 Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz

5.1.1 Produktivitätsmodelle für den vollmechanisierten Einschlag von Rundholz mit einem Harvester

5.1.1.1 Ergebnisse der Metaanalyse

Insgesamt wurden im Rahmen der Metaanalyse im BHD-Bereich zwischen 11,8–44,1 cm knapp 1.300 Fälle mit Angaben zur Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz erfasst. Beispielhaft für die erstellten Streudiagramme zur Prüfung des Zusammenhangs zwischen der Produktivität und anderen Variablen zeigt Abbildung 5, dass zwischen der Produktivität als abhängige Variable und dem BHD des ausscheidenden Bestands als unabhängige Variable offensichtlich ein Zusammenhang besteht.

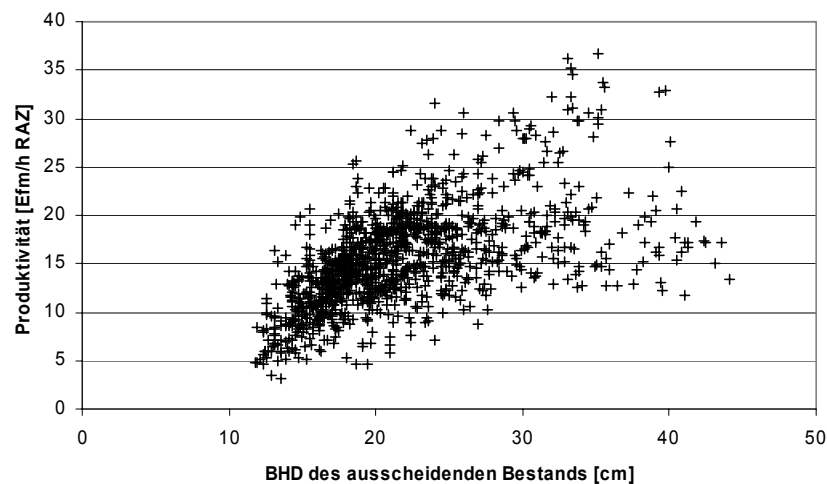


Abbildung 5: Abhängigkeit der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (1.274 Fälle)

Es fällt auf, dass die Anzahl an Fällen im BHD-Bereich zwischen ca. 15–25 cm sehr viel höher ist, als im BHD-Bereich > 25 cm, weshalb schon hier beachtet werden muss, dass spätere Aussagen über die Produktivität von Harvestern in schwachen Beständen belastbarer sind als entsprechende Aussagen für starke Bestände (siehe auch HEINIMANN, 1999). Der Zusammenhang ist nicht linear und mit zunehmendem BHD ist eine zunehmende Streuung der Produktivität zu erkennen (Heteroskedastizität). Dies ist insofern wenig überraschend, als Harvester in der Regel für Durchmesserbereiche zwischen 15–30 cm optimiert sind (PRÖLL, 2004) und deshalb außerhalb dieses Optimalbereichs (vor allem bei höheren BHD) eine breitere Streuung der Produktivität zu erwarten ist.

Zur Abschätzung der Validität wurde zunächst ein Produktivitätsmodell berechnet, das auf ca. 90 % der Fälle²⁵ basierte und in das ausschließlich der BHD als unabhängige Variable einging. Dieses Modell wurde mit demjenigen Modell verglichen, das auf Grundlage der übrigen 10 % der Fälle erstellt wurde. Daraus ergibt sich das in Abbildung 6 gezeigte Bild:

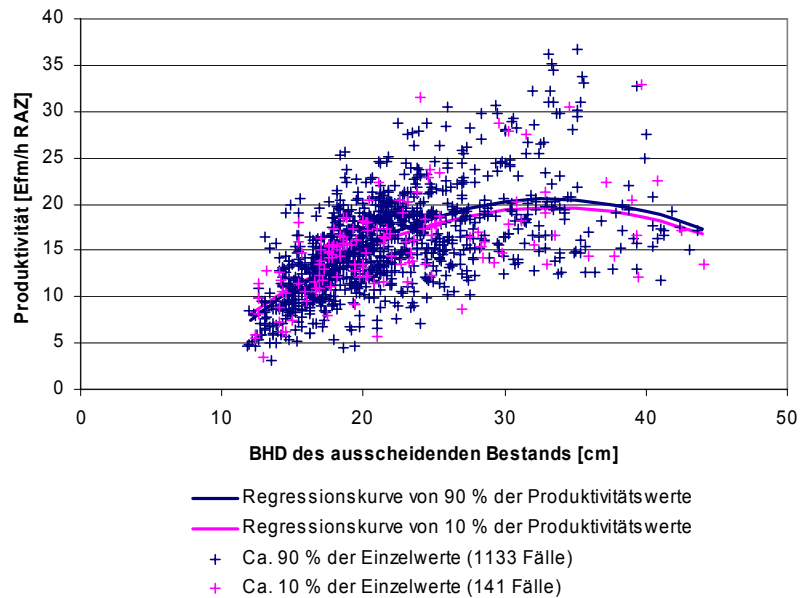


Abbildung 6: Allgemeines Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz (1.133 bzw. 141 Fälle)

Die den beiden Regressionskurven in Abbildung 6 hinterlegten Modelle lauten wie folgt (Formel 1 und Formel 2):

$$\text{Formel 1: Produktivität (90 \% der Fälle) [Efm/h RAZ]} = -0,0287 * BHD^2 + 1,917 * BHD - 11,49$$

$$\text{Formel 2: Produktivität (10 \% der Fälle) [Efm/h RAZ]} = -0,0254 * BHD^2 + 1,698 * BHD - 8,56$$

Dabei ist

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Schon hier kann angesichts eines Bestimmtheitsmaßes (R^2) von 0,406 bzw. 0,379 konstatiert werden, dass der BHD einen großen Teil der Gesamtstreuung erklärt und somit eine wichtige Einflussvariable für die Produktivität eines Harvesters beim Einschlag von Rundholz darstellt. Zudem ist zu erkennen, dass die beiden Regressionskurven in Lage und Verlauf gut miteinander übereinstimmen: Über den gesamten Durchmesserbereich betrachtet, liegt die Differenz zwischen den mit den beiden Modellen berechneten Produktivitäten bei weniger als 1 % bzw. 0,2 Efm/h RAZ: Das errechnete Modell besitzt also grundsätzlich eine hohe Validität.

²⁵ Ausgewählt mit Hilfe von Zufallszahlen.

Um weitere Einflussvariablen auf die Produktivität von Harvestern zu identifizieren und um damit das allgemeine Modell (Abbildung 6) besser an die Punktwolke anpassen zu können²⁶, werden in Tabelle 11 die arithmetischen Mittelwerte der Produktivität und der mittlere BHD des ausscheidenden Bestands für die einzelnen Harvestertypen differenziert nach der Baumart und dem Rückegassenabstand dargestellt. Dabei sind alle Fälle (100 %) in die Analyse einbezogen.

Es wird deutlich, dass die Anzahl an Fällen für die einzelnen Baumarten stark variiert: Liegen für Fichtenbestände insgesamt 857 Fälle vor, sind es für Kiefernbestände 324 Fälle und für Laubholzbestände 93, d.h. Produktivitätswerte für Fichtenbestände sind deutlich stärker vertreten als die entsprechenden Werte für Kiefern- oder Laubholzbestände. Dies spiegelt die aktuelle Situation in der vollmechanisierten Holzernte wider, wo Harvester vorrangig in Fichten- bzw. Kiefernbeständen eingesetzt werden, da der Einschlag in Laubholzbeständen durch eine höhere Zahl an Zwieseln, stärkere Astigkeit und Krümmung der Bäume sowie wegen des höheren Gewichts im Vergleich zum Einschlag in Fichtenbeständen erschwert ist (KWF, 1998; RAAB, 1999). Aus diesem Grund werden in Laubholzbeständen noch immer in höherem Maße teilmechanisierte Verfahren zur Holzernte eingesetzt (siehe auch SUCHOMEL, 2008). Es spielt ebenfalls eine Rolle, dass die Fichte in Baden-Württemberg und die Kiefer in Niedersachsen (aus diesen beiden Bundesländern stammt die Mehrzahl der Fälle) die dominierenden Baumarten sind, sodass auch aus diesem Grund für diese Baumarten mehr Fälle vorliegen. Zu beachten ist weiterhin die allgemein hohe Standardabweichung insbesondere der Werte für den mittleren BHD. Sie liegt für einzelne Harvestertypen bei über 7 cm und spiegelt damit ein weites Einsatzspektrum der untersuchten Harvester wider.

²⁶ Dies kann bspw. an einem steigenden R^2 abgelesen werden.

Tabelle 11: Mittlerer BHD des ausscheidenden Bestands und mittlere Produktivität der Harvestertypen sowie die jeweilige Standardabweichung und Anzahl an Fällen, getrennt nach Baumart, Harvestertyp und Rückegassenabstand

Baumart	Harvester- typ	Rückegassen- abstand	Mittlerer BHD [cm]	Standard- abweichung	Mittlere Produktivität [Efm/h RAZ]	Standard- abweichung	N
Fichte	TJ 1270	20 m	21,1	5,2754	15,3	3,6023	173
		40 m	21,7	3,6933	12,2	3,5403	9
	TJ 1470	20 m	21,2	4,6245	16,7	3,2370	162
		40 m	16,9	2,1793	7,4	2,5032	7
	Ponsse	20 m	20,1	6,1350	15,6	3,9136	94
	Rottne	20 m	23,4	6,8129	18,7	6,0141	100
	Silvatec	20 m	15,6	3,0064	10,2	3,1058	102
	Skogsjan	20 m	24,1	7,8171	14,5	2,9668	172
	Sonstige	20 m	21,7	5,7821	13,5	4,8177	22
		40 m	21,2	3,5870	15,4	3,4676	16
	Insgesamt	20 m	21,3	6,3902	15,2	4,4307	825
		40 m	20,4	3,7762	12,8	4,5057	32
Insgesamt		21,2	6,3128	15,1	4,4543	857	
Laubholz	TJ 1270	20 m	24,1	7,1593	9,0	1,6920	5
	TJ 1470	20 m	17,6	,0000	13,9	1,6979	3
		40 m	19,5	2,5884	12,7	2,0741	9
	Rottne	20 m	20,3	2,1643	15,4	4,4140	18
	Silvatec	20 m	17,5	4,5300	12,2	3,9071	8
	Skogsjan	20 m	19,6	3,4706	12,3	3,3721	50
	Insgesamt	20 m	19,8	3,8499	12,8	3,8379	84
		40 m	19,5	2,5884	12,7	2,0741	9
Insgesamt	19,7	3,7380	12,8	3,6966	93		
Kiefer	TJ 1270	20 m	18,4	1,2729	14,0	2,1796	11
	Ponsse	20 m	19,8	3,5254	13,1	2,6412	54
	Rottne	20 m	25,2	4,8957	20,2	5,5845	201
	Silvatec	20 m	18,4	3,2399	10,8	3,1026	11
	Skogsjan	20 m	25,0	5,9016	15,3	3,3719	27
	Sonstige	20 m	19,7	4,8277	13,3	6,8103	20
	Insgesamt	20 m	23,5	5,3216	17,6	5,9775	324
Insgesamt		21,7	5,9998	15,6	5,0211	1.274	

Weiterhin fällt in Tabelle 11 auf, dass sich die Produktivität der Harvester trotz geringer Unterschiede im jeweils mittleren BHD (Fichtenbestände: 21,2 cm, Laubholzbestände: 19,7 cm und Kiefernbestände: 23,5 cm) mit 12,8–17,6 Efm/h RAZ in Abhängigkeit von der Baumart deutlich unterscheidet. Dieser signifikante Einfluss der Baumart wird durch den Test nach STUDENT-NEWMAN-KEULS²⁷ bestätigt. Dessen Ergebnis, in Tabelle 12 dargestellt, zeigt, dass sich die Mittelwerte der Produktivität in Abhängigkeit von der jeweiligen Baumart tatsächlich signifikant voneinander unterscheiden. Dies bedeutet, dass für die weiteren Analysen keine Untergruppen (z. B. Fichten- und Kiefernbestände) zusammengefasst werden sollten, weshalb die drei Baumarten auch während der folgenden Berechnungen getrennt voneinander behandelt wurden.

Tabelle 12: Mittelwertvergleich der Produktivität von Harvestern beim Rundholzeinschlag in Abhängigkeit von der Baumart nach STUDENT-NEWMAN-KEULS

Baumart	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
Laubholz	93	12,799		
Fichte	857		15,073	
Kiefer	324			17,639
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

In Tabelle 11 zeigt sich auch, dass für einen Rückegassenabstand von 20 m deutlich mehr Fälle vorliegen (über 1.000) im Vergleich zu Fällen für einen Rückegassenabstand von 40 m (ca. 40 Fälle). Einer der Hauptgründe hierfür könnte sein, dass Harvester bei einem Rückegassenabstand von 40 m aufgrund des dann notwendigen motormanuellen Fällens und Vorlieferns nur selten eingesetzt werden (siehe auch MORAT et al., 1998 und RAAB, 1999). Da die 40 Fälle jedoch ein verhältnismäßig weites Spektrum abbilden (sie stammen aus acht Untersuchungen aus dem süddeutschen Raum), wurde die Variable „Rückegassenabstand“, einen signifikanten Einfluss vorausgesetzt, dennoch in die Auswertungen einbezogen. Auch wird gerade in Tabelle 11 ein möglicher Einfluss des Rückegassenabstands auf die Produktivität von Harvestern deutlich: So liegt in der Mehrzahl der Fälle die mittlere Produktivität eines Harvestertyps bei einem Rückegassenabstand von 40 m trotz eines oft höheren mittleren BHD *unter* der Produktivität desselben Harvestertyps bei einem Rückegassenabstand von 20 m. Damit hätte ein Verzicht auf diese Fälle deutliche Einschränkungen in der Gültigkeit und Anwendbarkeit des Modells mit sich gebracht.

Um weitere Informationen über die Stärke des Zusammenhangs zwischen der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz und möglichen Einflussvariablen zu erhalten, wurden Korrelationskoeffizienten berechnet. Diese Korrelationskoeffizienten zeigt Tabelle 13:

²⁷ Dieser Test prüft, ob sich Untergruppen (in diesem Fall die Baumarten) zu größeren Gruppen zusammenfassen lassen, oder ob sie sich signifikant voneinander unterscheiden und somit die bestehende Gruppeneinteilung beibehalten werden sollte (KÖHLER, et al., 2002).

Tabelle 13: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz und möglichen Einflussvariablen

		Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Rundholzanfall [Efm/ha]	Flächen- größe [ha]
Produktivität [Efm/h RAZ]	Korrelations- koeffizient	1	,552(**)	,277(**)	,335(**)
	Signifikanz (2-seitig)	.	<,001	<,001	<,001
	N	1.274	1.274	376	384
BHD des aussch. Bestands [cm]	Korrelations- koeffizient	,552(**)	1	,096(*)	,022
	Signifikanz (2-seitig)	<,001	.	,023	,602
	N	1.274	2.217	554	581
Rundholz- anfall [Efm/ha]	Korrelations- koeffizient	,277(**)	,096(*)	1	-,010
	Signifikanz (2-seitig)	<,001	,023	.	,813
	N	376	554	555	555
Flächen- größe [ha]	Korrelations- koeffizient	,335(**)	,022	-,010	1
	Signifikanz (2-seitig)	<,001	,602	,813	.
	N	384	581	555	582

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen deutlich, dass zwischen dem BHD des ausscheidenden Bestands und der Produktivität von Harvestern beim Rundholzeinschlag mit 0,552 ein relativ straffer Zusammenhang besteht. Dieser Zusammenhang wurde in der Vergangenheit durch zahlreiche andere Untersuchungen bestätigt (siehe z. B. FORBRIG, 2000; HEINIMANN, 1999; RAAB, 1999; SAUTER et al., 1998). Die Zusammenhänge zwischen der Produktivität und dem Rundholzanfall je Hektar sowie zwischen der Produktivität und der Flächengröße sind ebenfalls signifikant, aber deutlich schwächer ausgeprägt. Die Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten stellen sich erwartungsgemäß dar: Die Produktivität nimmt mit steigendem BHD, steigender Flächengröße und steigendem Rundholzanfall zu. Für weitere Variablen konnte keine signifikante Korrelation mit der Produktivität von Harvestern nachgewiesen werden.

Außerdem fällt auf, dass die Datengrundlage für die Berechnung einiger der Koeffizienten mit knapp 400 Fällen deutlich schmaler ist im Vergleich zu bspw. dem mit 1.274 Fällen sehr gut besetzten Zusammenhang zwischen der Produktivität und dem BHD des ausscheidenden

Bestands.²⁸ Dies liegt in der Tatsache begründet, dass für die Mehrzahl der Fälle keine Angaben zu den Variablen „Flächengröße“ und „Rundholzanfall je Hektar“ vorliegen.

Um Informationen über die Art des Zusammenhangs zwischen der Produktivität als abhängiger Variable und den in Tabelle 1 aufgeführten, unabhängigen Variablen zu erhalten und um damit ein Modell zur Beschreibung der Produktivität und deren Änderung in Abhängigkeit von diesen Variablen zu erstellen, wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, eine multiple, schrittweise Regression berechnet. Während dabei der BHD als metrische Variable in seiner vorliegenden Form in die Regression aufgenommen werden konnte, war für die nominal skalierten Variablen „Baumart“, „Rückegassenabstand“ und „Harvestertyp“ die Bildung von so genannten Dummy-Variablen notwendig, um diese in die Regression integrieren zu können (über das Vorgehen bei der Verwendung von Dummy-Variablen vergleiche hierzu den „Exkurs zum Thema Dummy-Variable“, auf Seite 46 oder auch BORTZ, 1999). Die genannten Variablen wurden wie folgt codiert:

Baumart

- **Kiefer:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Laubholz:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Fichte:** liegt automatisch dann vor, wenn „Kiefer“ und „Laubholz“ den Wert 0 annehmen

Um außerdem die Wechselwirkung zwischen BHD, Baumart und Produktivität darstellen zu können, wurden zwei weitere Variablen berechnet, indem der BHD mit der Dummy-Variablen der jeweiligen Baumart multipliziert wurde (so genannte Effektvariable).

- **Kiefer * BHD:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Laubholz * BHD:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Fichte * BHD:** liegt automatisch dann vor, wenn „Kiefer * BHD“ und „Laubholz * BHD“ den Wert 0 annehmen

Rückegassenabstand

- **Rückegassenabstand:** 1 = 40-m-Rückegassenabstand; 0 = 20-m-Rückegassenabstand

Harvestertyp (in Anlehnung an die in Tabelle 2 genannten Harvestertypen)

- **Harvestertyp „Ponsse“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Harvestertyp „Rottne“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Harvestertyp „Silvatec“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor

²⁸ Dennoch kann auch mit 400 Fällen ein aussagekräftiger Korrelationskoeffizient berechnet werden, sodass es wenig plausibel scheint, die Unterschiede zwischen den gezeigten Korrelationskoeffizienten durch die unterschiedliche Anzahl an Fällen zu begründen.

- **Harvestertyp „Skogsjan“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Harvestertyp „TJ 1270“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Harvestertyp „TJ 1470“:** 1 = liegt vor; 0 = liegt nicht vor
- **Sonstige Harvestertypen:** liegt automatisch dann vor, wenn „Harvestertyp „Ponsse“, „Harvestertyp „Rottne“, „Harvestertyp „Silvatec“, „Harvestertyp „Skogsjan“, „Harvestertyp „TJ 1270“ und „Harvestertyp „TJ 1470“ den Wert 0 annehmen

Exkurs zum Thema Dummy-Variable

In der vorliegenden Untersuchung kann es von Interesse sein, zu wissen, inwiefern bspw. die Baumart oder der Harvestertyp die Produktivität eines Harvesters bei einer konkreten Erntemaßnahme beeinflusst. Allerdings können solche nominal skalierten Variablen nicht als solche in eine Regressionsanalyse einbezogen werden, da Variable hierfür mindestens Intervallskalenniveau aufweisen müssen (siehe BROSIUS, 2004). Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, wäre, mit den jeweiligen Fällen für die Baumarten Fichte, Laubholz und Kiefer drei verschiedene Produktivitätsmodelle zu errechnen und miteinander zu vergleichen. Gleiches gilt für die Untersuchung des Einflusses des Harvestertyps, wofür in der vorliegenden Untersuchung sechs verschiedene Produktivitätsmodelle errechnet werden müssten. Soll nun jedoch der Einfluss von Baumart *und* Harvestertyp untersucht werden, so wären hierfür insgesamt $3 * 6 = 18$ unterschiedliche Produktivitätsmodelle notwendig, um alle möglichen Kombinationen abzubilden.

Der große Vorteil der Verwendung von Dummy-Variablen liegt darin, die Produktivität in Abhängigkeit von dem BHD, dem Harvestertyp und der Baumart in *einem einzigen* Modell darstellen zu können, d.h. es kann auf die Berechnung von 18 verschiedenen Modellen – jeweils mit einer entsprechend geringeren Datengrundlage für das einzelne Modell – verzichtet werden. Dazu werden für die nominal skalierten Variablen „Baumart“ und „Harvestertyp“ so genannte Stellvertreter-Variablen (= Dummy-Variablen) gebildet. Die Besonderheit dieser Variablen ist, dass sie lediglich die Ausprägungen 1 (Ausprägung liegt vor) oder 0 (Ausprägung liegt nicht vor) annehmen können.

Für die Variable „Baumart“, die 3 Ausprägungen (bzw. k Ausprägungen) annehmen kann (nämlich Fichte, Laubholz, Kiefer), müssten demnach 3 (k) Dummy-Variablen gebildet werden (für jede Baumart eine Dummy-Variable mit den Ausprägungen 0 und 1). Tatsächlich sind jedoch nur 2 ($k-1$) Dummy-Variablen zur Darstellung der 3 Ausprägungen nötig, da die dritte Ausprägung (in diesem Fall die Ausprägung „Fichte“) automatisch dann vorliegt, wenn die beiden anderen Ausprägungen (Laubholz und Kiefer) den Wert 0 aufweisen. Die Informationen, die eine dritte Dummy-Variable beinhalten würde, wären somit redundant zu denen der ersten beiden Dummies, da die dritte Ausprägung durch den Wert „0“ in den beiden ersten Dummies eindeutig definiert ist (siehe auch BORTZ, 1999).

Der Sachverhalt sei an folgendem Beispiel näher erläutert (Tabelle 14):

Tabelle 14: Beispieldatensatz zu Erläuterung der Funktionsweise von Dummy-Variablen

	Laubholz	Kiefer	BHD [cm]	Produktivität des Harvesters [Efm/h RAZ]
Fall 1	0	0	20,5	12,3
Fall 2	1	0	19,4	9,5
Fall 3	0	0	25,3	15,6
Fall 4	0	1	22,3	14,4

In diesem Beispieldatensatz repräsentieren die Fälle 1 und 3 einen Fichtenbestand, während hinter Fall 2 ein Laubholz- und hinter Fall 4 ein Kiefernbestand steht.

In dem aus diesem (hypothetischen) Beispieldatensatz resultierenden Produktivitätsmodell²⁹

$$\text{Produktivität} = 0,688 * \text{BHD} + 0,863 * \text{Kiefer} - 2,044 * \text{Laubholz} - 1,794$$

haben nun die Dummy-Variablen eine „Schalter-Funktion“:

Wird die Produktivität eines Harvesters in einem konkreten Laubholzbestand mit einem BHD von 20 cm berechnet, wird die Variable „Laubholz“ auf den Wert 1 gesetzt (und der Term damit berücksichtigt), die Variable „Kiefer“ hingegen auf den Wert 0 (und der Term damit nicht berücksichtigt). Daraus errechnet sich für diesen Laubholzbestand eine Produktivität von

$$\text{Produktivität} = 0,688 * 20 + 0,863 * 0 - 2,044 * 1 - 1,794 = 9,92 \text{ Efm/h RAZ}$$

Entsprechend ist das Vorgehen in Kiefernbeständen.

Errechnet man hingegen die Produktivität eines Harvesters in einem Fichtenbestand (BHD ebenfalls 20 cm), so werden sowohl die Variable „Laubholz“, als auch die Variable „Kiefer“ auf den Wert 0 gesetzt, d. h. die Produktivität betrüge somit

$$\text{Produktivität} = 0,688 * 20 + 0,863 * 0 - 2,044 * 0 - 1,794 = 11,97 \text{ Efm/h RAZ.}$$

Wie auch in Tabelle 14 deutlich wird, kann in einem Modell nur *eine* der beiden Variablen „Laubholz“ oder „Kiefer“ den Wert 1 annehmen (oder keine von beiden), jedoch nie beide gleichzeitig.

²⁹ Berechnet als multiple, schrittweise Regression mit der Software SPSS (Version 14.0.2).

In die Berechnung dieses Produktivitätsmodells gingen alle 1.274 Fälle ein. Wie Tabelle 15 zeigt, wurden im Rahmen der schrittweisen Regression der BHD und der BHD in seiner quadrierten Form³⁰ sowie die Baumart (Kiefer und Laubholz) und die Variablen „BHD * Laubholz“ und „BHD * Kiefer“ als signifikante Einflussvariablen auf die Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz in das Produktivitätsmodell aufgenommen. Des Weiteren gehen der Rückegassenabstand und der Harvestertyp (mit Ausnahme des Harvestertyps „Ponsse“) in das Modell ein.

Dabei ergibt sich die Reihenfolge der in das Modell aufgenommenen Variablen durch die Vorgehensweise bei einer schrittweisen multiplen Regression: Hier wird bei jedem Schritt die Variable mit der jeweils kleinsten F-Wahrscheinlichkeit³¹ in die Regression aufgenommen. Dabei können auch Variablen, die bereits in die Regression aufgenommen wurden, wieder ausgeschlossen werden, wenn das Signifikanzniveau ihres F-Wertes größer als 0,1 ist. Können keine Variablen mehr aufgenommen oder ausgeschlossen werden, endet das Verfahren

Es fällt auf, dass weder der Rundholzanfall je Hektar noch die Flächengröße in das Produktivitätsmodell Eingang fanden. Offensichtlich wird der bei isolierter Betrachtung ohnehin gering ausgeprägte Zusammenhang zwischen der Produktivität von Harvestern und diesen beiden Variablen (siehe die jeweiligen Korrelationskoeffizienten) durch den Einfluss der übrigen, „erklärungsstärkeren“ Variablen überlagert, weshalb beide Variablen nicht mehr als signifikante Einflussvariablen in das multiple Modell aufgenommen werden.

Tabelle 15 zeigt auch den Erklärungsgehalt der jeweiligen Variablen und die damit einhergehende Änderung des Bestimmtheitsmaßes (korrigiertes R^2). Es ist zu erkennen, dass der BHD (BHD und BHD^2) mit 37,7 % gut ein Drittel der gesamten Streuung erklärt, während die Harvestertypen und die Baumarten, genauso wie der Rückegassenabstand, zwar ebenfalls einen signifikanten Einfluss besitzen, aber im Vergleich zum BHD einen deutlich geringeren Anteil der Gesamtstreuung erklären. In der Summe wird mit diesem Modell ein mit 0,532 vergleichsweise gutes (korrigiertes) Bestimmtheitsmaß erreicht. Dies bedeutet, dass ca. die Hälfte der gesamten Streuung durch die in das Modell aufgenommenen Variablen erklärt werden kann. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Durchführung von Regressionsanalysen unter Verwendung von Gruppenmittelwerten (z. B. mittlerer BHD eines Bestands, mittlere Produktivität eines Schleppers pro Stunde), wie es auch im vorliegenden Projekt der Fall war, laut JACKE (1980) höhere Bestimmtheitsmaße zu erwarten sind, im Vergleich zu Regressionsanalysen, die auf Einzelbaumwerten basieren (siehe auch HEINIMANN, 1999).

³⁰ Der quadrierte BHD wurde in die Analysen einbezogen, da die verwendeten Daten, wie in Abbildung 5 ersichtlich, einen polynomischen Verlauf nahe legen und da auch bspw. PAUSCH und PONITZ (2002) oder HEIDE (2005) von einem polynomischen Zusammenhang zwischen der Produktivität eines Harvesters und dem BHD ausgehen.

³¹ Diese Statistik wird benutzt, um die Nullhypothese zu überprüfen, wonach die Aufnahme einer weiteren Variablen nicht zu einem signifikanten Anstieg des Bestimmtheitsmaßes führt.

Tabelle 15: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz als abhängige Variable)

Nr.	Einflussvariablen	Zunahme in R^2 ³²	Korrigiertes R^2 ³³	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD	,324	,324	4,1297	1.272
2	Konstante, BHD, Harvestertyp „Rottne“	,095	,418	3,8316	1.271
3	Konstante, BHD, BHD ² , Harvestertyp „Rottne“	,053	,470	3,6559	1.270
4	Konstante, BHD, BHD ² , Harvestertypen „Rottne“ und „Skogsjan“	,014	,484	3,6081	1.269
5	Konstante, BHD, BHD ² , Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“ und „Skogsjan“	,008	,491	3,5827	1.268
6	Konstante, BHD, BHD ² , Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“ und „Skogsjan“, Rückegassenabstand	,008	,498	3,5575	1.267
7	Konstante, BHD, BHD ² , Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“ und „TJ 1470“, Rückegassenabstand	,005	,503	3,5400	1.266
8	Konstante, BHD, BHD ² , BHD * Laubholz, Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“ und „TJ 1470“, Rückegassenabstand	,006	,508	3,5212	1.265
9	Konstante, BHD, BHD ² , BHD * Laubholz, Laubholz, Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“ und „TJ 1470“, Rückegassenabstand	,002	,510	3,5144	1.264
10	Konstante, BHD, BHD ² , BHD * Laubholz, Laubholz, Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“, „TJ 1470“ und „TJ 1270“, Rückegassenabstand	,002	,512	3,5087	1.263
11	Konstante, BHD, BHD ² , BHD * Laubholz, Laubholz, Kiefer, Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“, „TJ 1470“ und „TJ 1270“, Rückegassenabstand	,003	,514	3,5008	1.262
12	Konstante, BHD, BHD ² , BHD * Laubholz, Laubholz, BHD * Kiefer, Kiefer, Harvestertypen „Rottne“, „Silvatec“, „Skogsjan“, „TJ 1470“ und „TJ 1270“, Rückegassenabstand	,019	,532	3,4334	1.261

³² Berechnung basierend auf dem unkorrigierten R^2 .

³³ Grundsätzlich kann das R^2 (Bestimmtheitsmaß) einer Regression durch Aufnahme weiterer erklärender Variablen nicht sinken. Aufgrund dessen könnte allein durch Aufnahme möglichst vieler Variablen eine gute Regressions-schätzung erzielt werden (BROSIOUS, 2004). Deshalb sollte bei multiplen Regressionen stets das korrigierte Bestimmtheitsmaß zur Bewertung der Regression herangezogen werden, bei dessen Berechnung die Anzahl der in die Regression einbezogenen Variablen berücksichtigt und das Bestimmtheitsmaß entsprechend korrigiert wird.

Tabelle 16 zeigt die Varianzanalyse dieser schrittweisen Regression. Die Signifikanz von $< 0,001$ zeigt, dass das in Tabelle 15 gezeigte Modell hoch signifikant ist.

Tabelle 16: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	17.229,971	12	1.435,831	121,804	$<,001$
Residuen	14.864,711	1.261	11,788		
Gesamt	32.094,683	1.273			

Die Variablen und ihre Koeffizienten, die in das Produktivitätsmodell aufgenommen wurden, zeigt Tabelle 17.

Tabelle 17: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Harvester beim Einschlag von Rundholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-4,707	1,373		-3,427	,001	-7,402	-2,013
BHD des aussch. Bestands	1,466	,112	1,752	13,146	$<,001$	1,247	1,685
Harvestertyp „Rottne“	2,308	,316	,200	7,314	$<,001$	1,689	2,927
BHD ²	-,022	,002	-1,341	-10,367	$<,001$	-,026	-,018
Harvestertyp „Skogsjan“	-1,867	,326	-,148	-5,729	$<,001$	-2,506	-1,228
Harvestertyp „Silvatec“	-2,171	,409	-,127	-5,304	$<,001$	-2,974	-1,368
Rückegassenabstand	-2,636	,564	-,093	-4,674	$<,001$	-3,742	-1,530
Harvestertyp „TJ 1470“	,579	,343	,040	1,687	,092	-,094	1,253
BHD * Laubholz	-,292	,110	-,301	-2,643	,008	-,508	-,075
Laubholz	4,216	2,202	,219	1,915	,056	-,103	8,535
Harvestertyp „TJ 1270“	-,678	,265	-,058	-2,556	,011	-1,198	-,158
Kiefer	-7,391	,973	-,641	-7,597	$<,001$	-9,300	-5,482
BHD * Kiefer	,297	,042	,626	7,146	$<,001$	,216	,379

Keine Variablen mussten aufgrund von Kollinearität ausgeschlossen werden³⁴. Auch die Prüfung der standardisierten Residuen dieses Modells auf ihre Normalverteilung (siehe Abbildung 45, S. 167) zeigte keine Auffälligkeiten, die Residuen folgen jedoch einem gewissen Muster (leichte Wellenform). Solche systematischen Abweichungen weisen zwar darauf hin, dass das Modell trotz der Vielzahl an einbezogenen Variablen noch unvollständig ist; da die Abweichungen von der standardisierten Normalverteilung insgesamt jedoch nur sehr gering sind, scheinen keine gravierenden Modellvoraussetzungen verletzt worden zu sein, sodass das Modell zur Berechnung der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz wie folgt lautet (Formel 3):

$$\text{Formel 3: Produktivität [Efm/h RAZ]} = -0,022 * \text{BHD}^2 + 1,466 * \text{BHD} + \text{Laubholz} * (4,216 - 0,292 * \text{BHD}) - \text{Kiefer} * (7,391 + 0,297 * \text{BHD}) + 2,308 * \text{Harvestertyp „Rottne“} + 0,579 * \text{Harvestertyp „TJ 1470“} - 0,678 * \text{Harvestertyp „TJ 1270“} - 1,867 * \text{Harvestertyp „Skogsjan“} - 2,171 * \text{Harvestertyp „Silvatec“} - 2,636 * \text{Rückegassenabstand} - 4,707$$

Dabei ist:

BHD	= BHD des ausscheidenden Bestands [cm]
Laubholz	= Dummy-Variable; nimmt in Laubholzbeständen den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Kiefer	= Dummy-Variable; nimmt in Kiefernbeständen den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Rottne“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Rottne“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „TJ 1470“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „TJ 1470“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „TJ 1270“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „TJ 1270“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Skogsjan“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Skogsjan“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Silvatec“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Silvatec“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Rückegassenabstand	= Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Damit kann der Einfluss des BHDs des ausscheidenden Bestands, der Baumart, des Harvester-typs und des Rückegassenabstands auf die Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz zusammenfassend dargestellt werden.

Der BHD-Bereich, in dem das Modell in einem konkreten Bestand Gültigkeit besitzt, ergibt sich aus der Kombination der drei Gültigkeitsbereiche von Baumart, Rückegassenabstand und Harvestertyp (siehe Tabelle 18)³⁵.

³⁴ Unter Kollinearität, oft auch Multikollinearität genannt, versteht man nach BORTZ (1999) „...die wechselseitige Abhängigkeit von Variablen im Kontext multivariater Verfahren.“ Nach BROSIUS (2004) besteht bei Vorliegen von Kollinearität die Gefahr, dass die geschätzten Parameter nicht mehr zuverlässig, sondern verzerrt sind. Dies bedeutet, dass bspw. der gemeinsame Einfluss zweier erklärender Variablen zwar in der Summe richtig geschätzt wird, dass aber die Verteilung des Einflusses auf die beiden Variablen falsch sein kann.

³⁵ Als Gültigkeitsbereich wird damit der BHD-Bereich definiert, in dem Fälle für die Erstellung des Produktivitätsmodells vorliegen.

Tabelle 18: Gültigkeitsbereiche des Produktivitätsmodells in Abhängigkeit von Baumart, Rückegassenabstand und Harvestertyp

	Dummy-Variable	Gültigkeitsbereich (BHD des ausscheidenden Bestands)
1 Baumart	Fichte	11,8–44,1 cm
	Kiefer	12,9–40,5 cm
	Laubholz	12,6–27,4 cm
2 Rückegassenabstand	40 m	13,5–29,0 cm
	20 m	11,8–44,1 cm
3 Harvestertyp	Rottne	13,4–40,8 cm

5.1.1.2 Diskussion der Produktivitätsmodelle

Abbildung 7–Abbildung 9 zeigen beispielhaft die grafische Darstellung des Produktivitätsmodells, getrennt nach Baumarten und Harvestertypen, für einen Rückegassenabstand von 20 m. Dabei sind stets die Produktivitäten aller derjenigen Fälle gezeigt, die zu der jeweiligen Baumart vorliegen.

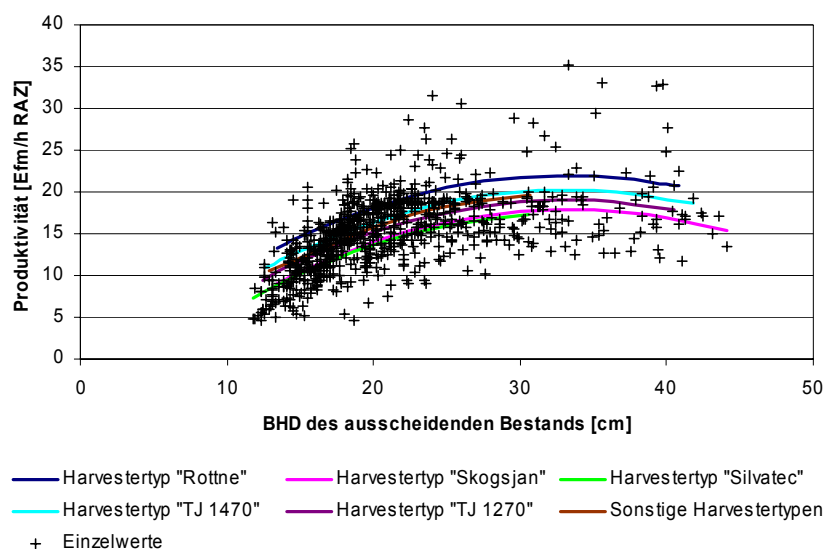


Abbildung 7: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Fichtenbeständen (Rückegassenabstand: 20 m; 825 Fälle)

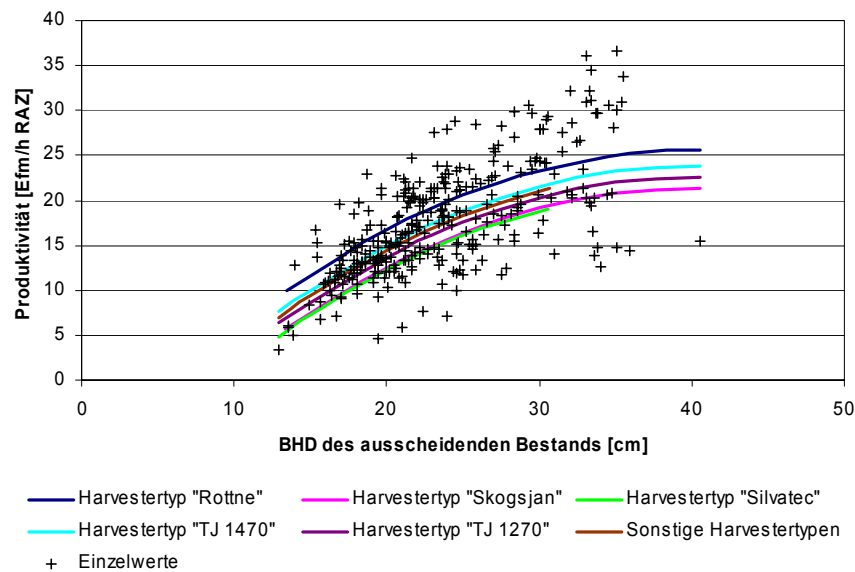


Abbildung 8: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Kiefernbeständen (Rückegassenabstand 20 m; 324 Fälle)

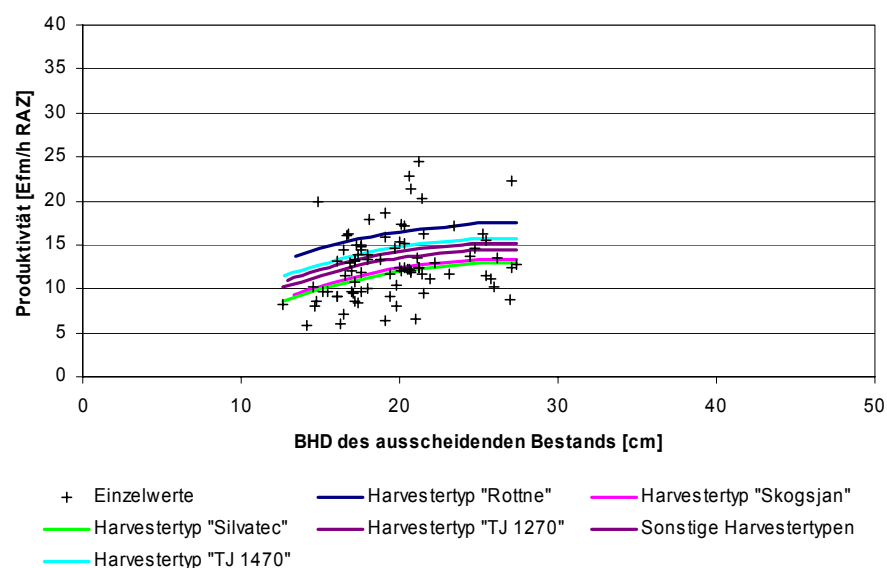


Abbildung 9: Produktivitätsmodell für Harvester beim Einschlag von Rundholz in Laubholzbeständen (Rückegassenabstand 20 m; 84 Fälle)

Aus den gezeigten Abbildungen folgt, dass die Produktivität eines Harvesters beim Einschlag von Rundholz mit zunehmendem BHD ansteigt. Insbesondere in den Fichtenbeständen ist jedoch zu erkennen, dass die Produktivität bei sehr großen BHD wieder leicht abnimmt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die untersuchten Harvestertypen keine speziellen Starkholzharvester, sondern in der Regel typische „Mittelklasseharvester“ darstellen, die nicht für den Einsatz in durchmesserstarken Beständen optimiert sind und deshalb in solchen auch nicht die optimale Produktivität erbringen. In den Kiefernbeständen (Abbildung 8) wird dieser Scheitelpunkt, der das Produktivitätsmaximum darstellt und ab dem die Produktivität wieder absinkt, im gezeigten Durchmesserbereich noch nicht erreicht. Würden hier jedoch

Produktivitäten für BHD außerhalb des Gültigkeitsbereichs berechnet und die Modelle damit extrapoliert, wäre ein Erreichen des Scheitelpunktes und in der Folge ein Absinken der Produktivität die Folge. Gleiches gilt für die Produktivität von Harvestern in Laubholzbeständen. Auch hier wäre – legt man Formel 3 zugrunde – mit weiter zunehmendem BHD ein Absinken der Produktivität zu erwarten. Die Lage der Scheitelpunkte stimmt in den Fichten- und Kiefernbeständen gut mit der von PAUSCH und PONITZ (2002) prognostizierten Lage überein: diese gehen bei selektiver Nutzung von einem Produktivitätsmaximum zwischen 17–20 Efm/MAS aus (das Produktivitätsmaximum in Bezug auf die RAZ läge entsprechend um ca. 15 % höher) und damit auf vergleichbarem Niveau wie in der vorliegenden Untersuchung.

Abbildung 7–Abbildung 9 ermöglichen darüber hinaus einen Vergleich der Harvestertypen untereinander. Hier wird deutlich, dass die Motorleistung eines Harvesters (gemessen in kW) einen hohen Einfluss auf dessen Produktivität hat: Für die beiden stärksten Harvestertypen der Untersuchung („Rottne“ und „TJ 1470“, siehe Tabelle 2), wird im Modell die höchste durchschnittliche Produktivität kalkuliert. Für die drei Harvestertypen „TJ 1270“, „Skogsjan“ und „Silvatec“ hingegen, die in Bezug auf ihre Motorleistung auf einem vergleichbaren Niveau liegen (siehe ebenfalls Tabelle 2), wird eine im Vergleich zum Durchschnitt geringere Produktivität kalkuliert.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Baumart auf die Produktivität eines Harvesters³⁶ (Abbildung 10) zeigt sich, dass die Produktivität beim Einschlag von Fichte bis zu einem BHD des ausscheidenden Bestands von ca. 25 cm über der Produktivität beim Einschlag von Kiefer liegt. Erst bei größeren BHD erzielt ein Harvester beim Einschlag von Kiefer eine höhere Produktivität im Vergleich zum Einschlag von Fichte. Wird Laubholz eingeschlagen, so liegt die Produktivität bei niedrigen BHD zwar auf vergleichbarem Niveau wie beim Einschlag von Fichte, bleibt jedoch mit zunehmendem BHD deutlich hinter derselben zurück.

Man erkennt außerdem, in welchem unterschiedlichen Maße der BHD die Produktivität eines Harvesters beeinflusst: so liegt bspw. die Produktivität des Harvestertyps „Skogsjan“ in Fichtenbeständen bei einem BHD von 25 cm um ca. 55 % über der Produktivität bei einem BHD von 15 cm. Der entsprechende Unterschied in Laubholzbeständen beträgt lediglich 35 %. In Kiefernbeständen liegt dieser Unterschied hingegen mit mehr als 300 % um ein Vielfaches höher. Verglichen mit Fichten- und Laubholzbeständen, steigt die Produktivität in Kiefernbeständen also mit zunehmendem BHD stark überproportional an und liegt infolgedessen bei einem BHD von 40 cm um ca. 4,5 Efm/h RAZ (ca. 27 %) über der Produktivität beim Einschlag in Fichtenbeständen.

³⁶ In diesem Fall, aufgrund der verhältnismäßig breiten Datenbasis, des Harvestertyps „Skogsjan“.

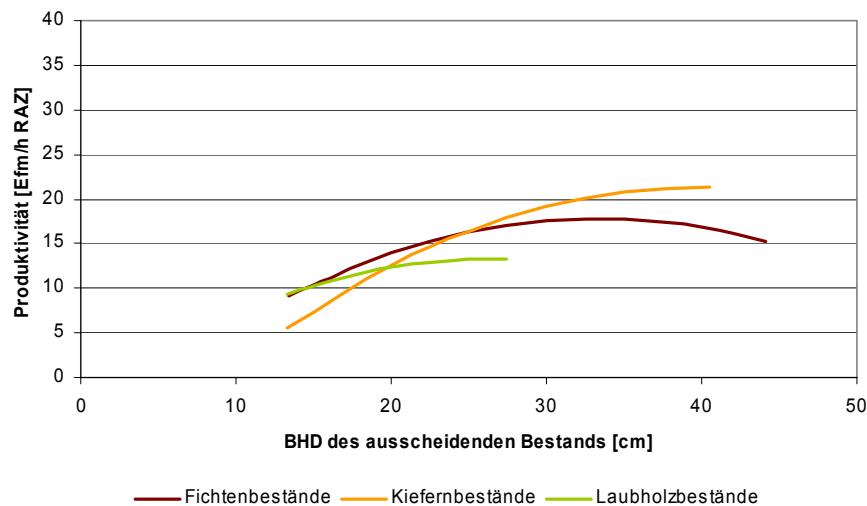


Abbildung 10: Produktivitätsmodell für den Harvestertyp „Skogsjan“ beim Einschlag von Rundholz in Abhängigkeit von der Baumart (Rückegassenabstand 20 m)

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen auch andere Untersuchungen: So liegt nach dem Produktivitätsmodell von FELLER et al. (1999b) die Produktivität von Harvestern beim Einschlag in Kiefernbeständen um durchschnittlich etwa 20 % über der Produktivität in Fichtenbeständen. Dies führen die Autoren u. a. auf die bessere Übersichtlichkeit des Kiefernbestands aufgrund einer stärkeren Astreinigung der Kiefer zurück. Zudem haben Kiefern insgesamt weniger Äste als z. B. Fichte. Diese Aussage wird von den Modellen HEINIMANN (1999) gestützt, nach denen die Produktivität beim Einschlag von Kiefer und Lärche um 0,97 Efm/MAS höher liegt als die Produktivität beim Einschlag von Fichte. Auch die Modelle von HEIDE (2005) liefern für Harvester beim Einsatz in Kiefernbeständen für den BHD-Bereich zwischen 10–30 cm eine um durchschnittlich 3,5 Efm/h RAZ höhere Produktivität im Vergleich zu Fichtenbeständen. Verglichen mit den Ergebnissen des vorliegenden Produktivitätsmodells liegt allerdings das Produktivitätsniveau bei HEIDE deutlich höher. So wird bei dessen Kalkulationen bei einem BHD von 30 cm schon eine Produktivität in Abhängigkeit von der Baumart zwischen 28 Efm/MAS und 40 Efm/MAS erreicht, wobei 17,7 % allgemeine Zeiten bereits eingerechnet sind. Würden diese allgemeinen Zeiten nicht berücksichtigt, um die Werte mit den Produktivitätswerten der vorliegenden Untersuchung vergleichbar zu machen, lägen HEIDES Produktivitätswerte noch deutlich höher.³⁷

Auch FORBRIG (2000) stellt bei seinen Untersuchungen für Harvester in schwächeren Kiefernbeständen eine höhere Produktivität im Vergleich zu schwächeren Fichtenbeständen fest. Nach seinen Berechnungen werden die Produktivitätsunterschiede mit steigendem BHD jedoch geringer, und kehren sich ab einem bestimmten BHD um. Diese höhere Produktivität in stärkeren Fichtenbeständen führt FORBRIG auf die höhere Geradschaftigkeit der Fichte zurück, wohingegen in Kiefernbeständen Krümmungen in den Einzelstämmen dem Harvester oft große Probleme bereiten und damit dessen Produktivität senken können. Seine These wird bestätigt durch die Untersuchung von WEIXLER et al. (1997), die in ca. 90-jährigen Fichten-Kiefern-Mischbeständen beim Einschlag der Kiefer eine um 5 % niedrigere Produktivität im Vergleich zum

³⁷ In seiner Arbeit muss jedoch auch HEIDE (2005) konstatieren, dass die von ihm ermittelten Produktivitäten sehr hoch erscheinen und solche Werte in der Praxis wohl nie erreicht würden.

Einschlag der Fichte feststellen. Diese Effekte konnten anhand der vorliegenden Datengrundlage nicht nachgewiesen werden.

In Übereinstimmung mit dieser Untersuchung stellt FORBRIG (2000) fest, dass die Produktivität von Harvestern im Laubholz bei sehr schwachen Baumvolumina auf einem vergleichbaren Niveau liegt wie in Fichtenbeständen. Mit steigendem Baumvolumen nehmen die Unterschiede zuungunsten des Laubholzes jedoch überproportional zu. Diese Aussage wird durch die Untersuchung von GUGLHÖR (1994) bestätigt, nach der insbesondere ab einem BHD von ca. 25 cm in Laubholzbeständen aufgrund von zunehmenden Steilästen und Zwieseln deutlich mehr Zeit je Baum für den Einschlag aufzuwenden ist im Vergleich zum Einschlag in Fichtenbeständen.

Einen grafischen Vergleich der eigenen Modelle mit den Modellen anderer Untersuchungen bietet Abbildung 11.

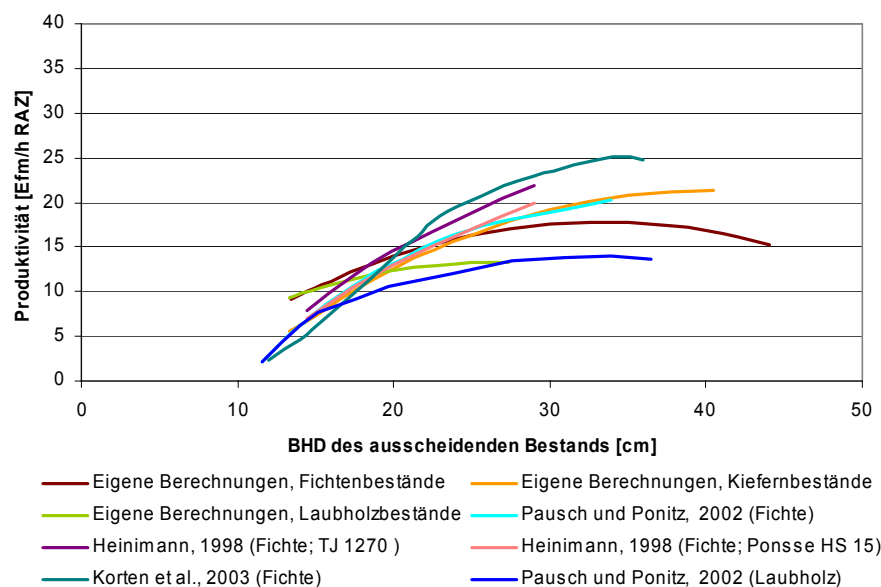


Abbildung 11: Produktivitätsmodell für den Harvestertyp „Skogsjan“ beim Einschlag von Rundholz (Rückegassenabstand 20 m), im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen

Dabei ist zu erkennen, dass die eigenen Berechnungen der Produktivität in Fichten- und Kiefernbeständen durchaus realistisch sind und insbesondere im Durchmesserbereich von 15–35 cm gut mit den von PAUSCH und PONITZ (2002) ermittelten Werten übereinstimmen. Lediglich bei sehr geringen Durchmessern ermitteln PAUSCH und PONITZ (2002) eine deutlich niedrigere Produktivität, da die Autoren in diesen Beständen von einem hohen X-Holz-Anfall³⁸ ausgehen, der als produktivitätsbeeinflussende Variable in deren Modell eingeht. Auch ein Vergleich der eigenen Produktivitäten sowohl mit den Ergebnissen von HEINIMANN (1999) wie auch mit den Ergebnissen von KORTEN et al. (2003) zeigt vor allem bei geringen und mittleren BHD eine hohe Übereinstimmung. Dass auch die für Harvester in Laubholzbeständen ermittelte Produktivität realistisch ist zeigt ein weiterer Vergleich mit den Ergebnissen von PAUSCH und PONITZ (2002).

³⁸ X-Holz ist bearbeitetes, aber nicht verwertbares Derbholz (z. B. aufgrund von Fäule oder Krümmung).

So sind bei geringen BHD Produktivitätsunterschiede zwischen den beiden Untersuchungen von bis zu 3 Efm/h RAZ zu erkennen, es wird aber auch deutlich, dass beide Untersuchungen in Laubholzbeständen von einem geringeren Anstieg der Produktivität in Abhängigkeit vom BHD ausgehen als in Fichten- oder Kiefernbeständen.

Die Modelle, die von RAAB (1999) zusammengestellt wurden (in Abbildung 11 nicht dargestellt), gehen in Fichtenbeständen bei einem BHD des ausscheidenden Bestands von 15 cm von Produktivitäten der Harvester zwischen 5,4–8,2 Efm/MAS aus und liegen damit leicht unter den Produktivitäten der eigenen Modelle. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dessen Übersicht z. T. verhältnismäßig alte Modelle aus dem Jahr 1993 einbezogen wurden, sodass die Resultate aufgrund des technischen Fortschritts seit dieser Zeit nicht uneingeschränkt mit den eigenen Ergebnissen, denen Daten aus den Jahren 2004–2006 zugrunde liegen, vergleichbar sind.

Wie aus Formel 3 abgeleitet werden kann, liegt die Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz bei einem Rückegassenabstand von 40 m³⁹ unabhängig vom BHD um ca. 2,6 Efm/h RAZ unter der Produktivität bei einem Rückegassenabstand von 20 m. In Abhängigkeit von der Baumart, dem BHD und dem Harvestertyp sinkt die Produktivität durch das zusätzliche Aufarbeiten von vorgelieferten Bäumen somit um ca. 10–40 %. Die Manipulation dieser Bäume spielt hier offensichtlich eine große Rolle: Diese werden nicht vom Harvester selbst gefällt und mit dem Zufallbringen bereits teilweise aufgearbeitet und in Sortimente eingeteilt; stattdessen müssen sie – z. T. mit dem Wipfel zuerst – vom Boden aufgenommen und dabei erst entzerrt und manipuliert werden, bevor sie aufgearbeitet werden können. Im Vergleich dazu kann der Maschinenführer bei einem Rückegassenabstand von 20 m alle Bäume stehend am Stammfuß greifen und zielgerichtet fällen, wodurch offensichtlich eine höhere Produktivität erzielt wird.

In der Literatur wird der Einfluss des Rückegassenabstands kontrovers diskutiert: So kann anhand der Übersicht von RAAB (1999) über verschiedene diesbezügliche Untersuchungen keine eindeutige Aussage hinsichtlich des Einflusses des Rückegassenabstands getroffen werden. Laut SABSCH und MEIBNER (2000) ist die Produktivität von Harvestern bei einem Rückegassenabstand von 40 m geringer, da das Aufnehmen einzelner, vorgelieferter Stämme einen höheren Zeitbedarf mit sich bringe. Nach der Auswertung mehrerer Untersuchungen geht HEIDE (2005) von einer durchschnittlich 3-prozentigen Produktivitätsminderung aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m gegenüber einem Rückegassenabstand von 20 m aus; die Spannweite der Untersuchungsergebnisse reicht aber von +42– -30 %, sodass auch hier keine endgültige Aussage getroffen werden kann.

Wie in Tabelle 15 und Tabelle 17 zu erkennen, wurden keine weiteren Variablen in das Modell zur Beschreibung der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Rundholz aufgenommen. Somit kann auf Grundlage des verwendeten Datenmaterials keine Aussage über den Einfluss der Hangneigung auf die Produktivität getroffen werden, wobei allerdings nur in 54 der 1.274 Fälle Angaben zur jeweiligen Hangneigung gemacht wurden.⁴⁰ Ein Blick in die Literatur zeigt, dass im Gegensatz zur motormanuellen Arbeit ein Einfluss der Hangneigung auf die

³⁹ Dies umfasst auch die Aufarbeitung der zugefällten bzw. vorgelieferten Bäume.

⁴⁰ Dabei lag die Hangneigung in 36 dieser Fälle bei 0 %. Auch für die anderen 18 Fälle konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Produktivität und der Hangneigung nachgewiesen werden.

Produktivität von Harvestern nur bedingt zu erwarten ist: So scheint gemäß PAUSCH und PONITZ (2002) eine Hangneigung von 25–30 % für Harvester unproblematisch zu sein und es konnte kein Produktivitätsabfall nachgewiesen werden. Zu diesem Ergebnis kommen auch SAUTER et al. (1998), die in ihrer Untersuchung im Steilhang (25–60 %) eine nur wenig abfallende Produktivität von Harvestern im Vergleich zu Ergebnissen aus ebenem oder nur leicht geneigtem Gelände feststellen. Es sei aber im Steilhang unter Umständen mit einem höheren Anteil an allgemeinen Zeiten zu rechnen. Auch nach LANGE (2005) hat die Hangneigung nur einen geringen Einfluss auf die Produktivität. STAMPFER (2001) wiederum geht erst ab einer Hangneigung von 60 % von einer um ca. 4–12 % geringeren Produktivität im Vergleich zu einer Hangneigung von 20 % aus. Auch für Raupenharvester, die in der vorliegenden Untersuchung nur sehr gering vertreten waren (< 20 Fälle), konnten KORTEN et al. (2003) im Bereich von 30–45 % gegenüber flachen Lagen keinen Einfluss der Hangneigung auf die Produktivität nachweisen. Laut deren Aussage sind Produktivitätseinbußen erst ab einer Neigung von 70–80 % zu erwarten.

Weitere Variablen, von denen ein Einfluss auf die Produktivität ausgehen könnte, die aber in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten, sind z.B. die Dichte des Unterwuchses (siehe z.B. LANGE, 2005), die Art der Auszeichnung (siehe z.B. ENGLER et al., 2008; GABRIEL, 1999) oder auch die Boden- und Witterungsverhältnisse. Grund für die Nichtberücksichtigung dieser Variablen war, dass in Veröffentlichungen von Untersuchungsergebnissen zu diesen Variablen nur im Ausnahmefall verwertbare quantitative Angaben gemacht wurden und deshalb die Datengrundlage zu gering war, um deren Einfluss im Rahmen einer Metaanalyse quantifizieren zu können. Gleiches gilt für den Ausbildungsstand und die Übung des Maschinenführers sowie dessen aktuelle Verfassung (Gesundheitszustand, Tageszeit der Arbeit), mit deren Einfluss sich z.B. NIMZ (2002) oder PURFÜRST (2007) auseinandersetzen. Letzterer stellt bspw. unter sonst vergleichbaren Arbeitsbedingungen in Abhängigkeit von dem jeweiligen Maschinenführer Produktivitätsunterschiede von bis zu 60 % fest. Auch wenn der Einfluss dieser personenbezogenen Variablen wegen fehlender Angaben mit dem vorliegenden Modell nicht abgeschätzt werden konnte, ist dennoch aufgrund der Vielzahl an Produktivitätswerten, die in die Modelle einbezogen werden konnten anzunehmen, dass sich die unterschiedliche Leistungsfähigkeit verschiedener Maschinenführer in der Summe als ausgeglichen darstellt und somit das Modell nicht entscheidend beeinflusst.

5.1.2 Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz durch Waldarbeiter im motormanuellen Verfahren

Wie in Kapitel 4.1.3.1 beschrieben, wurde die Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Rundholz auf Grundlage des Erweiterten Sortentarifs (EST), mit Hilfe des HOLZERNT-Programms (FVA, 2007) berechnet. Die Basis hierfür bildeten die Versuchsbestände, die im Rahmen zahlreicher Versuchseinsätze von CREMER (2007), CREMER et al. (2007) und LECHNER (2007) vollgekluppt und in das HOLZERNT-Programm integriert wurden.

Für **Fichtenbestände** sind diese 29 bzw. 25 Produktivitätswerte⁴¹ sowie die daraus abgeleiteten Ausgleichsgeraden in Abbildung 12 zu finden.

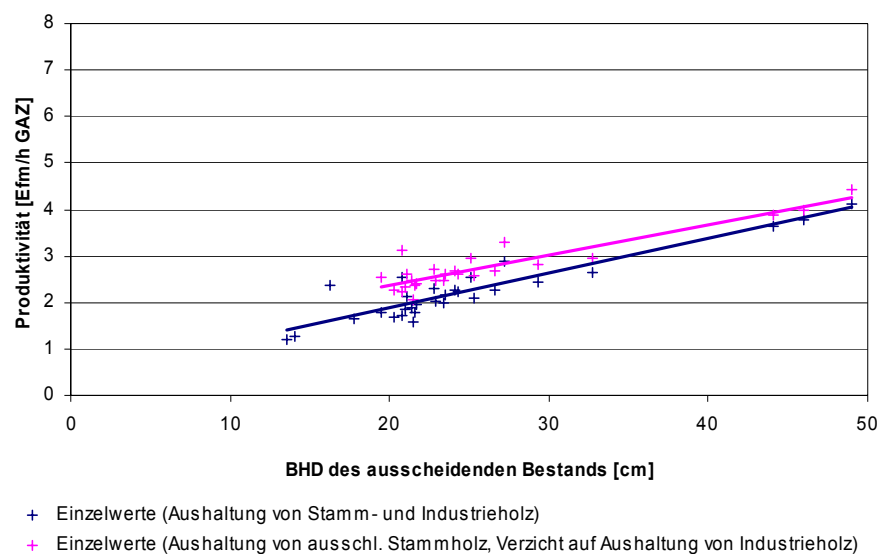


Abbildung 12: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Fichtenbeständen (29 bzw. 25 Fälle)

Durch die Berechnung der einzelnen Produktivitätswerte auf Basis des EST, dessen Zeittabellen von einem nahezu linearen Anstieg der Produktivität in Abhängigkeit vom BHD ausgehen (siehe EST, 2000), wäre eine sehr geringe Streuung der Produktivitätswerte zu erwarten gewesen. Dies ist, wie in Abbildung 12 zu erkennen, nicht der Fall. Grund hierfür ist, dass die Produktivitätswerte auch für Bestände mit gewissen Anteilen an anderen Baumarten berechnet wurden, was wiederum eine veränderte Sortimentsstruktur und damit eine veränderte Produktivität mit sich bringt.

Die aus den errechneten Produktivitätswerten abgeleiteten Formeln zur Beschreibung der Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Rundholz in Fichtenbeständen zeigen, in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante, Formel 4 und Formel 5. Da die einzelnen Produktivitätswerte keine Primärdaten sind, sondern diesen, wie beschrieben, das Modell des EST zugrunde liegt, wurden keine weiteren statistischen Analysen durchgeführt.

⁴¹ Da in Beständen mit geringem mittleren BHD ein Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz nicht realistisch ist, wurden bei Berechnung dieser Aushaltungsvariante Bestände mit einem mittleren BHD unter 19,5 cm nicht in die Analyse einbezogen.

$$\text{Formel 4: Produktivität}^{42} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,064 * \text{BHD} + 1,1029$$

$$\text{Formel 5: Produktivität}^{43} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,0744 * \text{BHD} + 0,3892$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Mit diesen Formeln können nun die über den EST hergeleiteten Produktivitätswerte als kontinuierliche Funktion beschrieben werden. Damit ist es möglich, für zwei verschiedene Aushaltungsvarianten und für *beliebige* BHD eine entsprechende Produktivität zu berechnen, im Gegensatz zu den ursprünglichen Zeittabellen des EST, in denen die Produktivität stets für einzelne BHD bzw. für BHD-Bereiche angegeben wird.

Grundsätzlich bewegt sich die Produktivität der Waldarbeiter in Abhängigkeit vom BHD im untersuchten Durchmesserpektrum (13,5 bzw. 19,5–49,0 cm) zwischen 2–4 Efm/h GAZ. Wie schon beim vollmechanisierten Einschlag von Rundholz steigt dabei die Produktivität der Waldarbeiter mit zunehmendem BHD an. Darüber hinaus fällt auf, dass sich in Abhängigkeit davon, ob Industrieholz ausgehalten wird, oder nicht, ein deutlicher Unterschied in der Produktivität zeigt. Dieser Unterschied wird mit zunehmendem BHD geringer: Bei einem BHD von 20 cm liegt die Produktivität der Waldarbeiter durch den Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz noch um knapp 30 % (ca. 0,5 Efm/h GAZ) höher im Vergleich zu einer Aushaltung von Stammholz *und* Industrieholz. Bei einem BHD von 45 cm sind es hingegen nur noch knapp 6 % (0,2 Efm/h GAZ). Der Grund hierfür ist in den unterschiedlichen Sortimentsanfällen der beiden Varianten zu suchen. Macht das – im Vergleich zum Stammholz – sehr viel arbeitsintensivere Industrieholz in Beständen mit geringem BHD z. T. weit mehr als die Hälfte des gesamten anfallenden Volumens aus, so geht sein Anteil mit zunehmendem BHD immer weiter zurück. Damit ist auch der im Vergleich zum Stammholz negative Einfluss auf die Produktivität geringer.

Die Abhängigkeit der Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Einschlag von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands und der Aushaltungsvariante in **Kiefernbeständen** zeigen Abbildung 13 sowie Formel 6 und Formel 7. Diese Regressionen basieren auf 22 bzw. 16 Produktivitätswerten, die auf Grundlage des EST mit Hilfe des HOLZERNT-Programms für die jeweiligen Bestände berechnet wurden. Der Durchmesserbereich, der durch das Produktivitätsmodell abgedeckt wird, liegt, in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante, zwischen 12,9 bzw. 19,4–45,3 cm⁴⁴.

⁴² Ohne Aushaltung eines Industrieholzsortiments.

⁴³ Mit Aushaltung eines Industrieholzsortiments (zusätzlich zum Stammholzsortiment).

⁴⁴ Auch hier wurden Bestände mit einem mittleren BHD von unter 19,4 cm von den Analysen zur Berechnung der Produktivität bei einem Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz (siehe auch Fußnote 41) ausgeschlossen.

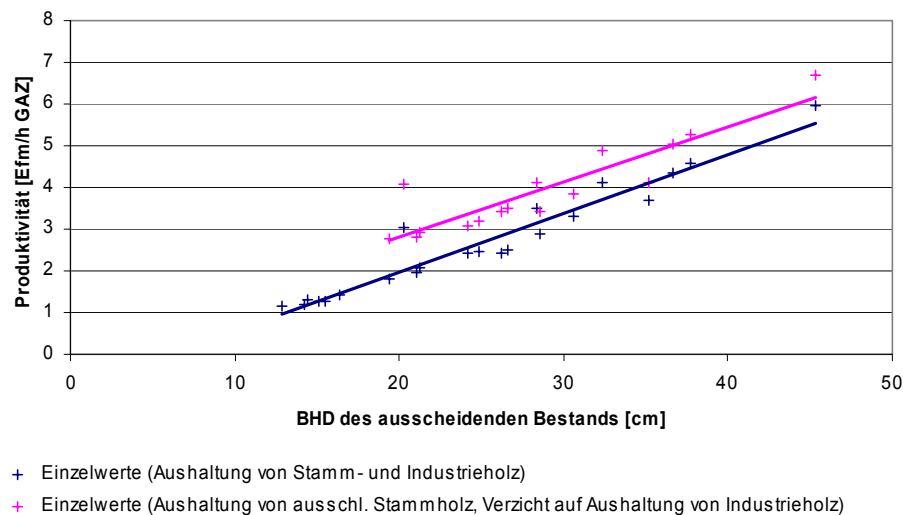


Abbildung 13: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Kiefernbeständen (22 bzw. 16 Fälle)

$$\text{Formel 6: Produktivität}^{45} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,1331 \cdot \text{BHD} + 0,1302$$

$$\text{Formel 7: Produktivität}^{46} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,1413 \cdot \text{BHD} - 0,8462$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Im Vergleich von Abbildung 13 mit Abbildung 12 wird deutlich, dass die Produktivität in Kiefernbeständen mit zunehmendem BHD stärker ansteigt im Vergleich zur Produktivität in Fichtenbeständen. Der Unterschied zwischen den beiden Aushaltungsvarianten (Aushaltung von Industrieholz oder nicht) liegt in den Kiefernbeständen hingegen mit durchschnittlich 0,76 Efm/h GAZ auf vergleichbarem Niveau wie in den Fichtenbeständen (0,45 Efm/h GAZ), sodass der Einfluss der Aushaltungsvariante offensichtlich vergleichbar ist. Auch ist zu erkennen, dass sowohl in Fichten- wie in Kiefernbeständen der Produktivitätsunterschied zwischen den beiden Varianten mit zunehmendem BHD geringer wird, auch wenn diese Tendenz in den Kiefernbeständen nur schwach ausgeprägt ist.

Die Produktivitätswerte und die Berechnungsformeln für die Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Einschlag in **Laubholzbeständen** sind in Abbildung 14 und in Formel 8 und Formel 9 dargestellt. Dabei decken die 40 bzw. 32 Datensätze einen Durchmesserbereich zwischen 15,3 bzw. 20,3–34,4 cm ab.⁴⁷

⁴⁵ Ohne Aushaltung eines Industrieholzsortiments.

⁴⁶ Mit Aushaltung eines Industrieholzsortiments (zusätzlich zum Stammholzsortiment).

⁴⁷ Wie in Fußnote 41 näher erläutert, wurden bei Berechnung der Produktivität bei einem Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz Bestände mit einem mittleren BHD des ausscheidenden Bestands von unter 20,3 cm nicht in die Analysen einbezogen, da in Beständen mit einem solch geringen BHD ein Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz nicht realistisch ist.

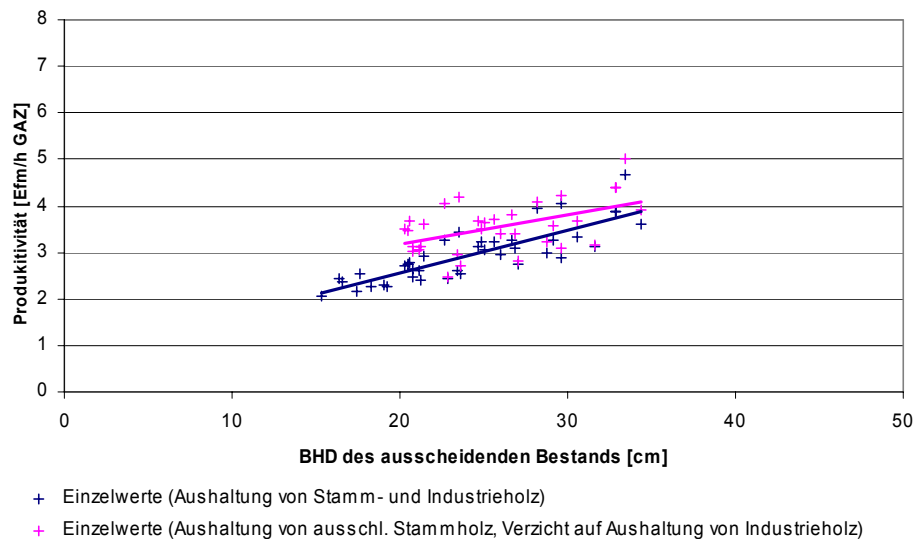


Abbildung 14: Produktivitätsmodell für Waldarbeiter beim motormanuellen Einschlag von Rundholz in Laubholzbeständen (40 bzw. 32 Fälle)

$$\text{Formel 8: Produktivität}^{48} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,0634 * \text{BHD} + 1,9045$$

$$\text{Formel 9: Produktivität}^{49} [\text{Efm/h GAZ}] = 0,0923 * \text{BHD} - 0,7177$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Mit 2,6–3,9 Efm/h GAZ (Aushaltung von Stamm- und Industrieholz) bzw. 3,2–4,1 Efm/h GAZ (ausschließlich Aushaltung von Stammholz) liegt die Produktivität der Waldarbeiter in Laubholzbeständen um durchschnittlich ca. 0,8 Efm/h GAZ über der Produktivität in Fichtenbeständen. Im Vergleich zur Produktivität in Kiefernbeständen liegt die Produktivität in Laubholzbeständen bei geringen BHD um ca. 0,6 Efm/h GAZ höher, bei steigenden BHD werden die Unterschiede geringer und kehren sich ab einem BHD von ca. 32 cm (Aushaltung von Stammholz und Industrieholz) bzw. 26 cm (Verzicht auf Industrieholzaushaltung) ins Gegenteil um, d. h. ab diesen BHD ist die Produktivität beim Einschlag in Kiefernbeständen höher.

Die starke Streuung der Produktivitätswerte in Abbildung 14 hat ihre Ursache offensichtlich in der z. T. zwischen 15–25-prozentigen Beimischung von Nadelholz (meist Fichte) in den Laubholzbeständen – legt man die entsprechenden Zeittabellen des EST zugrunde, wäre in Buchenreinbeständen ebenfalls von einem gleichmäßigen, nahezu linearen Anstieg der Produktivität auszugehen.

Der Unterschied zwischen den beiden Aushaltungsvarianten liegt in den Laubholzbeständen mit durchschnittlich 0,5 Efm/h GAZ auf einem vergleichbaren Niveau wie in den Fichtenbeständen. Damit ist der Unterschied prozentual gesehen jedoch geringer. Dieser geringere Unterschied

⁴⁸ Ohne Aushaltung eines Industrieholzsortiments.

⁴⁹ Mit Aushaltung eines Industrieholzsortiments (zusätzlich zum Stammholzsortiment).

resultiert insbesondere aus dem Umstand, dass die motormanuelle Aufarbeitung eines IL-Sortiments in Laubholzbeständen nur wenig mehr Aufwand bedeutet als die Aufarbeitung eines Stammholz-Sortiments und der Einfluss des IL-Sortiments auf die Produktivität somit verhältnismäßig gering ist (anders als in Fichtenbeständen, wo die Aufarbeitung eines IS-Sortiments einen deutlichen Mehraufwand im Vergleich zur Aufarbeitung von Stammholz bedeutet und somit einen hohen Einfluss auf die Produktivität hat). Anhand dieser Werte kann somit die Aussage getroffen werden, dass in Laubholzbeständen die Sortimentierung (vor allem in Hinblick auf die Frage der Aushaltung von Industrieholz) offensichtlich eine geringere Rolle spielt als in Fichtenbeständen.

Zusammenfassend für **alle untersuchten Baumarten** (Fichte, Kiefer und Laubholz) wird in Abbildung 15 nochmals verdeutlicht, dass ein Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz vor allem in durchmesserschwachen Beständen eine deutlich gesteigerte Produktivität zur Folge hat.

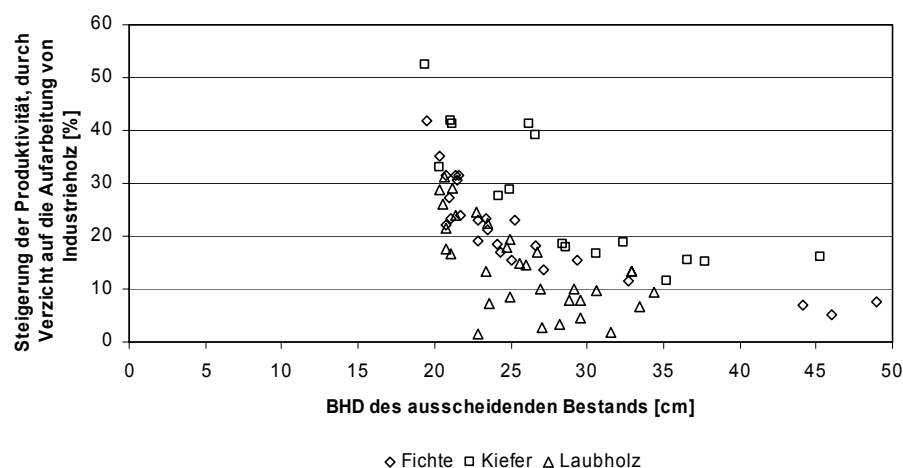


Abbildung 15: Steigerung der Produktivität von Waldarbeitern durch einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz

Man erkennt, dass die Produktivität in Beständen mit einem BHD von ca. 20 cm durch den Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz um durchschnittlich etwa 25–30 % gesteigert werden kann, während sich die Produktivität in durchmesserstarken Beständen durch einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz nur um ca. 10 % erhöht.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen von KÖBERLE (2007), der beim Vergleich der Produktivität von Waldarbeitern in Abhängigkeit von den Aushaltungskriterien in Fichtenbeständen mit einem mittleren BHD des ausscheidenden Bestands von ca. 45 cm eine um ca. 10 % höhere Produktivität durch den Verzicht auf die Aufarbeitung von IS ermittelt. Auch FINDEISEN und LINß (2006) gehen bei der Aufarbeitung von ausschließlich LAS-Sortimenten (in diesem Fall Langholzabschnitte mit 4 und 5 m Länge) im Vergleich zur Aufarbeitung von LAS-Sortimenten und Industrieholz von einer höheren Produktivität der Waldarbeiter aus.

Grundsätzlich kann mit den gezeigten Modellen auf einfache Weise die Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Einschlag von Rundholz berechnet werden. Auch ist es möglich, den Einfluss einer Aushaltung von Industrieholz abzuschätzen. Zu beachten ist, dass

in der Praxis dennoch Abweichungen z. B. in den Arbeitsbedingungen auftreten können, die nicht in die Analysen einbezogen wurden. Diese Abweichungen werden im EST durch Vergabe von prozentualen Zu- und Abschlägen (als Zuschläge A und B bezeichnet) auf die Vorgabezeit berücksichtigt. In der vorliegenden Untersuchung wurde stattdessen von einfachen Verhältnissen, ohne gesondert zu berücksichtigende Hiebsbedingungen ausgegangen. Auch kann der Leistungsgrad zwischen unterschiedlichen Waldarbeitern stark variieren und von den hinterlegten 160 % abweichen, was zu weiteren Abweichungen der mit den Modellen kalkulierten Produktivität von der tatsächlichen Produktivität führen kann. Für eine einfache Abschätzung der Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Einschlag von Rundholz und deren Abhängigkeit von der Baumart, dem BHD des ausscheidenden Bestands und der Aushaltung scheinen die in diesem Kapitel vorgestellten Modelle, ihre Genauigkeit und ihre Geltungsbereiche aber durchaus gut geeignet zu sein.

5.2 Modelle für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den Einschlag von Energieholz

5.2.1 Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den vollmechanisierten Einschlag von Energieholz mit einem Harvester

Für diesen Verfahrensschritt, der nur beim Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz Relevanz besitzt (Aushaltungsvariante 3, siehe Kapitel 4.2.3), konnte kalkulatorisch zu insgesamt 13 Fällen eine Produktivität ermittelt werden.⁵⁰ In diesen Fällen wurden die Produktivitäten im Rahmen detaillierter Zeitstudien erhoben (siehe u.a. CREMER, 2007; LECHNER, 2004; LECHNER, 2007), sodass der Stichprobenumfang zwar gering, das Zustandekommen der jeweiligen Werte jedoch gut nachvollziehbar ist und die Daten daher aussagekräftig sind. Dabei wurde in keinem der Fälle ein klassisches Industrieholzsortiment ausgehalten, sondern die Bäume, unabhängig von der Baumart, bis zu einem Zopf zwischen 12–15 cm aufgearbeitet und ausschließlich Stammholz ausgehalten.

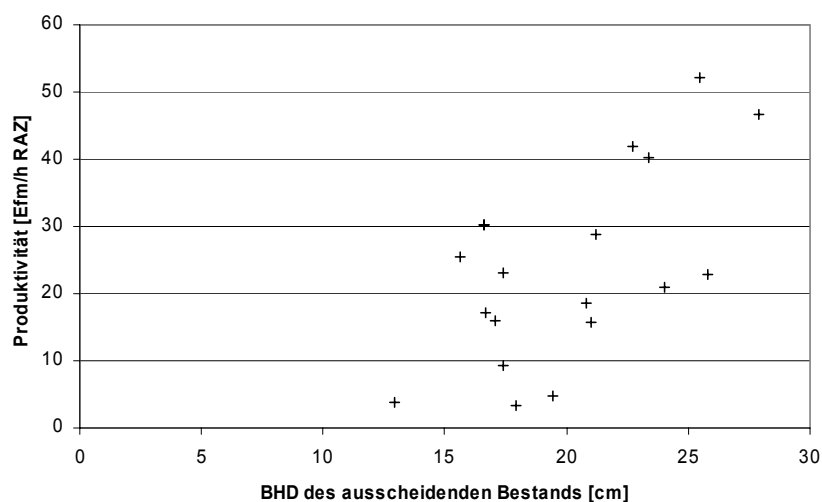


Abbildung 16: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (13 Fälle)

Wie schon das Streudiagramm in Abbildung 16 zeigt, scheint auch bei diesem Verfahrensschritt im Durchmesserbereich zwischen 12,9–27,9 cm ein Zusammenhang zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem BHD des ausscheidenden Bestands zu bestehen.

Die Korrelationskoeffizienten, die zur Identifikation der wichtigsten Einflussvariablen auf diese Produktivität berechnet wurden, zeigt Tabelle 19.

⁵⁰ Diese Produktivität ist keine tatsächliche, sondern eine kalkulatorische Produktivität. Ihre Berechnungsweise ist in Kapitel 4.2.3 auf S. **Fehler! Textmarke nicht definiert.** detailliert beschrieben.

Tabelle 19: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (13 Fälle)

	Kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Flächen- größe [ha]	Energieholz- anfall [Efm/ha]	Zopf- durchmesser [cm]
Kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	1	,610(*)	,109	-,597(*)	-,591(*)
BHD des aussch. Bestands [cm]	,610(*)	1	-,310	-,523(*)	-,343
Flächengröße [ha]	,109	-,310	1	-,357	-,431(*)
Energieholzanfall [Efm/ha]	-,597(*)	-,523(*)	-,357	1	,484(*)
Zopfdurchmesser [cm]	-,591(*)	-,343	-,431(*)	,484(*)	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

In dieser Tabelle wird der Eindruck aus Abbildung 16 bestätigt: Mit 0,610 wird für den Zusammenhang zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem BHD ein verhältnismäßig hoher, signifikanter positiver Korrelationskoeffizient errechnet. Dieser Zusammenhang kann wie folgt erklärt werden: Alle Untersuchungen, die in das Modell eingingen, wurden in relativ homogenen Beständen durchgeführt. In diesen sind mit zunehmendem Alter (und damit mit zunehmendem BHD) immer weniger Bäume zu finden, aus denen kein Rundholz ausgehalten werden kann. Damit sinkt die Zeit für das Fällen dieser Bäume in einem Bestand immer weiter ab und die kalkulatorische Produktivität steigt stark an. Daraus resultiert in einem durchmesserstarken Bestand für den Einschlag von Energieholz mit einem Harvester eine sehr hohe kalkulatorische Produktivität. Diese nähert sich aber im Gegensatz zu der Produktivität beim Einschlag von Rundholz nicht an eine maximale Produktivität an; stattdessen ist vorstellbar, dass aus allen Bäumen eines Bestands ein Rundholzsortiment ausgehalten werden kann und somit keine kalkulatorische Produktivität mehr für den Einschlag von Energieholz ermittelt werden kann.

Zwischen dem Energieholzanfall je Hektar und der Produktivität konnte ein signifikanter negativer Zusammenhang identifiziert werden, während zwischen dem Energieholzanfall und dem Zopfdurchmesser offensichtlich ein signifikanter positiver Zusammenhang besteht (siehe Tabelle 19). Dies ist insofern nicht überraschend, als bei steigendem Zopfdurchmesser ein geringeres Rundholzvolumen und damit einhergehend ein höheres Volumen an Energieholz anfällt. Bei den weiteren Analysen ist zu beachten, dass ein solcher Zusammenhang zwischen zwei unabhängigen Variablen auf das Vorliegen von Kollinearität hindeuten kann.

Weitere signifikante Einflussfaktoren auf die Produktivität als die in Tabelle 19 gezeigten konnten auf der vorliegenden Datengrundlage im Rahmen der Korrelationsrechnung genauso wenig identifiziert werden, wie weitere signifikante Zusammenhänge zwischen den übrigen Variablen. Dabei ist auch hier zu beachten, dass bspw. zwischen der Produktivität und dem Rückegassenabstand kein Korrelationskoeffizient berechnet werden kann, da hierfür eine Intervallskalierung der Variablen „Rückegassenabstand“ notwendig wäre (siehe z. B. KÖHLER et al., 2002). Da diese Variable in der vorliegenden Untersuchung aber als Dummy-Variable

kodiert wurde (0 = Rückegassenabstand 20 m, 1 = Rückegassenabstand 40 m) ist diese Voraussetzung nicht erfüllt.

Wie Tabelle 20 zeigt, wurde im Rahmen der schrittweisen multiplen Regression lediglich der Rückegassenabstand als signifikante Einflussvariable zusätzlich zum BHD des ausscheidenden Bestands in das Produktivitätsmodell aufgenommen.

Tabelle 20: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD des aussch. Bestands	,372	,315	11,9694	11
2	Konstante, BHD des aussch. Bestands, Rückegassenabstand	,251	,547	9,7309	10

Trotz des signifikant negativen Zusammenhangs zwischen der Produktivität und dem Energieholzanfall je Hektar wurde Letzterer nicht als Variable in das Produktivitätsmodell aufgenommen. Offensichtlich wird dessen Einfluss durch den Einfluss der anderen Variablen überlagert, sodass eine Aufnahme dieser Variablen in das Modell den Erklärungsgehalt des Modells nicht signifikant verbessern würde.

Im Rahmen der schrittweisen Regression konnte auch kein signifikanter Einfluss des Zopfdurchmessers, der Baumart oder der Flächengröße auf die Produktivität nachgewiesen werden, weshalb auch das oben genannte Problem der Kollinearität nicht weiter verfolgt werden muss. Dieses Phänomen, dass für eine einzelne (unabhängige) Variable eine signifikante Korrelation mit der abhängigen Variablen nachgewiesen wird, diese Variable im Rahmen einer schrittweisen Regression aber dennoch nicht in das Modell aufgenommen wird ist, tritt nach BROSIUS (2004) gerade bei multiplen Regressionsschätzungen häufig auf. Grund hierfür sei, dass der Einfluss einer Variablen vom gesamten Modell und damit auch von den übrigen in das Modell einbezogenen Variablen abhängt. Damit kann sich der Einfluss einer Variable im Zusammenwirken mit anderen erklärenden Variablen als nicht mehr signifikant erweisen (BROSIUS, 2004).

Das (korrigierte) Bestimmtheitsmaß (R^2) des Modells liegt bei 0,547, was im Vergleich zu den Bestimmtheitsmaßen der übrigen Modelle dieser Untersuchung als gut einzustufen ist. Durch den BHD des ausscheidenden Bestands kann mit mehr als 30 % der größere Teil der Streuung erklärt werden, während der Erklärungsgehalt des Rückegassenabstands bei ca. 20 % liegt.

Wie Tabelle 21 zeigt, ist das berechnete Produktivitätsmodell hoch signifikant.

Tabelle 21: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	1.562,054	2	781,027	8,248	,008
Residuen	946,897	10	94,690		
Gesamt	2.508,951	12			

Tabelle 22 zeigt die Variablen und die dazugehörigen Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz.

Tabelle 22: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-36,026	15,199		-2,370	,039	-69,891	-2,162
BHD des aussch. Bestands	2,525	,672	,764	3,758	,004	1,028	4,022
Rückegassenabstand	14,598	5,664	,524	2,577	,028	1,978	27,217

Im Histogramm der standardisierten Residuen (siehe Abbildung 46, S. 167) zeigt sich, dass diese keine exakte Normalverteilung aufweisen, sondern eher einer zweigipfligen Verteilung folgen. Da sie jedoch keinem *systematischen* Muster zu folgen, scheint die Forderung der Regression nach einem zufälligen Auftreten der Fehler der Schätzung erfüllt zu sein. Damit kann Formel 10 für die Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz herangezogen werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Fällen, die diesem Modell hinterlegt sind, können die Ergebnisse des Modells jedoch nur als erste Annäherung an die kalkulatorische Produktivität bezeichnet werden, jedoch nicht als statistisch gut abgesichertes Ergebnis.

$$\text{Formel 10: Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ]} = 2,525 * \text{BHD} + 14,598 * \text{Rückegassenabstand} - 36,026$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Rückegassenabstand = Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Dieses Produktivitätsmodell besitzt im Durchmesserbereich zwischen 12,9–27,9 cm (Rückegassenabstand 20 m) bzw. zwischen 16,6–25,5 cm (Rückegassenabstand 40 m) Gültigkeit.

In Formel 10 wird der Einfluss des Rückegassenabstands verdeutlicht: Demnach steigt die kalkulatorische Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m um fast 15 Efm/h RAZ an. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass bei einem Rückegassenabstand von 40 m auch Anteile des Energieholzes motormanuell gefällt und vorgeliefert werden und deshalb nicht durch den Harvester manipuliert werden müssen. Diese haben somit zwar keinen Einfluss auf die Arbeitszeit des Harvesters, erhöhen aber andererseits den Energieholzanfall, wodurch wiederum die kalkulatorische Produktivität des Harvesters deutlich gesteigert wird.

Abbildung 17 stellt den Einfluss des BHDs und des Rückegassenabstands auf die kalkulatorische Produktivität grafisch dar.

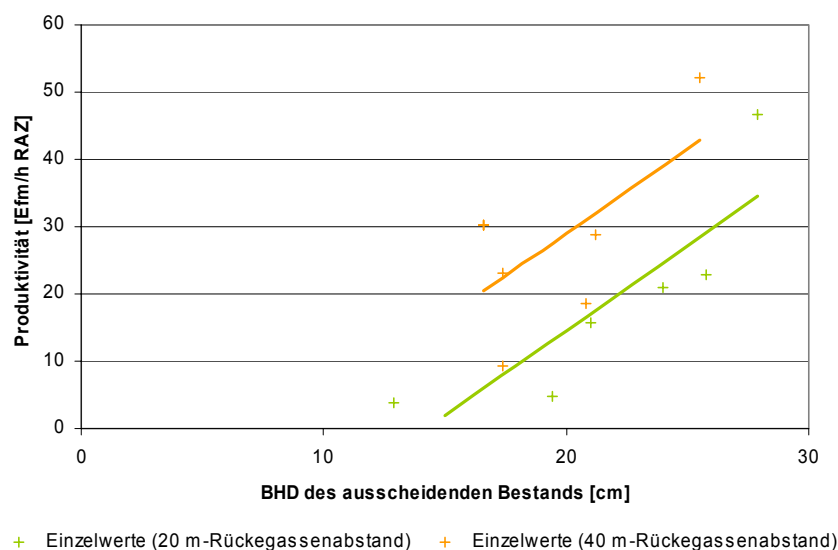


Abbildung 17: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz

Zu beachten ist, dass die Produktivität dieses Modells bei Rückegassenabständen von 20 m trotz eines Gültigkeitsbereichs bis 12,9 cm ab einem BHD von unter 14 cm negative Werte annimmt. Dies ist zwar in der Praxis nicht relevant, da hier, wie erwähnt, auf die Aushaltung von Industrieholz in solchen Beständen nicht verzichtet wird; dennoch wird für die späteren Beispielkalkulationen davon ausgegangen, dass die Produktivität eines Harvesters nicht unter 1,15 Efm/h RAZ (= 1 Efm/MAS) sinken kann.

Vergleichswerte für diesen Verfahrensschritt des Einschlags von Energieholz durch einen Harvester konnten in der Literatur nicht gefunden werden, sodass ein Vergleich der eigenen Ergebnisse mit anderen Ergebnissen unterbleiben muss. Zwar ermittelt bspw. auch STISSEL (2002) in seiner Untersuchung eine Produktivität für den Einschlag von Energieholz. Da er diese Produktivität jedoch über Differenzenbildung herleitet, sind seine Werte nicht mit den Werten der vorliegenden Untersuchung vergleichbar. Auch in Kalkulationshilfen, wie bspw. dem in Kapitel 3 vorgestellten Programm HeProMo der WSL (2007) oder dem HOLZERNT-Programm der FVA (2007) wird der Einschlag von Energieholz nicht explizit berücksichtigt, sodass mit diesen kein Vergleich möglich ist.

5.2.2 Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für den Einschlag von Energieholz durch Waldarbeiter im motormanuellen Verfahren

Für diesen Verfahrensschritt, der ebenfalls nur beim Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz Relevanz besitzt (Aushaltungsvariante 3, siehe Kapitel 4.2.3) konnten im Rahmen der Metaanalyse 21 Fälle erfasst werden. Auch diese Fälle stammen aus eigenen Versuchen des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft (z.B. CREMER et al., 2007; LECHNER, 2004; LECHNER, 2007), sodass zwar verhältnismäßig wenige, dafür jedoch gut abgesicherte Fälle zur Verfügung stehen. In allen Fällen wurde mit einem Rückegassenabstand von 40 m gearbeitet, sodass dieser im Gegensatz zu dem Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität beim Einschlag von Rundholz mit einem Harvester (Kapitel 5.2.1) als Einflussvariable ausscheidet. Auch hier wurde in keiner der Untersuchungen ein klassisches Industrieholzsortiment ausgehalten; stattdessen wurden die Bäume bis zu einem Zopf zwischen 14–28 cm zu reinen Stammholzsortimenten aufgearbeitet.

Abbildung 18 zeigt das Streudiagramm der kalkulatorischen Produktivitätswerte von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands.

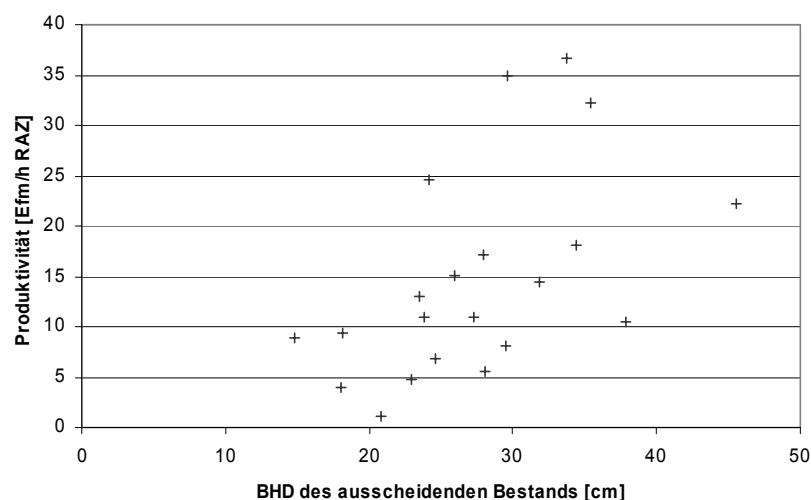


Abbildung 18: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (21 Fälle)

Deutlich ist die verhältnismäßig hohe Streuung der einzelnen Produktivitätswerte zu erkennen. Insbesondere in Beständen mit mittleren Durchmessern zwischen 30–38 cm weichen die Werte um zum Teil mehr als 100 % voneinander ab. Dieser offensichtlich wenig straffe Zusammenhang zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem BHD des ausscheidenden Bestands wird durch den mit 0,485 nur mäßig hohen, aber dennoch signifikanten Korrelationskoeffizienten bestätigt (siehe Tabelle 23). Wie in Tabelle 23 weiter zu erkennen ist, konnten keine weiteren signifikanten Korrelationskoeffizienten zwischen der kalkulatorischen Produktivität und den übrigen Variablen erkannt werden. Außerdem wurden zwischen der Flächengröße und dem Energieholzanfall sowie zwischen der Flächengröße und dem Zopfdurchmesser signifikante Zusammenhänge identifiziert (siehe Tabelle 23), auf die jedoch

nicht weiter eingegangen wird, da zwischen den jeweiligen Variablen kein kausaler Zusammenhang besteht.

Tabelle 23: Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (19 Fälle)⁵¹

	Kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Flächen- größe [ha]	Energie- holzanfall [Efm/ha]	Zopfdurch- messer [cm]
Kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	1	,485(*)	-,055	,276	,087
BHD des aussch. Bestands [cm]	,485(*)	1	-,193	-,098	-,008
Flächengröße [ha]	-,055	-,193	1	-,507(*)	-,718(**)
Energieholzanfall [Efm/ha]	,276	-,098	-,507(*)	1	,379
Zopfdurchmesser [cm]	,087	-,008	-,718(**)	,379	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Dennoch wurde im Rahmen der schrittweisen Regression der Einfluss aller der in Tabelle 23 gezeigten Variablen sowie der Baumart auf die kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz geprüft. Tabelle 24 zeigt jedoch, dass trotzdem lediglich der BHD des ausscheidenden Bestands als signifikante Einflussvariable in das Produktivitätsmodell aufgenommen wurde.

Tabelle 24: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	$R^{2\ 52}$	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD des aussch. Bestands	,280	,280	8,8648	19

Das Bestimmtheitsmaß dieses Modells liegt mit 0,280 auf einem geringen Niveau. Es kann lediglich knapp ein Drittel der gesamten Streuung durch eine Änderung des BHDs erklärt werden, was aber angesichts der bereits erwähnten hohen Streuung der Produktivitätswerte (Abbildung 18) zu erwarten war. Auch die Nichtberücksichtigung der Baumart ist nachvollziehbar, angesichts der Tatsache, dass für Laubholzbestände 13 Fälle vorliegen, während für

⁵¹ Da in zwei der Fälle nicht zu allen Variablen eine Angabe gemacht wurde, konnten zur Berechnung dieses Korrelationskoeffizienten nur 19 Fälle einbezogen werden.

⁵² Da in diese Regression nur eine erklärende Variable eingeht (der BHD des ausscheidenden Bestands), kann an dieser Stelle das „normale“ R^2 statt dem korrigierten R^2 verwendet werden.

Fichtenbestände (2 Fälle) und für Kiefernbestände (6 Fälle) deutlich weniger Fälle in die Analyse eingehen. Die Signifikanz dieses Modells zeigt Tabelle 25.

Tabelle 25: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	579,769	1	579,769	7,378	,014
Residuen	1.493,104	19	78,584		
Gesamt	2.072,874	20			

Tabelle 26 zeigt die Variablen und ihre Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz. Diese Regression deckt mit einem Gültigkeitsbereich zwischen 14,8–45,6 cm ein verhältnismäßig großes Durchmesserspektrum ab.

Tabelle 26: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-5,548	7,715		-,719	,481	-21,695	10,599
BHD des aussch. Bestands	,737	,271	,529	2,716	,014	,169	1,305

Die Verteilung der standardisierten Residuen dieses Modells (Abbildung 47, S. 167) zeigt insbesondere bei mittleren Produktivitäten Abweichungen von der standardisierten Normalverteilung, d. h. in diesem Bereich wird die Produktivität durch das Modell nicht fehlerfrei beschrieben. Dennoch kann die folgende Gleichung zur Abschätzung der kalkulatorischen Produktivität herangezogen werden (Formel 11), es muss aber angesichts der geringen Stichprobenzahl und im Hinblick auf die nicht optimale Verteilung der Residuen darauf hingewiesen werden, dass mit diesem Modell nur Trends, und keine statistisch gut abgesicherten Ergebnisse abgebildet werden.

$$\text{Formel 11: Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ]} = 0,737 * \text{BHD} - 5,548$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausschließenden Bestands [cm]

Eine grafische Darstellung dieses Modells liefert Abbildung 19.

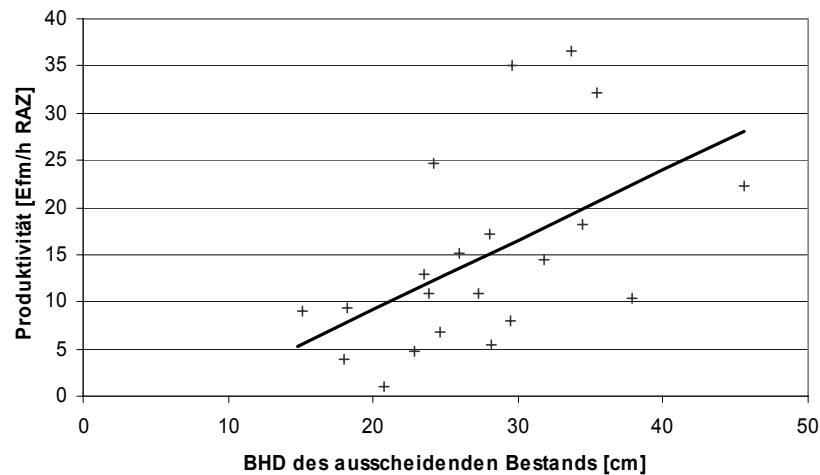


Abbildung 19: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz

Wie in Abbildung 19 zu erkennen, lagen keine Produktivitätswerte aus Beständen mit einem BHD von unter 15 cm vor, da diese Art der Aushaltung (Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz), wie schon in Kapitel 5.2.1 beschrieben, in solchen schwachen Beständen in der Praxis offensichtlich nicht relevant ist. Im Gegensatz zu den Produktivitätswerten von Harvestern existieren für die Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern aber auch für verhältnismäßig starke Bestände Produktivitätswerte. Dies kann insbesondere durch den Zopfdurchmessern der jeweiligen Eingriffe begründet werden: Lag der mittlere Zopfdurchmesser in den Beständen, die durch einen Harvester bearbeitet wurden bei ca. 13,1 cm, so wurden die Bäume durch die Waldarbeiter bis zu einem Zopf von durchschnittlich ca. 22,4 cm aufgearbeitet.⁵³ Damit kann aus weniger Bäumen ein Rundholzsortiment ausgehalten werden und es müssen gleichzeitig auch in starken Beständen mehr Bäume zur ausschließlich energetischen Verwertung gefällt werden.

Für diesen Verfahrensschritt waren in den Publikationen der letzten Jahre und anderen einschlägigen Veröffentlichungen keine Vergleichswerte zu finden. Auch im Programm HeProMo der WSL (2007) oder im HOLZERNT-Programm der FVA (2007) wird der Einschlag von Energieholz nicht berücksichtigt, sodass auch damit kein Vergleich möglich ist.

⁵³ Der höhere Zopfdurchmesser ist auch bedingt durch die höhere Anzahl von Laubholzbeständen, die in diese Untersuchung einbezogen wurden.

5.3 Produktivitätsmodelle für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone an die Rückegasse

5.3.1 Produktivitätsmodell für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone an die Rückegasse zur Aushaltung von Rundholz durch einen Harvester

Wie in Kapitel 4.1.3.2 beschrieben, wurde für diesen Verfahrensschritt auf existierende Produktivitätsmodelle zurückgegriffen und keine Metaanalyse durchgeführt. Die neuesten Veröffentlichungen, die sich mit dem Verfahrensschritt des motormanuellen Fällens und Vorlieferns befassen, stammen vom KWF (KWF, 1996, in RAAB, 1999) und von PFAU (1997). Auch BORT und PFEIL (1993) sowie DUMMEL und BRANZ (1986) untersuchten die Produktivität dieses Verfahrensschritts. Allen Untersuchungen liegt die Annahme zugrunde, dass der Rückegassenabstand 40 m beträgt und dass die Bäume an der Rückegasse durch einen Harvester aufgearbeitet werden. Damit ist ein motormanuelles Fällen und Vorliefern der Bäume aus der Zwischenzone, die durch den Harvester nicht bearbeitet werden kann, zwingend erforderlich. Alle Untersuchungen gehen außerdem vom motormanuellen Fällen und Vorliefern von *Fichtenvollbäumen* an die Rückegasse aus. Untersuchungen über die Produktivität beim Vorliefern von Sortenstücken (z. B. CLOSEN et al., 1987) wurden nicht berücksichtigt, da eine Vergleichbarkeit der Produktivitätswerte nicht gegeben ist. Aus diesem Grund wurden auch Produktivitätswerte beim *Zufällen* von Vollbäumen nicht in die Analysen einbezogen. Eine Übersicht über die Ergebnisse der genannten Untersuchungen gibt Tabelle 27:

Tabelle 27: Produktivitätswerte für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen aus der Zwischenzone zur Aushaltung von Rundholz durch einen Harvester an der Rückegasse (in Efm/h GAZ)⁵⁴

BHD des aussch. Bestands [cm]	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Pferd (nach PFAU, 1997)		4,1	4,6	5,2	5,7	6,1	6,7	7,5	
Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Pferd (nach KWF 1996)		3,7	4,2	4,9	5,3	5,8	7		
Seilunterstütztes, motormanuelles Fällen/ Vorliefern (nach DUMMEL und BRANZ, 1986)	2	2,3	2,6	3,1	3,6	4	4,4		5,2
Seilunterstütztes, motormanuelles Fällen/ Vorliefern (nach BORT und PFEIL, 1993)		2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1		
Seilunterstütztes, motormanuelles Fällen/Vorliefern (nach KWF 1996)		2,3	2,7	3,2	3,6	4	4,8		

⁵⁴ Alle aufgeführten Verfahren sind als 2-Mann-Verfahren definiert.

Wie Tabelle 27 und die daraus abgeleitete Abbildung 20 zeigen, liegen die Produktivitätswerte für das seilunterstützte (d.h. unterstützt durch einen Forstspezialschlepper) motormanuelle Fällen und Vorliefern von Vollbäumen an die Rückegasse grundsätzlich sehr dicht beieinander. Dagegen wird beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Vollbäumen an die Rückegasse mit dem Pferd eine um durchschnittlich ca. 1,8 Efm/h GAZ höhere Produktivität erreicht. Der Grund hierfür ist laut KWF (1996) in der höheren Wendigkeit des Pferds zu suchen. Dieses arbeitet nicht wie ein Forstspezialschlepper in exakten Seillinien, sondern bewegt sich auf dem für ihn am besten geeigneten Weg zur Rückegasse, wodurch eine höhere Produktivität erreicht wird.

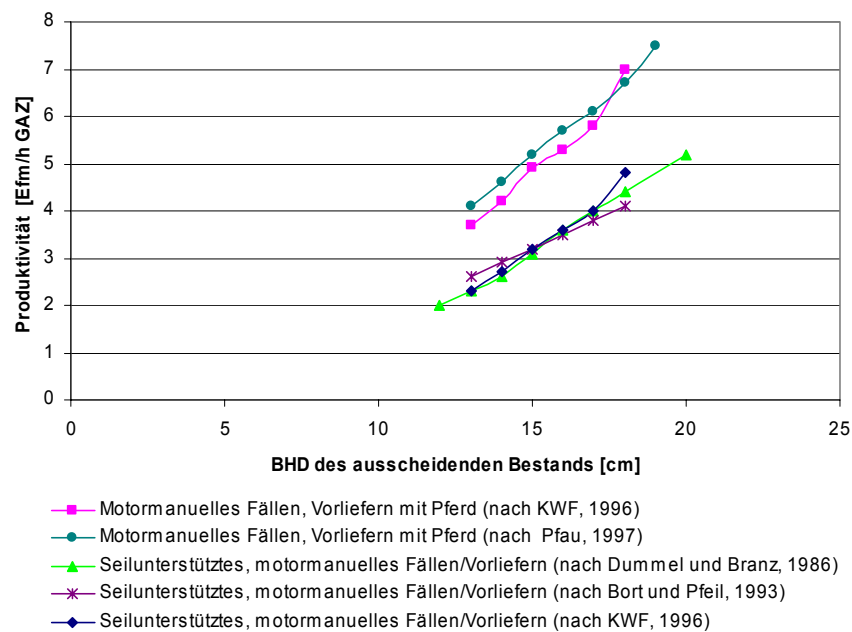


Abbildung 20: Abhängigkeit der Produktivität beim motormanuellem Fällen und Vorliefern von Rundholz mit Forstspezialschlepper bzw. Pferd vom BHD des ausscheidenden Bestands

Zur Verwendung der in Abbildung 20 gezeigten Produktivitätswerte in den späteren Beispielkalkulationen war es nötig, mittels einfacher Regression ein Produktivitätsmodell zu erstellen, um so die Tabellenwerte (Tabelle 27) durch eine kontinuierliche Funktion beschreiben zu können. Damit können die Produktivitätswerte außerdem extrapoliert und somit auch für größere BHD die entsprechende Produktivität berechnet werden.⁵⁵ Als Grundlage für die Erstellung dieses Modells wurden, wegen ihrer relativen Aktualität, die Ergebnisse der Untersuchung des KWF (1996) ausgewählt. Die Berechnungen wurden mit dem Programm WinStat, Version 2003.1 durchgeführt.

Die Formel des Produktivitätsmodells zur Abschätzung der Produktivität beim seilunterstützten, motormanuellen Fällen und Vorliefern im 2-Mann-Verfahren (nach KWF, 1996) lautet (Formel 12):

⁵⁵ Dabei muss insbesondere beim Vorliefern mit einem Pferd beachtet werden, dass dessen Einsatzgrenze nach PFAU (1997) bei einem BHD von ca. 19 cm liegt (entspricht einer Stückmasse von ca. 0,22 Fm) und bei stärkeren BHD nicht mehr eingesetzt werden sollte.

$$\text{Formel 12: Produktivität [Efm/h GAZ]} = 7,3417 * (\ln \text{BHD}) - 16,644$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Dieses Modell basiert, wie oben gezeigt, auf einem Produktivitätsmodell der KWF (1996) und resultiert nicht aus einer Analyse mehrerer, voneinander unabhängiger Produktivitätswerte. Deshalb kann auf die Angabe eines Bestimmtheitsmaßes oder anderer statistischer Kennwerte verzichtet werden. Ein Vergleich mit entsprechenden Produktivitätsmodellen, die auf Basis der Ergebnisse von DUMMEL und BRANZ (1986) oder von BORT und PFEIL (1993) kalkuliert wurden, zeigt nur minimale Abweichungen. In das gewählte Modell geht der BHD des ausscheidenden Bestands in seiner logarithmierten Form ein (dabei wird in diesem, wie in allen weiteren Verfahrensschritten stets der natürliche Logarithmus (*Logarithmus naturalis*, *ln*) verwendet, d. h. der Logarithmus zur Basis *e* (Eulersche Zahl)). Die Verwendung des BHDs in seiner logarithmierten Form ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass die genannten Werte nur ein relativ geringes Durchmesserpektrum abdecken. So zeigte sich bei weiteren Analysen, dass die Produktivität bei Annahme eines linearen oder polynomischen Zusammenhangs überproportional stark ansteigt, wenn das Modell in größere Durchmesserbereiche extrapoliert wird und bei einem angenommenen BHD von 40 cm bei ca. 32 Efm/h GAZ liegt. Damit wird die tatsächliche Produktivität in höheren Durchmesserbereichen sehr stark überschätzt. Legt man jedoch eine logarithmische Funktion zugrunde, nähert sich die Produktivität einer bestimmten Obergrenze an, was im Hinblick auf die Anwendung der Funktion auf Bestände mit größeren BHD die optimale Variante zu sein scheint.

Mit dem gezeigten Modell kann die Produktivität beim seilunterstützten motormanuellen Fällen und Vorliefern von Bäumen abgeschätzt werden. Für die darauf basierende Berechnung der Stückkosten ist zu beachten, dass in einem konkreten Bestand nur ca. die Hälfte der zu entnehmenden Bäume tatsächlich vorgeliefert werden muss, da die übrigen Bäume unmittelbar von der Rückegasse aus von dem Harvester eingeschlagen werden können. Damit sind auch die auf die *Gesamterntemenge* bezogenen Stückkosten für das motormanuelle Fällen und Vorliefern nur halb so groß wie die mit oben genanntem Modell abgeleiteten Stückkosten.

5.3.2 Modell für die Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Energieholz aus der Zwischenzone an die Rückegasse

Auch der Verfahrensschritt des motormanuellen Fällens und Vorlieferns von Energieholz kommt nur dann zur Anwendung, wenn auf die Aushaltung von Industrieholz (Aushaltungsvariante 3, siehe Kapitel 4.2.3) verzichtet wird. Für diesen Verfahrensschritt waren lediglich sieben Produktivitätswerte vorhanden, die alle aus Versuchen des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft stammten (siehe CREMER, 2007; LECHNER et al., 2007). Je zwei der Werte sind deckungsgleich, weshalb in Abbildung 21 nur fünf Werte zu erkennen sind. Sechs der Werte wurden in Laubholzbeständen und einer in einem Fichtenbestand ermittelt. Stets wurden die Bäume motormanuell gefällt und ein Forstspezialschlepper zum Vorliefern eingesetzt.

Diese Produktivitätswerte sind kalkulatorischer Art, ihre Herleitung erfolgte auf dieselbe Weise wie die Herleitung der Produktivitätswerte von Harvestern und Waldarbeitern beim Einschlag von Energieholz und ist in Kapitel 4.2.3 näher erläutert. Abbildung 21 zeigt den Zusammenhang zwischen der kalkulatorischen Produktivität der Waldarbeiter beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz und dem BHD des ausscheidenden Bestands.

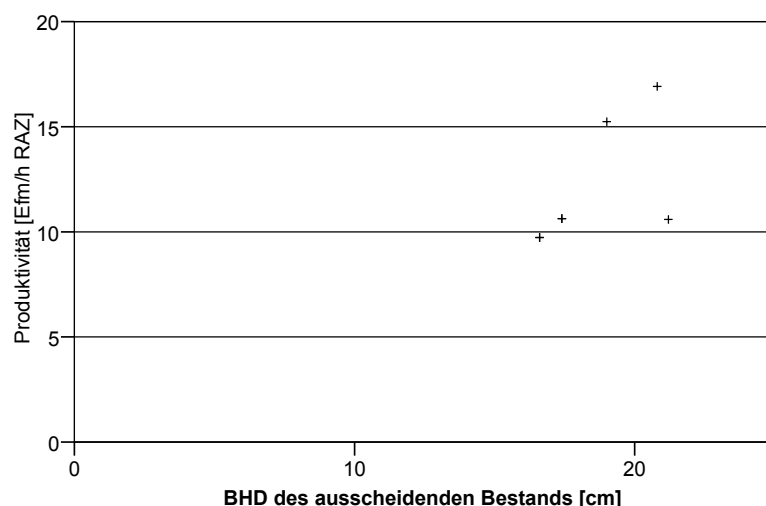


Abbildung 21: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (7 Fälle)

Dieser Zusammenhang ist offensichtlich gering. Auch konnte weder zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem BHD, noch zwischen der kalkulatorischen Produktivität und anderen Variablen ein signifikanter Korrelationskoeffizient berechnet werden. Um trotzdem Anhaltspunkte über die Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität vom BHD des ausscheidenden Bestands zu erhalten, wurde im Folgenden ein Produktivitätsmodell berechnet, in das der BHD aufgrund der geringen Datengrundlage und der nicht-signifikanten Korrelationen als einzige unabhängige Variable einbezogen wurde. (Tabelle 28).

Dieses Modell ist, wie Tabelle 29 zeigt, auf dem Niveau von 0,15 signifikant. Damit erfüllt es zwar nicht den in der Wissenschaft üblichen Standard eines Signifikanzniveaus von 0,05 (siehe BORTZ, 1999) und bildet aufgrund dessen lediglich einen Trend ab; dennoch scheint es geeignet zu sein, um im Rahmen der Beispielkalkulationen (siehe Kapitel 6) eine erste, sehr grobe

Abschätzung der Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz vorzunehmen.

Tabelle 28: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD des ausscheidenden Bestands	,378	,378	2,5121	5

Tabelle 29: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	19,157	1	19,157	3,036	,142
Residuen	31,554	5	6,311		
Gesamt	50,712	6			

Die Variablen und Koeffizienten des Modells zeigt Tabelle 30:

Tabelle 30: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Waldarbeitern beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Energieholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-5,105	9,820		-,520	,625	-30,349	20,138
BHD des aussch. Bestands	,924	,530	,615	1,742	,142	-,439	2,287

Die aus Tabelle 30 resultierende Formel des Produktivitätsmodells lautet:

$$\text{Formel 13: Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ]} = 0,924 * \text{BHD} - 5,105$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Der Gültigkeitsbereich dieses Modells liegt zwischen 16,6–21,2 cm; weitere statistische Auswertungen wurden aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nicht durchgeführt.

5.4 Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz

5.4.1 Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz mit einem Forwarder

Für die Produktivität von Forwardern bei der Rückung von Rundholz (in der weit überwiegenden Zahl der Fälle als Kurzholz⁵⁶) lagen, wie Abbildung 22 verdeutlicht, knapp 700 Fälle vor, deren Produktivitätswerte einen Durchmesserbereich von 10,9–44,0 cm abdecken.

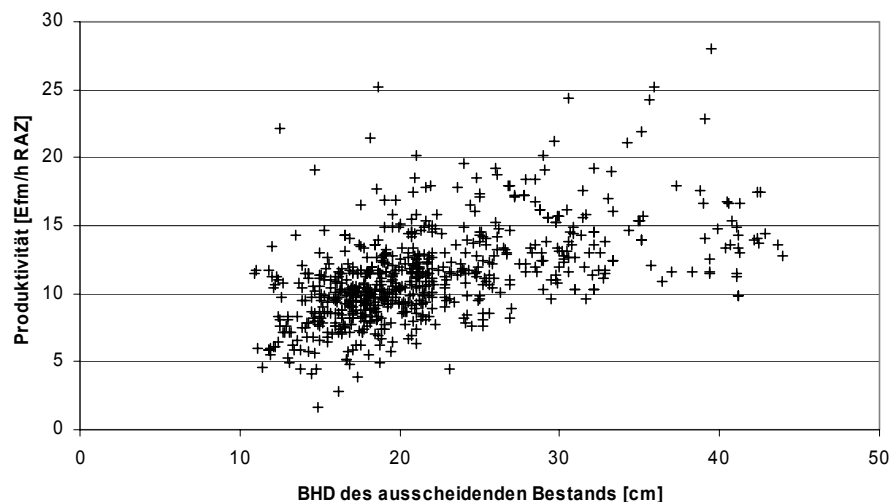


Abbildung 22: Abhängigkeit der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (692 Fälle)

Es ist zu erkennen, dass die Mehrzahl der Produktivitätswerte in einem Durchmesserbereich zwischen 15–25 cm liegt und dass die Streuung dieser Werte mit steigendem Durchmesser zunimmt. Auch hier scheint der BHD des ausscheidenden Bestands eine wichtige Einflussvariable auf die Produktivität zu sein. Der Einfluss der Baumart ist hingegen offensichtlich nur gering: So zeigt der Test nach STUDENT-NEWMAN-KEULS keine Notwendigkeit auf, bei der Untersuchung der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz nach Baumarten zu unterscheiden. Zwar wird bspw. im Programm HeProMo der WSL (2007) bei Berechnung der Produktivität von Forwardern zwischen Laubholz und Fichte unterschieden, diese verändert sich aber auch in diesem Programm bei sich ändernden Baumartenanteilen nur marginal.

Wie schon bei den Produktivitätsmodellen für Harvester beim Einschlag von Rundholz wurde auch für die Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz ein erstes Produktivitätsmodell unter ausschließlicher Verwendung des BHDs des ausscheidenden Bestands berechnet. Um auch hier die Validität des Modells zu testen wurde dieses Modell auf der Basis von 90 % der Fälle erstellt, die mit Hilfe von Zufallszahlen ausgewählt wurden, um dieses dann in einem zweiten Schritt mit einem Modell zu vergleichen, das auf den übrigen 10 % der Fälle basiert. Beide Modelle werden in Abbildung 23 gezeigt:

⁵⁶ Darunter werden Abschnitte mit einer Länge von 3 m und kürzer verstanden (im Gegensatz zu der Bezeichnung „Kranlängen“, mit der Abschnitte von 4–6 m Länge bezeichnet werden).

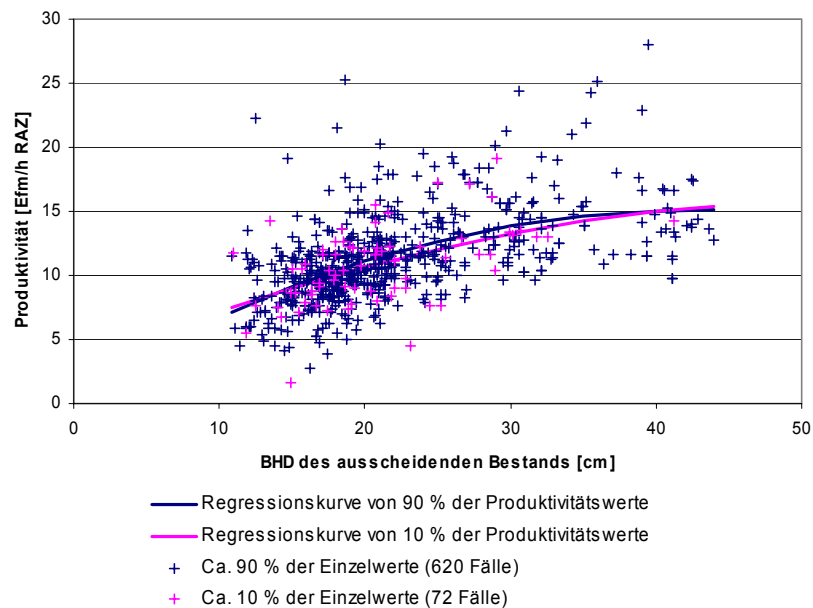


Abbildung 23: Allgemeines Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (620 bzw. 72 Fälle)

Die Modelle, die den beiden Regressionskurven in Abbildung 23 hinterlegt sind, lauten wie folgt:

Formel 14: *Produktivität (90 % der Fälle) [Efm/h RAZ]* = $0,008 * BHD^2 + 0,6787 * BHD + 0,6986$

Formel 15: *Produktivität (10 % der Fälle) [Efm/h RAZ]* = $-0,0043 * BHD^2 + 0,4734 * BHD + 2,8917$

Dabei ist

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der beiden Modelle liegt bei 0,31 bzw. 0,26 und damit auf einem verhältnismäßig geringen Niveau. Dies lässt darauf schließen, dass bei der Erstellung eines Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz, einen signifikanten Einfluss vorausgesetzt, weitere Variablen einbezogen werden sollten. Aus Abbildung 23 wird darüber hinaus deutlich, dass die beiden Regressionskurven in Lage und Verlauf gut übereinstimmen, was auf eine hohe Validität dieses Modells hinweist.

Im nächsten Schritt wurden Korrelationskoeffizienten berechnet, um mögliche weitere Einflussvariablen auf die Produktivität identifizieren zu können (Tabelle 31):

Tabelle 31: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz und möglichen Einflussvariablen

		Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Rundholzanfall [Efm/ha]	Rücke- entfernung [m]
Produktivität [Efm/h RAZ]	Korrelations- koeffizient	1	,582(**)	,182(**)	,017
	N	692	692	200	9
BHD des aussch. Bestands [cm]	Korrelations- koeffizient	,582(**)	1	-,088	-,362
	N	692	714	220	28
Rundholzanfall [Efm/ha]	Korrelations- koeffizient	,182(**)	-,088	1	,255
	N	200	220	221	29
Rückeentfernung [m]	Korrelations- koeffizient	,017	-,362	,255	1
	N	9	28	29	29

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Wie in Tabelle 31 zu erkennen ist, besteht sowohl zwischen der Produktivität und dem BHD als auch zwischen der Produktivität und dem Rundholzanfall je Hektar eine auf dem Niveau von 0,01 signifikante Korrelation. Beide Korrelationskoeffizienten weisen das erwartete Vorzeichen auf: So steigt die Produktivität sowohl mit steigendem BHD, als auch mit steigendem Rundholzanfall je Hektar an. Der Zusammenhang zwischen der Produktivität und dem Rundholzanfall je Hektar ist dabei mit 0,182 deutlich schwächer ausgeprägt im Vergleich zu dem mit 0,582 relativ starken Zusammenhang zwischen der Produktivität und dem BHD. Zu beachten ist außerdem, dass letzterem Korrelationskoeffizienten eine sehr hohe Anzahl an Fällen (692) hinterlegt ist, während der Korrelationskoeffizient zwischen Produktivität und Rundholzanfall je Hektar aufgrund der Tatsache, dass die notwendigen Angaben in den Versuchsdaten fehlten, auf der Grundlage von lediglich 200 Fällen berechnet wurde und somit in dessen Berechnung mehr als 70 % der Fälle nicht einbezogen werden konnten.

Weitere signifikante Korrelationen, wie z. B. zwischen der Produktivität und dem Zopfdurchmesser konnten auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht identifiziert werden, obwohl insbesondere zwischen der Produktivität und der Rückeentfernung ein signifikanter Zusammenhang zu vermuten gewesen wäre. Dieser konnte im vorliegenden Fall nicht nachgewiesen werden, was unter anderem daran liegt, dass lediglich in 9 Fällen Angaben zur Rückeentfernung gemacht wurden⁵⁷ (siehe Tabelle 31). Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die unterschiedlichen Rückeentfernungen ein nicht unerheblicher Teil der Streuung in Abbildung 22 erklärt werden kann. Andererseits ist anzunehmen, dass die Rückeentfernung die Produktivität sämtlicher Fälle gleichermaßen beeinflusst und somit ein Ausklammern der Rücke-

⁵⁷ Dies wiederum liegt darin begründet, dass in den Leistungsberichten der Forstbetriebe, denen die Mehrzahl der Fälle entnommen wurde, die Rückeentfernung nicht erfasst wird.

entfernung zwar zu einem geringeren Bestimmtheitsmaß, jedoch nicht zu einem *verzerrten* Ergebnis führt. Dies gilt umso mehr, als auch Untersuchungen aus Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen berücksichtigt werden konnten, und diese somit ein verhältnismäßig breites Spektrum abbilden. Gleiches gilt für die Anzahl an Sortimenten, die ebenfalls einen Einfluss auf die Produktivität haben kann, zu der allerdings in der Regel keine Angabe gemacht wurde. Diese hat jedoch – nimmt man das Kalkulationsprogramm HeProMo der WSL (2007) als Referenz – nur einen sehr geringen Einfluss auf die Produktivität.

Obwohl die durchschnittliche Länge der zu rückenden Sortimente im Programm HeProMo der WSL (2007) bei der Kalkulation der Produktivität als signifikante Einflussvariable berücksichtigt wird, konnte deren Einfluss auf Basis der vorliegenden Fälle nicht quantifiziert werden, da in der weit überwiegenden Zahl das Holz als Kurzholz (Länge ≤ 3 m) gerückt wurde und somit die Streuung nicht ausreichte, um deren Einfluss abzuschätzen.

Als weiteren Anhaltspunkt über die Art des Zusammenhangs zwischen der Produktivität und den unterschiedlichen Einflussvariablen zeigt Tabelle 32 das Ergebnis der schrittweisen Regression.

Tabelle 32: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD	,216	,212	2,3882	198
2	Konstante, BHD, Rückegassenabstand	,125	,334	2,1955	197
3	Konstante, BHD, BHD^2 , Rückegassenabstand	,045	,376	2,1246	196
4	Konstante, BHD, BHD^2 , Rückegassen- abstand, Rundholzanfall je Hektar	,018	,392	2,0979	195

Das Bestimmtheitsmaß dieses Produktivitätsmodells ist mit 0,392 relativ gering und es werden insgesamt nur ca. 40 % der gesamten Streuung durch das Modell erklärt. Dabei hat der BHD mit insgesamt 26 % den größten Erklärungsgehalt der in das Modell aufgenommenen Variablen; weitere 13 % der Streuung werden durch den Rückegassenabstand erklärt und knapp 2 % durch einen sich ändernden Rundholzanfall je Hektar. Weitere Variablen werden im Rahmen der schrittweisen Regression nicht in das Modell aufgenommen.

Auch der Einfluss der Variablen „Leistungsklasse“ wurde untersucht. Dazu wurden die einzelnen Fälle den Kategorien „Untere Leistungsklasse“ (bis 10 t Ladekapazität, 24 Fälle), „mittlere Leistungsklasse“ (10–12 t Ladekapazität, 524 Fälle) und „obere Leistungsklasse“ (>12 t Ladekapazität, 142 Fälle) zugeteilt. Dann wurden die untere und die obere Leistungsklasse als Dummy-Variablen kodiert (0 = nicht vorhanden; 1 = vorhanden). Werden nun beide Leistungsklassen = 0 gesetzt, liegt ein Forwarder der mittleren Leistungsklasse vor. Um die Wechselwirkung zwischen BHD und Produktivität zu berücksichtigen, wurden außerdem die Variablen „BHD * untere Leistungsklasse“ und „BHD * obere Leistungsklasse“ erstellt. Keine dieser Variablen wurde in das in Tabelle 32 beschriebene Produktivitätsmodell aufgenommen.

Tabelle 33 zeigt, dass das berechnete Modell hoch signifikant ist.

Tabelle 33: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	582,493	4	145,623	33,087	<,001
Residuen	858,229	195	4,401		
Gesamt	1.440,722	199			

Einen Überblick über die Variablen und Koeffizienten des Produktivitätsmodells gibt Tabelle 34:

Tabelle 34: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-,916	1,798		-,510	,611	-4,461	2,629
BHD des aussch. Bestands	,742	,141	1,966	5,277	<,001	,464	1,019
Rückegassenabstand	2,726	,486	,318	5,606	<,001	1,767	3,685
BHD ²	-,010	,003	-1,482	-3,970	<,001	-,015	-,005
Rundholzanfall je Hektar	,014	,006	,138	2,456	,015	,003	,026

Keine der einbezogenen Variablen musste aufgrund von Kollinearität ausgeschlossen werden. Die Prüfung der standardisierten Residuen auf ihre Normalverteilung (Abbildung 48, S. 168) zeigt, dass diese nicht exakt verteilt sind und dass diese Abweichungen darüber hinaus systematischer Art sind. Damit kann auch das aus Tabelle 34 abgeleitete Modell (Formel 16) zwar Hinweise zur Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz geben, es muss aber darauf hingewiesen werden, dass auch dieses Modell offensichtlich nicht alle erklärenden Variablen berücksichtigt.

$$\text{Formel 16: Produktivität [Efm/h RAZ]} = - 0,010 * \text{BHD}^2 + 0,742 * \text{BHD} + 2,726 * \text{Rückegassenabstand} + 0,014 * \text{Rundholzanfall je Hektar} - 0,916$$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Rückegassenabstand = Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Rundholzanfall je Hektar = Rundholzanfall je Hektar [Efm/ha]

Das Modell deckt bei einem Rückegassenabstand von 20 m einen Durchmesserbereich zwischen 10,9–44,0 cm ab (176 Fälle), und bei einem Rückegassenabstand von 40 m einen Durchmesserbereich zwischen 13,2–29,0 cm (24 Fälle).

In Formel 16 ist der hohe Einfluss des BHDs des ausscheidenden Bestands und des Rückegassenabstands zu erkennen: So steigt die Produktivität aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m um ca. 2,7 Efm/h RAZ an. Dies scheint insofern plausibel zu sein, als bei einem Rückegassenabstand von 40 m – gleiche Eingriffsstärke vorausgesetzt – bis zu doppelt so viel Rundholz je Rückegasse gerückt werden kann, im Vergleich zu einem Rückegassenabstand von 20 m. Dadurch ist für den Forwarder ein rationelleres Arbeiten und damit eine gesteigerte Produktivität möglich. Der Rundholzanfall je Hektar hat hingegen bei gleich bleibendem Rückegassenabstand, einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Produktivität des Forwarders: Bei einer Verdoppelung des Rundholzanfalls von 30 Efm/ha auf 60 Efm/ha steigt die Produktivität um lediglich ca. 0,4 Efm/h RAZ an. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 24 grafisch dargestellt.

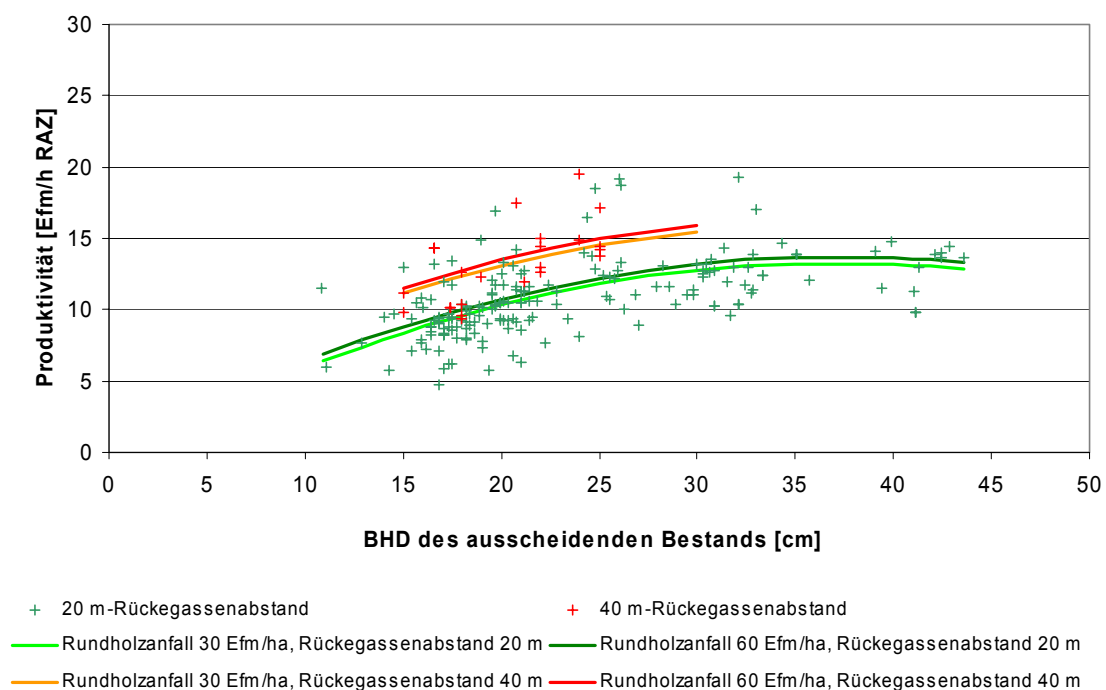


Abbildung 24: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (200 Fälle)

In Abbildung 24 ist außerdem zu erkennen, dass sich die Produktivität von Forwardern nach dem berechneten Produktivitätsmodell ab einem BHD von ca. 30 cm einer gewissen Produktivitätsobergrenze zwischen 13–14 Efm/h RAZ annähert und ab einem BHD von ca. 40 cm sogar wieder leicht abnimmt. Dies ist insofern nachvollziehbar, als in stärkeren Beständen zwar auch stärkere Sortimentsstücke anfallen, die Produktivität des Forwarder jedoch gleichzeitig ab einem gewissen Punkt aufgrund der begrenzten Hubkraft des Kranarms nicht mehr beliebig gesteigert werden kann. Gleichzeitig fallen die einzelnen Sortimentsstücke sehr

viel weniger konzentriert auf der Fläche an, wodurch weitere Fahrtentfernungen zur Ladung dieser Sortimentsstücke zu erwarten sind.

Schon in Tabelle 31 ist zu erkennen, dass die Anzahl an Fällen, die Angaben zum „Rundholzanfall je Hektar“ machen, verhältnismäßig niedrig liegt; Angaben dazu konnten nur in ca. 27 % aller Fälle erhoben werden. Deshalb liegen auch dem in Abbildung 24 gezeigten Modell „nur“ 200 Fälle zugrunde. Um die Datengrundlage des Produktivitätsmodells zu erhöhen, wurde deshalb eine weitere schrittweise Regression durchgeführt, bei der der Rundholzanfall trotz des signifikanten Einflusses auf die Produktivität von der Analyse ausgeschlossen wurde. Das Ergebnis dieser Analyse zeigt Tabelle 35:

Tabelle 35: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)

Modell	Variable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, BHD	,287	,286	2,8334	689
2	Konstante, BHD, BHD * Obere Leistungsklasse	,064	,350	2,7044	688
3	Konstante, BHD, BHD * Obere Leistungsklasse, Rückegassenabstand	,034	,382	2,6354	687
4	Konstante, BHD, BHD^2 , BHD * Obere Leistungsklasse, Rückegassenabstand	,007	,388	2,6223	686

In dieser Tabelle ist zu erkennen, dass die Anzahl der Fälle, die in das Modell einbezogen werden, stark ansteigt (von 200 auf 691), dass das Bestimmtheitsmaß des Modells im Vergleich zu dem vorherigen Modell (siehe Tabelle 32) jedoch geringfügig von 0,392 auf 0,388 sinkt. Das Bestimmtheitsmaß wird also trotz der deutlich höheren Fallanzahl schlechter.

Gleichzeitig fällt auf, dass in dieses Modell die Variable „BHD * Obere Leistungsklasse“ aufgenommen wird. Die beiden Dummy-Variablen „obere Leistungsklasse“ und „untere Leistungsklasse“ werden hingegen nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie die Variable „BHD * untere Leistungsklasse“, d. h. für diese Variablen ist kein signifikanter Einfluss auf die Produktivität nachweisbar. Dabei muss beachtet werden, dass gerade für die Variable „untere Leistungsklasse“ verhältnismäßig wenige Fälle (24) vorliegen. Der Einfluss einer stärkeren Motorleistung des Forwarders wird hingegen offensichtlich schon durch die Variable „BHD * obere Leistungsklasse“ hinreichend beschrieben.

Der BHD des ausscheidenden Bestands hat auch in diesem Modell mit knapp 30 % den bei Weitem größten Erklärungsgehalt aller Variablen. Weitere ca. 6 % der Gesamtstreuung werden durch eine stärkere Motorleistung des Forwarders erklärt („BHD * obere Leistungsklasse“) und ca. 3 % der Gesamtstreuung durch den Rückegassenabstand. Die hohe Signifikanz dieses Modells zeigt Tabelle 36:

Tabelle 36: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	3.040,992	4	760,248	110,555	<,001
Residuen	4.717,364	686	6,877		
Gesamt	7.758,356	690			

Das daraus resultierende Modell mit seinen Variablen und Koeffizienten zeigt Tabelle 37.

Tabelle 37: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	2,975	1,081		2,752	,006	,852	5,097
BHD des aussch. Bestands	,469	,090	,951	5,243	<,001	,294	,645
BHD * Obere Leistungsklasse	,089	,010	,273	8,577	<,001	,069	,109
Rückegassenabstand	3,159	,539	,176	5,859	<,001	2,100	4,217
BHD ²	-,005	,002	-,505	-2,808	,005	-,008	-,001

Keine der Variablen musste in diesem Modell aufgrund von Kollinearität ausgeschlossen werden. Wie das Histogramm der standardisierten Residuen (Abbildung 49, S. 168) zeigt, sind diese im mittleren Produktivitätsbereich leicht überrepräsentiert und folgen hier nicht exakt einer Normalverteilung. Dies zeigt auch das entsprechende Normalverteilungsdiagramm, wo ebenfalls im mittleren Produktivitätsbereich die höchsten Abweichungen von der Normalverteilung zu verzeichnen sind. In diesem Diagramm ist auch zu erkennen, dass die Residuen offensichtlich keiner zufälligen Verteilung, sondern einem systematischen Muster (Wellenform) folgen. Dies deutet darauf hin, dass auch dieses Modell keine völlig unverzerrten Ergebnisse liefert und bedeutet, dass der Erklärungsgehalt des Modells bspw. durch Einbeziehen weiterer Variablen weiter verbessert werden könnte. Da im Rahmen der Regressionsanalyse jedoch keine weiteren Variablen mit einem signifikanten Einfluss auf die Produktivität identifiziert werden konnten, sind dies offensichtlich Variablen, die im Rahmen der Metaanalyse nicht erfasst wurden. Beispiele für solche Variablen wären z. B. der Übungsgrad des Maschinenführers oder auch die Größe des Greifaggregats. Dennoch scheinen die Abweichungen nicht ungewöhnlich hoch und somit tolerierbar, weshalb die Produktivität von Forwardern mit folgender Formel abgeschätzt werden kann (Formel 17):

Formel 17: $\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = -0,005 * \text{BHD}^2 + 0,469 * \text{BHD} + 0,089 * (\text{BHD} * \text{Obere Leistungsklasse}) + 3,159 * \text{Rückegassenabstand} + 2,975$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Rückegassenabstand = Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Obere Leistungsklasse = Dummy-Variable, nimmt bei einem Forwarder der oberen Leistungsklasse den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Die Gültigkeitsbereiche dieses Modells im Hinblick auf den BHD ausscheidenden Bestands zeigt Tabelle 38:

Tabelle 38: Gültigkeitsbereiche des Produktivitätsmodells in Abhängigkeit von Rückegassenabstand und Leistungsklasse

Variable	Ausprägung	Gültigkeitsbereich (BHD des ausscheidenden Bestands)
1 Rückegassenabstand	20 m	10,9–44,0 cm
	40 m	13,2–29,0 cm
2 Leistungsklasse	Untere/mittlere	10,9–44,0 cm
	Obere	15,1–42,4 cm

Auch hier gilt, dass sich der Gültigkeitsbereich eines Modells durch die Kombination der Gültigkeitsbereiche der jeweiligen Ausprägung beider Variablen ergibt (vgl. Kapitel 5.1.1, Tabelle 18).

Das in Tabelle 37 berechnete Produktivitätsmodell ist für einen Rückegassenabstand von 20 m in Abbildung 25 grafisch dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Produktivität von Forwardern der unteren und mittleren Leistungsklasse⁵⁸ bei geringen BHD mit ca. 1,3 Efm/h RAZ nur wenig niedriger als die Produktivität von Forwardern der oberen Leistungsklasse liegt. Mit zunehmendem BHD steigt Produktivität der Forwarder der oberen Leistungsklasse jedoch überproportional an und liegt bei einem BHD von 40 cm um fast 4 Efm/h RAZ über der entsprechenden Produktivität der Forwarder der unteren und mittleren Leistungsklasse.

Beim Vergleich des in Tabelle 37 (Abbildung 25) gezeigten Modells mit dem in Tabelle 34 (Abbildung 24) dargestellten Modell zeigt sich, dass sich die Produktivitäten der Forwarder der unteren und mittleren Leistungsklasse im dargestellten Gültigkeitsbereich in beiden Modellen nur geringfügig unterscheiden und im Durchschnitt um lediglich 0,2 Efm/h RAZ voneinander abweichen.⁵⁹ Auch der Einfluss des Rückegassenabstands ist in den beiden Modellen vergleichbar: Steigt die Produktivität eines Forwarders durch eine Vergrößerung des Rückegassenabstands von 20 m auf 40 m nach dem Modell in Tabelle 37 um ca. 3,2 Efm/h RAZ an (in Abbildung 25 nicht dargestellt), geht das in Tabelle 34 gezeigte Modell von einer Steigerung der Produktivität aufgrund eines größeren Rückegassenabstands um ca. 2,7 Efm/h RAZ aus.

⁵⁸ Diese liegt dann vor, wenn die Variable „BHD * obere Leistungsklasse“ gleich Null gesetzt wird.

⁵⁹ Für das in Abbildung 24 gezeigte Modell wird dabei von einem Rückegassenabstand von 20 m ausgegangen.

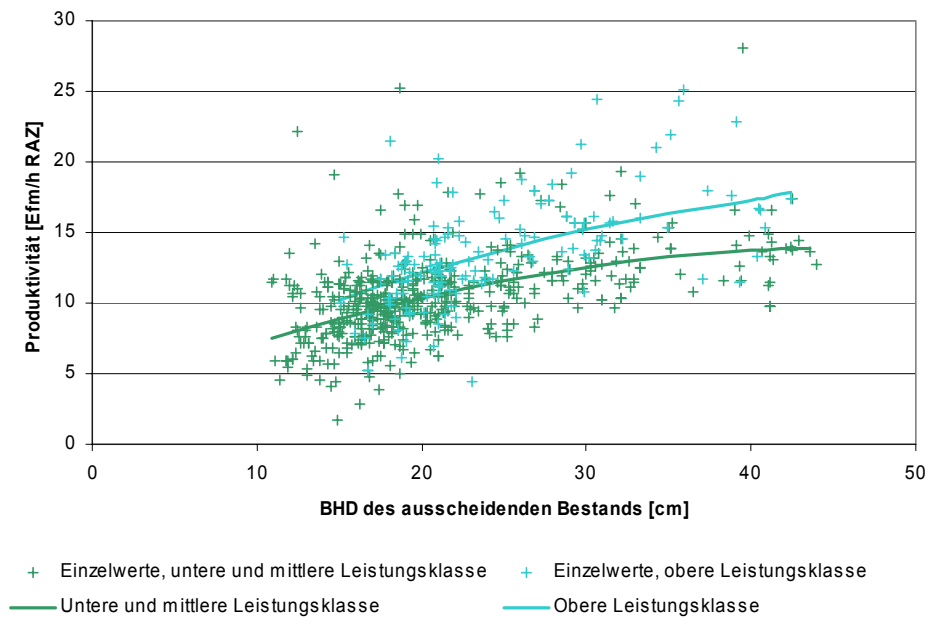


Abbildung 25: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Rückegassenabstand 20 m)

Aus dem Vergleich der beiden Modelle kann also gefolgert werden, dass sich diese nur wenig unterscheiden. Auch die Bestimmtheitsmaße der beiden Modelle unterscheiden sich nur marginal. Beides trägt also wenig zur Entscheidung für oder gegen eines der Modelle bei. Die Entscheidung, das zweite Modell für die in Kapitel 6 folgenden Beispielkalkulationen zu verwenden, wird deshalb auf Basis folgender Überlegungen getroffen: Zum einen ist dem zweiten Modell fast die 4-fache Anzahl an Fällen hinterlegt, d. h. die Basis dieses Modells ist eine sehr viel höhere und die getroffenen Aussagen sind somit besser abgesichert. Auch die standardisierten Residuen folgen bei dem zweiten Modell in höherem Maße der Normalverteilung als bei dem ersten Modell. Zum andern beeinflusst der Rundholzanfall je Hektar, der als Einflussvariable in das erste Modell aufgenommen wird, die Produktivität nur in geringem Maße (der Erklärungsgehalt dieser Variablen liegt bei $< 2\%$; siehe Tabelle 32). Demgegenüber scheint es wichtiger, die Änderung der Produktivität in Abhängigkeit von der Leistungsklasse des Forwarders darstellen zu können, was ebenfalls für die Verwendung des zweiten Modells spricht.

Dass die Ergebnisse dennoch realistisch sind, zeigt ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Modelle (Abbildung 26).

Die Eingangsvariablen der eigenen Produktivitätsmodelle sind dabei wie folgt definiert:

- Modell 1a: Rundholzanfall 50 Efm/ha; Rückegassenabstand 20 m
- Modell 1b: Rundholzanfall 50 Efm/ha; Rückegassenabstand 40 m
- Modell 2a: Forwarder der unteren/mittleren Leistungsklasse; Rückegassenabstand 20 m
- Modell 2b: Forwarder der oberen Leistungsklasse; Rückegassenabstand 40 m

Für einen Vergleich dieser Werte wurde das HOLZERnte-Programm der FVA (2007) und das Programm HeProMo der WSL (2007) herangezogen. Außerdem wurden die eigenen Modelle mit Ergebnissen der Untersuchung von LAAR et al. (1992) (nach RAAB, 1999) verglichen (siehe Abbildung 26).

Im HOLZERnte-Programm sind für die Berechnung der Produktivität von Forwardern Leistungsvorgaben der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt hinterlegt. Diese geben die Produktivität von Forwardern in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands vor. Zu beachten ist, dass diese Vorgaben ab einem BHD von 25 cm gekappt sind und für den BHD-Bereich zwischen 25–50 cm nur ein Wert ausgegeben wird, auch wenn in der Realität mit einer weiter steigenden Produktivität zu rechnen ist.

In dem Programm HeProMo wurde für den Vergleich von einem Forwarder der mittleren Leistungsklasse ausgegangen. Der angenommene Laubholzanteil lag bei 30 %, die anfallende Holzmenge wurde auf 340 m³ gesetzt⁶⁰; weiterhin wurde von 2 ausgehaltenen Sortimenten sowie einer mittleren Rückeentfernung von 250 m⁶¹ ausgegangen. Die durchschnittliche Länge der zu rückenden Sortimentsstücke wurde variiert: Im ersten Fall wurde eine durchschnittliche Länge von 2 m angenommen, im zweiten Fall wurde für diese eine Länge von 4 m angesetzt. Für die übrigen Variablen wurden die Standardeinstellungen beibehalten.

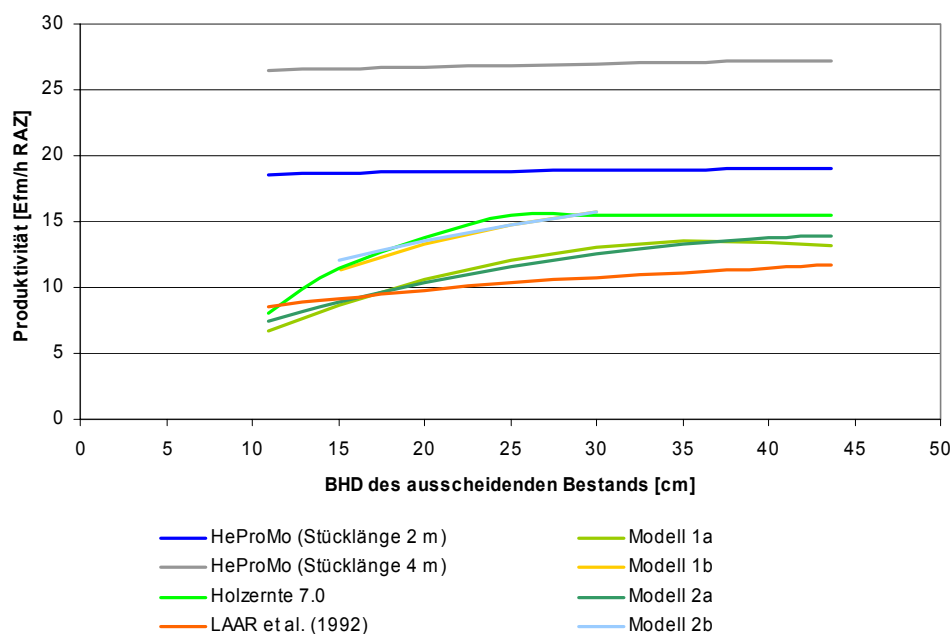


Abbildung 26: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Rundholz im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen

Es zeigt sich, dass insbesondere „Modell 1b“ und „Modell 2b“ in Lage und Form gut mit den im HOLZERnte-Programm hinterlegten Produktivitätswerten übereinstimmen. Die nach der Formel von LAAR et al. (1992) (nach RAAB, 1999) berechneten Produktivitäten stimmen wiederum vor allem bei geringen Durchmessern gut mit „Modell 1a“ und „Modell 2a“ überein.

⁶⁰ 340 m³ ist der Durchschnittswert des Rundholzanfalls der in das eigene Produktivitätsmodell eingehenden Fälle.

⁶¹ Davon 125 m auf der Waldstraße und 125 m auf der Rückegasse.

Zuzüglich eines Zuschlagsfaktors aufgrund des technischen Fortschritts seit 1992 ergäbe sich hier eine gute Übereinstimmung mit den im vorliegenden Kapitel erarbeiteten Modellen, sodass konstatiert werden kann, dass die eigenen Modelle durchaus realistische Ergebnisse liefern.

Demgegenüber weichen die Produktivitätswerte des Programms HeProMo stark von den eigenen Ergebnissen ab und liegen z. T. um mehr als 150 % höher. Zudem ist hier nur ein geringer Einfluss des BHDs des ausscheidenden Bestands zu erkennen: So steigt die mit HeProMo berechnete Produktivität eines Forwarders bei der Rückung von 4 m langen Abschnitten – bei Konstanz der übrigen Variablen – von 26,4 Efm/h RAZ (BHD 10 cm) um lediglich 0,8 Efm auf 27,2 Efm/h RAZ (BHD 40 cm). Dies liegt nach Angaben der Autoren (WSL, 2007) insbesondere daran, dass in dieses Modell der BHD nicht als zentrale unabhängige Variable eingeht. Eine sehr viel höhere Bedeutung kommt hingegen den Variablen „Nutzungsmenge“ und „Anteil krummes Holz“ sowie der „Sortimentslänge“ zu. Dies wird beim Vergleich der in Abbildung 26 gezeigten Produktivitätswerte deutlich: So liegt die Produktivität, die das Programm HeProMo für eine Stücklänge von 2 m angibt, um durchschnittlich ca. 8 Efm/h RAZ über der Produktivität bei einer Stücklänge von 4 m. Dieser Einfluss der mittleren Stücklänge kann mit den im Rahmen der Metaanalyse abgeleiteten Modellen nicht quantifiziert werden.

Dass mit den hier dargestellten eigenen Modelle dennoch realistische Produktivitätsangaben errechnet werden, zeigt auch ein Vergleich mit MORAT et al. (1998): Diese geben für Forwarder mit umgerechnet ca. 6,1–13,2 Efm/h RAZ einen Produktivitätsrahmen an, der gut mit den Ergebnissen der eigenen Produktivitätsmodelle vergleichbar ist, der aber ebenfalls deutlich unter den Werten des Programms HeProMo liegt.

Wie bereits erwähnt, findet die Rückeentfernung in den eigenen Produktivitätsmodellen keine Berücksichtigung. Anhand der (wenigen) Fälle, bei denen eine Angabe zur mittleren Rückeentfernung gemacht wurde, konnte eine mittlere Rückeentfernung von 250 m errechnet werden. Diese Angabe scheint durchaus plausibel, auch vor dem Hintergrund der Untersuchungen von FELLER et al. (1999a), WITTKOPF et al. (2003) und RAAB (1999), in denen durchschnittliche Rückeentfernungen zwischen 200 m und 300 m ermittelt werden. Um dennoch auf abweichende Rückeentfernungen reagieren zu können, kann auf die Korrekturfaktoren von LÜTHY (1997b) zurückgegriffen und die Produktivität damit an die vorliegenden Verhältnisse angepasst werden. Diese Faktoren, mit denen die Produktivitätswerte bei abweichender Rückeentfernung prozentual korrigiert werden, sind in Tabelle 39 zu finden.

Tabelle 39: Faktoren zur Korrektur der Produktivität beim Rücken von Rundholz bei einer von 250 m abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997b)

Rückeentfernung	100 m	200 m	250 m	300 m	400 m	500 m	700 m	900 m	1.000 m
Korrekturfaktor (mittl. Rückeentfernung 100 m)	1	0,97	0,95	0,93	0,89	0,86	0,8	0,75	0,72
Korrekturfaktor (mittl. Rückeentfernung 250 m)	1,05	1,02	1	0,98	0,94	0,91	0,84	0,78	0,76

5.4.2 Produktivitätsmodell für das Rücken von Rundholz mit einem Forstspezialschlepper

Da der Fokus der Metaanalyse vorrangig auf der Produktivitätsermittlung verschiedener Verfahrensschritte bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln lag, wurden Werte für die Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz nicht gezielt erhoben. Stattdessen wurden Werte dazu nur denjenigen Untersuchungen entnommen, die gleichzeitig auch Angaben über die Produktivität eines Verfahrensschritts bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln machten. Zur Kalkulation der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz standen daher knapp 20 Fälle zur Verfügung.

In allen Fällen wurde das Rücken in Beständen mit einem Rückegassenabstand von 40 m durchgeführt, die Produktivitätswerte umfassen damit stets das Vorliefern *und* Rücken des Rundholzes. Der Forstspezialschlepper wurde immer in Verbindung mit einer motormanuellen Fällung und Aufarbeitung der Bäume eingesetzt, wobei in allen Fällen Langholz ausgehalten wurde.

Abbildung 27 zeigt eine offensichtliche Abhängigkeit zwischen dem BHD des ausscheidenden Bestands und der Produktivität von Forstspezialschleppern.

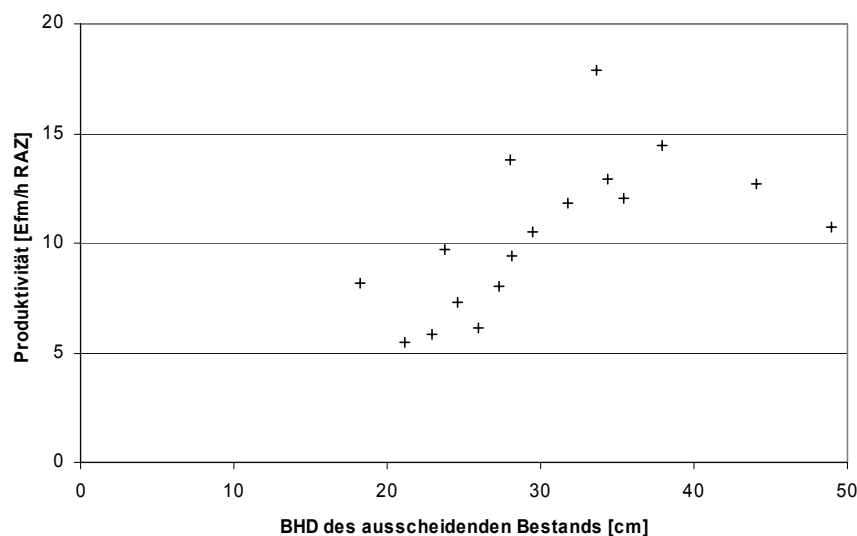


Abbildung 27: Abhängigkeit der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (17 Fälle)

Zur Identifikation weiterer Variablen, die neben dem BHD einen Einfluss auf die Produktivität haben, wurden Korrelationskoeffizienten zwischen der Produktivität und verschiedenen möglichen Einflussvariablen berechnet. Diese Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 40: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz und möglichen Einflussvariablen (17 Fälle)

	Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Log. BHD des aussch. Bestands [cm] ⁶²	Rundholz- anfall [Efm/ha]	Zopf- durchmesser [cm]
Produktivität [Efm/h RAZ]	1	,593(*)	,641(**)	,172	,304
BHD des aussch. Bestands [cm]	,593(*)	1	,989(**)	,704(**)	-,470
Log. BHD des aussch. Bestands [cm]	,641(**)	,989(**)	1	,636(**)	-,387
Rundholzanfall [Efm/ha]	,172	,704(**)	,636(**)	1	-,799(**)
Zopfdurchmesser [cm]	,304	-,470	-,387	-,799(**)	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Wie in dieser Tabelle zu erkennen ist, besteht zwischen der Produktivität und dem BHD sowie zwischen der Produktivität und dem logarithmierten BHD ein signifikanter Zusammenhang. Dabei sprechen sowohl der höhere Korrelationskoeffizient, wie auch logisch-sachliche Gründe (Annäherung der Produktivität an eine Obergrenze statt eines linearen Anstiegs) für eine Verwendung des logarithmierten BHDs im Produktivitätsmodell. Für die anderen beiden Variablen (Rundholzanfall je Hektar und Zopfdurchmesser) kann kein signifikanter Zusammenhang mit der Produktivität nachgewiesen werden.

Ein Korrelationskoeffizient zwischen der Produktivität und der mittleren Ruckeentfernung wurde nicht berechnet. Zwar ist ein Zusammenhang zu erwarten, da aber nur in 2 der 17 Fälle Angaben zu dieser Variablen gemacht wurden, kann deren Einfluss an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden.

Weiterhin auffallend ist der Zusammenhang zwischen dem Rundholzanfall und dem Zopfdurchmesser sowie dem Rundholzanfall und dem (logarithmierten) BHD. In beiden Fällen ist von Kollinearität auszugehen, d.h. die jeweiligen Variablen sind nicht vollständig voneinander unabhängig. Dennoch wurden in das folgende Produktivitätsmodell sowohl der BHD als auch der Zopfdurchmesser und der Rundholzanfall je Hektar vorerst einbezogen und das Vorliegen von Kollinearität dann anhand geeigneter Werte geprüft. Der Einfluss weiterer Variablen wie bspw. der Baumart auf die Produktivität konnte aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nicht untersucht werden.

Den Ablauf der schrittweisen Regression zeigt Tabelle 41:

⁶² Auch hier wird stets mit dem natürlichen Logarithmus (dem *Logarithmus naturalis*, *ln*) gearbeitet.

Tabelle 41: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands	,411	,372	2,7031	15
2	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands, Zopfdurchmesser	,359	,737	1,7496	14
3	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands, Zopfdurchmesser, Rundholzanfall je Hektar	,063	,794	1,5475	13

Das Bestimmtheitsmaß dieses Modells ist mit 0,794 überdurchschnittlich hoch. Es fällt auf, dass – obwohl weder eine signifikante Korrelation zwischen der Produktivität und dem Zopfdurchmesser noch zwischen der Produktivität und dem Rundholzanfall je Hektar nachgewiesen werden konnten (siehe Tabelle 40) – im Rahmen der schrittweisen Regression beide Variablen in das Produktivitätsmodell aufgenommen werden. Wie zu erkennen, erklären dabei der logarithmierte BHD und der Zopfdurchmesser mit insgesamt knapp 74 % den größten Teil der Streuung. Der zusätzliche Erklärungsgehalt der Variablen „Rundholzanfall je Hektar“ ist mit ca. 6 % vergleichsweise gering.

Trotz des hohen Bestimmtheitsmaßes wurde im Folgenden nicht mit diesem Modell weitergearbeitet. Zwar deuten weder die für die einzelnen Variablen berechneten Toleranzwerte noch die so genannten VIF (Variance Inflation Factor) auf Kollinearität der Variablen hin⁶³ (siehe z. B. BROSIUS, 2004). Andere Werte, wie z. B. der Konditionsindex oder die Varianzanteile einzelner Eigenwerte zeigen hingegen deutliche Hinweise auf Kollinearität, weshalb bei diesem Modell von einer Verzerrung der Ergebnisse ausgegangen werden muss. Auch aus praktischer Sicht ist es nicht sinnvoll, mit dem gezeigten Modell weiterzuarbeiten: Die Werte des Zopfdurchmessers dürften im Modell nicht beliebig verändert werden, da das Modell ab einem Zopfdurchmesser von weniger als ca. 15 cm am unteren Ende des dargestellten BHD-Bereichs negative Produktivitätswerte errechnet.

Aus diesem Grund wurde ein weiteres Modell erstellt, bei dessen Berechnung der Zopfdurchmesser aus der Regression ausgeschlossen wurde. Als Folge dessen zeigte sich, dass auch der Rundholzanfall je Hektar nicht in das Modell aufgenommen wurde und somit der BHD in seiner logarithmierten Form die einzige Variable zur Erklärung der Streuung ist.

Den Ablauf dieser Regression zeigt Tabelle 42:

⁶³ Die Toleranzwerte (in Tabelle 44 nicht dargestellt) bewegen sich für das vorliegende Modell zwischen 0,236–0,555 und liegen somit deutlich über der Grenze von 0,01, unter der nahezu zwingend von einer Kollinearität ausgegangen werden müsste. Gleiches gilt für die VIF: Hier müsste ab Werten von ca. 10 von Kollinearität ausgegangen werden (siehe BROSIUS, 2004), was aber im vorliegenden Fall mit Werten zwischen 1,803–4,230 nicht zutreffend scheint.

Tabelle 42: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands	,411	,372	2,7031	15

Das Bestimmtheitsmaß des Modells liegt mit 0,372 erwartungsgemäß niedriger als das des zuvor gezeigten Modells. Dennoch ist auch dieses Modell statistisch hoch signifikant (Tabelle 43):

Tabelle 43: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	76,564	1	76,564	10,478	,006
Residuen	109,604	15	7,307		
Gesamt	186,168	16			

Die Variable und die Koeffizienten des Modells zur Berechnung der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz zeigt Tabelle 44.

Tabelle 44: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenz- intervall für B	
	B	Standard- fehler	Beta			Unter- grenze	Ober- grenze
Konstante	-18,082	8,825		-2,049	,058	-36,892	,727
Log. BHD des aussch. Bestands	8,428	2,604	,641	3,237	,006	2,879	13,978

Wie Abbildung 50 (S. 168) zeigt, folgen die standardisierten Residuen in hohem Maße der standardisierten Normalverteilung und keinem systematischen Muster, sodass die zentralen Forderungen der Regression erfüllt sind. Die entsprechende Formel des Produktivitätsmodells lautet damit wie folgt (Formel 18):

$$\text{Formel 18: Produktivität [Efm/h RAZ]} = 8,428 * (\ln \text{BHD}) - 18,082$$

Dabei ist:

BHD

= BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Der Gültigkeitsbereich dieses Modells bewegt sich im Hinblick auf den BHD des ausscheidenden Bestands zwischen 18,2–49,0 cm.

Für weitere Vergleiche mit den eigenen Ergebnissen wurden Produktivitätswerte des KWF (1998) sowie des Programms HeProMo der WSL (2007) herangezogen. In diesem Programm wurde die mittlere Zuzugentfernung auf „unter 20 m“ gesetzt; alle anderen Variablen wurden auf ihren Standardeinstellungen belassen.

Abbildung 28 zeigt die mit Formel 18 berechneten Produktivitätswerte, in Vergleich zu den mit dem Programm HeProMo kalkulierten Produktivitätswerten und den Werten des KWF (1998).

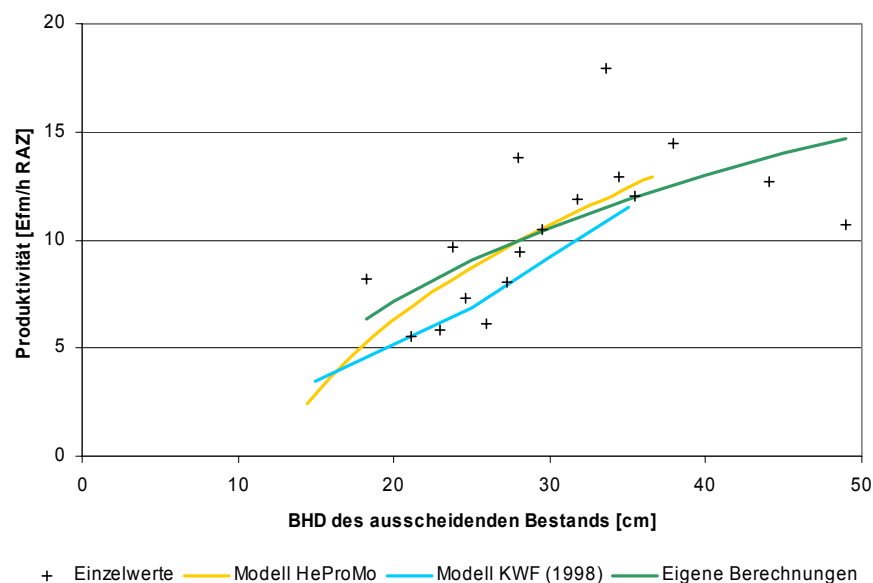


Abbildung 28: Produktivitätsmodell für Forstspezialschlepper beim Rücken von Rundholz im Vergleich mit Modellen anderer Untersuchungen

Hier zeigt sich, dass die Werte, die auf Grundlage des eigenen Modells kalkuliert wurden sehr gut mit den Werten übereinstimmen, die mit Hilfe des Programms HeProMo berechnet wurden. Unterschiede zeigen sich vor allem im Gültigkeitsbereich: Deckt das in das Programm HeProMo integrierte Produktivitätsmodell einen Durchmesserbereich zwischen ca. 14–35 cm ab, schließt das eigene Modell auch höhere Durchmesserbereiche bis zu einem BHD von fast 50 cm ein. Demgegenüber stehen die Produktivitätswerte, die das KWF (1998) für das Rücken mit einem Forstspezialschlepper angibt. Deren Lage passt sich gut in den dargestellten Rahmen ein, ihr Verlauf überrascht jedoch: Steigt die Produktivität bei geringen BHD linear an, setzt sich der Anstieg ab einem BHD von ca. 25 cm überproportional fort. Ab einem BHD von ca. 40 cm würden die mit dieser Kurve berechneten Produktivitätswerte deutlich über den Werten der eigenen Berechnungen liegen. Auch dieses Modell liefert also in dem dargestellten Durchmesserbereich realistische Werte, sollte aber offensichtlich nicht extrapoliert werden.

5.5 Produktivitätsmodelle für das Rücken von Energieholz

5.5.1 Produktivitätsmodell für das Rücken von Energieholz mit einem Forwarder

Für das Rücken von Energieholz mit einem Forwarder konnten im Rahmen der Metaanalyse insgesamt knapp 30 Fälle erfasst werden. Diese stammten zum überwiegenden Teil aus eigenen Untersuchungen am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft (z. B. CREMER, 2007; LECHNER, 2004; LECHNER, 2007; SCHULER et al., 2007). In allen Fällen wurde das Rundholz im Vorfeld durch einen Harvester aufgearbeitet, d. h. das Energieholz war stets an der Rückegasse abgelegt und verhältnismäßig stark vorkonzentriert. Dabei können im Energieholz zusätzlich zum Kronenmaterial auch einzelne Vollbäume geringen Durchmessers enthalten sein, aus denen aufgrund der jeweiligen Aushaltungskriterien keine Rundholzsortimente ausgehalten werden können. Eine Trennung der Produktivität in das Rücken von ausschließlich Kronenmaterial und das Rücken von Kronenmaterial inklusive einzelner Vollbäume schien jedoch angesichts einer dann jeweils sehr geringen Zahl an Fällen nicht zielführend zu sein.

Schon im Streudiagramm ist ein Zusammenhang zwischen der Produktivität beim Rücken von Energieholz und dem BHD des ausscheidenden Bestands zu erkennen (Abbildung 29).

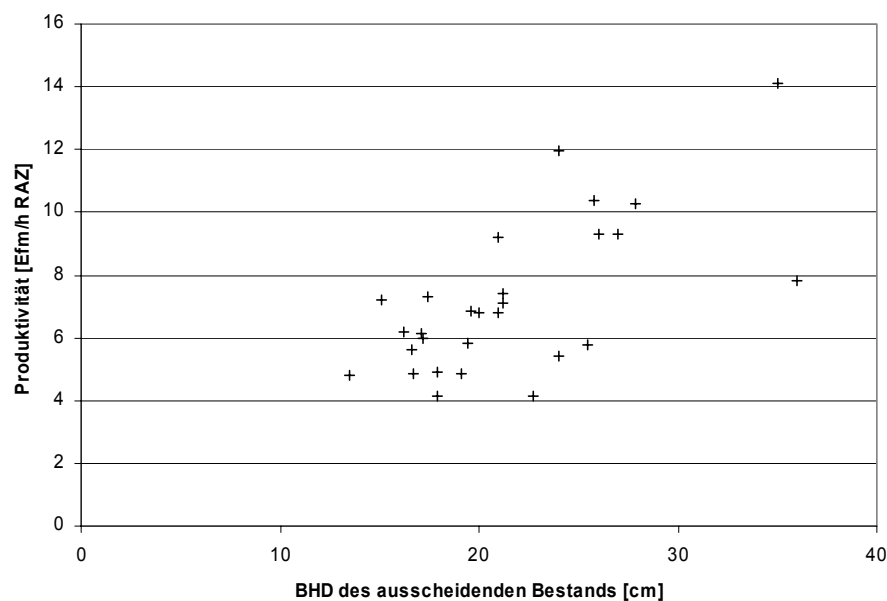


Abbildung 29: Abhängigkeit der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (27 Fälle)

Dieser Zusammenhang, wird – genauso wie der Zusammenhang zwischen der Produktivität und weiteren Variablen – bei Berechnung der jeweiligen Korrelationskoeffizienten bestätigt (Tabelle 45).

Tabelle 45: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (27 Fälle)

	Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Log. BHD des aussch. Bestands [cm]	Energieholz- anfall [Efm/ha]	Zopfdurch- messer [cm]
Produktivität [Efm/h RAZ]	1	,599(**)	,603(**)	,124	,582(**)
BHD des aussch. Bestands [cm]	,599(**)	1	,999(**)	-,391(*)	,485(*)
Log. BHD des aussch. Bestands [cm]	,603(**)	,999(**)	1	-,376	,490(**)
Energieholzanfall [Efm/ha]	,124	-,391(*)	-,376	1	-,098
Zopfdurchmesser [cm]	,582(**)	,485(*)	,490(**)	-,098	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Wie in Tabelle 45 zu sehen, können sowohl zwischen der Produktivität und dem (logarithmierten) BHD, als auch zwischen der Produktivität und dem Zopfdurchmesser relativ straffe, signifikante Zusammenhänge nachgewiesen werden. Alle Korrelationskoeffizienten weisen das erwartete Vorzeichen auf: Sowohl mit steigendem BHD, als auch mit größer werdendem Zopfdurchmesser (z. B. von 8 auf 15 cm ansteigend), steigt die Produktivität des Forwarders beim Rücken von Energieholz signifikant an. Ersteres hängt offensichtlich damit zusammen, dass mit steigendem BHD – einen gleichen Zopfdurchmesser vorausgesetzt – längere Restkronen zur Verwertung als Energieholz zur Verfügung stehen und die Produktivität eines Forwarders aufgrund des Stück-Masse-Gesetzes somit ansteigt. Gleiches gilt für den Zopfdurchmesser: Steigt dieser bspw. von 8 auf 15 cm an, wird ein größerer Teil der Krone als Energieholz genutzt und die Produktivität steigt ebenfalls an.

Eine weitere enge Korrelation besteht zwischen dem BHD des ausscheidenden Bestands und dem Energieholzanfall je Hektar, allerdings mit negativem Vorzeichen: Der Energieholzanfall je Hektar nimmt mit steigendem BHD ab. Diese Aussage steht in Einklang mit LECHNER (2007), der in seiner Untersuchung ebenfalls eine negative Korrelation zwischen dem BHD und dem Energieholzanfall je Hektar erkennt. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass dieser Zusammenhang nicht zwingend gegeben ist, da der Energieholzanfall gleichzeitig stark von der Anzahl der entnommenen Bäume beeinflusst wird. Zwischen dem (logarithmierten) BHD und dem Zopfdurchmesser wird zwar ein signifikanter Zusammenhang angezeigt, dieser ist jedoch nicht zwingend, da der Zopfdurchmesser von den Aushaltungskriterien des jeweiligen Waldbesitzer bzw. des Abnehmers abhängt und somit prinzipiell unabhängig vom BHD eines Bestands ist; dabei gilt aber, dass bei einer gleichzeitigen Aushaltung von Rundholz bei stärkeren BHD tendenziell auch der korrespondierende Zopfdurchmesser höher liegen dürfte.

Ein Korrelationskoeffizient zwischen der Produktivität und der Rückeentfernung konnte wegen fehlender Daten nur auf Grundlage von 21 Fällen (statt, wie oben, 27 Fälle) berechnet werden (in Tabelle 45 nicht dargestellt).⁶⁴ Ein signifikanter Zusammenhang konnte dabei nicht festgestellt werden. Auch für weitere Variablen ergab sich kein signifikanter Einfluss auf die Produktivität.

Den Ablauf der schrittweisen Regression, die zur Erstellung des Produktivitätsmodells durchgeführt wurde, zeigt Tabelle 46. Da sich die Korrelationskoeffizienten zwischen der Produktivität und dem BHD bzw. dem BHD in seiner logarithmierten Form nur marginal unterscheiden (siehe Tabelle 45), wurde Letzterer in dieses Modell einbezogen; dies scheint vor allem auch im Hinblick auf die Entwicklung der Produktivität, die sich bei steigenden BHD an eine Obergrenze annähert, die bessere Lösung zu sein.

Tabelle 46: Ablauf der schrittweisen Regression (Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariablen	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands	,444	,422	1,8161	25
2	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands, Energieholzanfall je Hektar	,148	,558	1,5881	24
3	Konstante, log. BHD des aussch. Bestands, Energieholzanfall je Hektar, Zopfdurchmesser	,101	,653	1,4065	23

Grundsätzlich wird mit diesem Modell ein mit 0,653 verhältnismäßig hohes korrigiertes Bestimmtheitsmaß erreicht. Die wichtigste signifikante Einflussvariable auf die Produktivität ist dabei der logarithmierte BHD, der – wie schon bei den Regressionen der vorangegangenen Kapitel – den größten Anteil der Streuung erklärt (in diesem Fall mehr als 40 %). Der Erklärungsbeitrag der Variablen „Energieholzanfall je Hektar“ und „Zopfdurchmesser“ liegt mit ca. 15 % und 10 % auf einem vergleichbar niedrigen Niveau. Weitere Variablen wie bspw. die Baumart wurden nicht als signifikante Einflussvariablen erkannt und deshalb nicht in die Regression einbezogen. Die Variable „Rückegassenabstand“ wurde hingegen bewusst nicht in die Analyse einbezogen, da die Produktivitätswerte in Bezug auf diese Variable sehr ungleich verteilt waren.⁶⁵

Die Signifikanz des Produktivitätsmodells zeigt Tabelle 47:

⁶⁴ Die mittlere Rückeentfernung, die sich aus diesen 21 Fällen errechnet, liegt bei 130 m.

⁶⁵ So lagen für Rückegassenabstände von 20 m vor allem Produktivitätswerte in hohen Durchmesserbereichen vor, während die Produktivitätswerte für Rückegassenabstände von 40 m in aller Regel in Beständen mit geringen BHD erhoben worden waren. Aufgrund dessen wäre der Rückegassenabstand im Rahmen der schrittweisen Regression zwar als signifikante Einflussvariable erkannt und in das Produktivitätsmodell einbezogen worden; Dieser Einfluss wäre aber lediglich aufgrund der geklumpten Verteilung, und nicht aufgrund des tatsächlichen Zusammenhangs (der dennoch bestehen, aber auf der vorliegenden Datenbasis nicht nachgewiesen werden kann) als signifikant erkannt worden.

Tabelle 47: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Energieholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	102,787	3	34,262	17,321	<,001
Residuen	45,497	23	1,978		
Gesamt	148,284	26			

Die Variablen des Produktivitätsmodells mit den dazugehörigen Koeffizienten zeigt Tabelle 48.

Tabelle 48: Variable und Koeffizienten des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Energieholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
Konstante	-15,586	3,728		-4,181	<,001	-23,297	-7,875
Log. BHD des aussch. Bestands	6,171	1,271	,644	4,857	<,001	3,543	8,800
Energieholzanfall je Hektar	,021	,007	,364	2,979	,007	,006	,035
Zopfdurchmesser	,268	,097	,348	2,756	,011	,067	,469

Auch hier sind keine Auffälligkeiten im Hinblick auf die Toleranzwerte und die Variance Inflation Factors (VIF) (vgl. Fußnote 63, Seite 92) zu erkennen. Der Konditionsindex könnte zwar auf eine Kollinearität zwischen dem Energieholzanfall je Hektar und dem Zopfdurchmesser hinweisen. Da sich aber bei Betrachtung der Varianzanteile der jeweiligen Eigenwerte keine Auffälligkeiten zeigen und da sich auch in Tabelle 45 kein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Variablen feststellen ließ, wurde keine der Variablen aufgrund von Kollinearität aus dem Modell ausgeschlossen.

Wie das Histogramm in Abbildung 51 (S. 169) erkennen lässt, weichen die standardisierten Residuen in geringem Maße von der Normalverteilung ab und es zeigt sich eine nahezu zweigipflige Verteilung. Dabei zeigt sich auch, dass die Residuen insbesondere bei mittleren Produktivitäten von der Normalverteilung abweichen. Dies deutet darauf hin, dass die Produktivität von weiteren, nicht in das Modell aufgenommenen Variablen beeinflusst wird, die jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht identifiziert werden konnten. Da die Abweichung der Residuen jedoch grundsätzlich gering und vor allem offensichtlich nicht systematisch (d. h. einem Muster folgend) ist, lautet das entsprechende Modell zur Kalkulation der Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz wie folgt (Formel 19):

Formel 19: $\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 6,171 \cdot (\ln \text{BHD}) + 0,021 \cdot \text{Energieholzanfall je Hektar} + 0,268 \cdot \text{Zopfdurchmesser} - 15,586$

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Energieholzanfall je Hektar = Energieholzanfall je Hektar [Efm/ha]

Zopfdurchmesser = Aufarbeitungsdurchmesser des Rundholzes [cm]

Das gezeigte Modell bewegt sich in einem Durchmesserbereich zwischen 13,5–36,0 cm. Dabei variieren der Energieholzanfall je Hektar zwischen 4,0–130,5 Efm/ha und der Zopfdurchmesser zwischen 8–15 cm.

Mit Hilfe von Formel 19 kann somit der Einfluss des BHDs, vor allem aber auch der Einfluss des Energieholzanfalls und des Zopfdurchmessers auf die Produktivität abgeschätzt werden. Außerdem wird deutlich, dass die Produktivität eines Forwarders beim Rücken von Energieholz durch die Aushaltung von Industrieholz (zusätzlich zum Stammholz) sinkt, da diese stets mit einem geringeren Zopfdurchmesser und einem geringeren Energieholzanfall je Hektar einhergeht. Diese Abhängigkeiten werden in Abbildung 30 verdeutlicht.

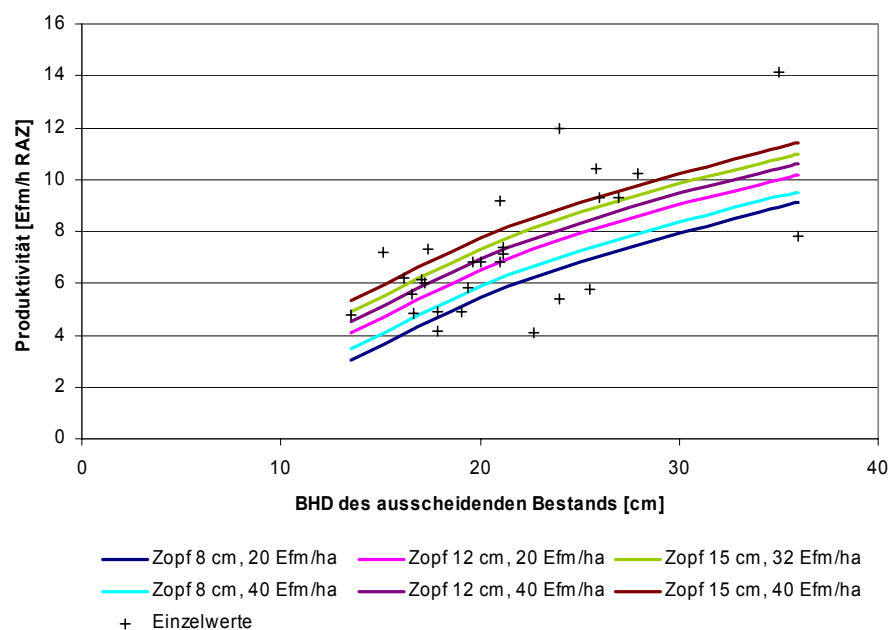


Abbildung 30: Produktivitätsmodell für Forwarder beim Rücken von Energieholz

Es konnte kein signifikanter Einfluss der Rückeentfernung auf die Produktivität identifiziert werden. Eine Erklärung hierfür könnte, neben der geringen Anzahl an Fällen, die mit 50–190 m (bis auf eine Ausnahme von 290 m) absolut gesehen verhältnismäßig geringe Spannweite an Rückeentfernungen sein, aufgrund derer der Einfluss der Rückeentfernung nur wenig zutage tritt. Dabei ist vor allem zu beachten, dass die Rückeentfernung insbesondere die Arbeitsablaufschritte „Leerfahrt“ und „Lastfahrt“ des Forwarders beeinflusst. Diese nehmen jedoch bspw. in einer Untersuchung von SCHULER et al. (2007) einen Anteil an der reinen Arbeitszeit (RAZ) von lediglich 13–26 % ein (bei Rückeentfernungen zwischen 50–115 m), sodass eine geringe Variation der Rückeentfernung auch nur relativ geringe Auswirkungen auf

die Produktivität haben kann. Dennoch gehen bspw. KALLIO und LEINONEN (2005) von einem Einfluss der Rückeentfernung auf die Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz aus. Um variierende Rückeentfernungen angemessen zu berücksichtigen, können deshalb auch hier die Korrekturfaktoren von LÜTHY (1997b) verwendet werden, angepasst an eine mittlere Rückeentfernung von 130 m, als Durchschnitt der für diesen Verfahrensschritt untersuchten Fälle (siehe Tabelle 49).

Tabelle 49: Faktoren zur Korrektur der Produktivität beim Rücken von Energieholz bei einer von 130 m abweichenden mittleren Rückeentfernung (nach LÜTHY, 1997b)

Rückeentfernung	100 m	130 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m	1000 m
Korrekturfaktor ⁶⁶	1,00	0,99	0,97	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,75	0,72
Korrekturfaktor neu	1,01	1,00	0,98	0,94	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78	0,76	0,73

Weitere Modelle, mit denen die hier dargestellten eigenen Ergebnisse verglichen hätten werden können, konnten in der Literatur nicht gefunden werden; so werden weder im HOLZERNT-Programm der FVA (2007), noch im Programm HeProMo der WSL (2007) Angaben zur Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz gemacht.

5.5.2 Modell zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für das Rücken von Energieholz mit einem Forstspezialschlepper

Forstspezialschlepper kommen beim Rücken von Energieholz nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Grund hierfür ist, dass aufgrund der Arbeitsweise dieser Maschinen nur ein verhältnismäßig geringes Volumen an Energieholz je Lastfahrt transportiert werden kann und diese Maschinen deshalb in der Regel nur eine verhältnismäßig geringe Produktivität erzielen. Auch nach WITTKOPF (2005) ist die Lastbildungsmöglichkeit beim Einsatz von Forstspezialschleppern gering, weshalb „Alternativen mit tragender Arbeitsweise leistungsfähiger [sind]“.

Dieser Befund spiegelt sich in der Literatur wieder, wo keine Untersuchungen zum Rücken von Energieholz mit einem Forstspezialschlepper gefunden wurden. Offensichtlich ist ein solches Vorgehen aus technisch-ökonomischer Sicht nicht praxisüblich. Um diese Einschätzung auch empirisch abzusichern, wurden – trotz der oben genannten Einschränkungen – am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft von LECHNER (2004) und LECHNER (2007) Studien zur Ermittlung der Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz durchgeführt. Diese Studien betrafen ausnahmslos einen Rückegassenabstand von 40 m mit vorangegangenem motormanuellen Einschlag. Dies bedeutet, dass das Rücken stets auch das gleichzeitig durchgeführte Vorliefern umfasste. Dabei wurde das Energieholz stets *gemeinsam* mit den aufgearbeiteten Rundholzsortimenten gerückt, da eine getrennte Rückung von Rund- und Energieholz „nicht dem praxisüblichen Vorgehen“ entsprechen würde (LECHNER, 2004). Die Herleitung der somit rein kalkulatorischen Produktivität für das Rücken des Energieholzes ist in Kapitel 4.2.3 detailliert beschrieben. 5 der insgesamt 17 Produktivitätswerte

⁶⁶ nach LÜTHY (1997b).

wurden in Kiefernbeständen erhoben, die übrigen 12 stammen aus Untersuchungen in Laubholzbeständen.

Abbildung 31 zeigt die kalkulatorische Produktivität von Forstspeziialschleppern beim Rücken von Energieholz sowohl in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands (links) als auch in Abhängigkeit vom Energieholzanfall je Hektar (rechts).

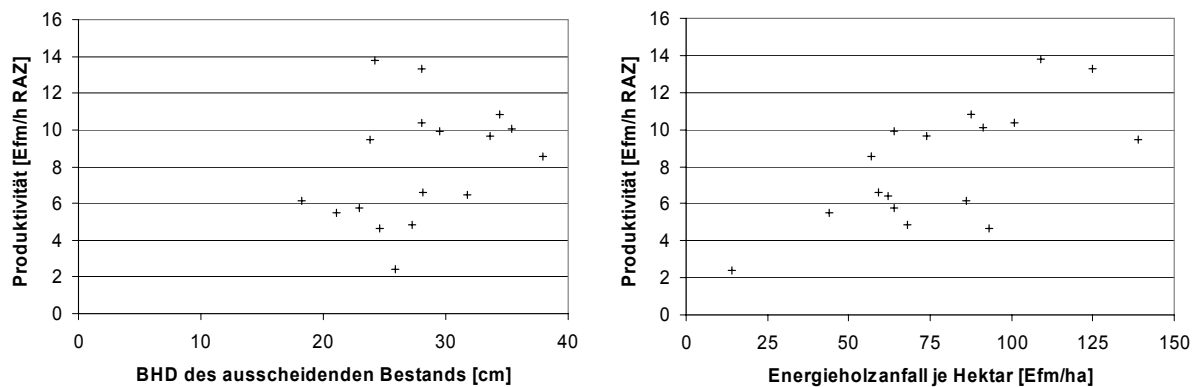


Abbildung 31: Abhängigkeit der kalkulatorischen Produktivität von Forstspeziialschleppern beim Rücken von Energieholz vom BHD des ausscheidenden Bestands (links) und vom Energieholzanfall je Hektar (rechts) (17 Fälle)

Die grafische Darstellung lässt vermuten, dass der Zusammenhang zwischen dem BHD des ausscheidenden Bestands und der kalkulatorischen Produktivität beim Rücken von Energieholz nur relativ schwach ausgeprägt ist (Abbildung 31, links). Ein stärkerer Zusammenhang ist hingegen zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem Energieholzanfall je Hektar zu erkennen (Abbildung 31, rechts).

Tabelle 50 bestätigt diese Aussagen: Bei Berechnung der Korrelationskoeffizienten ist zu erkennen, dass weder zwischen dem BHD und der kalkulatorischen Produktivität noch zwischen dem logarithmierten BHD und der kalkulatorischen Produktivität auf der vorhandenen Datengrundlage ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden kann. Demgegenüber besteht sowohl zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem Energieholzanfall je Hektar wie auch zwischen der kalkulatorischen Produktivität und dem Zopfdurchmesser ein mit 0,597 bzw. 0,770 relativ straffer, statistisch signifikanter Zusammenhang. In beiden Fällen weist der Korrelationskoeffizient das erwartete Vorzeichen auf. So steigt die kalkulatorische Produktivität mit steigendem Energieholzanfall ebenso wie mit steigendem Zopfdurchmesser an. Somit gilt, dass die kalkulatorische Produktivität eines Forstspeziialschleppers beim Rücken von Energieholz offensichtlich maßgeblich vom Zopfdurchmesser der ausgehaltenen Sortimente und dem Energieholzanfall je Hektar und nur in geringem Maße vom BHD des ausscheidenden Bestands beeinflusst wird. Darüber hinaus ist ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Energieholzanfall je Hektar und dem Zopfdurchmesser der ausgehaltenen Sortimente zu erkennen. Auch dieser Korrelationskoeffizient weist das erwartete Vorzeichen auf: Wie schon im vorangegangenen Kapitel steigt auch hier der Energieholzanfall je Hektar mit steigendem Zopfdurchmesser an.

Tabelle 50: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz und möglichen Einflussvariablen (17 Fälle)

	Kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	BHD des aussch. Bestands [cm]	Log. BHD des aussch. Bestands [cm]	Energie- holzanfall [Efm/ha]	Zopfdurch- messer [cm]
kalkulatorische Produktivität [Efm/h RAZ]	1	,412	,412	,597(*)	,770(**)
BHD des aussch. Bestands [cm]	,412	1	1,000(**)	-,080	-,118
Log. BHD des aussch. Bestands [cm]	,412	1,000(**)	1	-,080	-,118
Energieholzanfall [Efm/ha]	,597(*)	-,080	-,080	1	,456(*)
Zopfdurchmesser [cm]	,770(**)	-,118	-,118	,456(*)	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten zwischen der kalkulatorischen Produktivität und der Ruckeentfernung war nicht möglich, da Letztere im Rahmen der genannten Untersuchungen nicht detailliert aufgenommen wurde. Die durchschnittliche Ruckeentfernung über alle Bestände lag bei ca. 100 m (LECHNER, 2004).

Der hohe Einfluss insbesondere des Zopfdurchmessers auf die kalkulatorische Produktivität des Forstspezialschleppers zeigt sich bei Berechnung eines ersten Produktivitätsmodells. In dieses wird im Rahmen einer schrittweisen Regression ausschließlich der Zopfdurchmesser als erklärende Variable aufgenommen, während der BHD des ausscheidenden Bestands und der Energieholzanfall je Hektar nicht in das Modell eingehen. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß dieses Modells liegt mit 0,562 relativ hoch, d. h. mehr als die Hälfte der Streuung können in dem Modell durch eine Änderung im Zopfdurchmesser erklärt werden. Dabei ist zu beachten, dass der mittlere Zopfdurchmesser aller Fälle mit 24,8 cm verhältnismäßig hoch liegt und die Spannweite an untersuchten Zopfdurchmessern gleichzeitig relativ gering ist, da die Rundholzsortimente versuchsbedingt bis zu einem Zopf von lediglich 20–28 cm aufgearbeitet wurden.

Im Rahmen einer schrittweisen Regression werden die Variablen ausschließlich nach dem Kriterium der Signifikanz der Regressionskoeffizienten ausgewählt. Solche statistischen Prüfverfahren spielen zwar nach BROSIUS (2004) in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle; der entscheidende Punkt sei jedoch, „... dass die Regressionsschätzungen auch einen vernünftigen Sinn in einem theoretischen Modellrahmen ergeben“ (BROSIUS, 2004). Werden diese Überlegungen auf die vorliegende Untersuchung übertragen, so wird deutlich, dass in die Produktivitätsmodelle der übrigen Verfahrensschritte der BHD des ausscheidenden Bestands stets als wichtigste erklärende Variable in das Modell aufgenommen wird. Deshalb scheint es unwahrscheinlich, dass diese Variable in das Produktivitätsmodell eines Forstspezialschleppers beim Rücken von Energieholz nicht aufgenommen wird. Da zudem, wie erwähnt, der Zopf-

durchmesser nur ein geringes Spektrum abdeckte und außerdem zwischen dem Energieholz-anfall je Hektar, der in das Modell aufgenommen wurde, und dem Zopfdurchmesser Kollinearität zu vermuten ist, wurde ein weiteres Modell berechnet, in das der Zopfdurchmesser nicht einbezogen wurde. Dieses Modell ist in Tabelle 51 zu finden:

Tabelle 51: Ablauf der schrittweisen Regression (kalkulatorische Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz als abhängige Variable)

Modell	Einflussvariable	Zunahme in R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler des Schätzers	df2
1	Konstante, Energieholz-anfall je Hektar	,488	,454	2,3368	15
1	Konstante, Energieholz-anfall je Hektar, log. BHD des aussch. Bestands	,148	,584	2,0400	14

Das korrigierte Bestimmtheitsmaß dieses Modells liegt mit 0,584 auf vergleichbarem Niveau wie das des ersten Modells. Wie Tabelle 52 zeigt, ist auch dieses Modell signifikant.

Tabelle 52: Ergebnisse der Varianzanalyse für das erweiterte Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Rundholz

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Regression	101,768	2	50,884	12,227	,001(b)
Residuen	58,262	14	4,162		
Gesamt	160,031	16			

Tabelle 53 zeigt die Variablen und ihre Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz:

Tabelle 53: Variable und Koeffizienten des Modells zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten		Signifikanz	95%-Konfidenz- intervall für B	
	B	Standard- fehler	Beta	T		Unter- grenze	Ober- grenze
Konstante	-18,452	8,870		-2,080	,056	-37,475	,572
Energieholz-anfall je Hektar	,076	,017	,726	4,491	,001	,039	,112
Log. BHD des aussch. Bestands	6,235	2,616	,385	2,384	,032	,625	11,845

Die Unabhängigkeit der beiden in das Modell einbezogenen Variablen wurde geprüft und es wurden keine Hinweise auf Kollinearität gefunden. Die standardisierten Residuen dieses Modells sind annähernd normal verteilt und zeigen keine systematische Abweichung von der Normalverteilung (Abbildung 52, S. 169). Damit kann mit diesem Modell die kalkulatorische Produktivität eines Forstspezialschleppers beim Rücken von Energieholz wie folgt abgeschätzt werden (Formel 20):

Formel 20: $\text{Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ]} = 6,235 \cdot (\ln \text{BHD}) + 0,076 \cdot \text{Energieholzanfall je Hektar} - 18,452$

Dabei ist:

$\ln \text{BHD}$ = logarithmierter BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Energieholzanfall je Hektar = Energieholzanfall je Hektar [Efm/ha]

Dieses Modell zur Berechnung der kalkulatorischen Produktivität eines Forstspezialschleppers beim Rücken von Energieholz ist, in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestands in Abbildung 32 grafisch dargestellt. Es deckt ein Durchmesserpektrum zwischen 18,2–37,9 cm ab und der Energieholzanfall bewegt sich zwischen 14–139 Efm/ha.

Da mit diesem Modell eine kalkulatorische Produktivität berechnet wird, wurden in der Literatur keine vergleichbaren Modelle gefunden. Im beschriebenen BHD-Bereich und für die angegebenen Energieholzanfälle je Hektar liefert das Modell jedoch offensichtlich sinnvolle Werte.

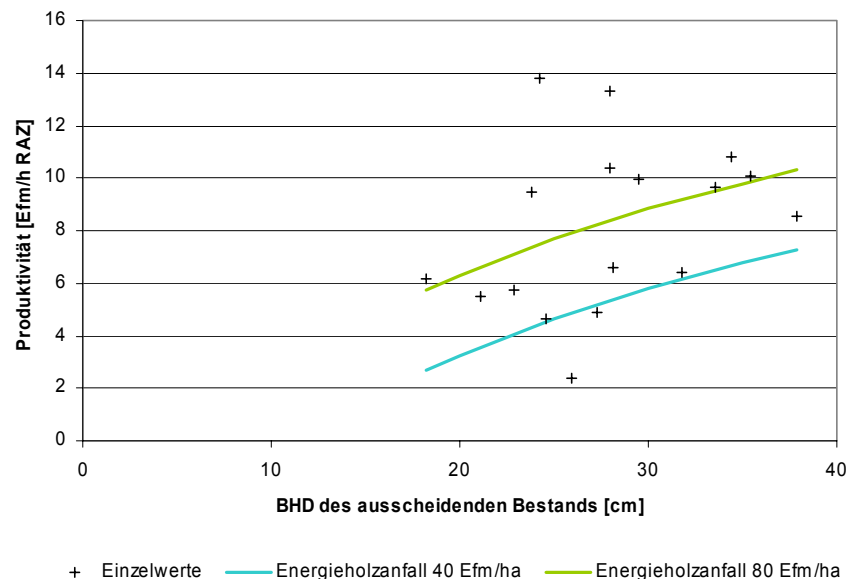


Abbildung 32: Modell zur Herleitung der kalkulatorischen Produktivität von Forstspezialschleppern beim Rücken von Energieholz

5.6 Produktivitätsmodelle für den Transport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Langholz-LKW

Basierend auf den Studien von SCHULER und CREMER (2007) und SCHULER et al. (2007) wurden für einen Langholz-LKW beim Transport von Energieholz aus Nadelholzbeständen auf einen zentralen Hackplatz die folgenden Modelle zur Abschätzung der Produktivität ermittelt (Formel 21 und Formel 22):

$$\text{Formel 21: Produktivität}^{67} [\text{Efm/h RAZ}] = 0,0543 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt})^2 - 1,6014 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt}) + 19,238$$

$$\text{Formel 22: Produktivität}^{68} [\text{Efm/h RAZ}] = 0,049 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt})^2 - 1,5604 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt}) + 21,848$$

Dabei ist:

Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt = Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt [km]

Auf den ersten Blick scheint es überraschend, dass in die beiden Modelle die Fahrdistanz als einzige Variable eingeht und bspw. der BHD keine Berücksichtigung findet. Dies hat seinen Grund darin, dass beide Modelle anhand der Werte von nur einem Bestand erstellt wurden, sodass eine Variation des BHDs und somit eine Abschätzung von dessen Einfluss nicht möglich war. Außerdem nimmt der LKW das Energieholz am Wegrand auf, nachdem es von dem Forwarder an die Waldstraße gerückt und in großen Haufen abgelegt wurde. Durch diese hohe Vorkonzentration des Energieholzes an der Waldstraße hat der BHD nur noch einen geringen Einfluss auf die Produktivität des LKW. Stattdessen beeinflusst vor allem der Zopfdurchmesser des Rundholzes zum einen das Ladevolumen des Energieholzes auf dem LKW, zum andern ist in Abhängigkeit vom Zopfdurchmesser des Rundholzes auch mit einem unterschiedlichen Aufwand für das Be- und Entladen des LKWs mit Energieholz zu rechnen. Wie Formel 21 und Formel 22 zeigen, wurden deshalb zwei Modelle für die Produktivität des LKWs beim Zwischentransport von Energieholz erstellt: Eines der Modelle geht dabei von einem Zopf von 8 cm aus (Formel 21, Aushaltung von Stammholz und Industrieholz), das andere von einem Zopf von 12 cm (Formel 22, Aushaltung von Stammholz und Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz). Als weitere Variable muss damit lediglich die Fahrdistanz des LKWs vom Polterplatz des Energieholzes zum Hackplatz berücksichtigt werden, die deshalb auch explizit in die Berechnung der Produktivität eingeht. Die grafische Darstellung der Produktivität eines LKW beim Transport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz zeigt, in Abhängigkeit von der Aushaltung und der Fahrdistanz, Abbildung 33.

Diesen Modellen liegen detaillierte Zeitstudien zugrunde, sodass die Ergebnisse als verlässlich angesehen werden können. Zu beachten ist jedoch, dass die Studien ausschließlich in ca. 40–45-jährigen Fichtenbeständen durchgeführt wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Kronenform der Einzelbäume scheint deshalb eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Kiefern- oder

⁶⁷ Wenn Energieholz zusätzlich zu Stammholz und Industrieholz ausgehalten wird (Industrieholzzopf: 8 cm; Aushaltungsvariante 2, siehe Kapitel 4.2.3, nach SCHULER et al., 2007).

⁶⁸ Wenn Energieholz zusätzlich zu Stammholz ausgehalten wird und kein Industrieholz ausgehalten wird (Stammholzzopf: 12 cm, Aushaltungsvariante 3, siehe Kapitel 4.2.3, nach SCHULER et al., 2007).

Laubholzbestände fraglich, sodass auch die späteren Beispielkalkulationen zum Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz nur für die beiden Fichtenbestände durchgeführt wurden.

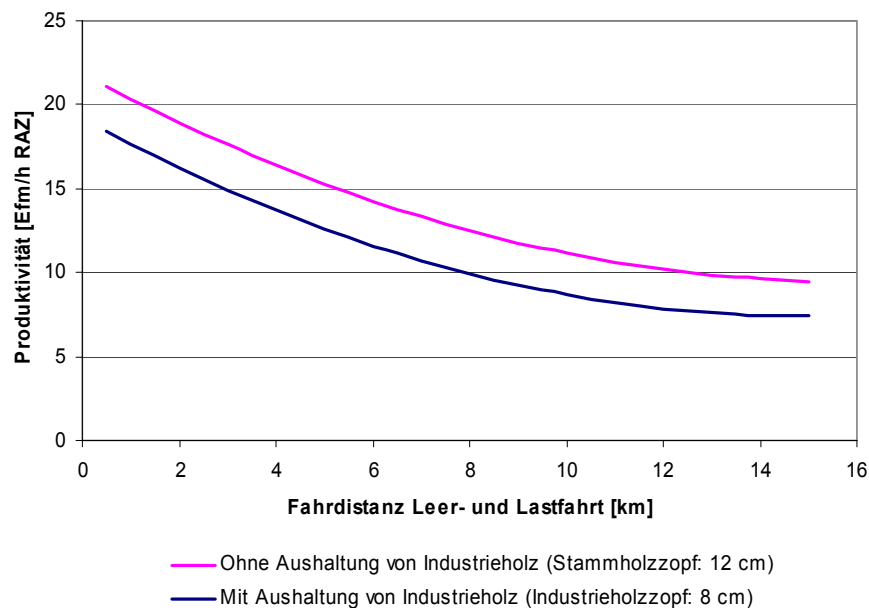


Abbildung 33: Produktivitätsmodell für Langholz-LKW beim Zwischentransport von Energieholz aus Fichtendurchforstungen auf einen zentralen Hackplatz

In den vorliegenden beiden Aushaltungsvarianten wird davon ausgegangen, dass durch die Aushaltung von Energieholz *zusätzlich* zur Aushaltung von Stammholz und Industrieholz durchschnittlich je Fuhre ca. 7 Efm an Energieholz transportiert werden können. Wird hingegen auf die Aushaltung von Industrieholz verzichtet, so können aufgrund des dann deutlich höheren Schaftholzanteils je Fuhre umgerechnet ca. 10 Efm an Energieholz transportiert werden (siehe auch SCHULER et al., 2007). Werden die Aushaltungskriterien, die diesen Modellen hinterlegt sind, verändert (höherer/geringerer Zopfdurchmesser), so verändert sich auch das durchschnittliche Transportvolumen je Fuhre und damit die Produktivität des LKW. Eine solche Änderung kann mit den vorliegenden Modellen nicht dargestellt werden. Dennoch bieten Formel 21 und Formel 22 eine erste Möglichkeit, die Produktivität eines LKW beim Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz für entsprechende Bestände grob abzuschätzen.

5.7 Produktivitätsmodelle für das Hacken von Energieholz

Die Schwierigkeiten, die bei der Erstellung eines Produktivitätsmodells für Hacker im Rahmen der durchgeführten Metaanalyse auftraten, werden schon in den Streudiagrammen in Abbildung 34 und Abbildung 35 deutlich:

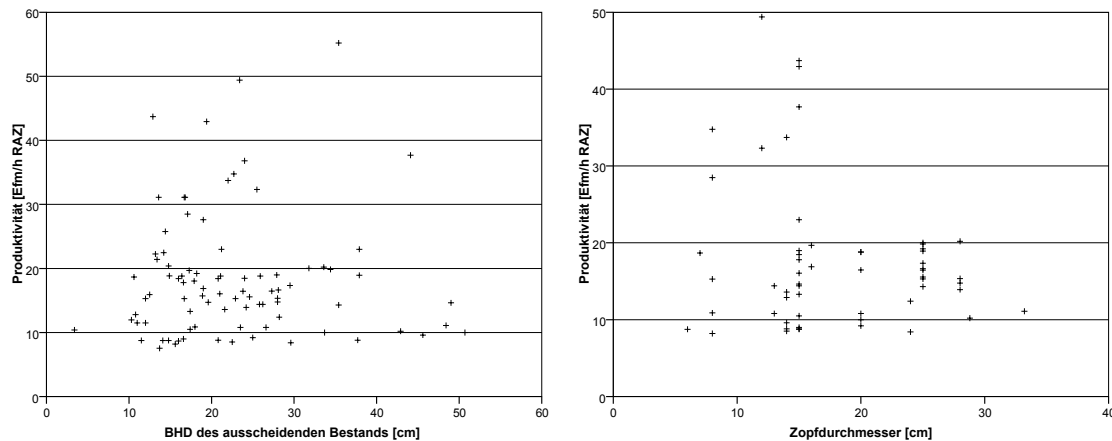


Abbildung 34: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern vom BHD des ausscheidenden Bestands (links, 95 Fälle) und vom Zopfdurchmesser (rechts, 61 Fälle)

Obwohl bis zu 95 Fälle in die Metaanalyse einbezogen werden konnten, ist in Abbildung 34 keine eindeutige Abhängigkeit der Produktivität vom BHD des ausscheidenden Bestands zu erkennen, obwohl dieser sowohl in das Produktivitätsmodell von STAMPFER et al. (1997), als auch in das Modell der WSL (2007) aufgenommen wurde. Auch eine Abhängigkeit vom Zopfdurchmesser, wie sie indirekt z. B. dem Modell von SPINELLI (2001) zugrunde liegt, ist, wie Abbildung 34 zeigt, offensichtlich nicht vorhanden, genauso wenig wie eine Abhängigkeit der Produktivität von der Motorleistung des Hackers (siehe Abbildung 35).

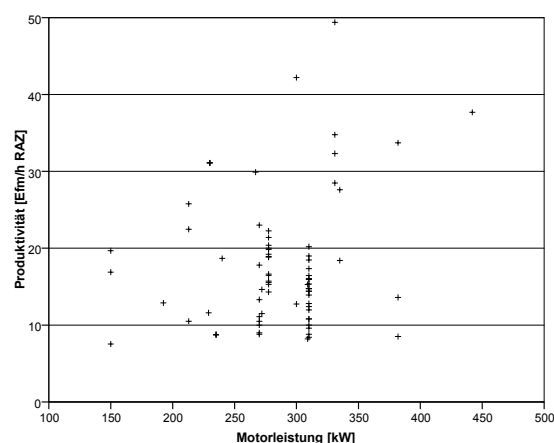


Abbildung 35: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern von deren Motorleistung (76 Fälle)

Die geringen Zusammenhänge zwischen der Produktivität von Hackern und den in Abbildung 34 und Abbildung 35 gezeigten sowie weiteren Variablen werden bei der Berechnung von Korrelationskoeffizienten bestätigt: Wie in Tabelle 54 deutlich wird, ist auf der vorhandenen

Datengrundlage zwischen keiner der untersuchten Variablen und der Produktivität ein signifikanter Zusammenhang feststellbar.

Tabelle 54: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Hackern und möglichen Einflussvariablen

		BHD des ausscheidenden Bestands [cm]	Energieholz- anfall je Hektar [Efm/ha]	Flächen- größe [ha]	Zopfdurch- messer [cm]	Motor- leistung [kW]
Produktivität	Korrelations- koeffizient	,002	-,113	-,014	-,185	,200
	Signifikanz (2-seitig)	,983	,341	,905	,164	,083
	N	95	73	74	61	76

Auf Basis dieser Korrelationskoeffizienten kann somit gesagt werden, dass bei gesamthafter Betrachtung aller Hacksysteme (d. h. ohne Trennung nach dem Ort des Hackens) weder der BHD des ausscheidenden Bestands, noch der Energieholzanfall je Hektar oder der Zopfdurchmesser einen entscheidenden Einfluss auf die Produktivität eines Hackers besitzen, genauso wenig wie die Flächengröße des beernteten Bestands oder die Motorleistung des Hackers.

Um zu untersuchen, ob eine Aufteilung und getrennte Analyse der Produktivitätswerte in Abhängigkeit vom Hacksystem sinnvoll ist, wurde, wie schon in Kapitel 5.1.1 gezeigt, ein Test nach STUDENT-NEWMAN-KEULS durchgeführt. Damit wurde geprüft, ob sich die Produktivitäten der Hacksysteme signifikant voneinander unterscheiden und somit getrennt voneinander behandelt werden sollten, oder ob mehrere Hacksysteme zu einer Gruppe zusammengefasst werden können. Das Ergebnis dieses Tests zeigt Tabelle 55.

Tabelle 55: Mittelwertvergleich der Produktivität von Hackern in Abhängigkeit vom Hacksystem nach STUDENT-NEWMAN-KEULS

		Untergruppe für Alpha = .05.		
	N	1	2	3
Hacken auf der Rückegasse	18	12,711		
Hacken an der Waldstraße in Aufsattelcontainer	29	16,179	16,179	
Hacken an der Waldstraße in externen Container	44		24,235	
Hacken an einem zentralen Platz	8			33,789
Signifikanz		,399	,052	1,000

In dieser Tabelle wird deutlich, dass sich die Produktivität beim Hacken an einem zentralen Platz signifikant von den übrigen Produktivitäten unterscheidet. Die Produktivitäten beim Hacken an der Waldstraße in einen Aufsattelcontainer und in einen externen Container könnten nach diesem Test zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Da hier jedoch die Signifikanz nur marginal über dem geforderten Niveau von 0,05 liegt, wurde entschieden, diese beiden Hacksysteme dennoch getrennt voneinander zu behandeln. Stützt man sich ausschließlich auf diesen Test, so könnten auch die Produktivitäten beim Hacken auf der Rückegasse und beim Hacken an der Waldstraße in einen Aufsattelcontainer zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Da sich bei diesen beiden Systemen jedoch die jeweiligen Rahmenbedingungen und die Arbeitsweise des Hackers deutlich voneinander unterscheiden, scheint es auch hier nicht sinnvoll, die beiden Systeme zusammenzufassen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von SPINELLI und MAGAGNOTTI (2008) überein, nach denen der Ort des Hackens einen signifikanten Einfluss auf die Produktivität hat. Deshalb wird auch bei deren Produktivitätsangaben stets nach dem Ort des Hackens unterschieden. Damit werden in der vorliegenden Untersuchung weiterhin alle vier der in Tabelle 55 gezeigten Hacksysteme getrennt voneinander behandelt.

Um für diese vier Hacksysteme die jeweils wichtigsten Einflussvariablen auf die Produktivität zu identifizieren, wurden weitere Korrelationskoeffizienten zwischen der Produktivität und den in Tabelle 54 gezeigten Variablen berechnet. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 56 zu finden.

Tabelle 56: Korrelationskoeffizienten (nach SPEARMAN) zwischen der Produktivität von Hackern und möglichen Einflussvariablen, getrennt nach Hacksystemen

		BHD des ausscheiden- den Bestands [cm]	Energie- holzanfall je Hektar [Efm/ha]	Flächen- größe [ha]	Zopf- durch- messer [cm]	Rücke- entfer- nung ⁶⁹ [m]	Motor- leistung [kW]
Produktivität beim Hacken auf der Rückegasse	Korrelation	,258	,605	-,149	,364	-,870	,009
	Signifikanz	,373	,064	,662	,376	,005(**)	,978
	N	14	10	11	8	8	13
Produktivität beim Hacken an der Waldstraße in Auf- sattelcontainer	Korrelation	-,423	-,151	,205	,041	---	-,832(**)
	Signifikanz	,022(*)	,463	,316	,855	---	,000
	N	29	26	26	22	---	29
Produktivität beim Hacken an der Waldstraße in ex- ternen Container	Korrelation	-,015	,273	-,015	-,185	---	,269
	Signifikanz	,932	,130	,935	,397	---	,157
	N	36	32	32	23	---	29
Produktivität beim Hacken auf zentra- lem Platz	Korrelation	,786	-,057	-,287	,337	---	-,141
	Signifikanz	,021(*)	,928	,639	,580	---	,821
	N	8	5	5	5	---	5

** Die Korrelation ist signifikant auf dem Niveau von 0,01 (zweiseitig).

* Die Korrelation ist signifikant auf dem Niveau von 0,05 (zweiseitig).

⁶⁹ Wird nur beim Hacken auf der Rückegasse erfasst; mittlere Ruckeentfernung der erfassten Fälle: 175 m.

In Tabelle 56 zeigt sich, dass auf der vorliegenden Datengrundlage nur für wenige Variable ein signifikanter Korrelationskoeffizient mit der Produktivität eines Hacksystems berechnet werden kann. Damit ist nur im Ausnahmefall ein signifikanter Einfluss einer Variablen auf die Produktivität eines Hackers nachzuweisen. Außerdem ist festzustellen, dass nur für wenige Fälle vollständige Datensätze vorliegen, weshalb einige der Korrelationskoeffizienten auf einem sehr geringen Stichprobenumfang basieren.

Der Zusammenhang zwischen der Rückeentfernung und der Produktivität eines Hackers beim **Hacken auf der Rückegasse** ist kaum erstaunlich, da die Zeit, die ein Hacker auf der Rückegasse produktiv arbeiten kann, mit längerer Rückeentfernung abnimmt, weil gleichzeitig mehr Zeit für den Transport der Hackschnitzel mit dem aufgebauten Container an die Waldstraße aufzuwenden ist (siehe auch HAKKILA, 2004). Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass dies die einzige Einflussvariable auf die Produktivität ist. So hat nach LAITILA (2006) bspw. auch das Ladevolumen des Aufsattelcontainers oder die Qualität des Hackmaterials einen Einfluss auf die Produktivität eines Hackers beim Einsatz auf der Rückegasse. Der Einfluss dieser Variablen konnte jedoch im Rahmen der Metaanalyse nicht quantifiziert werden, wobei hier auch die geringe Fallzahl zu beachten ist, aufgrund derer keine weiteren Schlüsse gezogen werden sollten.

Die offensichtlich mit zunehmendem BHD signifikant abnehmende Produktivität eines **Hackers mit Aufsattelcontainer an der Waldstraße**, kann in Anlehnung an CREMER et al. (2007), damit erklärt werden, dass sich das Energieholz vor allem in stärkeren Laubholzbeständen aufgrund der sperrigeren Kronen in höherem Maße ineinander verhakt und somit ein höherer Aufwand zum Entzerren der Kronen nötig ist, im Vergleich zu den relativ schlanken und biegsamen Kronen schwächerer Bestände. Gleichzeitig geriet der Hacker (in der Mehrzahl der Fälle wurde ein Hacker der Firma Bruks mit einer Motorleistung von 310 kW eingesetzt) bei der Verarbeitung von starken Laubholzkronen z. T. schon an seine Produktivitätsgrenze (siehe auch CREMER et al., 2007 und LECHNER, 2004). Die mit steigender Motorleistung sinkende Produktivität ist auf die sehr ungleichmäßige Verteilung der Produktivitätswerte zurückzuführen (siehe Abbildung 36) und so in der Praxis nicht zu erwarten.

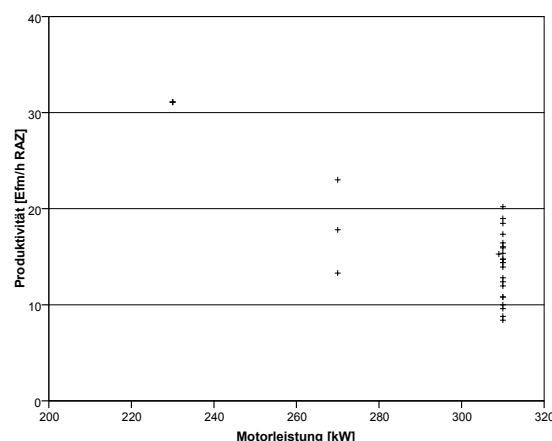


Abbildung 36: Abhängigkeit der Produktivität von Hackern beim Hacken an der Waldstraße in einen Aufsattelcontainer von der Motorleistung des Hackers (29 Fälle)

Wie in Tabelle 56 deutlich wird, konnte für keine der untersuchten Variablen ein signifikanter Einfluss auf die Produktivität beim **Hacken an der Waldstraße in einen externen Container**, dem in der Praxis am weitesten verbreiteten System, nachgewiesen werden.

Beim **Hacken an einem zentralen Platz** verkehrt sich der Trend der mit zunehmendem BHD abnehmenden Produktivität ins Gegenteil: Unter Berücksichtigung der sehr geringen Anzahl an Produktivitätswerten, die darüber hinaus ausschließlich in Fichtenbeständen erhoben wurden, gilt, dass hier die Produktivität eines Hackers mit steigendem BHD des ausscheidenden Bestands ebenfalls ansteigt. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die in der Regel sehr leistungsstarken Hacker mit entsprechenden Kränen und Greifarmen ausgestattet sind, die deshalb mit dem z. T. recht sperrigen Energieholz gut zurechtkommen. Auch sind die Einzüge bzw. der Trommeldurchmesser dieser Hacker oft so groß dimensioniert, dass sie auch stärkeres Material problemlos verarbeiten können.

Da nach ASIKAINEN (2003) Produktivitätsunterschiede von Hackern auch in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial (Vollbäume bzw. Kronenmaterial⁷⁰) zu erwarten sind, wurden weitere Korrelationskoeffizienten für die vier Hacksysteme berechnet, und zwar getrennt nach dem Hacken von Vollbäumen und dem Hacken von Kronenmaterial. Auch dafür konnten jedoch nur im Ausnahmefall signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen der Produktivität und den einzelnen Variablen identifiziert werden, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wurde.

Der Umstand, dass nur sehr eingeschränkt belastbare und aussagekräftige Korrelationen für die einzelnen Hacksysteme identifiziert werden konnten, macht zum einen deutlich, dass weitere Untersuchungen zur Produktivität von Hackern durchgeführt werden sollten. Damit kann die Datengrundlage für weitere Analysen erweitert und es können gezielt Untersuchungen zum Einfluss derjenigen Variablen auf die Produktivität durchgeführt werden, zu denen bislang oft keine Angaben vorliegen. Zum andern kann die Tatsache, dass nur sehr eingeschränkt belastbare und aussagekräftige Korrelationen berechnet werden konnten, aber auch ein Hinweis darauf sein, dass die erhobenen Variablen tatsächlich nur einen geringen Einfluss auf die Produktivität eines Hackers haben. So können bspw. auch WEIXLER et al. (1999) in ihrer Untersuchung keinen signifikanten Einfluss der Stückmasse und der Anzahl der zugeführten Bäume auf die Produktivität eines Hackers ermitteln und auch FELLER und RIEDELBERGER (2001) können nur deshalb den Einfluss des BHDs der zu hackenden Bäume auf die Produktivität quantifizieren, da in deren Untersuchung die Bäume beim Hackvorgang einzeln dem Aggregat zugeführt wurden. Dies bedeutet, dass die Produktivität offensichtlich von anderen, im Rahmen der Metaanalyse nicht erfassten bzw. nicht erfassbaren Variablen beeinflusst wird. So haben laut ASIKAINEN (2003) die Arbeitsbedingungen für den Hacker – wie bspw. die Beschaffenheit des Untergrunds und dessen Tragfähigkeit, die Organisation der Logistik oder auch menschliche Faktoren – einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität von Hackern. Nach KALLIO und LEINONEN (2005) hängt die Produktivität eines Hackers außerdem vom Wassergehalt des Hackmaterials, aber auch von der Vorschubgeschwindigkeit und anderen technischen Spezifikationen des Hackers ab. Nach SPINELLI und MAGAGNOTTI (2008) wiederum haben auch das Gewicht und die Form des Hackmaterials (normale Form, krumme Form) einen entscheidenden Einfluss auf die Produktivität. Diese Variablen konnten im Rahmen der Metaanalyse nicht analysiert werden, da deren Ausprägung in der Regel nicht numerisch erfasst und

⁷⁰ In diesem Kronenmaterial können ggf. auch einzelne Vollbäume mit geringen Durchmessern enthalten sein.

quantifiziert werden kann und da in der Mehrzahl der Untersuchungsberichte zu diesen Variablen keine Angaben gemacht wurden.

Da somit auf die Ableitung von Produktivitätsmodellen verzichtet werden musste, wurden stattdessen die Produktivitätsmittelwerte für die einzelnen Hacksysteme in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial berechnet. Damit können auf einfache Weise die Produktivität und die Produktivitätsunterschiede zwischen den einzelnen Hacksystemen und Ausgangsmaterialien abgeschätzt werden. Diese Produktivitätsmittelwerte für die einzelnen Hacksysteme sind, weiter aufgeteilt nach dem Ausgangsmaterial, in Tabelle 57 zu finden.

Tabelle 57: Produktivitätsmittelwerte für Hacker (inkl. Anzahl an Fällen und Standardabweichung) sowie mittlerer BHD bzw. Zopfdurchmesser und mittlere Motorleistung der Hacker, getrennt nach Hacksystem und Ausgangsmaterial

Hacksystem	Ausgangsmaterial	Produktivitäts- mittelwert [Efm/h RAZ]	N	Standard- abweichung	Mittl. BHD bzw. Zopfdurch- messer [cm]	Mittlere Motor- leistung [kW]
Hacken auf der Rückegasse	Vollbaumnutzung	11,0	6	2,428	10,67 (BHD)	247
	Kronenmaterial	10,3	10	1,885	16,60 (Zopf)	260
Hacken an der Waldstraße in Aufsattel- container	Vollbaumnutzung	21,2	7	9,308	14,33 (BHD)	276
	Kronenmaterial	14,6	22	3,870	18,95 (Zopf)	305
Hacken an der Waldstraße in externen Container	Vollbaumnutzung	22,9	15	12,338	15,68 (BHD)	261
	Kronenmaterial	21,8	27	12,648	19,23 (Zopf)	274
Hacken an zentralem Platz	Vollbaumnutzung	Keine Fälle vorhanden				
	Kronenmaterial	33,8	8	13,194	10,80 (Zopf)	341

Die Werte aus Tabelle 57 sind in Abbildung 37 grafisch dargestellt. Obwohl hier „nur“ die Produktivitätsmittelwerte dargestellt werden, ist der hohe Einfluss des Hacksystems und des damit verbundenen Grads der Vorkonzentration des Energieholzes auf die Produktivität deutlich zu erkennen: Liegt die mittlere Produktivität beim Hacken von Kronenmaterial auf der Rückegasse bei 10,3 Efm/h RAZ, steigt diese auf 14,6 Efm/h RAZ und 21,8 Efm/h RAZ beim Hacken an der Waldstraße in einen Aufsattelcontainer respektive einen externen Container und erreicht erwartungsgemäß mit 33,8 Efm/h RAZ beim Hacken an einem zentralen Platz den höchsten Wert. Darüber hinaus fällt auf, dass vor allem für das Hacken in einen externen Container eine sehr hohe Spannweite an Produktivitätswerten zu finden ist, was darauf hinweist, dass offensichtlich die Produktivität eines Hackers von sehr vielen Variablen abhängt und deshalb nur schwer verallgemeinert werden kann. Zu dieser Erkenntnis kommen auch SPINELLI und MAGAGNOTTI (2008), die in ihrer Untersuchung zwar eine durchschnittliche Abweichung der tatsächlichen Produktivitätswerte von den mit ihrem Modell kalkulierten Produktivitätswerten von lediglich 1 % feststellen; gleichzeitig liegt die Spannweite der Produktivitätswerte jedoch bei

-40–+50 %, sodass auch SPINELLI und MAGAGNOTTI schließen, dass die Vorhersage der Produktivität im jeweiligen Anwendungsfall nur wenig zuverlässig ist.

Auch SPINELLI und MAGAGNOTTI (2008) gehen von einem Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Produktivität aus; dennoch ist dieser Einfluss in der vorliegenden Untersuchung nicht immer eindeutig zu erkennen (Abbildung 37): So liegt die Produktivität beim Hacken von Kronenmaterial auf der Rückegasse um 6,6 % unter der entsprechenden Produktivität beim Hacken von Vollbäumen. Zu diesem Ergebnis kommen auch BRUNBERG et al. (1998), die beim Hacken auf der Rückegasse in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial ebenfalls nur sehr geringe Produktivitätsunterschiede feststellen. Beim Einsatz eines Hackers mit Aufsattelcontainer an der Waldstraße ist der Einfluss des Ausgangsmaterials hingegen deutlich zu erkennen: Hier liegt die Produktivität beim Hacken von Kronenmaterial um ca. 30 % unter der Produktivität beim Hacken von Vollbäumen. Beim Einsatz eines Hackers mit externem Standardcontainer an der Waldstraße wiederum liegt die Produktivität beim Hacken von Kronenmaterial um nur knapp 5 % unter der Produktivität beim Hacken von Vollbäumen. Beim Hacken an einem zentralen Platz war kein Vergleich möglich, da für das Hacken von Vollbäumen keine Fälle vorlagen.

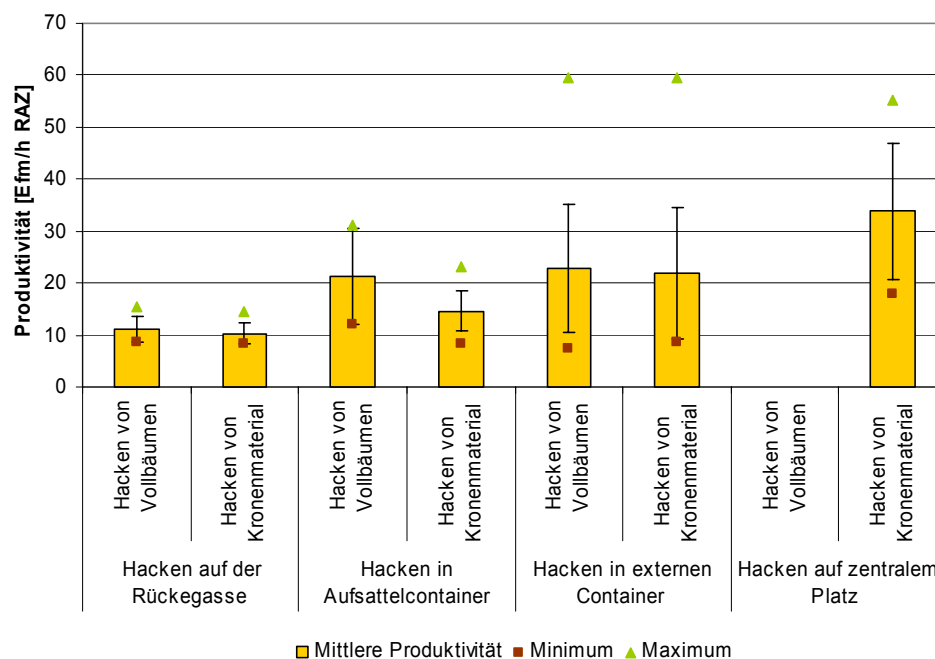


Abbildung 37: Mittlere Produktivitätswerte, ihre Standardabweichung und jeweilige Spannweite, getrennt nach Hacksystemen und Ausgangsmaterial

Grundsätzlich kann also auf Basis der vorliegenden Fälle konstatiert werden, dass Hacker beim Hacken von Vollbäumen eine höhere durchschnittliche Produktivität erreichen im Vergleich zum Hacken von Kronenmaterial. Dies gilt offensichtlich auch dann, wenn beim Hacken von Kronenmaterial der Zopfdurchmesser des Rundholzes (und damit der Basisdurchmesser des zu hackenden Kronenmaterials) höher als der BHD der Vollbäume liegt und insofern beim Hacken von Kronenmaterial eine höhere Produktivität zu erwarten gewesen wäre (siehe Tabelle 57). Offensichtlich gewinnt beim Hacken von Vollbäumen jedoch die Tatsache an Bedeutung, dass Bäume einschließlich Stämmen „als Ganzes“ dem Hacker zugeführt werden können. Demgegenüber werden dem Hacker beim Hacken von Kronenmaterial oft reines Reisig bzw. große Kronen zugeführt, wodurch dessen Produktivität erkennbar verringert wird. Dass auch der

Zopfdurchmesser nicht zwangsläufig ausschlaggebend für die Produktivität eines Hackers sein muss, zeigt ebenfalls Tabelle 57. So war dieser zwar beim „Hacken auf zentralem Platz“ mit 10,80 cm der bei Weitem geringste der vier Hacksysteme, andererseits lag jedoch die mittlere Produktivität dieser Hacker mit 33,8 Efm/h RAZ weit über der Produktivität der anderen Systeme.

Auch der Einfluss der Motorleistung auf die Produktivität scheint hingegen – im Gegensatz zu den Erkenntnissen von SPINELLI und MAGAGNOTTI (2008) – offensichtlich gering zu sein: Wie Tabelle 57 zeigt, unterscheiden sich die Produktivitäten der vier Hacksysteme deutlich, obwohl nur geringe Unterschiede in der jeweiligen Motorleistung des Hackers festzustellen sind. Damit wird deutlich, wie wichtig eine hohe Vorkonzentration des Energieholzes an einem zentralen Platz und damit verbunden eine reibungslose Abfuhr der Container, d. h. eine gut funktionierende Logistikkette ist. Diese Variable kann jedoch in der Praxis nur schwer quantifiziert und nur unter kontrollierten Bedingungen objektiv erfasst werden. Deshalb kann die Produktivität von Hackern in Abhängigkeit von der Logistikorganisation mit dem hier verwendeten Ansatz einer Metaanalyse nicht modelliert werden. Tatsächlich finden sich in den ausgewerteten Veröffentlichungen und Projektberichten keine objektiv vergleichbaren Angaben zu diesen Variablen. Darüber hinaus ist die Produktivität stark von den örtlichen Gegebenheiten (Wegbreite, Ausweichstellen für Transportfahrzeuge u.ä.) abhängig und auch deshalb nur schwer verallgemeinerbar.

Exemplarische Vergleiche zeigen, dass die oben dargestellten Mittelwerte realistisch sind: So werden bei dem Programm HeProMo der WSL (2007) in Abhängigkeit vom Ort des Hackens (Waldstraße oder Rückegasse; immer jedoch ein Hacker mit Aufsattelcontainer) Produktivitäten der Hacker von bis zu 40 Efm/MAS kalkuliert. Haupteinflussvariable auf die Produktivität sind u. a. der Laubholzanteil eines Bestands, der mittlere BHD und der Zopfdurchmesser, die Fahrstrecke vom Hackort zum Container und deren Beschaffenheit sowie das Ausgangsmaterial (Kronenmaterial, Vollbäume oder Rundholzabschnitte). Demgegenüber erreichen verschiedene Hackertypen (darunter auch gering motorisierte, handbeschickte Hacker) nach dem Modell von SPINELLI und PETTENELLA (2001) in Abhängigkeit von ihrer Motorleistung und dem Stückgewicht des Energieholzes Produktivitäten zwischen $5\text{--}33,6 \frac{\text{t}_{\text{Frischgewicht}}}{\text{MAS}}$ was, je nach Wassergehalt, einer Produktivität zwischen 8–40 Efm/MAS entspricht. Damit bewegt sich die Produktivität in vergleichbaren Größenordnungen wie die oben dargestellten Produktivitätswerte. Das KWF (2000) nimmt beim Hacken von Bäumen aus Kieferndickungen mit einem Anhängenhacker mit Kranbeschickung unabhängig vom BHD des ausscheidenden Bestands eine Produktivität von ca. 8 Efm/MAS an. Grundsätzlich ist also eine große Spannweite an Produktivitätswerten zu verzeichnen, deren Zustandekommen sich nur sehr bedingt anhand weniger Variablen erklären lässt. Auch deshalb scheinen die dargestellten Werte hinreichend verlässlich zur Abschätzung der Produktivität verschiedener Hacksysteme in einem konkreten Bestand zu sein und können somit als Mittelwerte in den folgenden Beispielkalkulationen verwendet werden.

5.8 Bewertung der Methode der Metaanalyse zur Erstellung von Produktivitätsmodellen

Im Rahmen der Metaanalyse zeigt sich, dass die Datengrundlage für die Analyse der einzelnen Verfahrensschritte sehr unterschiedlich ist: Konnten z. B. für den Einschlag von Rundholz mit Harvestern mehr als 1.000 Fälle in der Metaanalyse berücksichtigt werden, konnten für andere Verfahrensschritte wie z. B. das Rücken von Energieholz nur ca. 30 Fälle herangezogen werden. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass eine Anzahl von Untersuchungsergebnissen nicht in die Metaanalyse einbezogen werden konnten, da Angaben zu wichtigen produktivitätsbeeinflussenden Variablen wie z. B. dem Zopfdurchmesser oder dem Energieholzanfall je Hektar fehlten, die jedoch für eine Einordnung und Analyse der Ergebnisse von Bedeutung gewesen wären.

Auch stellte sich heraus, dass die veröffentlichten Untersuchungsergebnisse oft nicht das Resultat von Primäruntersuchungen waren, sondern stattdessen auf Ergebnissen früherer Untersuchungen basierten, die unter Zugrundelegung bestimmter Annahmen aktualisiert wurden. Da diese Annahmen nicht immer eindeutig nachvollziehbar waren, wurden solche Ergebnisse im Rahmen der Metaanalyse nicht verwendet, wodurch sich die Zahl der geeigneten Fälle weiter verringerte. Auf die Konsequenzen dessen weisen z. B. BEELMANN und BLIESENER (1994) hin, nach deren Aussage bei Zusammenfassung einer nur geringen Anzahl von Primärstudien, bei denen zudem systematische Verzerrungen vorliegen können (z. B. Einbeziehung von nur wenigen Quellen), die Grenzen einer Generalisierung der Ergebnisse erreicht werden. Aufgrund der geringen Fallanzahl für bestimmte Modelle, wurde auch die von STEVENS (1986) formulierte Vorgabe nicht in jedem Modell erfüllt, nach der jede Variable, die in ein Modell aufgenommen wird, mit mindestens 15 Fällen abgedeckt sein sollte. Folgt man diesem Vorschlag, so besitzt bspw. das Modell zur Berechnung der Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz (siehe Kapitel 5.2.1), in das bei weniger als 20 Fällen 2 erklärende Variablen eingehen, nur eine eingeschränkte Gültigkeit und bildet nur einen Trend ab, der nicht statistisch abgesichert ist.

Eine weitere Einschränkung für die Gültigkeit der Produktivitätsmodelle stellt die Vergleichbarkeit bzw. die Uniformität der Produktivitätswerte dar, die in das jeweilige Modell aufgenommen wurden (siehe z. B. BEELMANN und BLIESENER, 1994). So wurden in der vorliegenden Arbeit Produktivitätswerte in die Analysen einbezogen, deren Erhebung auf unterschiedliche Weise erfolgte (z. B. Stoppuhr, Rüttelschreiber). Auch wurden die Produktivitätswerte oft mit unterschiedlicher Zielsetzung erhoben: war bspw. ein Teil der Werte als Inputgröße für die Maschinenbuchführung der Forstbetriebe bestimmt, wurden andere Werte im Rahmen detaillierter wissenschaftlicher Zeitstudien erhoben zur Abschätzung der Produktivität eines Verfahrensschritts. Darüber hinaus weisen RIEGER (1983) und HEINIMANN (1999) darauf hin, dass auch die Definition der Maschinenarbeitsstunde (MAS) als Bezugsgröße offensichtlich nicht immer konsequent angewendet wird.

Nach FARIN (1994) stehen die praktischen Voraussetzungen metaanalytischen Arbeitens dann in Frage, wenn die Primärstudien eine geringe Qualität in Datenerhebung und Datendokumentation aufweisen (siehe auch FRICKE und TREINES, 1985). Um diesem Kritikpunkt zu begegnen, wurde darauf geachtet, dass nur solche Werte in die Analysen einbezogen wurden, deren Herkunft und Zustandekommen nachvollzogen werden konnte. Dennoch lassen sich

insbesondere im Hinblick auf die Produktivitätswerte aus der Maschinenbuchführung der Forstbetriebe, wo bspw. Eingabefehler nicht immer eindeutig nachvollziehbar sind, unter Umständen nicht alle fehlerhaften Produktivitätswerte identifizieren.

Vor dem Hintergrund der oft unklaren statistischen Qualität der bislang durchgeführten Untersuchungen ist zur Verbesserung der Datengrundlage und zur Verifizierung der Produktivitätsmodelle die Durchführung weiterer statistisch gut abgesicherter Primäruntersuchungen wünschenswert. Die Ergebnisse der Metaanalyse können weiter verbessert werden, wenn die verfügbaren Eingangsdaten eine hohe statistische Qualität aufweisen, zumal im Einzelfall eine qualitativ fragwürdige Datengrundlage auch durch eine Metaanalyse nicht ausgeglichen werden kann („garbage in – garbage out“, siehe FARIN, 1997).

Auf einen weiteren Vorbehalt bei der Anwendung des Konzepts der Metaanalyse weisen EELMANN und BLIESENER (1994) hin: sie postulieren, dass nicht alle durchgeführten Untersuchungen in gleichem Maße auch publiziert werden; vielmehr gelangen Untersuchungsergebnisse dann häufiger zur Veröffentlichung, wenn sie statistisch signifikant sind, oder der Arbeitshypothese entsprechen. Die „Dunkelziffer“ an Arbeiten, die aufgrund nicht signifikanter Ergebnisse nicht veröffentlicht werden und die deshalb im Rahmen einer Metaanalyse nicht erfasst werden können, ist nicht bekannt. Damit spiegeln die erfassten Arbeiten nicht zwangsläufig die Grundgesamtheit aller Untersuchungen wider und das Ergebnis der Metaanalyse könnte somit verzerrt sein. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wurde aus diesem Grund eine weitreichende Literaturstudie unter möglichst umfassender Einbeziehung auch von Dissertationen, unveröffentlichten Forschungsberichten und so genannter „grauer Literatur“ durchgeführt. Auch wurde durch Gespräche mit einschlägigen wissenschaftlichen Einrichtungen versucht, Hinweise auf etwaige unpublizierte Arbeiten zu erhalten, um damit die Anzahl an nicht erfassten Arbeiten so gering wie möglich zu halten.

Es zeigte sich außerdem, dass einige der Variablen, die die Produktivität eines Verfahrens beeinflussen, im Rahmen einer Metaanalyse nicht berücksichtigt werden können. Dazu zählen insbesondere schwer messbare Variablen wie z. B. der Grad der Vorkonzentration des Energieholzes (niedrig, mittel, hoch), aber auch Variablen, die den Maschinenführer selbst und sein Leistungsvermögen betreffen (z. B. Übungsgrad, Gesundheitszustand). Da die Ausprägung dieser Variablen meist auf einem relativ subjektiven Empfinden beruht, können sie in Untersuchungen nur schwer in einer vergleichbaren und nachvollziehbaren Form erhoben und somit nur bedingt in eine quantitative Analyse einbezogen werden. Auch werden Angaben zu solchen Variablen nur selten veröffentlicht. Stattdessen sind in der Mehrzahl der Untersuchungen meist nur Angaben zu „harten“, messbaren Variablen des Bestands oder der Maschinen (BHD, Baumhöhe, Kranlänge) zu finden. Die Nichtberücksichtigung der genannten Variablen zeigt sich bspw. auch an den z. T. geringen Bestimmtheitsmaßen der Modelle, was bedeutet, dass nur ein geringer Teil der Streuung durch das Modell erklärt werden kann. Dies ist, ebenso wie die Tatsache, dass bei einigen Modellen die standardisierten Residuen offensichtlich nicht einer Normalverteilung folgen, Indiz dafür, dass ggf. weitere Variablen aufgenommen werden sollten, um dann einen größeren Teil der Streuung erklären zu können (BROSIOUS, 2004). Sollen solche Variablen, von denen ein Einfluss auf die Produktivität vermutet wird, auch im Rahmen einer Metaanalyse berücksichtigt werden, ist es notwendig, diese, systematisch zusammenzustellen und einen verbindlichen Standard für deren Erfassung im Rahmen von Einzeluntersuchungen zu erarbeiten. Im Weiteren müssen die Angaben zu diesen Variablen in möglichst umfassender Form auch tatsächlich erhoben und anschließend veröffentlicht werden. Nur so kann eine

verlässliche Datengrundlage für die Einbeziehung dieser Variablen in zukünftige Metaanalysen geschaffen werden.

5.9 Bewertung der Produktivitätsmodelle

Trotz der in Kapitel 5.8 genannten Einschränkungen liegt mit den vorgestellten Modellen erstmals ein Werkzeug vor, das es erlaubt, die Produktivität verschiedener Verfahren bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln in Kombination mit der Bereitstellung von Rundholz getrennt nach Verfahrensschritten abzuschätzen.

Es zeigt sich, dass in nahezu allen Modellen der BHD die mit Abstand wichtigste Einflussvariable auf die Produktivität ist. Dabei steigt diese erwartungsgemäß mit zunehmendem BHD an. Lediglich beim Hacken des Energieholzes konnte keine direkte Abhängigkeit der Produktivität vom BHD identifiziert werden. Als weitere wichtige Einflussvariable auf die Produktivität wurden zum einen der Rückegassenabstand und zum andern der Rund- bzw. Energieholzanfall je Hektar identifiziert. Dabei ist bei einer Vergrößerung des Rückegassenabstands von 20 m auf 40 m für Harvester beim Einschlag von Rundholz von einer leicht sinkenden Produktivität auszugehen. Demgegenüber nehmen die kalkulatorische Produktivität von Harvestern beim Einschlag von Energieholz sowie die Produktivität von Forwardern und Forstspezialschleppern beim Rücken von Rund- und Energieholz mit zunehmendem Rückegassenabstand zu. Beim Rücken des Energieholzes hat außerdem ein steigender Zopfdurchmesser der Rundholzsortimente einen positiven Einfluss auf die Produktivität von Forwardern. Für andere mögliche Einflussvariablen, wie z. B. die Flächengröße oder die Hangneigung, konnte kein signifikanter Einfluss auf die Produktivität festgestellt werden. Auch für die Rückeentfernung ist kein Einfluss nachweisbar, was aber an der geringen Anzahl an Fällen liegen dürfte, in denen Angaben zu dieser Variablen gemacht werden. Auf diese Problematik weist auch LANGE (2006) hin, nach dessen Erfahrung selbst in den Leistungsnachweisen der Maschinenbuchführung oft wichtige Variablen nicht erfasst werden, da deren Erfassung im Bordcomputer einer Maschine entweder nicht vorgesehen ist, oder da die Maschinenführer zu den Variablen keine verwertbaren Angaben machen.

Insbesondere bei Modellen für Verfahrensschritte bei der Bereitstellung von Energieholz ist die Datengrundlage noch gering, sodass hier zwar erste Anhaltspunkte für die Produktivität gegeben sind, die entwickelten Modelle aber statistisch nicht immer hinreichend abgesichert sind. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Modelle z. T. unterschiedliche Gültigkeitsbereiche aufweisen können, was seine Ursache ebenfalls in der geringen Zahl an Fällen hat, die für die jeweiligen Verfahrensschritte in die Metaanalyse einbezogen werden konnten. Dadurch konnte bspw. nicht in allen Modellen das gesamte Spektrum der technisch möglichen Zopfdurchmesser oder BHD abgedeckt werden. Dies hat zur Folge, dass einzelne Modelle für spätere Berechnungen (siehe auch die Beispielkalkulationen im folgenden Kapitel 6) z. T. in, wenn auch geringem Maße, extrapoliert werden müssen, um so einen Vergleich der Produktivität verschiedener Verfahren in einem konkreten Bestand überhaupt zu ermöglichen. Die Bestimmung der Produktivität eines Verfahrensschritts außerhalb des durch Daten belegten Bereichs kann aber zwar sein, da die Ergebnisse dann mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind und es in Einzelfällen möglich ist, dass es aufgrund der Extrapolation zu wenig sinnvollen Ergebnissen kommt. In der vorliegenden Untersuchung scheint eine Extrapolation der Modelle im Rahmen der Beispielkalkulationen aber unproblematisch und es ist davon auszugehen, dass

die Modelle auch im Extrapolationsbereich realistische Ergebnisse liefern. Weiterhin ist zu beachten, dass die standardisierten Residuen der einzelnen Modelle – wie in den jeweiligen Kapiteln beschrieben – nicht in allen Fällen exakt normal verteilt sind, sondern dass ihre Verteilung in einzelnen Fällen darauf hinweist, dass die Modelle bspw. durch Hinzunahme weiterer Variablen, die im Rahmen der Metaanalyse nicht erfasst werden konnten, weiter optimiert werden könnten. Dennoch scheinen die Modelle für eine erste Abschätzung der Produktivität der untersuchten Verfahrensschritte in einem konkreten Bestand gut geeignet zu sein.

Zur Absicherung der errechneten Werte und zur Verifizierung der Modelle scheint es sinnvoll, für konkrete Bestände die vorkalkulierten Produktivitätswerte mit Hilfe von Praxisversuchen zu überprüfen, um damit die zu erwartenden Unterschiede zwischen vorkalkulierter und tatsächlich erreichter Produktivität quantifizieren zu können. Dies trifft insbesondere auf den Verfahrensschritt des Hackens von Energieholz zu, für den keine Produktivitätsmodelle erstellt, sondern nur Durchschnittswerte der Produktivität für die jeweiligen Hacksysteme abgeleitet werden konnten. Da die Spannweite der Produktivität im Einzelfall jedoch recht groß sein kann, können diese Mittelwerte nur einen vorläufigen Anhaltspunkt liefern; hier sind weitere Untersuchungen notwendig, in denen möglichst viele der Variablen, die einen Einfluss auf die Produktivität von Hackern haben können, systematisch erfasst und analysiert werden, um damit auch für diesen Verfahrensschritt zuverlässige Produktivitätsmodelle abzuleiten. Im Rahmen solcher Praxisversuche bietet sich auch die Möglichkeit zur Quantifizierung der Produktivitätsunterschiede aufgrund von Rationalisierungseffekten bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln durch eine sehr gute Abstimmung der Maschinen aufeinander und eine optimierte Logistik, die in der vorliegenden Untersuchung durch den modularen Aufbau der Verfahren (Zusammensetzung aus mehreren Einzelmodellen) nicht abgebildet werden können.

Mit ihren einfach zu ermittelnden Eingangsvariablen und in der unkomplizierten Anwendbarkeit unterscheiden sich die hier entwickelten Modelle deutlich von den Produktivitätsmodellen, die bspw. HEIDE (2005) (siehe auch HEIDE et al., 2005) vorschlägt, oder wie sie in das Programm HeProMo der WSL (2007) integriert sind. In diese Modelle gehen zahlreiche Variablen ein, deren Ausprägung z. T. nur mit hohem Aufwand ermittelt werden kann (z. B. Anteil der grünen Krone an der Baumlänge, Anteil der Naturverjüngung und Unterstand auf der Fläche, Fahrstreckenanteile des Forwarders auf der Rückegasse bzw. der Waldstraße). Ist damit die Anwendung dieser Modelle schon im Einzelbestand aufwändig, so ist es kaum möglich, die Ausprägung all dieser Variablen für bspw. die Bestände eines Forstbetriebs zu ermitteln, weshalb dann die Anwendung dieser Modelle auch nur eingeschränkt möglich ist. Darüber hinaus liegt der Fokus der genannten Modelle, wie bereits angesprochen, auf der Ermittlung der Produktivität von Verfahrensschritten bei der Bereitstellung von Rundholz; über die Produktivität von Verfahrensschritten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln zur energetischen Verwertung werden nur im Ausnahmefall Aussagen getroffen.

Mit den vorgestellten Produktivitätsmodellen kann hingegen mit nur wenigen Eingangsvariablen für einen einzelnen Bestand, aber auch für die Bestände bspw. eines Forstbetriebs die Produktivität (und daraus abgeleitet die Stückkosten) verschiedener Verfahren in den Beständen bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln in Kombination mit der Aushaltung von Rundholz abgeschätzt werden. Dabei bietet sich insbesondere eine Kombination mit den Untersuchungsergebnissen von LECHNER (2007) an, der Aussagen über die in einem Bestand zu erntenden Stamm-, Industrie- und Energieholzmengen macht sowie die Einbeziehung der Ergebnisse von ENGLER und CREMER (2008), die Aussagen treffen über die Abhängigkeit der

Sortimentsverteilung vom Zopfdurchmesser des Rundholzes. Damit ist es möglich, sowohl die Auswirkungen von sich ändernden Sortier- und Aushaltungsvorschriften (z. B. Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz), wie auch den Einfluss von z. B. neuen Durchforstungskonzepten (bspw. geringerer BHD des ausscheidenden Bestands aufgrund eines stärkeren Eingriffs in den Unter- und Zwischenstand) auf die Produktivität zu quantifizieren. Werden die errechneten Produktivitätswerte als Eingangsdaten für Kostenkalkulationsmodelle, wie sie z. B. die AFL NIEDER-SACHSEN (2008), SCHAFFER und PICHLER (2008) oder das FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE (2006) veröffentlicht haben, genutzt, können durch die Ableitung der jeweiligen Stückkosten letztendlich auf detaillierte Weise auch die flächenbezogenen Erlöse einer konsequenten Nutzung von Biomasse für eine energetische Nutzung bestimmt werden. Dabei können unterschiedliche Optionen für die Versorgung von Unternehmen der Holzverarbeitenden Industrie und/oder von Holzheiz(kraft)werken geprüft und der Rohstoff Biomasse darauf aufbauend optimal gelenkt und somit die vorhandenen Holzressourcen bestmöglich eingesetzt werden.

Eine weitere Entwicklungsmöglichkeit wäre die Integration dieser Modelle in das HOLZERNT-Programm der FVA (2007) oder eine Verknüpfung mit dem genannten Programm HeProMo der WSL (2007). Infolgedessen könnte auch mit diesen Programmen die gesamte Bereitstellung für Rundholz und Hackschnitzel mit ihren verschiedenen Varianten bzgl. Verfahren, Aushaltungsvarianten u. Ä. abgebildet werden und zwar nicht nur hinsichtlich der jeweiligen Produktivität, sondern auch in Bezug auf die jeweiligen Stückkosten und Nettoflächenerlöse.

6 Beispielkalkulationen: Ergebnisse und Diskussion

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden die im Rahmen der Metaanalyse entwickelten Produktivitätsmodelle in Beispielkalkulationen auf konkrete Bestände angewendet, um so ihre Funktionsweise und Plausibilität zu überprüfen. Dazu wurden die einzelnen Verfahrensschritte zu sechs beispielhaften, in der Praxis gebräuchlichen Verfahren zusammengefasst (siehe Tabelle 7). Unter Verwendung der Bestandeskennwerte (Tabelle 6) als Eingangsvariablen konnten dann bestandesbezogene Produktivitätswerte für die jeweiligen Verfahrensschritte berechnet werden. Daraus wiederum konnten die jeweils für das Rundholz und die Hackschnitzel anfallenden Stückkosten und Nettoflächenerlöse abgeleitet werden.

Wie in Tabelle 7 erläutert, wurden die sechs Verfahren abgekürzt, wie folgt:

1. Verfahren TM40WS: Teilmechanisiertes Verfahren (Motormanueller Einschlag, Rücken mit Forstspezialschlepper), Rückegassenabstand 40 m, Hacken des Energieholzes an der Waldstraße.
2. Verfahren VM40WS: Vollmechanisiertes Verfahren (Einschlag durch Harvester, Rücken mit Forwarder), Rückegassenabstand 40 m, Hacken des Energieholzes an der Waldstraße.
3. VM40RG: Vollmechanisiertes Verfahren (Einschlag durch Harvester, Rücken mit Forwarder), Rückegassenabstand 40 m, Hacken des Energieholzes auf der Rückegasse.
4. VM20WS: Vollmechanisiertes Verfahren (Einschlag durch Harvester, Rücken mit Forwarder), Rückegassenabstand 20 m, Hacken des Energieholzes an der Waldstraße.
5. VM20RG: Vollmechanisiertes Verfahren (Einschlag durch Harvester, Rücken mit Forwarder), Rückegassenabstand 20 m, Hacken des Energieholzes auf der Rückegasse.
6. VM20ZP: Vollmechanisiertes Verfahren (Einschlag durch Harvester, Rücken mit Forwarder), Rückegassenabstand 20 m, Zwischentransport des Energieholzes mit einem Langholz-LKW, Hacken des Energieholzes an einem zentralen Platz.

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, wurden die Produktivitäten, Stück- und Nettoflächenerlöse außerdem für die folgenden drei Aushaltungsvarianten untersucht:

- **Aushaltungsvariante 1:** Es findet eine Nutzung von Stammholz und Industrieholz statt und es werden keine Hackschnitzel bereitgestellt.
- **Aushaltungsvariante 2:** Es findet eine Nutzung von Stammholz und Industrieholz statt und das als Kuppelprodukt anfallende Kronenmaterial wird zur Produktion von Hackschnitzeln genutzt.
- **Aushaltungsvariante 3:** Es findet eine Nutzung von Stammholz und Hackschnitzeln statt, auf die Aushaltung von Industrieholz wird verzichtet.

6.1 Produktivitäten bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln

Die Produktivitäten der einzelnen Verfahrensschritte werden in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante beispielhaft für den durchmesserschwachen Fichtenbestand NH 251 (siehe Tabelle 6) dargestellt.

Dabei ist zu beachten, dass bereits alle Produktivitätsangaben auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) bzw. die Maschinenarbeitsstunde (MAS) bezogen wurden. Damit können aus den gezeigten Produktivitäten direkt die Stückkosten je Festmeter abgeleitet werden, ohne dass die Werte zuvor weiter manipuliert werden müssen.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Produktivität bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz unabhängig davon ist, ob gleichzeitig Hackschnitzel bereitgestellt werden, oder nicht. Grund hierfür ist, dass bei Aushaltungsvariante 2 der Zeitbedarf für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern dem Prinzip der „By-products allocation“ folgend, vollständig dem Stamm- und Industrieholz zugerechnet wird (siehe auch Kapitel 4.2.3) und die Hackschnitzel deshalb damit nicht belastet werden. Aufgrund dessen sind die Produktivitäten beim Einschlag von Stamm- und Industrieholz bei den Aushaltungsvarianten 1 und 2 dieselben, weshalb sie im Folgenden nicht getrennt voneinander aufgeführt werden.

Aushaltungsvarianten 1 und 2: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz

Bei den Aushaltungsvarianten 1 und 2 sind die Verfahrensschritte zur Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz der Verfahren VM40WS und VM40RG und der Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP jeweils dieselben. Deshalb ist auch die Produktivität dieser Verfahren bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz jeweils dieselbe.

Dass die Produktivität der einzelnen Verfahrensschritte bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz stark vom Rückegassenabstand abhängt, ist in Tabelle 58 deutlich erkennbar: So liegt die Produktivität des Harvesters bei den Verfahren VM40WS und VM40RG aufgrund des höheren Rückegassenabstands von 40 m mit 10,3 Efm/MAS um ca. 2,3 Efm/MAS (18 %) unter der Produktivität des Harvesters bei einem Rückegassenabstand von 20 m (Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP). Die Produktivität des Forwarders beim Rücken von Stamm- und Industrieholz liegt hingegen bei einem Rückegassenabstand von 40 m (Verfahren VM40WS und VM40RG) aufgrund des höheren Volumenfalls entlang der Rückegasse mit 12 Efm/MAS um knapp 3 Efm/MAS (23 %) über der Produktivität bei einem Rückegassenabstand von 20 m (Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP). Die Produktivität des Forstspezialschleppers beim Rücken von Stamm- und Industrieholz (Verfahren TM40WS) liegt mit 6,6 Efm/MAS erwartungsgemäß deutlich unter der Produktivität der Forwarder.

Aushaltungsvariante 2: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln

Da, wie erwähnt, bei Aushaltungsvariante 2 der gesamte Zeitbedarf für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern dem Stamm- und Industrieholz zugerechnet wird, fallen keine separaten Einschlags- und Vorlieferarbeiten für die Hackschnitzel an. Deshalb sind in Tabelle 58 für diese Arbeiten auch keine Produktivitätswerte hinterlegt. Stattdessen müssen

lediglich Produktivitäten für ggf. das getrennte Rücken und den Zwischentransport sowie das Hacken des Energieholzes kalkuliert werden. Für den Verfahrensschritt „Rücken“ sind zwischen den Verfahren deutliche Unterschiede in der Produktivität zu erkennen: Wird für den Forstspeziialschlepper des Verfahrens TM40WS von einer Produktivität von 1,9 Efm/MAS ausgegangen, erreicht der Forwarder beim Rücken des Energieholzes bei den Verfahren VM40WS, VM20WS und VM20ZP mit 5,0 Efm/MAS mehr als die doppelte Produktivität. Somit scheinen Forwarder für das Rücken von Energieholz die geeignetere Lösung im Vergleich zu Forstspeziialschleppern zu sein. Die Produktivitätswerte der unterschiedlichen Hacksysteme variieren in Abhängigkeit vom Ort des Hackens (Waldstraße (WS), Rückegasse (RG), Zentraler Platz (ZP)) zwischen 9–29,4 Efm/MAS. Hier konnten, wie in Kapitel 5.7 näher erläutert, keine Produktivitätsmodelle erarbeitet werden, da kein statistisch signifikanter Einfluss von Bestandeskennwerten nachgewiesen werden konnte. Aufgrund dessen wurde mit Produktivitäts-Mittelwerten für die jeweiligen Hacksysteme gearbeitet.

Tabelle 58: Aushaltungsvarianten 1 und 2: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz und von Hackschnitzeln (nur Aushaltungsvariante 2) in Bestand NH 251

Verfahren	Kürzel	Verfahrensschritte Stamm- und Industrieholz			Verfahrensschritte Hackschnitzel				
		Einschlag	Motor-manuelles Fällen und Vorliefern	Rücken	Ein-schlag	Motor-manuelles Fällen und Vorliefern	Rücken	Zwischen-transport	Hacken
1	TM40WS	2,0 Efm/h GAZ	---	6,6 Efm/MAS	---	---	1,9 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
2	VM40WS	10,3 Efm/MAS	5,7 Efm/h GAZ	12,0 Efm/MAS	---	---	5,0 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
3	VM40RG	10,3 Efm/MAS	5,7 Efm/h GAZ	12,0 Efm/MAS	---	---	---	---	9,0 Efm/MAS
4	VM20WS	12,6 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	---	---	5,0 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
5	VM20RG	12,6 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	---	---	---	---	9,0 Efm/MAS
6	VM20ZP	12,6 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	---	---	5,0 Efm/MAS	11,4 Efm/MAS	29,4 Efm/MAS

Aushaltungsvariante 3: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stammholz

Da bei Aushaltungsvariante 3 ein Teil des Zeitbedarfs für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern den Hackschnitzeln zugerechnet wird (siehe Kapitel 4.2.3), sinkt der auf das Stammholz entfallende Zeitbedarf, und die Produktivität beim motormanuellen Einschlag von Stammholz steigt bei Verfahren TM40WS um 20 % auf 2,4 Efm/h GAZ an (Tabelle 59). Die Produktivität des Harvesters beim Einschlag von Stammholz liegt bei den Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP mit 17,3 Efm/MAS sogar um 4,7 Efm/MAS (44 %) über der Produktivität

beim Einschlag von Stammholze bei den Aushaltungsvarianten 1 und 2. Bei den Verfahren VM40WS und VM40RG ändert sich die Produktivität der Harvester beim Einschlag von Stammholz im Vergleich zu den Aushaltungsvarianten 1 und 2 hingegen kaum. Der Grund hierfür ist, dass bei einem Rückegassenabstand von 40 m nur ein sehr geringer Teil der Arbeitszeit des Harvesters dem Energieholz zugerechnet werden kann, weshalb sich auch die Produktivität nur in geringem Maße (0,2 Efm/MAS) ändert.

Tabelle 59: Aushaltungsvariante 3: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Stammholz und Hackschnitzeln (Verzicht auf Bereitstellung von Industrieholz) in Bestand NH 251

Ver- fahren	Kürzel	Verfahrensschritte Stammholz			Verfahrensschritte Hackschnitzel				
		Einschlag	Motor- manuelles Fällen und Vorliefern	Rücken	Einschlag (kalk. Produktivität)	Motormanuelles Fällen und Vor- liefern (kalk. Produktivität)	Rücken	Zwischen transport	Hacken
1	TM40WS	2,4 Efm/h GAZ	---	6,6 Efm/MAS	8,1 Efm/h GAZ	---	3,2 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
2	VM40WS	10,1 Efm/MAS	6,0 Efm/h GAZ	12,0 Efm/MAS	27,5 Efm/MAS	11,9 Efm/h GAZ	6,6 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
3	VM40RG	10,1 Efm/MAS	6,0 Efm/h GAZ	12,0 Efm/MAS	27,5 Efm/MAS	11,9 Efm/h GAZ	---	---	9,0 Efm/MAS
4	VM20WS	17,3 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	14,8 Efm/MAS	---	6,6 Efm/MAS	---	19,0 Efm/MAS
5	VM20RG	17,3 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	14,8 Efm/MAS	---	---	---	9,0 Efm/MAS
6	VM20ZP	17,3 Efm/MAS	---	9,2 Efm/MAS	14,8 Efm/MAS	---	6,6 Efm/MAS	13,8 Efm/MAS	29,4 Efm/MAS

Beim motormanuellen Fällen und Vorliefern von Stammholz ist mit 6,0 Efm/MAS eine leichte Zunahme der Produktivität um 0,3 Efm/MAS (5 %) im Vergleich zum motormanuellen Fällen und Vorliefern von Stamm- und Industrieholz zu verzeichnen. Beim Rücken von Stammholz ändert sich die Produktivität in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante hingegen nicht. Dies war im Hinblick auf die für den Forstspezialschlepper und den Forwarder hinterlegten Produktivitätsmodelle, in die lediglich der BHD sowie ggf. der Rückegassenabstand und die Leistungsklasse des Forwarders eingehen, auch nicht zu erwarten.

Aushaltungsvariante 3: Produktivitäten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln

Durch den Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz muss bei Aushaltungsvariante 3 im Gegensatz zu Aushaltungsvariante 2 für den Einschlag des Energieholzes eine kalkulatorische Produktivität hinterlegt werden (Tabelle 59). Diese dient, wie in Kapitel 4.2.3 erläutert, vor allem dazu, die auf die Hackschnitzel entfallenden Kosten abzuschätzen (siehe folgendes Kapitel) und liegt im Beispielbestand NH 251 zwischen 8,1–27,5 Efm/MAS. Aus dem gleichen Grund muss bei den Verfahren VM40WS und VM40RG aufgrund des Rückegassenabstands von 40 m

auch eine kalkulatorische Produktivität für das motormanuelle Fällen und Vorliefern des Energieholzes hinterlegt werden.

Beim Rücken wird sowohl die Produktivität des Forstspeziialschleppers (Verfahren TM40WS) wie auch die Produktivität des Forwarders (Verfahren VM40WS, VM20WS und VM20ZP) durch den höheren Energieholzanfall und den höheren Zopfdurchmesser bei Aushaltungsvariante 3 stark beeinflusst: Die Produktivitäten liegen im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 um jeweils ca. 1,5 Efm/MAS (68 % bzw. 32 %) höher. Auch auf die Produktivität des LKWs beim Zwischen-transport des Energieholzes auf einen zentralen Platz (Verfahren VM20ZP) hat die Aushaltung einen Einfluss: Durch die zusätzliche Nutzung des potenziellen Industrieholzes als Energieholz wird eine im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 um knapp 2,5 Efm/MAS (21 %) höhere Produktivität erreicht. Die für das Hacken hinterlegten Mittelwerte ändern sich in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante nicht, sodass in Tabelle 58 und Tabelle 59 jeweils dieselben Produktivitäten zu finden sind.

6.2 Stückkosten für die Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln

6.2.1 Kostenzurechnung nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (Aushaltungsvariante 2) bzw. unter Zugrundelegung einer kalkulatorischen Produktivität (Aushaltungsvariante 3)

Aushaltungsvarianten 1 und 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz

Abbildung 38 zeigt beispielhaft für den schwächeren Fichtenbestand NH 251 die aus den Produktivitätswerten (Kapitel 6.1) abgeleiteten Stückkosten der einzelnen Verfahren für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz (Aushaltungsvarianten 1 und 2), getrennt nach Verfahrensschritten.

Dabei zeigt sich, dass bei allen Verfahren der Einschlag des Stamm- und Industrieholzes die höchsten Kosten verursacht. Diese liegen bei dem teilmechanisierten Verfahren TM40WS bei 15,40 €/Efm, bei den vollmechanisierten Verfahren VM40WS und VM40RG bei 11,60 €/Efm und bei den vollmechanisierten Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP bei 9,60 €/Efm.

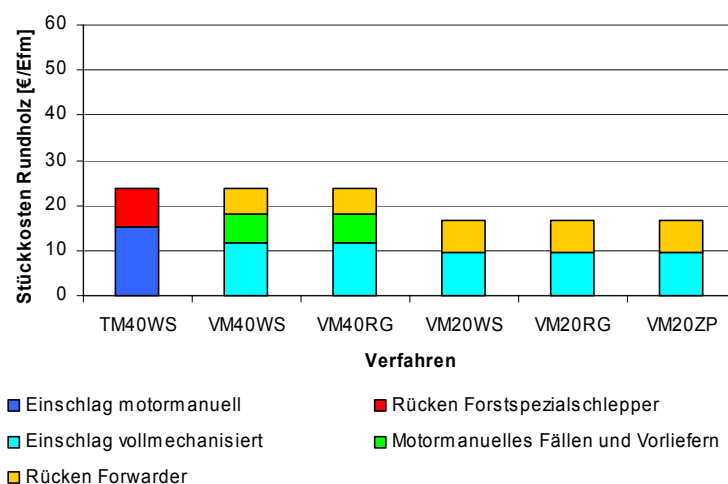


Abbildung 38: Aushaltungsvarianten 1 und 2: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz, getrennt nach Verfahrensschritten (Bestand NH 251)

Für das zusätzliche motormanuelle Fällen und Vorliefern von Stamm- und Industrieholz aus der Zwischenzone, das nur bei den Verfahren VM40WS und VM40RG zum Tragen kommt, werden Kosten von 6,60 €/Efm ermittelt. Das Rücken des Stamm- und Industrieholzes mit einem Forstspezialschlepper (Verfahren TM40WS) verursacht im untersuchten Bestand NH 251 Kosten von ca. 8,30 €/Efm, während für das Rücken mit einem Forwarder von Kosten zwischen 5,40 €/Efm (Verfahren VM40WS und VM40RG) und 7,00 €/Efm (Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP) auszugehen ist.

In der Summe zeigt sich, dass die Stückkosten bei den vollmechanisierten Verfahren und einem Rückegassenabstand von 20 m (Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP) mit 16,50 €/Efm

deutlich unter denjenigen Stückkosten liegen, mit denen bei den Verfahren mit einem Rückegassenabstand von 40 m (TM40WS, VM40WS und VM40RG) zu rechnen ist. Somit sind diese Verfahren aus ökonomischer Sicht am vorteilhaftesten. Für einen Rückegassenabstand von 40 m wird außerdem deutlich, dass das teilmechanisierte Verfahren (TM40WS) bei der Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz keine gravierenden Kostennachteile im Vergleich zu den beiden vollmechanisierten Verfahren VM40WS und VM40RG aufweist.

Tabelle 60 zeigt die Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz in allen sechs Beispielbeständen, *ohne* eine Aufteilung auf die jeweiligen Verfahrensschritte⁷¹. Die jeweils günstigsten Stückkosten sind grau eingefärbt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die Verfahren VM40WS und VM40RG sowie die Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP jeweils nur im Hinblick auf die weiter unten diskutierten Verfahrensschritte zur Bereitstellung der Hackschnitzel unterscheiden und die Verfahrensschritte zur Bereitstellung des Stamm- und Industrieholzes jeweils dieselben sind, weshalb sich die entsprechenden Stückkosten nicht voneinander unterscheiden.

Die oben für den Fichtenbestand NH 251 gemachte Aussage über das kostengünstigste Verfahren wird in Tabelle 60 bestätigt: Es zeigt sich, dass die vollmechanisierten Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP bei den Aushaltungsvarianten 1 und 2 in fünf der sechs Bestände das kostengünstigste Verfahren für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz darstellen. Lediglich in dem durchmesserstarken Buchenbestand (LH 101) liegen die Stückkosten des teilmechanisierten Verfahrens TM40WS um 2,20 €/Efm unter den entsprechenden Stückkosten der genannten Verfahren. Des Weiteren zeigt sich, dass in allen Beständen die Stückkosten durch ein zusätzliches motormanuelles Fällen und Vorliefern von Bäumen aus der Zwischenzone aufgrund eines Rückegassenabstands von 40 m (Verfahren VM40WS und VM40RG) um bis zu 10 €/Efm über den entsprechenden Stückkosten einer vollmechanisierten Bereitstellung des Stamm- und Industrieholzes bei einem Rückegassenabstand von 20 m (Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP) und in der Mehrzahl der Fälle auch über den Stückkosten einer teilmechanisierten Bereitstellung (Verfahren TM40WS) liegen.

Grundsätzlich kann darüber hinaus gesagt werden, dass die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz in durchmesserschwächeren Beständen (Bestände NH 251, LH 104 und KI 203) deutlich teurer ist im Vergleich zur Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz in durchmesserstärkeren Beständen (Bestände NH 273, LH 101 und KI 207). So liegen z. B. in den untersuchten Buchenbeständen die Stückkosten in dem schwächeren Bestand (LH 104) zwischen 3,10–8,80 €/Efm über den entsprechenden Stückkosten in dem stärkeren Bestand (LH 101). Dieser Unterschied stellt sich in den Fichten- und Kiefernbeständen vergleichbar dar.

Im Hinblick auf das eingesetzte Verfahren ist der Kostenunterschied zwischen schwächeren und stärkeren Beständen mit 6,30–8,80 €/Efm bei dem teilmechanisierten Verfahren TM40WS am größten, während die Unterschiede bei bspw. dem vollmechanisierten Verfahren VM20WS bei lediglich 3,00–3,10 €/Efm liegen. In Tabelle 60 wird außerdem deutlich, dass die Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz in Kiefernbeständen bei vergleichbarem Durchmesser um bis zu 6,40 €/Efm niedriger als die entsprechenden Stückkosten in Fichten- oder Buchenbeständen liegen.

⁷¹ Die Kosten für die jeweiligen Verfahrensschritte können aber ggf. auf einfache Weise über die Produktivitäten der Verfahrensschritte (siehe Kapitel 6.1) hergeleitet werden.

Tabelle 60: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Rundholz in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante (in €/Efm)

Aushaltungsvarianten 1 und 2 (Stamm- und Industrieholz)							
Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
1	TM40WS	23,70	16,20	23,20	14,40	18,90	12,60
2	VM40WS	23,60	17,90	29,90	22,50	21,20	16,10
3	VM40RG	23,60	17,90	29,90	22,50	21,20	16,10
4	VM20WS	16,50	13,50	19,70	16,60	15,30	12,20
5	VM20RG	16,50	13,50	19,70	16,60	15,30	12,20
6	VM20ZP	16,50	13,50	19,70	16,60	15,30	12,20
Aushaltungsvariante 3 (nur Stammholz)							
Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
1	TM40WS	20,60	15,00	20,30	13,70	16,20	11,50
2	VM40WS	23,50	17,80	32,80	24,20	22,40	16,00
3	VM40RG	23,50	17,80	32,80	24,20	22,40	16,00
4	VM20WS	14,00	13,30	---	17,00	13,70	12,10
5	VM20RG	14,00	13,30	---	17,00	13,70	12,10
6	VM20ZP	14,00	13,30	---	17,00	13,70	12,10

Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln

Die Stückkosten der einzelnen Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln zeigt Tabelle 61. Da bei Aushaltungsvariante 2, wie schon in Kapitel 6.1 besprochen, keine separaten Einschlags- und Vorlieferarbeiten für das Energieholz anfallen, beinhalten auch die entsprechenden Stückkosten nur die Kosten für das Rücken und Hacken des Energieholzes. Dabei sind bei Aushaltungsvariante 2 die Verfahrensschritte der Verfahren VM40RG und VM20RG und der Verfahren VM40WS und VM20WS in Bezug auf die Bereitstellung von Hackschnitzeln jeweils dieselben, weshalb auch die entsprechenden Stückkosten dieselben sind.

Bei Betrachtung der Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 2 fällt zunächst auf, dass sich diese mit 19,00–47,20 €/Efm in einem weiten Rahmen bewegen. Dabei liegen die Stückkosten in durchmesserschwächeren Beständen über den entsprechenden Stückkosten in stärkeren Beständen. Wird das teilmechanisierte Verfahren

⁷² Da in diesem schwachen Laubholzbestand ein sehr hoher Anteil der Arbeitszeit des Harvesters dem Energieholz zugeordnet wurde, änderte sich die damit korrespondierende Produktivität des Harvesters beim Einschlag von Stammholz so stark, dass daraus eine negative Produktivität des Harvesters resultierte. Auf deren Darstellung wurde deshalb in Tabelle 60, genauso wie bei den weiteren Beispielkalkulationen verzichtet. Das bedeutet außerdem, dass diese Berechnungsweise bei solchen schwachen Laubholzbeständen nicht mehr angewendet werden sollte, da keine sinnvollen Kennwerte mehr angegeben werden können.

TM40WS ausgeklammert, zeigt sich, dass die Kostenunterschiede der vollmechanisierten Verfahren über alle Bestände hinweg mit maximal ca. 7 €/Efm verhältnismäßig gering sind. Für diese Verfahren gilt, dass eine wirtschaftliche Bereitstellung von Hackschnitzeln in allen Beständen schon ab einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm möglich ist (Ausnahme ist das Verfahren VM20ZP in Bestand NH 251) und dass damit Erlöse zwischen 0,70–6,00 €/Efm erzielt werden können.

Tabelle 61: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante (in €/Efm)

Aushaltungsvariante 2 (Hackschnitzel)							
Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
1	TM40WS	39,40	25,20	47,20	24,60	31,00	23,90
2	VM40WS	23,40	19,50	24,30	19,20	21,70	19,00
3	VM40RG	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30
4	VM20WS	23,40	19,50	24,30	19,20	21,70	19,00
5	VM20RG	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30
6	VM20ZP	26,20	22,30	--- ⁷³	---	---	---

Aushaltungsvariante 3 (Hackschnitzel)							
Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
1	TM40WS	31,60	25,80	31,90	24,00	26,60	24,30
2	VM40WS	28,00	22,30	29,70	21,70	25,40	22,20
3	VM40RG	29,80	26,50	32,40	26,70	28,40	26,40
4	VM20WS	28,60	21,20	36,10	20,60	24,80	21,10
5	VM20RG	30,40	25,30	38,70	25,70	27,80	25,30
6	VM20ZP	30,30	22,90	---	---	---	---

Bei Aushaltungsvariante 2 stellt das Hacken an der Waldstraße (Verfahren VM20WS und VM40WS) in vier der sechs Bestände das kostengünstigste Verfahren dar (Tabelle 61). Lediglich in den Beständen NH 251 und LH 104 liegen die Stückkosten beim Hacken auf der Rückegasse (Verfahren VM20RG und VM40RG), niedriger, da in diesen beiden Beständen die vorgelagerten Kosten für das Rücken des Energieholzes mit einem Forwarder aufgrund der geringen BHD des ausscheidenden Bestands auf einem sehr hohen Niveau liegen. Dadurch können diese Kosten nicht wie in den übrigen Beständen durch die gesteigerte Produktivität des Hackers an der Waldstraße im Vergleich zum Hacken auf der Rückegasse kompensiert werden.

⁷³ Wie in Kapitel 5.6 erläutert, besitzt das Produktivitätsmodell für den Zwischentransport von Energieholz auf einen zentralen Hackplatz mit einem Langholz-LKW nur in Fichtenbeständen Gültigkeit.

Die Stückkosten des Verfahrens TM40WS liegen bei Aushaltungsvariante 2 ausnahmslos deutlich über den Stückkosten der vollmechanisierten Verfahren. Zu diesem Schluss kommen auch SPINELLI und MAGAGNOTTI (2007), nach deren Aussage Hackschnitzel mit vollmechanisierten Verfahren zu deutlich niedrigeren Stückkosten bereitgestellt werden können im Vergleich zu teilmechanisierten Verfahren. Die Stückkosten der vollmechanisierten Verfahren unterschieden sich innerhalb eines Bestandes nur wenig und die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens VM20WS ist gering. Aufgrund dessen kann gesagt werden, dass der Wahl des optimalen Verfahrens (insbesondere bestimmt durch das Hacksystem) offensichtlich eine geringere Bedeutung zukommt, als angenommen. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu der Aussage von JACKE (2007b), nach der man, wo immer möglich, an der Waldstraße hacken sollte, „... nach dort vollzogener Konzentration des zu verarbeitenden Holzes.“ Auch nach WITTKOPF (2005) rechnet sich ein Hacken auf der Rückegasse in der Regel nicht, da der Hacker dann aufgrund der geringeren Vorkonzentration des Hackmaterials eine deutlich verringerte Produktivität im Vergleich zu einem Hacker an der Waldstraße aufweist. Andererseits wird das Ergebnis von LECHNER et al. (2007) bestätigt, die in ihrer Untersuchung ebenfalls nur geringe Unterschiede in den Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Abhängigkeit vom Ort des Hackens ermitteln. Zu dem gleichen Ergebnis kommt wiederum auch die Vereinigung HOLZENERGIE SCHWEIZ (2003), die nach einer Befragung zahlreicher Forstbetriebe in der Schweiz zu dem Schluss kommt, dass sich „... weder das «Hacken im Bestand [d. h. auf der Rückegasse]» noch das «Hacken auf der Waldstraße» als das rationellere Verfahren behaupten [kann].“

Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Stammholz

Durch den Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz (Aushaltungsvariante 3) sinken die Stückkosten des Verfahrens TM40WS für die Bereitstellung von Stammholz im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 um ca. 0,70–3,10 €/Efm auf 11,50–20,60 €/Efm (siehe Tabelle 60). Auch bei den vollmechanisierten Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP sinken die Stückkosten bei Aushaltungsvariante 3 gegenüber Aushaltungsvariante 2 um durchschnittlich 0,90 €/Efm auf 12,10–20,70 €/Efm. Bei den vollmechanisierten Verfahren VM40WS und VM40RG, die von einem zusätzlichen motormanuellen Fällen und Vorliefern des Stammholzes an die Rückegasse ausgehen, ist die Aussage weniger eindeutig: Sinken die Stückkosten in den beiden Fichtenbeständen (NH 251 und NH 273) sowie dem Kiefernbestand (KI 207) geringfügig ab, steigen die Stückkosten in den übrigen drei Beständen (LH 104, LH 101 und KI 203) sogar leicht an.

In Tabelle 60 zeigt sich außerdem, dass das teilmechanisierte Verfahren TM40WS bei Aushaltungsvariante 3 bei der Bereitstellung von Stammholz in den beiden Laubholzbeständen (LH 104 und LH 101) und dem durchmesserstarken Kiefernbestand (KI 207) das kostengünstigste Verfahren ist. Ursache hierfür sind zum einen die vor allem in durchmesserstärkeren Laubholzbeständen relativ geringe Produktivität (und die daraus resultierenden hohen Stückkosten) von Harvestern beim Einschlag von Stammholz (siehe Kapitel 5.1.1), und zum andern die verhältnismäßig hohe Produktivität (und die daraus resultierenden geringen Stückkosten) von Waldarbeitern und Forstspezialschleppern beim Einschlag und Rücken von Stammholz in Laubholz- und Kiefernbeständen. Demgegenüber können in den durchmesserschwachen Kiefern- und Fichtenbeständen (KI 203 und NH 251) sowie in dem starken Fichtenbestand (NH 273) die Harvester und Forwarder ihre Vorteile ausspielen und sind dadurch die kostengünstigere Alternative.

Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln

Abbildung 39 zeigt beispielhaft für den Bestand NH 251 die Stückkosten der einzelnen Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3, getrennt nach Verfahrensschritten. Wie zu erkennen, sind die im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 zusätzlichen, auf das Energieholz bezogenen Kosten für das motormanuelle Fällen und Vorliefern mit 3,10 €/Efm und den Einschlag der Bäume mit 3,60–8,10 €/Efm verhältnismäßig gering. Insgesamt variieren die Stückkosten im genannten Bestand zwischen 28,00–31,60 €/Efm und weisen damit mit knapp 4 €/Efm nur eine geringe Spannweite auf. Somit wird auch hier deutlich, dass das Hacksystem (d. h. der Ort des Hackens) nur eine untergeordnete Rolle spielt, da die Kosten für das Rücken des Energieholzes an die Waldstraße oder den zusätzlichen Zwischentransport des Energieholzes an einen zentralen Hackplatz in hohem Maße durch die jeweils geringeren Kosten des Hackers kompensiert werden.

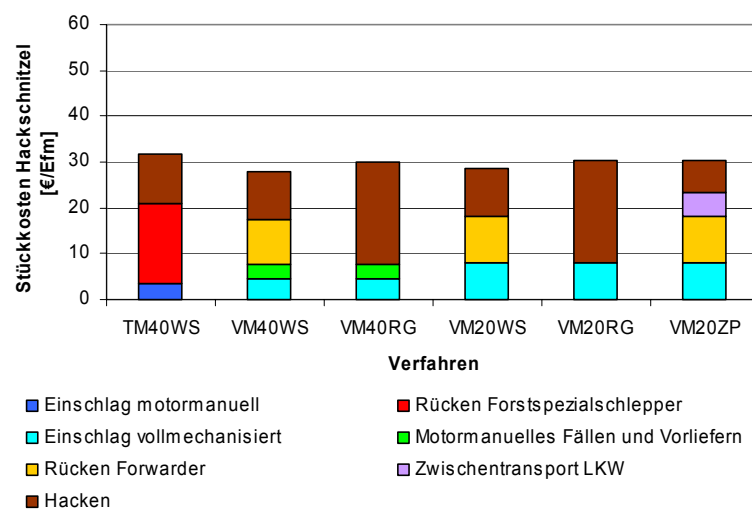


Abbildung 39: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten der Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln, getrennt nach Verfahrensschritten (Bestand NH 251)

Beim Vergleich aller sechs Beispielbestände (Tabelle 61) zeigt sich, dass auch bei Aushaltungsvariante 3 die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in durchmesserstarken Beständen (NH 273, LH 101, KI 207) unter denjenigen Stückkosten liegen, die in durchmesserschwachen Beständen (NH 251, LH 104, KI 203) zu erwarten sind.

Über alle Bestände hinweg bewegen sich die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3 in einem Rahmen zwischen 20,60–31,90 €/Efm. Damit liegen sie um durchschnittlich 3,20 €/Efm höher als die Stückkosten bei Aushaltungsvariante 2. Dabei muss zwischen dem teilmechanisierten Verfahren TM40WS und den übrigen, vollmechanisierten Verfahren differenziert werden: Steigen die Stückkosten der vollmechanisierten Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3 um durchschnittlich 4,90 €/Efm an, nehmen die Stückkosten des teilmechanisierten Verfahrens im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 sogar um durchschnittlich 4,50 €/Efm ab. Damit ist bei einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm mit 9 der 32 Verfahren eine wirtschaftliche Bereitstellung von Hackschnitzeln möglich. Wird von einem Hackschnitzelpreis von 30 €/Efm ausgegangen, können sogar mit 25 von 32 Verfahren positive Erlöse erzielt werden. Auch die Stückkosten der übrigen sieben Verfahren bewegen sich überwiegend nur knapp oberhalb der Wirtschaftlichkeit.

Trotz der durchschnittlich höheren Stückkosten im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 ist auch bei Aushaltungsvariante 3 das vollmechanisierte Verfahren VM20WS, das von einem Einschlag des Energieholzes mit einem Harvester, Rücken mit einem Forwarder und Hacken an der Waldstraße ausgeht, in vier von sechs Beständen das kostengünstigste Verfahren. Seine Vorteile im Vergleich zu den übrigen Verfahren sind jedoch relativ gering: Die Stückkosten liegen im Durchschnitt um lediglich knapp 2 €/Efm unter den Stückkosten der übrigen Verfahren.

6.2.2 Auswirkungen einer veränderten Kostenzurechnung

Diejenigen Kosten für die Bereitstellung des Stamm- und Industrieholzes sowie der Hackschnitzel, die aufgrund von Kuppelproduktion nicht eindeutig dem einen oder dem anderen Sortiment zugerechnet werden können (d.h. in diesem Fall die Kosten für den Einschlag mit Harvester bzw. im motormanuelle Verfahren sowie die Kosten für das motormanuelle Fällen und Vorliefern des Holzes), werden bei Aushaltungsvariante 2 nach dem in Kapitel 4.2.3 näher beschriebenen Prinzip der „By-products allocation“ auf die Sortimente aufgeteilt. Bei Aushaltungsvariante 3 werden die auf die jeweiligen Sortimente entfallenden Kosten mit Hilfe einer kalkulatorischen Produktivität ermittelt, aus der dann die Kosten abgeleitet werden. Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, könnten die Kosten in beiden Aushaltungsvarianten stattdessen auch nach dem Prinzip der „Joint products allocation“ oder der „Apportioned inputs allocation“ zwischen den Sortimenten aufgeteilt werden.

Um diese Auswirkungen einer veränderten Kostenzurechnung aufzuzeigen, sollen am Beispiel des Fichtendurchforstungsbestands NH 251 die Kosten, wie sie in der vorliegenden Untersuchung ermittelt wurden, verglichen werden mit einer Kostenzurechnung in Anlehnung an den Verkaufspreis der Sortimente („Apportioned inputs allocation“). Dazu wurde, unabhängig von der Aushaltungsvariante, von einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm ausgegangen. Außerdem wurde für Aushaltungsvariante 2 ein durchschnittlicher gewogener Stamm- und Industrieholzpreis von 75 €/Efm⁷⁴ und für Aushaltungsvariante 3 ein durchschnittlicher Stammholzpreis von 85 €/Efm angenommen.

Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz

Die Auswirkungen einer veränderten Kostenzurechnung auf die Bereitstellungskosten von Stamm- und Industrieholz bei Aushaltungsvariante 2 zeigt Abbildung 40. Da nun ein Teil der Einschlags- und Vorlieferkosten nicht mehr dem Stamm- und Industrieholz, sondern dem Hackschnitzelsortiment angerechnet wird, sinken die durchschnittlichen Einschlagskosten für das Stamm- und Industrieholz in diesem Bestand um 2,80 €/Efm (25 %) auf 8,40 €/Efm. In Kombination mit den um 1,70 €/Efm geringeren Kosten für das motormanuelle Fällen und Vorliefern liegen somit die Bereitstellungskosten für das Stamm- und Industrieholz mit 14,20–19,90 €/Efm um durchschnittlich ca. 3,40 €/Efm (16 %) unter den Bereitstellungskosten, die sich nach dem Prinzip der „By-products allocation“ ergeben. Dies bedeutet, dass durch die Aushaltung eines zusätzlichen Sortiments, das als weiterer Kostenträger fungiert, kalkulatorisch eine kostengünstigere Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz erreicht wird und dass mit

⁷⁴ Da bei Berechnung der Stückkosten nicht zwischen Stammholz und Industrieholz differenziert wird, wird auch bei Aufteilung der Kosten in Anlehnung an den Verkaufspreis nicht zwischen diesen beiden Sortimenten unterschieden, sondern ein Durchschnittspreis hinterlegt.

den Sortimenten Stammholz und Industrieholz höhere Nettostückerlöse erwirtschaftet werden können.

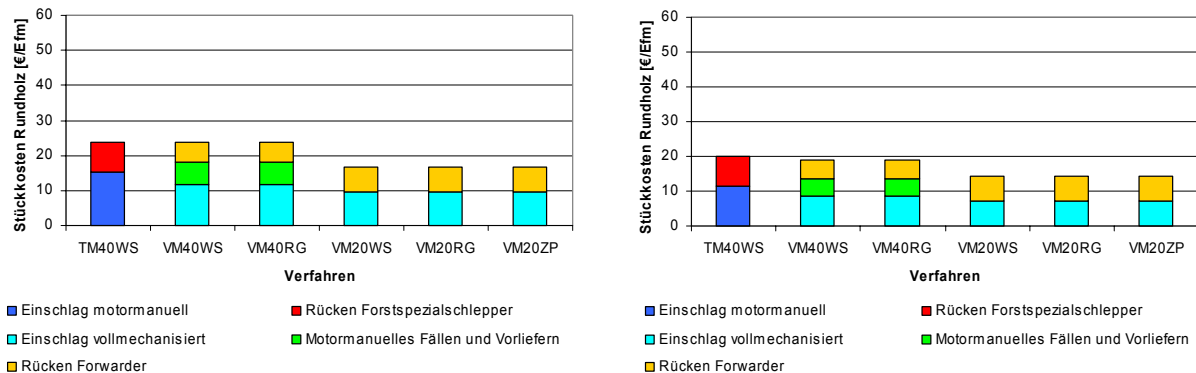


Abbildung 40: Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts

Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln

Durch die anteilige Kostenzurechnung in Anlehnung an den Verkaufspreis werden die Hackschnitzel bei Aushaltungsvariante 2 nun auch mit Kosten für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern belastet. Wie im vorherigen Unterkapitel gezeigt, sinken dadurch die Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz ab. Wie Abbildung 41 zeigt, steigen gleichzeitig aber die Kosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln an. Die linke Abbildung zeigt dabei die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln, wie sie in der vorliegenden Untersuchung bei Aushaltungsvariante 2 nach dem Prinzip der „By-products allocation“ berechnet wurden, die rechte Abbildung zeigt die Stückkosten bei Zurechnung der Kosten in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“).

Dem Hackschnitzelsortiment werden nun Stückkosten von durchschnittlich 10,70 €/Efm für den Einschlag bzw. 6,30 €/Efm für das motormanuelle Fällen und Vorliefern zugerechnet. Insgesamt steigen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln durch die veränderte Kostenzurechnung um durchschnittlich knapp 13 €/Efm (50 %) auf 31,40–54,00 €/Efm. Damit können die Hackschnitzel bei den aktuellen Preisen von 25 €/Efm aufgrund der veränderten Kostenzurechnung nicht mehr kostendeckend verkauft werden.

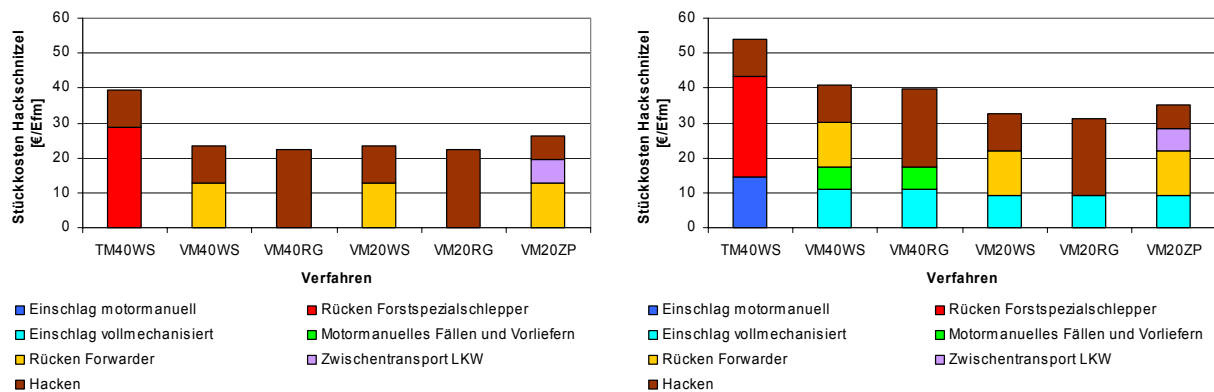


Abbildung 41: Aushaltungsvariante 2: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln, berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts

Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Stammholz

Die Auswirkungen einer veränderten Kostenzurechnung auf die Stückkosten für die Bereitstellung von Stammholz bei Aushaltungsvariante 3 sind in Abbildung 42 dargestellt.

Wie zu erkennen, steigen die Stückkosten für die Bereitstellung des Stammholzes geringfügig, um durchschnittlich ca. 1,40 €/Efm (9 %) auf 16,20–23,20 €/Efm an. Im Gegensatz zu der veränderten Kostenzurechnung für das Stamm- und Industrieholz bei Aushaltungsvariante 2 ist somit bei Aushaltungsvariante 3 eine veränderte Kostenzurechnung für das Stammholz nachteilig, da es nun mit höheren Kosten als bisher belastet wird.

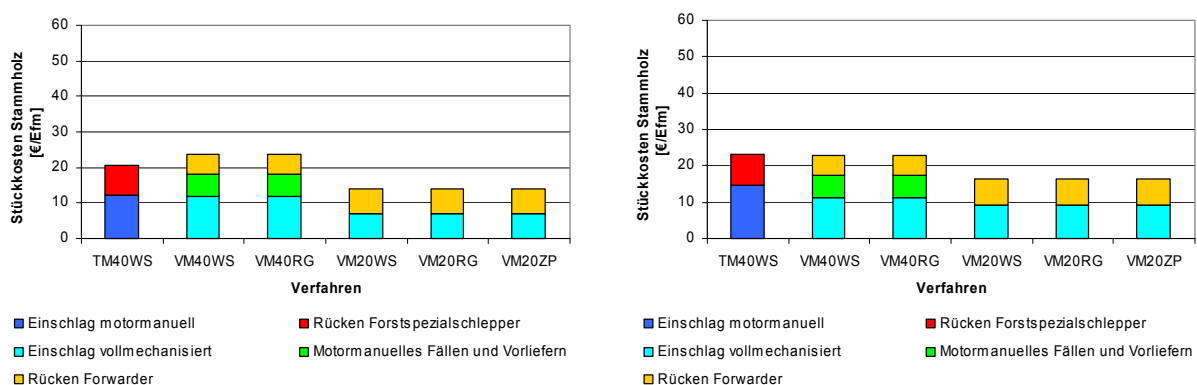


Abbildung 42: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Stammholz, berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts

Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln (Aushaltungsvariante 3)

Die veränderten Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3 zeigt Abbildung 43. Bei dieser Aushaltungsvariante wurden den Hackschnitzeln in der vorliegenden Untersuchung bereits Kosten für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und

Vorliefern des Energieholzes zugerechnet (jeweils basierend auf einer kalkulatorischen Produktivität, siehe Kapitel 5.2 und 5.3.2). Aufgrund dessen ist der Unterschied durch eine veränderte Kostenzurechnung vergleichsweise gering: So steigen die Stückkosten der Verfahren TM40WS, VM40WS und VM40RG im Vergleich zur bisherigen Kostenkalkulation um durchschnittlich lediglich 1,00–3,50 €/Efm (3–10 %) an, während andererseits die Stückkosten der vollmechanisierten Verfahren, die von einem Rückegassenabstand von 20 m ausgehen (VM20WS, VM20RG und VM20ZP) um durchschnittlich 3,70 €/Efm (ca. 13 %) sinken. Die Gesamtkosten bewegen sich im Rahmen zwischen 24,90–35,10 €/Efm (Abbildung 43). Damit liegen die Kosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln durch die veränderte Kostenzurechnung bei Aushaltungsvariante 3 bei fünf der sechs Verfahren über dem angenommenen Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm. Steigt der Hackschnitzelpreis auf 30 €/Efm, so ist mit vier der sechs Verfahren eine wirtschaftliche Hackschnitzelbereitstellung möglich.

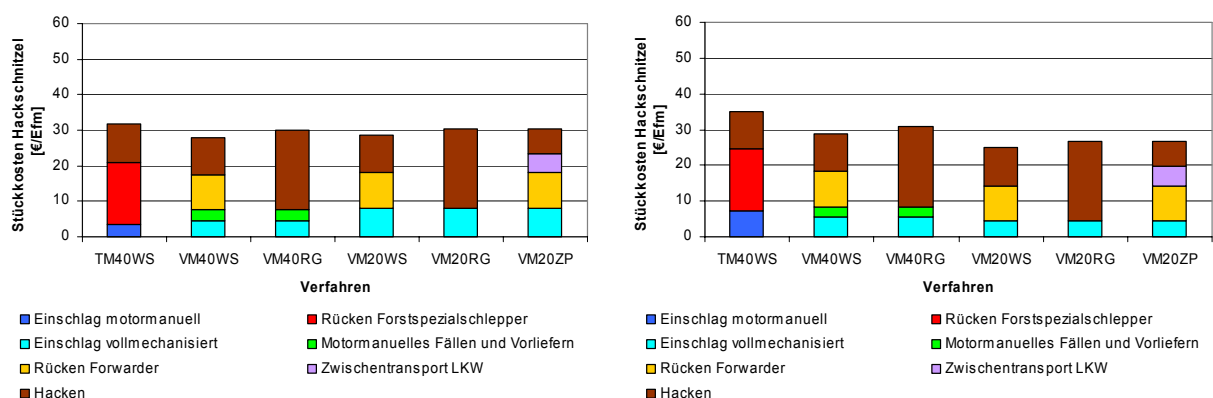


Abbildung 43: Aushaltungsvariante 3: Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln berechnet nach dem Prinzip der „By-products allocation“ (wie in vorliegender Untersuchung), links, und in Anlehnung an den Verkaufspreis („Apportioned inputs allocation“), rechts

Fazit einer veränderten Kostenzurechnung

Zusammenfassend gilt, dass bei Aushaltungsvariante 2 die Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz durch die veränderte Kostenzurechnung sinken. Demgegenüber liegen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln nun deutlich über den bisher berechneten Stückkosten, da den Hackschnitzeln nun auch anteilige Kosten für den Einschlag und das motormanuelle Fällen und Vorliefern zugerechnet werden. Damit ist bei Aushaltungsvariante 2 keine wirtschaftliche Hackschnitzelbereitstellung mehr möglich.

Bei Aushaltungsvariante 3 sind sowohl für die Bereitstellung des Stammholzes wie auch der Hackschnitzel bei allen sechs Verfahren nur geringe Veränderungen in den Stückkosten aufgrund der veränderten Kostenzurechnung zu verzeichnen.

Beim Vergleich der Stückkosten zwischen den Aushaltungsvarianten ist festzustellen, dass im Unterschied zu den bisherigen Berechnungen nun die Stückkosten für das Stammholz bei Aushaltungsvariante 3 um durchschnittlich ca. 3 €/Efm *über* den Stückkosten für das Stamm- und Industrieholz bei Aushaltungsvariante 2 liegen. Gegenteilig verhält es sich mit den Stückkosten für Hackschnitzel: Diese liegen bei Aushaltungsvariante 3 nun um durchschnittlich ca. 10 €/Efm *unter* denen von Aushaltungsvariante 2.

Zu beachten ist, dass die Stückkosten bei beiden Varianten stark von den jeweils aktuellen Verkaufspreisen der Sortimente abhängen, da die Gesamtkosten in Anlehnung an diese aufgeteilt werden. Dies bedeutet auch, dass bspw. bei überproportionalen Preisanstiegen für das Hackschnitzelsortiment gleichzeitig auch die Kosten für die Bereitstellung der Hackschnitzel ansteigen, da diesen dann ein höherer Kostenanteil zugerechnet wird. Damit sind diese Stückkosten weniger stabil, als diejenigen Stückkosten, die ausschließlich auf den für die einzelnen Verfahrensschritte hergeleiteten Produktivitäten basieren und damit grundsätzlich unabhängig von dem jeweils aktuellen Hackschnitzelpreis sind.

Die Entwicklung der Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Abhängigkeit vom Hackschnitzelpreis ist, unter der Annahme von gleich bleibenden Rundholzpreisen, für Aushaltungsvariante 2 in Abbildung 44 dargestellt.

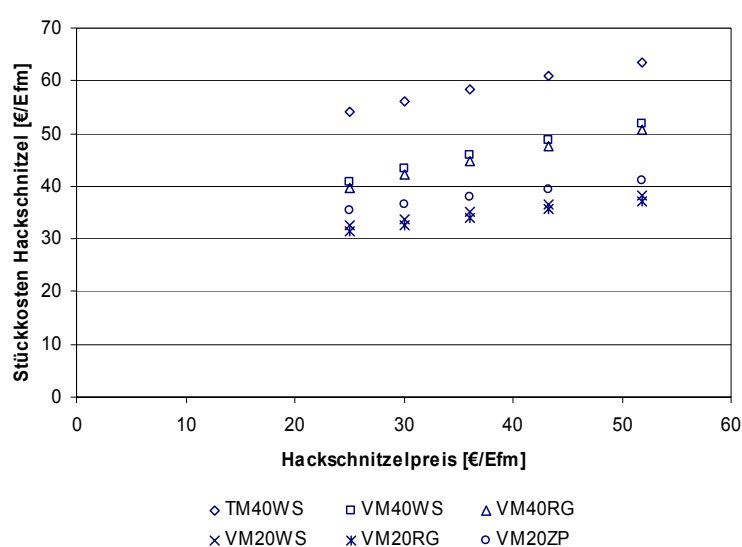


Abbildung 44: Entwicklung der Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei sich ändernden Hackschnitzelpreisen

Geht man von jeweils 20 % höheren Hackschnitzelpreisen aus, so steigen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln um durchschnittlich ca. 2,00 €/Efm an. Prozentual gesehen gilt, dass die Stückkosten des teilmechanisierten Verfahrens (TM40WS) sowie der vollmechanisierten Verfahren VM20WS, VM20RG und VM20ZP für die Bereitstellung von Hackschnitzeln um ca. 4 % ansteigen, wenn der Hackschnitzelpreis um 20 % ansteigt. Die Stückkosten der vollmechanisierten Verfahren VM40WS und VM40RG steigen bei einem um 20 % höheren Hackschnitzelpreis sogar um 6 % an.

Auf die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln von Aushaltungsvariante 3 wirken sich veränderte Hackschnitzelpreise nur in geringerem Maße aus: Diese steigen um lediglich 2–3 % an, wenn der Hackschnitzelpreis um 20 % ansteigt.

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, können diejenigen Kosten, deren Zurechnung auf eines der Sortimente nicht eindeutig möglich ist, auch nach dem Prinzip der „Joint products allocation“, in Anlehnung an die Menge auf die Sortimente aufgeteilt werden. Damit werden den Sortimenten Rundholz und Hackschnitzel Stückkosten in gleicher Höhe zugerechnet. Bezogen auf den untersuchten Bestand NH 251 bedeutet dies bspw., dass entsprechend einem Rundholzanfall

von 83,6 Efm/ha und einem Energieholzanfall von 21,9 Efm/ha (Aushaltungsvariante 2) die Gesamtkosten für den Einschlag (motormanuell oder vollmechanisiert) zu 79 % dem Rundholz und zu 21 % dem Energieholz zugerechnet werden. Die daraus resultierenden Stückkosten bspw. für den vollmechanisierten Einschlag durch Harvester bei einem Rückegassenabstand von 20 m (Gesamtkosten: 795,10 €/ha) betragen somit für das Rundholz und das Energieholz jeweils 7,50 €/Efm. Verschieben sich die Mengen der einzelnen Sortimente untereinander, z.B. durch Nutzung des potenziellen Industrieholzes zur Bereitstellung von Hackschnitzeln und bleibt die Gesamterntemenge gleich (Aushaltungsvariante 3), hat dies keine Veränderungen in den Stückkosten zu Folge. In einem solchen Fall wird zwar ein höheres Volumen an Hackschnitzeln bereitgestellt, diesen wird dann aber auch ein entsprechend höherer Anteil der Gesamtkosten zugerechnet, sodass sich die Stückkosten nicht verändern.

Verglichen mit der Kostenzurechnung in Anlehnung an den Verkaufspreis der Sortimente liegen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Bestand NH 251 bei Aushaltungsvariante 2 durch die Zuordnung der Kosten in Anlehnung an die jeweiligen Erntemengen über alle sechs Verfahren hinweg um durchschnittlich 2,20 €/Efm niedriger. Gleichzeitig steigen die Stückkosten für die Bereitstellung des Rundholzes um durchschnittlich 0,60 €/Efm an. Bei Aushaltungsvariante 3 steigen die Stückkosten für die Bereitstellung der Hackschnitzel durch die Kostenzurechnung in Anlehnung an die Erntemenge um durchschnittlich 4,10 €/Efm an (im Vergleich zu der Kostenzurechnung in Anlehnung an den Preis), während die Stückkosten für die Bereitstellung des Rundholzes um durchschnittlich 2,50 €/Efm absinken.

Wie gezeigt, hat also die Kostenzurechnung einen deutlichen Einfluss auf die Stückkosten der bereitgestellten Sortimente. Welche dieser Kostenzurechnungen letztlich für die Ermittlung der Stückkosten gewählt wird, kann dabei nur durch den Forstbetrieb entschieden werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Stückkosten nicht das einzige Entscheidungskriterium für die Aushaltung bestimmter Sortimente sein sollte. Hier spielt insbesondere auch der Nettoflächenerlös eine wichtige Rolle, auf den im folgenden Kapitel 6.3 ausführlich eingegangen wird. Dieser ändert sich in Abhängigkeit von der Kostenzurechnung nicht.

6.3 Nettoflächenerlöse bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln

Wie in Kapitel 6.2.2 ausgeführt, sollten bei der Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren und eine bestimmte Aushaltungsvariante in einem konkreten Bestand neben den Stückkosten der jeweiligen Sortimente vor allem die daraus resultierenden Nettoflächenerlöse berücksichtigt werden. Die Nettoflächenerlöse setzen sich, wie in Kapitel 4.2.4 erläutert, aus den Bruttoerlösen des Rundholzes und der Hackschnitzel zusammen, abzüglich der jeweiligen Bereitstellungskosten. Nur anhand dieser kann eine fundierte, gesamthafte Entscheidung über das optimale Verfahren und die bestmögliche Aushaltungsvariante in einem Bestand getroffen werden. Tabelle 62 zeigt die Nettoflächenerlöse für die einzelnen Verfahren und Aushaltungsvarianten in den Beispielbeständen. Zugrunde gelegt sind Stamm- und Industrieholzpreise von Januar 2007 (siehe Tabelle 10) und ein Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm.

Tabelle 62: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007; Hackschnitzelpreis 25 €/Efm; in €/ha)

	Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
Aushaltungs- variante 1 (Aushaltung von Stammholz und Industrieholz)	1	TM40WS	4.890	7.042	914	2.510	2.154	4.207
	2	VM40WS	4.899	6.893	648	2.046	2.009	3.922
	3	VM40RG	4.899	6.893	648	2.046	2.009	3.922
	4	VM20WS	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
	5	VM20RG	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
	6	VM20ZP	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
Aushaltungs- variante 2 (Aushaltung von Stammholz, Industrieholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	4.575	7.040	243	2.519	2.021	4.222
	2	VM40WS	4.933	6.968	668	2.171	2.081	4.000
	3	VM40RG	4.957	6.929	729	2.104	2.068	3.957
	4	VM20WS	5.524	7.360	1.071	2.510	2.453	4.312
	5	VM20RG	5.548	7.322	1.132	2.442	2.440	4.269
	6	VM20ZP	5.462	7.322	---	---	---	---
Aushaltungs- variante 3 (Aushaltung von Stammholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	4.407	6.963	14	2.123	1.668	4.092
	2	VM40WS	4.357	6.797	-29	1.745	1.453	3.807
	3	VM40RG	4.281	6.716	-180	1.565	1.319	3.715
	4	VM20WS	4.975	7.195	---	2.099	1.853	4.126
	5	VM20RG	4.899	7.114	---	1.919	1.719	4.034
	6	VM20ZP	4.905	7.162	---	---	---	---

Vergleich der Aushaltungsvarianten

Wie in Tabelle 62 deutlich wird, ist Aushaltungsvariante 2 bei einer vollmechanisierten Bereitstellung von Hackschnitzeln zusätzlich zur Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz in allen sechs Beispielbeständen diejenige Variante, mit der die höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden können (in Tabelle 62 jeweils dunkelgrau hinterlegt). Dieses Ergebnis bestätigt die Ergebnisse der Untersuchung von BONT (2005), nach der durch die Bereitstellung von Hackschnitzeln die Wertschöpfung eines Forstbetriebs gesteigert werden kann. Der Einfluss der zusätzlichen Bereitstellung von Hackschnitzeln auf den Nettoflächenerlös ist aber gering: Der zusätzliche Erlös im Vergleich zu Aushaltungsvariante 1 liegt bei dem angenommenen Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm im Durchschnitt der vollmechanisierten Verfahren über alle Bestände hinweg bei lediglich knapp 60 €/ha (ca. 2,5 %). Mit dem teilmechanisierten Verfahren TM40WS kann bei Aushaltungsvariante 2 der Nettoflächenerlös durch die zusätzliche Bereitstellung von Hackschnitzeln nur in Bestand LH 101 und KI 207 geringfügig gesteigert werden. In den übrigen Beständen sinkt er im Vergleich zu Aushaltungsvariante 1 sogar um durchschnittlich 280 €/ha (ca. 20 %) ab.

Bei Aushaltungsvariante 3 muss aufgrund der Nutzung des potenziellen Industrieholzes zur Bereitstellung von Hackschnitzeln grundsätzlich mit erheblichen finanziellen Einbußen im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 gerechnet werden (Tabelle 62): Wie schon im vorangehenden Kapitel 6.2 gezeigt, können die Kosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3 bei einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm ohnehin nur in wenigen Fällen durch den Verkauf der Hackschnitzel gedeckt werden. Gleichzeitig ist der Nettoerlös des Industrieholzes verhältnismäßig hoch, sodass deshalb bei einer Nutzung des Industrieholzes zur Bereitstellung von Hackschnitzeln der Nettoflächenerlös im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2 um durchschnittlich 410 €/ha (ca. 16 %⁷⁵) niedriger liegt. Damit kann konstatiert werden, dass sich unter diesen Bedingungen eine Nutzung des potenziell anfallenden Industrieholzes zur Bereitstellung von Hackschnitzeln nicht lohnt, sondern stattdessen die Aushaltung von Hackschnitzeln, zusätzlich zur Aushaltung von Stammholz *und* Industrieholz die im Hinblick auf den Nettoflächenerlös optimale Aushaltungsvariante darstellt.

Wie Tabelle 63 zeigt, müsste der Hackschnitzelpreis bei gleich bleibenden Stamm- und Industrieholzpreisen auf 55 €/Efm steigen, um einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz zu rechtfertigen und um dieses stattdessen zusätzlich zu dem übrigen Kronenmaterial einer energetischen Verwertung zuzuführen. In diesem Fall können beim Einsatz aller derjenigen Verfahren, die von einem Hacken des Energieholzes an der Waldstraße bzw. an einem zentralen Platz ausgehen, mit Aushaltungsvariante 3 höhere Nettoflächenerlöse als mit Aushaltungsvariante 2 erzielt werden. Die finanziellen Vorteile sind jedoch im Durchschnitt der vollmechanisierten Verfahren gering und liegen bei lediglich ca. 30 €/ha (1 %). Bei Einsatz des teilmechanisierten Verfahrens können hingegen mit Aushaltungsvariante 3 durchschnittlich um ca. 260 €/ha (13 %) höhere Nettoflächenerlöse als mit Aushaltungsvariante 2 erzielt werden.

Bei einem Hackschnitzelpreis von 55 €/Efm kann der Nettoflächenerlös durch die zusätzliche Bereitstellung von Hackschnitzeln (Aushaltungsvarianten 2 und 3) im Vergleich zu Aushaltungsvariante 1 um durchschnittlich 630 €/ha (ca. 30 %) gesteigert werden. Diese Steigerung fällt in den durchmesserschwachen Beständen mit ca. 730 €/ha deutlich höher aus als in den

⁷⁵ Berechnet ohne Bestand LH 104.

durchmesserstarken Beständen, wo die Steigerung des Nettoflächenerlöses bei ca. 530 €/ha liegt. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass in durchmesserschwachen Beständen mehr Hackschnitzel anfallen als in durchmesserstarken Beständen (siehe Tabelle 6) und erstere deshalb sensibler auf einen sich ändernden Hackschnitzelpreis reagieren.

Steigen die Industrieholzpreise (mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung) ebenfalls an, so ist dann Aushaltungsvariante 2 wieder die Variante, mit der die deutlich höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden können. Dies zeigt Tabelle 70 (im Anhang auf S. 174 zu finden), wo von Hackschnitzelpreisen von 55 €/Efm und gleichzeitig von 50 % höheren Industrieholzpreisen ausgegangen wird. Es wird deutlich, dass dann die Nettoflächenerlöse von Aushaltungsvariante 2 wieder um durchschnittlich knapp 280 €/Efm über den Nettoflächenerlösen von Aushaltungsvariante 3 liegen und sich somit eine Nutzung des potenziellen Industrieholzes als Energieholz nicht mehr lohnt.

Tabelle 63: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007; Hackschnitzelpreis 55 €/Efm; in €/ha)

	Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
Aushaltungs- variante 1 (Aushaltung von Stammholz und Industrieholz)	1	TM40WS	4.890	7.042	914	2.510	2.154	4.207
	2	VM40WS	4.899	6.893	648	2.046	2.009	3.922
	3	VM40RG	4.899	6.893	648	2.046	2.009	3.922
	4	VM20WS	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
	5	VM20RG	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
	6	VM20ZP	5.489	7.285	1.051	2.385	2.381	4.234
Aushaltungs- variante 2 (Aushaltung von Stammholz, Industrieholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	5.232	7.448	1.148	3.164	2.681	4.615
	2	VM40WS	5.590	7.376	1.574	2.816	2.741	4.393
	3	VM40RG	5.614	7.337	1.635	2.748	2.728	4.350
	4	VM20WS	6.181	7.768	1.977	3.155	3.113	4.705
	5	VM20RG	6.205	7.730	2.038	3.087	3.099	4.661
	6	VM20ZP	6.119	7.730	2.090	3.235	3.195	4.754
Aushaltungs- variante 3 (Aushaltung von Stammholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	5.631	7.545	1.754	3.194	3.012	4.700
	2	VM40WS	5.581	7.379	1.711	2.816	2.797	4.416
	3	VM40RG	5.505	7.298	1.560	2.636	2.663	4.324
	4	VM20WS	6.199	7.777	---	3.170	3.197	4.735
	5	VM20RG	6.123	7.696	---	2.990	3.063	4.643
	6	VM20ZP	6.129	7.744	---	3.304	3.365	4.811

Vergleich der Verfahren

Bei Aushaltungsvariante 1 können in fünf der sechs Beispielbestände mit dem vollmechanisierten Verfahren VM20WS die höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden (Tabelle 62). Besonders vorteilhaft ist dieses Verfahren insbesondere in durchmesserschwachen Beständen: In solchen Beständen liegen die Nettoflächenerlöse, die mit diesem Verfahren erzielt werden können, um bis zu 500 €/ha über den Erlösen, die mit den übrigen Verfahren erzielt werden könnten. Lediglich in dem durchmesserstarken Laubholzbestand (LH 101) liegen die Erlöse des teilmechanisierten Verfahrens TM40WS höher als die der vollmechanisierten Verfahren.

Unabhängig von den jeweiligen Industrieholz- bzw. Hackschnitzelpreisen ist bei Aushaltungsvariante 2 das vollmechanisierte Verfahren VM20WS, das von einem Hacken des Energieholzes an der Waldstraße ausgeht in drei der sechs Bestände das im Hinblick auf den Nettoflächenerlös optimale Verfahren. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Untersuchungen von SIKANEN et al. (2007): Diese stellen fest, dass der Einschlag von Rund- und Energieholz mit einem Harvester, Rücken mit einem Forwarder und Hacken des Energieholzes an der Waldstraße das optimale Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln in Kombination mit der Bereitstellung von Rundholz ist. Lediglich in den durchmesserschwachen Fichten- und Laubholzbeständen (NH 251 und LH 104) können durch eine Verlagerung des Hackens auf die Rückegasse (Verfahren VM20RG) höhere Nettoflächenerlöse im Vergleich zum Hacken an der Waldstraße erzielt werden. In dem durchmesserstarken Laubholzbestand (LH 101) stellt sich hingegen das teilmechanisierte Verfahren TM40WS als das optimale Verfahren hinsichtlich des Nettoflächenerlöses dar.

Wie Tabelle 62 zeigt, ist das vollmechanisierte Verfahren VM20WS auch dann in vier der sechs untersuchten Beispielbestände das vorteilhafteste Verfahren, wenn zugunsten einer Produktion von Hackschnitzeln auf die Aushaltung von Industrieholz verzichtet wird (Aushaltungsvariante 3). Die Unterschiede zwischen diesem und den Verfahren VM20RG und VM20ZP sind jedoch verhältnismäßig gering und betragen durchschnittlich weniger als 100 €/ha. Auch die Unterschiede zu den Nettoflächenerlösen, die mit dem teilmechanisierten Verfahren TM40WS erzielt werden können sind insbesondere in durchmesserstarken Beständen gering.

6.4 Zusammenfassung und Bewertung der Beispielkalkulationen

Zusammenfassend gilt, dass im Hinblick auf die **Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz** (Aushaltungsvarianten 1 und 2) die vollmechanisierten Verfahren VM20WS, VM20RG und VM40RG, die von einem Einschlag durch Harvester und Rücken durch Forwarder ausgehen, mit 12,20–19,70 €/Efm in der Mehrheit der Bestände das optimale Verfahren darstellen. Es zeigt sich außerdem, dass der Einsatz vollmechanisierter Verfahren bei einem Rückegassenabstand von 40 m (VM40WS und VM40RG) aus finanzieller Sicht eher nachteilig ist und die Stückkosten dieser Verfahren mit 16,10–29,40 €/Efm noch über den Stückkosten des teilmechanisierten Verfahrens TM40WS (motormanueller Einschlag, Rücken durch Forstspeziialschlepper) liegen. Wird auf die Bereitstellung von Industrieholz verzichtet und ausschließlich Stammholz ausgehalten (Aushaltungsvariante 3), so nimmt insbesondere die Wirtschaftlichkeit des teilmechanisierten Verfahrens TM40WS zu, das dann mit 11,50–20,30 €/Efm in drei der sechs Bestände das kostengünstigste Verfahren ist.

Bei Aushaltungsvariante 2 (Aushaltung von Hackschnitzeln, zusätzlich zu Stamm- und Industrieholz) können mit den Verfahren VM40WS und VM20WS (Rücken durch Forwarder, Hacken an der Waldstraße) mit 19,00–21,70 €/Efm in vier der sechs Beispielbestände die niedrigsten **Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln** erzielt werden. In dem schwachen Nadel- und dem schwachen Laubholzbestand liegen hingegen die Stückkosten der Verfahren VM40RG bzw. VM20RG (Hacken auf der Rückegasse) niedriger. Grundsätzlich sind die Unterschiede in den Stückkosten aber gering, woraus abgeleitet werden kann, dass der Einfluss des Hacksystems geringer ist als bislang angenommen. Bei Aushaltungsvariante 3 (Aushaltung von Stammholz und Hackschnitzeln, Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz) liegen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln im Durchschnitt um 3,20 €/Efm höher im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2, mit 20,60–24,80 €/Efm liegen aber weiterhin die Stückkosten des Verfahrens VM20WS in vier der sechs Beispielbestände am niedrigsten. Unabhängig von der Aushaltungsvariante liegen die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln mit Verfahren TM40WS am höchsten.

Im Hinblick auf den **Nettoflächenerlös** ist das Verfahren VM20WS in der Mehrzahl der Bestände am vorteilhaftesten. Geht man von einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm aus, so liegen die Nettoflächenerlöse bei Aushaltungsvariante 2 in der Regel über den Nettoflächenerlösen der beiden anderen Aushaltungsvarianten. Dabei ist der Mehrerlös durch die zusätzliche Aushaltung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 2 im Vergleich zu Aushaltungsvariante 1 mit ca. 60 €/ha nur gering. Aushaltungsvariante 3 ist bei einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm keine wirtschaftliche Alternative und führt zu Mindererlösen von durchschnittlich ca. 410 €/ha im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2. Gleichbleibende Industrieholzkpreise vorausgesetzt, müsste der Hackschnitzelpreis auf 55 €/Efm steigen, um einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz zu rechtfertigen. Steigen die Industrieholzkpreise jedoch in gleichem Maße wie die Hackschnitzelpreise an, so ist dann Aushaltungsvariante 2 wieder die Variante, mit der die deutlich höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden können.

Die vorgestellten Beispielkalkulationen können nur grobe Anhaltspunkte für die Vorteilhaftigkeit eines Verfahrens oder einer Aushaltungsvariante geben. So sind zum einen die Einschränkungen aufgrund der Modelle selbst zu beachten (siehe Kapitel 5.8 und 5.9), zum

anderen beeinflussen außerdem auch die folgenden Faktoren die Produktivitäten, Stückkosten und Nettoflächenerlöse einer Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln:

Werden bspw. die Aushaltungskriterien für das Stammholz und das Industrieholz (siehe Tabelle 5) modifiziert, so ändert sich einerseits das Erntevolumen insgesamt, es können sich aber auch die Relationen der einzelnen Sortimente zueinander ändern. Beides kann einen entscheidenden Einfluss auf das optimale Verfahren und dessen Wirtschaftlichkeit, die optimale Aushaltungsvariante (Aushaltung von Industrieholz oder nicht) und den Nettoflächenerlös haben. Im Rahmen einer Untersuchung von CREMER (2008) konnte aber am Beispiel eines ca. 40-jährigen Fichtenbestands gezeigt werden, dass sich trotz veränderter Aushaltungskriterien an der Vorteilhaftigkeit der einzelnen Aushaltungsvarianten zueinander keine Änderungen ergeben.

Im Rahmen des Projekts wurde außerdem davon ausgegangen, dass das Stammholz beim Einschlag von bspw. Kiefer zu 15 % der Erntemenge B-Qualität besitzt und 85 % der Erntemenge in C-Qualität anfällt (siehe Tabelle 9). Im Hinblick auf das Industrieholz wurde davon ausgegangen, dass dieses zu 100 % IN-Qualität besitzt und dass kein faules oder krummes Industrieholz anfällt (IF/IK). Sind hier veränderte Anteile der einzelnen Qualitäten zu erwarten, so können die Auswirkungen auf die zu erzielenden Preise und damit auf den Nettoflächenerlös eines Bestandes im Rahmen der Beispielkalkulationen berücksichtigt und die Modelle somit an die Verhältnisse in einem konkreten Bestand angepasst werden.

Auch der Einfluss von unterschiedlichen Hackschnitzelqualitäten auf den zu erzielenden Nettoflächenerlös kann im Rahmen weiterer Beispielkalkulationen dargestellt werden: So ist zu beachten, dass in der Praxis für Hackschnitzel aus unterschiedlichen Baumarten aufgrund des unterschiedlichen spezifischen Heizwerts (Holzdichte) oft unterschiedliche Preise gezahlt werden. So gehen z.B. DIETER und ENGLERT (2001) von deutlich höheren Preisen für Laubholzhackschnitzel aus im Vergleich zu Fichten- und Kiefern hackschnitzeln. Auch ist davon auszugehen, dass für Hackschnitzel mit einem geringeren Wassergehalt aufgrund des daraus resultierenden höheren Heizwerts höhere Preise beim Verkauf erreicht werden können. Die dazu notwendige Trocknung setzt jedoch ein aus Forstschutzgründen bei Nadelholz problematisches Liegenlassen des Energieholzes im Bestand bzw. an der Waldstraße voraus, kann aber auch durch eine geeignete Lagerung der Hackschnitzel erreicht werden (siehe z. B. BALLY et al., 2000). Auch der Feinanteil der Hackschnitzel, der unter anderem durch die Aushaltungsvariante oder den eingesetzten Hacker beeinflusst wird, hat einen Einfluss auf die Qualität und damit auf den Preis der Hackschnitzel (siehe z. B. QM, 2004): So ist bei Aushaltungsvariante 2, wo nur die nach Aushaltung von Stamm- und Industrieholzsortimenten verbleibende Restkrone sowie das Reisigmaterial zur Hackschnitzelproduktion genutzt werden, ein eher hoher Feinanteil zu erwarten. Diese Aussage wird gestützt durch Ergebnisse von CREMER (2007), der bei Untersuchung von Hackschnitzeln aus schwachen Fichtenkronen einen mit 15–30 % überdurchschnittlich hohen Feinanteil feststellte. Umgekehrt ist zu erwarten, dass die Qualität der Hackschnitzel von Aushaltungsvariante 3 aufgrund der Mitnutzung des Industrieholzes als Energieholz besser ist, weshalb für diese Hackschnitzel ein höherer Preis zu erwarten ist.

Damit einher geht auch die Frage nach dem Nährstoffentzug, die ebenfalls die Wahl des optimalen Bereitstellungsverfahrens und der Aushaltungsvariante beeinflussen kann, aber nur für einen konkreten Bestand/Standort zu beantworten ist. So variiert der Nährstoffentzug sowohl in Abhängigkeit von der Aushaltungsvariante (Mitnutzung des Kronenmaterials als Energieholz), als auch in Abhängigkeit vom Bereitstellungsverfahren (unterschiedlicher Grad an

Ernteverlusten) oder von der waldbaulichen Behandlung (Durchforstungsart). Zu dem Einfluss der waldbaulichen Behandlung und der Holznutzung auf den Nährstoffhaushalt in Waldbeständen, wurden von BLOCK et al. (2007) ausführliche Untersuchungen durchgeführt. Weitere Untersuchungen im Spannungsfeld Energieholznutzung versus Nährstoffentzug führten in den letzten Jahren bspw. WILPERT et al. (2007), ETTL et al. (2007a), ETTL und GÖTTLEIN (2007) sowie GÖTTLEIN et al. (2007) durch, die sich eingehend mit den Auswirkungen eines Nährstoffentzugs auf den verbleibenden Bestand sowie dessen monetäre Bewertung befassen. Eine Möglichkeit, um einem (zu) hohen Nährstoffentzug entgegen zu wirken, wäre die Rückführung der Holzaschen in den Wald und damit die Einführung eines Recycling-Kreislaufs für Holzaschen (siehe bspw. FVA, 2002 oder HALLENBARTER, 2002). Eine andere Möglichkeit wäre es, die Krone nach Aushaltung der Sortimente nicht unbearbeitet an der Rückegasse abzulegen, sondern diese auf die gleiche Weise wie das Stammholz und das Industrieholz zu entasten und nur dieses entastete Kronenstück als Energieholz zu nutzen. Damit würde nahezu das gesamte Reisigmaterial im Bestand verbleiben und es könnte so einem übermäßigen Nährstoffentzug vorgebeugt werden. Gleichzeitig wäre der Feinanteil der Hackschnitzel geringer und deren Qualität damit eine bessere. Andererseits geht bspw. der Nachhaltigkeitsbeirat der Landesregierung Baden-Württemberg in seinem jüngsten Gutachten davon aus, dass „nach Jahrzehnten mit diffusen Nährstoffeinträgen in die Wälder (...) ein Nährstoffaustrag generell wünschenswert [ist]“ (NBBW, 2008). In diesem Gutachten wird der Nährstoffaustrag aus ökologischer Sicht eher als positiv bewertet und es wird deshalb sogar eine verstärkte Nutzung von Restholz und Pflegeanfällen aus dem Wald als Energieträger empfohlen.

Ein weiterer Punkt, der bei Planung einer Holzerntemaßnahme in einem konkreten Bestand beachtet werden muss, ist die Befahrungsempfindlichkeit des Waldbodens, aufgrund derer auf bestimmten Standorten nicht alle Verfahren gleichermaßen eingesetzt werden können. So kann sich bspw. auf sensiblen Böden der Einsatz eines (schweren) Hackers auf der Rückegasse verbieten und das Energieholz sollte stattdessen trotz der unter Umständen höheren Kosten mit einem verhältnismäßig leichten Forstspezialschlepper an die Waldstraße gerückt werden. Allerdings werden Waldböden in der Regel schon bei der ersten Überfahrt mit einer Forstmaschine so stark verdichtet, dass beim zweiten Überfahren auf derselben Fahrspur mit der gleichen Belastung keine weitere Verdichtung stattfindet (siehe SCHÄFFER, 2002). Dieser Bodenverdichtung kann nach SCHÄFFER (2002) auch durch das Belassen einer Reisigmatte nicht entgegen gewirkt werden, da durch diese zwar die visuell erkennbaren Schäden im Bestand deutlich geringer ausfallen, aber dennoch nach der Befahrung eine nachhaltige Funktionsstörung im Boden auftritt. Insofern kommt auch dem Argument des „Belassens einer Reisigmatte im Bestand“ bei der Entscheidung für eine der drei untersuchten Aushaltungsvarianten eine eher untergeordnete Rolle zu.

Alle genannten Punkte müssen bei der Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Verfahren bzw. Aushaltungsvariante ergänzend zur Produktivität, den Stückkosten und den Nettoflächenerlösen berücksichtigt werden. Dabei zeigt die Erfahrung, dass oft auch politische Beweggründe (z. B. Versorgung eines Zellstoffwerks zur Sicherung der Arbeitsplätze oder Bereitstellung von Biomasse aus dem eigenen Gemeindewald für ein kommunales Heizwerk) eine Rolle spielen, wie im Übrigen auch die Nutzungskonkurrenz zu den bisherigen Holzabnehmern aus der Holzverarbeitenden Industrie. Damit können die Erkenntnisse aus der Anwendung der vorgestellten Produktivitätsmodelle bei der Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Verfahren und eine bestimmte Aushaltungsvariante zwar nicht alleine zielführend sein, ihre Ergebnisse können aber die Entscheidung stützen und auf eine rationale Basis stellen.

7 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die Nachfrage nach Holz zur Energieerzeugung, parallel zu einer verstärkten Nutzung von Stamm- und Industrieholz, in Deutschland eine starke Steigerung erfahren. Dabei wird die Bereitstellung von Hackschnitzeln aus dem Wald zur energetischen Verwertung inzwischen auch von der Forstwirtschaft als ein Geschäftsfeld angesehen, das Chancen für eine Erweiterung der Produktpalette und somit für eine weitere Einnahmequelle bietet. Wie die Bundeswaldinventur II ausweist, stehen dieser ausgeweiteten Nachfrage durchaus entsprechende naturale Nutzungspotenziale gegenüber. Bei der Realisierung dieser Potenziale sehen sich die Forstbetriebe jedoch Unsicherheiten und Schwierigkeiten gegenüber.

Zum einen ist unklar, mit welchen Produktivitäten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln in einem konkreten Bestand zu rechnen ist, und welche Stückkosten daraus resultieren. Auch ist nicht bekannt, inwieweit die Bereitstellung von Hackschnitzeln einen Einfluss auf die Produktivität der gleichzeitigen Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz hat. Darüber hinaus stehen Forstbetriebe vor der Wahl, nur das bisher ungenutzt im Bestand verbleibende Kronenmaterial für eine energetische Verwertung zu nutzen, oder aber zusätzlich dazu auch das qualitativ schlechtere Holz (Industrieholz), das bisher einer stofflichen Verwertung zugeführt wurde, zur Bereitstellung von Hackschnitzeln zur energetischen Verwertung zu nutzen. Hier fehlt ein Decision Support System, mit dem auf einer rationalen Grundlage darüber entschieden werden kann, welches Verfahren in einem konkreten Bestand optimalerweise zum Einsatz kommen und welche Sortimenten (Stammholz, Industrieholz und/oder Hackschnitzel) dabei ausgehalten werden sollten.

Um die Grundlage für ein solches System zu schaffen, wurde eine **Metaanalyse** zur Ableitung von allgemein gültigen Produktivitätswerten für Verfahren bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln durchgeführt. Dazu wurden im Rahmen einer breit angelegten Literaturrecherche relevante Studien aus dem Zeitraum 1996–2007 über die Produktivität verschiedener Verfahren bei der Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln sowie die jeweils individuellen Rahmenbedingungen erfasst und aufbereitet. Anschließend wurden die gesammelten Produktivitätswerte gesamthaft statistisch ausgewertet und mit Hilfe multipler Regressionen systematisch analysiert. Die Produktivitäten wurden dabei getrennt für Rundholz und Hackschnitzel sowie getrennt nach den einzelnen Verfahrensschritten (z. B. Einschlag, Rücken, Hacken) und den technischen Ausprägungen (z.B. motormanuell/vollmechanisiert) erfasst und analysiert. Waren bereits hinreichend aussagekräftige und abgesicherte Modelle vorhanden, wurden diese mit ggf. leichten Modifikationen verwendet.

Darauf aufbauend wurden für konkrete Bestände **Beispielkalkulationen** durchgeführt, um damit die Modelle zu überprüfen und um Empfehlungen bezüglich geeigneter Verfahren für die Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln zu erarbeiten. Dazu wurden sechs Bestände (Fichte, Kiefer, Laubholz, jeweils ca. 40-jährig und ca. 80–90-jährig) detailliert hinsichtlich ihrer Struktur aufgenommen und auf diese die erarbeiteten Produktivitätsmodelle angewendet. Um in diesen Beständen die gesamte Bereitstellung sowohl von Rundholz wie auch von Hackschnitzeln abzubilden, wurden die einzelnen Verfahrensschritte modular zu sechs verschiedenen Verfahren zusammengestellt. Diese Verfahren unterscheiden sich insbesondere in ihrem Mechanisierungsgrad (teilmechanisiert/vollmechanisiert) und in dem Ort, an dem der Hackprozess stattfindet (Rückegasse, Waldstraße, zentraler Platz). Um außerdem Hinweise über die Konsequenzen unterschiedlicher Aushaltungsstrategien zu erhalten, wurden weiterhin drei

verschiedene Aushaltungsvarianten untersucht: Bei Aushaltungsvariante 1 wurde von einer Bereitstellung von ausschließlich Stamm- und Industrieholz ausgegangen. Aushaltungsvariante 2 geht von einer Bereitstellung von Stammholz, Industrieholz und Hackschnitzeln aus, während bei Aushaltungsvariante 3 ausschließlich Stammholz und Hackschnitzel ausgehalten werden; es wird also auf die Aushaltung von Industrieholz verzichtet und dieses stattdessen komplett dem Hackschnitzelsortiment zugerechnet. Aus den Produktivitäten, die für die Verfahrensschritte in den jeweiligen Beständen und für die jeweiligen Aushaltungsvarianten ermittelt wurden, wurden dann unter Zugrundelegung aktueller Stundensätze die Stückkosten für die jeweils ausgehaltenen Sortimente berechnet. Unter Rückgriff auf aktuelle Stamm- und Industrieholzepreise sowie variierende Hackschnitzelpreise wurden daraus wiederum für die verschiedenen Verfahren und Aushaltungsvarianten die in einem konkreten Bestand zu erwartenden Stückerlöse (Deckungsbeitrag 1) sowie unter Berücksichtigung des jeweiligen flächenbezogenen Hiebsanfalls die Nettoflächenerlöse berechnet.

Bei der Herleitung der Produktivitätsmodelle im Rahmen der Metaanalyse zeigte sich, dass in nahezu allen Modellen der BHD des ausscheidenden Bestands die mit Abstand wichtigste Einflussvariable auf die Produktivität ist. Dabei steigt dieser Einfluss erwartungsgemäß mit zunehmendem BHD an. Lediglich beim Hacken des Energieholzes konnte keine direkte Abhängigkeit der Produktivität vom BHD identifiziert werden. Als weitere wichtige Einflussvariable auf die Produktivität wurden zum einen der Rund- bzw. Energieholzanfall je Hektar und zum anderen der Rückegassenabstand identifiziert. Dabei ist bei einer Vergrößerung des Rückegassenabstands von 20 m auf 40 m für Harvester beim Einschlag von Rundholz von einer leicht sinkenden Produktivität auszugehen. Demgegenüber nimmt die Produktivität von Forwardern und Forstspezialschleppern beim Rücken von Rund- und Energieholz mit zunehmendem Rückegassenabstand zu. Außerdem hat auch ein steigender Zopfdurchmesser einen positiven Einfluss auf die Produktivität von Forwardern beim Rücken von Energieholz. Für andere Variablen, wie z. B. die Flächengröße oder die Hangneigung konnte kein signifikanter Einfluss auf die Produktivität festgestellt werden. Auch für die Rückeentfernung war im Rahmen der Metaanalyse kein Einfluss nachweisbar. Dies könnte an der geringen Anzahl an Fällen liegen, in denen Angaben zu dieser Variablen gemacht werden.

Grundsätzlich zeigte sich das Instrument der Metaanalyse gut geeignet für die Ableitung von Produktivitätsmodellen. Auch konnten beim Vergleich der eigenen Modelle mit Modellen oder Einzelergebnissen anderer Autoren hohe Übereinstimmungen festgestellt werden. Allerdings zeigte sich, dass die Anzahl der Fälle, die für die einzelnen Verfahrensschritte in die Metaanalyse einbezogen werden konnten, stark variierte: Konnten z. B. für den Einschlag von Rundholz mehr als 1.000 Fälle berücksichtigt werden, lagen für andere Verfahrensschritte z. T. weniger als 20 Fälle vor. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass in den Versuchsberichten in vielen Fällen Angaben zu wichtigen produktivitätsbeeinflussenden Variablen wie z. B. dem Zopfdurchmesser oder dem Energieholzanfall je Hektar fehlten und die Fälle deshalb nicht in umfassende Analysen einbezogen werden konnten. Aufgrund der in manchen Fällen geringen Fallanzahl konnten nicht für alle untersuchten Verfahrensschritte statistisch gut abgesicherte Produktivitätsmodelle erarbeitet werden. Dabei ist die Datengrundlage insbesondere bei Modellen für die Bereitstellung von Energieholz gering, da über das relativ neue Feld der Hackschnitzelbereitstellung naturgemäß erst relativ wenige systematische Studien existieren. Aufgrund dessen decken ein Teil der Modelle auch nicht das gesamte mögliche Durchmesserpektrum ab. Deshalb konnten z. T. zwar erste Anhaltspunkte für die Produktivität gewisser Verfahrensschritte abgeleitet werden, es musste aber in Kauf genommen werden,

dass die Produktivität im konkreten Bestand von der errechneten Produktivität deutlich abweichen kann. Zur Verbesserung der Datengrundlage und damit zur besseren Absicherung der Produktivitätsmodelle ist deshalb die Durchführung weiterer Primäruntersuchungen unabdingbar. Im Rahmen dieser Untersuchungen sollten möglichst viele weitere potenzielle Einflussvariablen systematisch quantitativ erfasst und dokumentiert werden. Des Weiteren zeigte sich, dass im Rahmen einer Metaanalyse nicht alle derjenigen Variablen erfasst und berücksichtigt werden können, die die Produktivität eines Verfahrens beeinflussen. Hier sind insbesondere schwer quantifizierbare sachliche Variablen wie z.B. der Grad der Vorkonzentration des Energieholzes oder die Geländeverhältnisse, aber auch personenbezogene Variablen wie der Übungsstand oder der Gesundheitszustand des Maschinenführers bzw. dessen Tagesform zu nennen. Das Fehlen solcher Variablen in den Modellen zeigt sich unter anderem an den z.T. geringen Bestimmtheitsmaßen. Auch folgen die standardisierten Residuen einiger Modelle offensichtlich nicht einer Normalverteilung. Beides weist darauf hin, dass weitere Variablen in das Modell aufgenommen werden sollten, um so den Erklärungsgehalt des Modells zu verbessern.

Im Rahmen der Beispielkalkulationen für konkrete Bestände zeigte sich, dass die vollmechanisierte Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz mit Harvester und Forwarder und einem Rückegassenabstand von 20 m in der Mehrheit der Fälle, d.h. im Nadelholz und im Laubschwachholz das wirtschaftlich optimale Verfahren darstellt. Auch wird deutlich, dass bei vollmechanisierten Verfahren und einem Rückegassenabstand von 40 m mit Produktivitätseinbußen der Harvester von ca. 10–40 % zu rechnen ist. Der motormanuelle Einschlag und das Rücken durch einen Forstspezialschlepper sind vor allem in Laubholzbeständen wirtschaftlich konkurrenzfähig zur vollmechanisierten Bereitstellung. Werden zusätzlich zum Stamm- und Industrieholz auch Hackschnitzel bereitgestellt (Aushaltungsvariante 2), so werden in der Mehrzahl der Bestände beim Rücken des Energieholzes mit einem Forwarder und nachfolgendem Hacken an der Waldstraße die niedrigsten Stückkosten erreicht. Ausnahme sind die durchmesserschwachen Fichten- bzw. Laubholzbestände, in denen ein Hacken des Energieholzes auf der Rückegasse die kostengünstigere Alternative darstellt. Grundsätzlich sind die Unterschiede in den Stückkosten zwischen den Verfahren aber gering und der Einfluss des Hacksystems scheint geringer, als im Allgemeinen angenommen. Verzichtet man zugunsten der Hackschnitzel auf die Aushaltung von Industrieholz (Aushaltungsvariante 3), so liegen die Stückkosten für deren Bereitstellung grundsätzlich um durchschnittlich ca. 3,20 €/Efm höher im Vergleich zu Aushaltungsvariante 2. Auch in diesem Fall liegen die Stückkosten für die Bereitstellung der Hackschnitzel in der Mehrzahl der Bestände beim Einsatz des vollmechanisierten Verfahrens (Einschlag mit einem Harvester, Rücken mit einem Forwarder und Hacken an der Waldstraße) am niedrigsten. Die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln mit dem teilmechanisierten Verfahren (Motormanueller Einschlag, Rücken mit einem Forstspezialschlepper und Hacken an der Waldstraße) liegen in der Mehrzahl der Bestände am höchsten.

In der vorliegenden Arbeit werden diejenigen Kosten, die nicht eindeutig einem der Sortimente (Rundholz oder Hackschnitzel) zugerechnet werden konnten, dem Prinzip der „By-products allocation“ folgend dem Rundholz als Hauptprodukt zugerechnet. Werden diese Kosten stattdessen gemäß dem Prinzip der „Apportioned inputs allocation“ im Verhältnis zum Verkaufspreis der Sortimente aufgeteilt, so sinken bei Aushaltungsvariante 2 die Stückkosten für die Bereitstellung von Stamm- und Industrieholz um durchschnittlich 3,40 €/Efm, während die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln dann um durchschnittlich knapp 13,00 €/Efm über den bisher berechneten Stückkosten liegen. Damit ist bei Aushaltungsvariante 2 keine

wirtschaftliche Hackschnitzelbereitstellung mehr möglich. Demgegenüber sind bei Aushaltungsvariante 3 sowohl für die Bereitstellung des Stammholzes wie auch der Hackschnitzel nur geringe Veränderungen der Stückkosten aufgrund der veränderten Kostenzurechnung zu verzeichnen. Werden die Kosten in Anlehnung an das jeweilige Volumen der Sortimente aufgeteilt, so werden den Sortimenten Rundholz und Hackschnitzeln jeweils Stückkosten in gleicher Höhe zugerechnet. Dadurch sinken die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln im untersuchten Bestand NH 251 bei Aushaltungsvariante 2 um durchschnittlich ca. 2,20 €/Efm ab, während die Stückkosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln bei Aushaltungsvariante 3 um durchschnittlich 4,10 €/Efm ansteigen.

Die Vorteilhaftigkeit der vollmechanisierten Verfahren zeigt sich auch bei Berechnung der Nettoflächenerlöse, d. h. bei flächenbezogener Betrachtung der jeweiligen Stückkosten für die Bereitstellung von Rundholz und Hackschnitzeln und der entsprechenden Preise für diese Sortimente: Unabhängig von der Aushaltungsvariante können in der Mehrzahl der Bestände bei einem Einschlag des Holzes durch einen Harvester, Rücken durch Forwarder und Hacken des Energieholzes an der Waldstraße die höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden.

Vergleicht man die verschiedenen Aushaltungsvarianten miteinander, so können bei einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm mit Aushaltungsvariante 2 (Aushaltung von Stammholz, Industrieholz und Hackschnitzeln) die höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden. Der Mehrerlös durch die zusätzliche Bereitstellung von Hackschnitzeln ist im Vergleich zu Aushaltungsvariante 1 mit durchschnittlich ca. 60 €/ha aber gering. Aushaltungsvariante 3 ist bei einem Hackschnitzelpreis von 25 €/Efm keine wirtschaftliche Alternative und führt zu Mindererlösen gegenüber Aushaltungsvariante 2 von durchschnittlich 410 €/ha. Gleichbleibende Industrieholzepreise vorausgesetzt, müsste der Hackschnitzelpreis auf 55 €/Efm steigen, um einen Verzicht auf die Aushaltung von Industrieholz zu rechtfertigen. Steigen die Industrieholzepreise jedoch in gleichem Maße wie die Hackschnitzelpreise an, so ist dann Aushaltungsvariante 2 wieder die Variante, mit der die deutlich höchsten Nettoflächenerlöse erzielt werden können.

Bei Bewertung der vorgestellten Ergebnisse ist zu beachten, dass die Nettoflächenerlöse durch weitere Faktoren wie z. B. veränderte Aushaltungskriterien oder unterschiedliche Hackschnitzelpreise aufgrund von Unterschieden in der Baumart oder Qualität beeinflusst werden. Dennoch kann mit den vorgestellten Produktivitätsmodellen mit nur wenigen Eingangsvariablen für einen konkreten Bestand die Produktivität verschiedener Verfahren für die Bereitstellung von Hackschnitzeln und Rundholz abgeschätzt werden. Werden daraus die zu erwartenden Stückkosten und Nettoflächenerlöse abgeleitet, so können unterschiedliche Optionen für die Versorgung von Unternehmen der Holzverarbeitenden Industrie und/oder von Holzheiz(kraft)werken geprüft und so der Rohstoff Biomasse bestmöglich eingesetzt werden.

8 Summary

Simultaneously to a growing demand for stem wood and pulpwood, the demand for wood chips in Germany has strongly increased. Meanwhile, the supply of wood chips is seen as an opportunity for forest enterprises to extend their product range and therewith to create an additional income. As the national forest inventory shows, this increasing demand can be covered by the wood potential that is available in Germany's forests. When realizing these potentials, forest enterprises are facing several uncertainties and problems, as it is not known, which productivities and costs can be expected in a concrete stand when supplying wood chips. Additionally, it is uncertain, if and in which way the additional supply of wood chips influences the productivity when supplying stem wood and pulpwood. Thirdly, forest enterprises face the choice of sorting wood with a low quality in dependency of the price as pulpwood or as wood chips for an energetic utilization instead. Here, a decision support system is missing, that allows forest enterprises to decide on a rational basis on the optimal supply chain with which a harvesting measure is realized and on the assortments (stem wood, pulpwood and/or wood chips) that are produced ideally.

To remedy the lack of information that was mentioned above, a **meta-analysis** was conducted to derive general models for the productivity of different supply chains when supplying round wood (stem wood and pulpwood) and wood chips. Carrying out a broad literature research, relevant data from 1996–2007 about the productivity of different chains when supplying round wood and wood chips were collected and processed. This was done separately for round wood and wood chips, as well as separately for the single steps of a supply chain (for example logging with harvester or motor manually, skidding with forestry tractor or with forwarder and chipping). Following this, the productivity values were evaluated statistically and analysed systematically using multiple regressions. If well proven and reliable productivity models were already available, these models were used, if necessary with little modifications.

Based on this, **exemplary calculations** were done using the data of real stands. Therewith, the functioning of the models was proven and recommendations could be given about suitable chains for the supply of round wood and wood chips. To apply the productivity models on, the structure of six stands (two spruce stands, two pine stands and two hardwood stands, respectively 40 and 80–90 years old) has been measured detailed. To display the whole supply chain, the single steps were assorted modularly to six different supply chains. These supply chains differ in their degree of mechanization (partly mechanized/fully mechanized) and in the respective place of chipping (on strip road, at roadside, at landing). To get more information about the optimal sorting in a stand, three sorting variants have been analysed: Sorting variant 1 assumes a sorting of stem wood and pulpwood, sorting variant 2 assumes an additional sorting of wood chips and sorting variant 3 assumes a sorting of stem wood and wood chips and a waiving on the sorting of pulpwood; here, the pulp wood is used for the production of wood chips as well. Combining the productivities that were calculated for the single steps in the respective stands and sorting variants with current hourly rates, the costs per m³ for the different assortments could be calculated. In combination with current round wood prices and varying prices for wood chips, net profits per hectare could be calculated for different supply chains and sorting variants in a concrete stand.

When deriving the productivity models within the meta-analysis, it could be shown that the DBH of the trees to be taken out is generally the most important predictor variable for the productivity.

With an increasing DBH, productivity increases, too. Only when chipping energy wood, no significant influence of the DBH could be identified. Another important predictor variable is the distance of the strip roads. If this distance is increased from 20 m to 40 m, a slightly lower productivity of the harvesters when logging round wood can be expected. In opposite to this, the productivity of forwarders and forestry tractors when skidding round wood and energy wood increases when distance of strip roads is 20 m in comparison to a distance of strip roads of 40 m. Another relevant predictor variable is the top end diameter, which has a positive influence on forwarders when skidding energy wood (a higher top end diameter leads to a higher productivity). For other variables like the area or the slope of a stand, no significant influence on the productivity could be shown. For the skidding distance, no significant influence could be shown in the meta-analysis, too. The reason for this could be the small number of cases in which the skidding distance was specified.

In principle, the instrument meta-analysis is well suitable for deriving productivity models. When comparing the models with models of other authors, a high congruence in the results could be found. On the other hand, the number of cases that could be included into the meta-analysis was varying strongly between the respective models: For the logging of round wood with harvesters, more than 1.000 cases could be taken into account whereas for other models only less than 20 cases were available. One of the reasons for this was, that in many cases information for important variables like top end diameter or harvesting volume of energy wood were missing. Therefore, these cases could not be included in the analyses. Another reason is that up to now, only few scientific and systematic studies exist for the supply of wood chips. Therefore, these models show a rather small basis of data and some of the models rather show trends than statistically highly significant results. That is why the productivity of a machine in a concrete stand can vary considerably from the productivity that was calculated before using the productivity models. To increase the significance of the models and to secure the results that were obtained in this study, it is therefore recommended, to conduct more primary studies. In these studies, as many variables as possible that may have an influence on the productivity, should be researched and documented systematically. Furthermore, it could be noted that not all of the variables, that have an influence on the productivity of a supply chain can be taken into account in a meta-analysis. Here, especially variables like the pre-concentration of the energy wood have to be mentioned, as well as variables like the physical health and the mental condition of the machine operator. When looking at the partly rather low coefficients of determination (R^2), it can be seen, that variables like these could improve the significance of a model. In addition to this, the standardized residuals often deviate from the normal distribution, which supports the conclusion that including more variables in the model would improve its significance.

After doing the exemplary calculations it can be stated, that a fully mechanized supply of round wood with a strip road distance of 20 m is economically seen as the optimal supply chain. Additionally it can be shown, that harvesters have a productivity that is 10–40 % lower when working with a strip road distance of 40 m in comparison to a strip road distance of 20 m. Especially in hardwood stands, partly mechanized supply chains (chain saw and forestry tractor) can compete with fully mechanized supply chains when supplying round wood. If wood chips are supplied in addition to stem wood and pulpwood (sorting variant 2), lowest costs for wood chips are reached when skidding the energy wood with a forwarder and chipping at roadside. Exclusions are small-diametered spruce and hardwood stands: In these stands, chipping on strip road is the more favourable solution. In principle, the differences between the

supply chains are low as well as the influence of the place of chipping. If no pulpwood is produced (sorting variant 3), costs per piece for wood chips are on the average 3,20 €/m³ higher in comparison to sorting variant 2. Still, felling the energy wood with a harvester, skidding with a forwarder and chipping at roadside remains the favourable supply chain in most of the stands. Using a partly mechanized supply chain (motor manual felling, skidding with a forestry tractor and chipping at roadside), costs for wood chips are highest in the majority of the stands.

In this work, the costs per piece have been calculated following the principle of “by-products allocation”. This means, that those costs that could not be clearly allocated to one of the assortments (round wood/wood chips), were allocated to the round wood, as the main product of the production process. If these costs are allocated in dependency on the price of the assortments (“apportioned inputs allocation”), then costs per piece for the supply of stem and industrial wood drop by 3,40 €/m³ on the average, whereas costs per piece for the supply of wood chips raise by 13,00 €/m³ in comparison to the costs per piece that were calculated before. Following this, an economic supply of wood chips is not possible with respect to sorting variant 2. With respect to sorting variant 3, the changes in cost allocation only have little influence on costs per piece for the supply of stem wood as well as for the supply of wood chips. If costs are allocated following the respective harvesting volume of the assortments, costs per piece for the supply of round wood and wood chips are the same. Thereby, costs per piece for the supply of wood chips drop due to changes in cost allocation by 2,20 €/m³ on the average (sorting variant 2). Looking at sorting variant 3, an average increase of costs per piece for the supply of wood chips by 4,10 €/m³ can be noted.

The advantage of the fully mechanized supply chains can also be seen when looking at the net profit per hectare, which is, independent from the sorting variant, highest, when the logging of the round wood and the energy wood is done with a harvester, skidding is done using a forwarder and the energy wood is then chipped at roadside.

Assuming a price for the wood chips of 25 €/m³, it can be shown, that net profits per hectare are highest with sorting variant 2. Still, the additional net profit per hectare through the supply of wood chips is comparably low (approx. 60 €/ha in average). With sorting variant 3, net profits per hectare in the same stand are approx. 410 €/ha lower in comparison to sorting variant 2. Assuming constant prices for pulp wood, prices for wood chips would have to rise up to 55 €/m³ to justify a waiving on the production of pulp wood. If prices for pulp wood rise, too, then again sorting variant 2 is the variant with which the highest net profits per hectare can be gained.

It has to be considered, that net profits per hectare are influenced by many other factors: One example are changes in the sorting criteria, that influence the net profits, as well as differing prices for wood chips due to differences in tree species or quality (different heating value, different water contents or different fine fractions due to changes in sorting). Still, with the presented models it is possible to calculate the productivity of different supply chains for round wood and wood chips in a concrete stand using only a few selected variables. If costs per m³ and net profits are derived out of that, different options for the supply of the wood-working industry or biomass heating (power) plants can be proven. Based on this, forest enterprises can build up and develop their business area “wood chips” systematically, to manage and to utilize the resource biomass in the best possible way.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Im Rahmen der Metaanalyse verwendete Quellen

- ASIKAINEN, A. und PULKKINEN, P. (1998): Comminution of Logging residues with Evolution 910R chipper, MOHA chipper truck and Morbark 1200 tub grinder. *International Journal of Forest Engineering* 9 (1): S. 47–53
- BASSE, D., WASSERMANN, H., NIER, J. (2002): Energieholzproduktion. Teil 3. Waldhackschnitzel. *Forst und Technik* 14 (10): S. 20–22
- CREMER, T. (2007): Mobilisierung und wirtschaftliche Nutzung von Rohholz aus Wald und Landschaft zur Energieerzeugung. Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, zur Vorlage bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 257 S.
- CREMER, T., und VELAZQUEZ-MARTI, B. (2007): Evaluation of two harvesting systems for the supply of wood-chips in Norway spruce forests affected by bark beetles. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28 (2): S. 145–155
- CREMER, T., LECHNER, H., LAUG, S. (2007): Durchforstung von Wegrandkorridoren als effiziente Alternative der Energieholzbereitstellung? Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg zur Vorlage beim Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 66 S.
- CREMER, T., LECHNER, H., ZAHN, B., KNÖRZER, B. (2006): Die Lösung für eine kostendeckende Bereitstellung von Hackmaterial? *AFZ-DerWald* (13): S. 688–690
- DESROCHERS, L., PUTTOCK, D., RYANS, M. (1993): The economics of chipping logging residues at roadside: a study of three systems. *Biomass & Bioenergy* (6): S. 401–411
- EST (2000): Tarifvertrag über die Entlohnung von Holzerntearbeiten nach dem Erweiterten Sortentarif (EST) vom 3.5.1979. Änderungsvertrag Nr. 17 und Nr. 5 vom 19. September 2000
- FELLER, S. und RIEDELBERGER, M. (2001): Hackschnitzelbereitstellung mit dem Timberchipper. *Forst und Technik* (4): S. 4–8
- GEWECKE, M. (2004): Bündelung von Ast- und Kronenmaterial – Eine Lösung zur effizienten Bioenergiebereitstellung in Mitteleuropa? Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 119 S.
- KANZIAN, C., FENZ, B., HOLZLEITNER, F., STAMPFER, K. (2006): Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass - Fallbeispiele im Laub- und Nadelholz. Forschungsbericht des Departments für Wald- und Bodenwissenschaften der BOKU Wien
- KWF (2005): Holzernteverfahren. [CD-ROM]

- LECHNER, H. (2004): Quantifizierung der Auswirkungen einer Variation von Eingriffsintensität und Sortenbildung auf Massenanzahl und Kosten bei der Energieholzbereitstellung am Beispiel verschiedener waldbaulicher Ausgangssituationen. Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 159 S.
- LECHNER, H. (2007): Integriertes Konzept zur rationellen Rohholzbereitstellung als Beitrag zur Sicherung und Optimierung der Versorgung der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie (INFOR-Nr. 71). Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Auftrag des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP). 160 S.
- LECHNER, H., CREMER, T., BECKER, G., WILLEMS, S. (2007): Die Qual der Wahl: Hacken im Bestand oder an der Waldstraße? AFZ-DerWald 62: S. 290–293.
- PLAATH, H.-J. und KROOP, M. (1996): Gewinnung und Aufarbeitung von Ganzbäumen zu Heizhackschnitzeln. AFZ-DerWald (17): S. 956–958
- ROHRMOSER, C. und STAMPFER, K. (2003): Effiziente Waldhackgutbereitstellung? Österreichische Forstzeitung (Arbeit im Wald) 114 (10):, S. 4–5
- ROHRMOSER, C. und STAMPFER, K. (2003): Optimierung der Bereitstellungskette von Waldhackgut. Österreichische Bundesforste AG – Consulting, Projektbericht, 96 S.
- SCHNEIDER, I., ABERLE, K. und KÖLLNER, E. (1993): Waldhackschnitzelgewinnung im Stadtwald Bräunlingen. Mitteilungen der Abteilung für Arbeitswissenschaft und Forstbenutzung der FVA Baden-Württemberg Nr. 12, 12 S:
- SPINELLI, R. (2004): Hackschnitzelerzeugung in den italienischen Alpen. AFZ-DerWald (19): S. 1054–1055
- STAMPFER, E. und STAMPFER, K. (1997): Bereitstellung von Waldhackgut. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 29, Wien, 70 S
- STERNER, V. (2004): Leistungs- und Kostenanalyse einer Bündelmaschine für Reisig – Einsatz des Fiberpac 370 B unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 128 S.
- STISSEL, (2002): Integrierte Waldhackschnitzelgewinnung in Durchforstungsmaßnahmen fünfzigjähriger Kiefernbestände. Diplomarbeit an der FH Eberswalde, 64 S.
- THOR, M. (1996): Chipset 536 C stickvägsgående flisare – tidsstudie och systemanalys. Skogforsk, Uppsala, Sweden, S. 1–16
- VERSCHEURE, P. (1998): Holz-Hackschnitzel Lieferkonzept für die Heizanlagen Müllheim und Neuenburg. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 83 S.

- WEIXLER, H., FELLER, S., GÖLDNER, A., KRAUSENBOECK, B., REMLER, N., V. WEBENAU, B. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der LWF Nr. 21, Freising
- WITTKOPF, S., KRICHBAUM, C., BAUDISCH, C. (2003) Energieholznutzung und Waldschutz im Einklang. LWF aktuell Nr. 39, S. 7–10

9.2 Weitere verwendete Quellen

- AFL NIEDERSACHSEN (2008): Richtpreise, Tarife, Kalkulationen, Adressen 2008/2009, Wietze, 192 S.
- ASIKAINEN, A. (2003): Productivity, cost and availability factors of forest chip production. Bio-energy 2003. Proceedings der Internat. Nordic Bioenergy Conference. S. 221–224.
- BACHER-WINTERHALTER, M. (2004): Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzerntesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes. Dissertation am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 185 S.
- BALLY, B., BUCHTER, B., BUSIN, U. (2000): Literaturstudie zu Lagerung von Energieholzschnitzel. 10 S.
- BARTH, M. (1997): Konzeption und Evaluation multipler Regressionsanalysen. In: STRAUß, B. und BENGEL, J. (Hrsg.) (1997). Forschungsmethoden in der Medizinischen Psychologie. Jahrbuch der Medizinischen Psychologie, Band 14, Hogrefe, Göttingen, 314 S., S. 146–160
- BECKER, G., CREMER, T., ENGLER, B. (2008): Bioenergie als neues Geschäftsfeld in der Forstwirtschaft – Konzept für die betriebliche Umsetzung. AFZ-DerWald (2): S. 78–80
- BEELMANN, A. und BLIESENER, T. (1994). Aktuelle Probleme und Strategien der Metaanalyse. Psychologische Rundschau (45): S. 211–233.
- BERGSTRAND, K. G. (1985): Underlag för prestationsmal för Skotning. 1. Aufl. Kista, Schweden, Forskningsstiftelsen Skogsarbeten Redogörelse. 35 S.
- BEYER, R. und SCHIECK, R. (2001): Erarbeitung eines Produktivitätsmodells für Caterpillar-Radharvester. Diplomarbeit am Institut für Forstnutzung und Forsttechnik der Technischen Universität Dresden, 102 S.
- BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) (2003): Maschinenbeschreibung und Selbstkostenrechnung. Wien. CD
- BLOCK, J., SCHUCK, J. und SEIFERT, T. (2007): Einfluss der waldbaulichen Behandlung und der Holznutzung auf den Nährstoffhaushalt von Traubeneichenökosystemen. In: AUTORENKOLLEKTIV (2007): Eiche im Pfälzerwald. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 63, Trippstadt, S. 117–150

- BONT, L. (2005): Kundenorientierte Optimierung der Sortiments-Aushaltung bei der Holzernte unter besonderer Berücksichtigung des Energieholz. Diplomarbeit an der Professur für forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich, 205 S.
- BORK, E.W. und SU, J.G. (2007): Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: a meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*. Elsevier, Amsterdam, Niederlande, 111 (1): S. 11–24
- BORT, U., EMHARDT, M., PFEIL, C. (1992): Prämienlohn Rücken. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg.
- BORT, U. und PFEIL, C. (1993): Mechanisierte Holzernte, Wechselwirkung von Erschließungsdichte, Pfleglichkeit und Betriebserfolg. Bericht der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- BORTZ, J. (1999): Statistik für Sozialwissenschaftler. 5., vollst. überarb. und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u. a. 836 S.
- BOSTEDT, G. und MATTSSON, L. (2005): On the marginal benefits and costs of adjusting forestry to meet recreational demands: a meta-analysis. Arbetsrapport Nr. 352, Institutionen for Skogsekonomi, Sveriges Lantbruksuniversitet Umea, Sweden, 9 S.
- BROSIUS, F. (2004): SPSS 12. Das mitp-Standardwerk. Bonn, 1034 S.
- BRUCHNER, A.-K. (2004): Industrielle Simulationssoftware als Entscheidungsunterstützungsinstrument in der Produktionslogistik der Holzerntekette. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München, 137 S.
- BRUNBERG, T. (1997): Underlag för produktionsnorm för engreppsskördare i gallring. Skogforsk., Redogörelse Nr. 8, Uppsala, 18 S.
- BRUNBERG, B., ANDERSSON, G., NORDÉN, B. und THOR, M. (1998): Uppdragsprojekt Skogsbränsle – slutrapport. Skogforsk, Redogörelse Nr. 6, Uppsala, 61 S.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1997): Zeitaufwand für Holzernteverfahren. Grundlage für Pauschalansätze. Bern, 70 S.
- CLOSEN, B., STADTFELD, M., FRORATH, B. (1987): Erfahrungen und Hinweise zur Durchführung von Pferderücker-Lehrgängen. *AFZ-DerWald* (51/52): S. 1342–1344
- CREMER, T., PETERSEN, H., BECKER, G. (2008): Vollmechanisierte Schwachholzernte; Kalkulation verschiedener Aushaltungsvarianten zur Erzielung der maximalen Wertschöpfung für den Waldbesitzer. Tagungsführer der 15. KWF-Tagung vom 04.–7.06.2008 in Schmallenberg, S.98–102
- CREMER, T. (2007): Mobilisierung und wirtschaftliche Nutzung von Rohholz aus Wald und Landschaft zur Energieerzeugung. Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 257 S.

- CREMER, T., LECHNER, H., LAUG, S. (2007): Durchforstung von Wegrandkorridoren als effiziente Alternative der Energieholzbereitstellung? Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 66 S.
- CURTIS, P.S. und WANG, X. (1998): A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form and physiology. *Oecologia* 113 (3): S. 299–313
- DIETER, M. und ELSASSER, P. (2002): Carbon stocks and carbon stock changes in the tree biomass of Germany's forests. *Forstwiss. Centralblatt* 121, S. 195–210
- DIETER, M. und ENGLERT, H. (2001): Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsbericht 2001/11 des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, 45 S.
- DRINKMANN, A. (1990): Methodenkritische Untersuchungen zur Metaanalyse. Deutscher Studienverlag, Weinheim, 164 S.
- DUMMEL, K. und BRANZ, H. (1986): Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 333, Landwirtschaftsverlag Münster, 205 S.
- DUMMEL, K., SCHARNAGL, G., SCHWANITZ, P. (1995): Entlohnung. Geschichte und Zukunft des EST. *Forsttechnische Informationen* 47, S. 121
- ELIASSON, L., BENGTSSON, J., CEDERGREN, J., LAGESON, H. (1999): Comparison of single-grip harvester productivity in clear- and shelterwood cutting. *International Journal of Forest Engineering* 10 (1): S. 43–48
- ENGLER, B., BECKER, G., WIPPEL, B. (2008): Zwischen Wirtschaftlichkeit und Pfleglichkeit. Benötigen homogene Kiefernbestände eine Bestandesvorbereitung? *AFZ-DerWald* (2): S. 58–61
- ENGLER, B. und CREMER, T. (2008): Pulpwood versus energy wood: Sorting strategies for different stands and market condition. Abstract für das KWF/FORMEC-Meeting vom 02.–05.06.2008 in Schmallingenberg
- EST (2000): Tarifvertrag über die Entlohnung von Holzerntearbeiten nach dem Erweiterten Sortentarif (EST) vom 3.5.1979. Änderungsvertrag Nr. 17 und Nr. 5 vom 19. September 2000
- ETTL R., WEIS W. und GÖTTLEIN A. (2007): Holz verbrennt, Asche bleibt – Entwicklung des Energieholzverbrauches und des Ascheaufkommens in Bayern sowie Konsequenzen für die stoffliche Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung. *AFZ-DerWald* (2): S. 74–77

- ETTL R. und GÖTTLEIN A. (2007): Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen – Monetäre Bewertung des Nährstoffexportes bei Biomassenutzung. AFZ-DerWald (14): S 756–758
- FANDEL, G., HEUFT, B., FEY, A., PITZ, T. (2004): Kostenrechnung. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 554 S.
- FARIN, E. (1994): Forschungsperspektive und Methodik der Metaanalyse. Forschungsberichte des Psychologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 113, 106 S.
- FARIN, E. (1997): Metaanalysen: Methodologische Grundlagen und praktische Durchführung. In: STRAUß, B. und BENGEL, J. (Hrsg.) (1997). Forschungsmethoden in der Medizinischen Psychologie. Jahrbuch der Medizinischen Psychologie, Band 14, Hogrefe, Göttingen, 314 S., S. 161–180
- FELLER, S. und WEIXLER, H. (1998): Hannibal ante portas. LWF aktuell Nr. 11, Freising
- FELLER, S., SCHAUER, H., WEIXLER, H. (1998): Königstiger in bayerischen Wäldern. LWF aktuell Nr. 11, Freising
- FELLER, S., WEBENAU, B., WEIXLER, H., (1999a): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 21, Freising, 103 S.
- FELLER, S., WEIXLER, H., HAMBERGER, J. (1999b): Neuson 11002 HV – Raupenharvester der Kompaktklasse. Forst und Technik (6): S. 10–13
- FELLER, S. und RIEDELBERGER, M. (2001): Hackschnitzelbereitstellung mit dem Timberchipper. Forst und Technik (4): S. 4–8
- FD FREIBURG (2001): Prämienlohntabelle für Fällen und Zufällen. Nach: Fva (2007)
- FD FREIBURG (2005): Forstdirektion Freiburg. Schriftliche Auskunft.
- FIGHT, R.D., GICQUEAU, A., HARTSOUGH, B.R. (1999) Harvesting costs for management planning for Ponderosa Pine plantations. General Technical Report PNW-GTR-467, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service, 8 S.
- FIGHT, R.D., HARTSOUGH, B.R., NOORDIJK, P. (2006): Users guide for FRCS: fuel reduction cost simulator software. General Technical Report PNW-GTR-668, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service, 23 S.
- FINDEISEN, E. und LINß, K. (2006): Energieholzaushaltung aus der Durchforstung mittelalter Fichtenreinbestände unter Einsatz des Waldrestholzbündlers Pinox 330. Forst und Technik (7): S. 271–279
- FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE (2006): The cost calculator of logging residue procurement. Joensuu Research Centre, Joensuu, Finland

- FORBRIG, A. (2000): Konzeption und Anwendung eines Informationssystems über Forstmaschinen auf der Grundlage von Maschinenbuchführung, Leistungsnachweisen und technischen Daten. KWF-Bericht Nr. 29, Groß-Umstadt, 213 S.
- FRICKE, R. und TREINIES, G. (1985): Einführung in die Metaanalyse. Methoden der Psychologie, Band 3., 1. Auflage. Verlag Hans Huber, Bern, 192 S.
- FVA (2007): HOLZERNT. Kalkulationsprogramm für Holzernte und Holzvermarktung. Version 7.1. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg. CD
- FVA (2002): Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 43, Freiburg, 172 S.
- GABRIEL, O. (1999): Auszeichnen – Ja oder Nein? Forst und Technik (12): S. 10
- GHAFFARIAN, M.R., STAMPFER, K., SESSIONS, J. (2007): Forwarding productivity in Southern Austria. Croatian Journal of Forest Engineering 28 (2): S. 169–175
- GLÖDE, D. (1999): Single- and double-grip harvesters – productive measurements in final cutting of shelterwood. International Journal of Forest Engineering 10 (2): S. 63–74
- GÖTTLEIN, A., Ettl, R., WEIS, W. (2007): Energieholznutzung und nachhaltige Waldbewirtschaftung – ein Zielkonflikt?. Rundgespräche der Kommission für Ökologie. Band 33 „Energie aus Biomasse“. S. 87–95
- GRAMMEL, R. (1988): Holzernte und Holztransport: Grundlagen. Schriftenreihe „Pareys Studientexte“ Nr. 60., Hamburg und Berlin, 242 S.
- GUGLHÖR, W. (1994): Durchforstung von Buchenbeständen mit einem Kranvollernter. AFZ-DerWald (13): S. 695–698
- GUIMIER, D.Y. (1985): Biomass equipment database. Special Report SR-34, FERIC, Pointe Claire, Quebec, 40 S.
- HAKKILA, P. (2004): Developing technology for large-scale production of forest chips. Technology Programme Report 6, Helsinki, 99 S.
- HARTSOUGH, B.R. und STOKES, B.J. (1990): Comparison and feasibility of North American methods for harvesting small trees and residues for energy. In: Stokes, B.J. (ed.) (1990): Harvesting Small Trees and Forest Residues, Workshop Proceedings. International Energy Agency, Task VI, Activity 3. Kopenhagen, Dänemark. S. 31–40.
- HARTSOUGH, B.R., GICQUEAU, A., FIGHT, R.D. (1998): Productivity and cost relationships for harvesting ponderosa pine plantations. Forest Products Journal (9): S. 87–93
- HEIDE, H. C. VON DER (2005): Produktivitätsparameter bei der vollmechanisierten Holzernte. Diplomarbeit an der HAWK – Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Ressourcenmanagement. 59 S.

- HEIDE, H. C. VON DER, FRIEDEL, S., BOMBOSCH, F. (2005): Kalkulationsmodul auf Basis einer Harvesterleistungsanalyse. *AFZ-DerWald* (18): S. 962–964
- HEINIMANN, H.R. (1999): Produktivität und Einsatzbedingungen verschiedener Harvestertypen – eine statistische Auswertung aufgrund von Leistungsnachweisen. Zürich, 27 S.
- HOLZENERGIE SCHWEIZ (2003): Rationelle Holzschnitzelbereitstellung im Forstbetrieb. Merkblatt, 8 S. Zürich
- HUDSON, J. B., MITCHELL, C. P., STORRY, P. G. S. (1990): Costing integrated harvesting systems. Integrated harvesting systems workshop, Aberdeen, 1990, S. 46–52
- HUNTER, J.E. und SCHMIDT, F.L. (1990): *Methods of Meta-Analysis. Correcting Error and Bias in Research Findings*. SAGE Publications, Newbury Park, 592 S.
- JACKE, H. (1980): Zur Technik der Regressionsrechnung bei der Analyse forstlicher Arbeitszeitstudien. Dissertation an der Forstlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, 204 S,
- JACKE, H. (2003): Vorgabe-, Richt- und Planzeiten: Zur abschließenden Nutzung des Erweiterten Sortentarifs (EST). *Forst und Holz* (23–24): S. 720–722
- JACKE, H. (2007b): Spartanisches Spiel mit Spänen: professionelles HACKen – Energieholzserie Teil 6. *Forst und Holz* 62 (11): S. 41–47
- JENKINS, J.C., CHOJNACKY, D.C., HEATH, L.S., BIRDSEY, R.A. (2003): Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. General Technical Report GTR-NE-319, Northeastern Research Station, USDA Forest Service, 203 S.
- JOHNSTONE, J.F. und CHAPIN, F.S. (2006): Effects of soil burn severity on post-fire tree recruitment in boreal forest. *Ecosystems*. Springer-Verlag, New York, USA 9 (1): S. 14–31
- KÄRHÄ, K., RÖNNKÖ, E., GUMSE, S.-I. (2004): Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering* 15 (2): S. 43–56
- KALLIO, M. und LEINONEN, A. (2005): Production technology of forest chips in Finland. VTT Processes, Jyväskylä, Finnland, 103 S.
- KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut – Verfahren Energieholzbündel im Gebirge. Endbericht im Auftrag des Kooperationsabkommens Forst Platte Papier (FPP), Wien, 36 S.
- KERSTIENS, G. (2001): Meta-analysis of the interaction between shade-tolerance, light environment and growth response of woody species to elevated CO₂. *Acta Oecologica*. Editions Scientifiques et Medicales Elsevier, Paris, Frankreich, 22, 1, S. 61–69

- KÖBERLE, M. (2007): Vergleich verschiedener Aufarbeitungsvarianten für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln aus Kronenholz unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Hackschnitzelqualität. Diplomarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg, 99 S.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G., VOLESKE, P. (2002): Biostatistik. Dritte, aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 301 S.
- KORTEN, S., MATTHIES, D., GENNARI, C., NAGL, M. (2003): Leistung, Kosten, Pfleglichkeit des Valmet 911 X3M. Forst und Technik (9): S. 4–7
- KOTEN, D.E., PETERS, P.A., HUBNER, S.A. (1984): HARDAT: a universal harvesting data storage and retrieval system. In: PETERS, P.A. und LUCHOK, J. (ed.) (1984): Mountain Logging Symposium Proceedings, West Virginia University, S. 65–78
- KÜHMAIER, M., KANZIAN, C., HOLZLEITNER, F., STAMPFER, K. (2007): Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Projektstudie des Instituts für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur, Wien, 283 S
- KUPRAT, H. und WENZELIDES, M. (2002): Modelle der Energiehackschnitzelbereitstellung in Niedersachsen. AFZ-DerWald 57: S. 2–7
- KWF (1992): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Tagungsführer zur 11. KWF-Tagung 1992 in Koblenz. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 132 S.
- KWF (1996): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Tagungsführer zur 12. KWF-Tagung 1996 in Oberhof. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 136 S.
- KWF (2000): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Tagungsführer zur 13. KWF-Tagung 2000 in Celle. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 164 S.
- KWF (2004): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Tagungsführer zur 14. KWF-Tagung 2004 in Groß-Umstadt. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 142 S.
- KWF (2008a): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., Tagungsführer zur 15. KWF-Tagung 2005 in Schmallingenberg. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt, 157 S.
- KWF (2008b): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V., <http://www.kwf-online.de/deutsch/index.htm> (Abfrage vom 14.04.08)
- LAAR, A. VAN, LÖFFLER, H., OHRNER, G. (1992): Zur Behandlung der Fichte in Oberschwaben. Ergebnisse und Folgerungen aus den Durchforstungsversuchen „Göggingen“ und „Freising“. München/Stellenbosch, 93 S.

- LAGESON, H. (1997): Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. *International Journal of Forest Engineering* 8 (2): S. 7–14
- LANGE, F. (2006): Prämissen für Produktivitätsvergleiche zwischen Vollerntern über standardisierte Fälle. Masterarbeit am Institut für Forstliche Arbeitswissenschaften und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen, 98 S.
- LECHNER, H. (2004): Quantifizierung der Auswirkungen einer Variation von Eingriffsintensität und Sortenbildung auf Massenanzahl und Kosten bei der Energieholzbereitstellung am Beispiel verschiedener waldbaulicher Ausgangssituationen. Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 159 S.
- LECHNER, H. (2007): Integriertes Konzept zur rationellen Rohholzbereitstellung als Beitrag zur Sicherung und Optimierung der Versorgung der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie (INFOR-Nr. 71). Abschlussbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. 160 S.
- LECHNER, H., CREMER, T., BECKER, G., WILLEMS, S. (2007): Die Qual der Wahl: Hacken im Bestand oder an der Waldstraße? *AFZ-DerWald* 62: S. 290–293.
- LEMM, R. und ERNI, V. (1995): Ein Simulationsmodell für den Forstbetrieb – Entwurf, Realisierung und Anwendung. Bericht Nr. 341, EAFV Birmensdorf.
- LFV BADEN-WÜRTTEMBERG (LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG) (1993): Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Stuttgart, 188 S.
- LTW (2003): Lohntarifvertrag für Waldarbeiter Nr. 17 vom 14. März 2003, 10 S.
- LÜTHY, C. (1997a): Kalkulationsgrundlage für das Holzlücken mit Forwarder. Interner Bericht, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL).
- LÜTHY, C. (1997b): Holzlücken mit Forwarder. *Wald und Holz*, Nr. 4, S. 33–35
- LÜTHY, C., NÄF, J., THEES, O., LEMM, R. (1997): Kalkulationsgrundlage für das Holzlücken mit Forwarder – Benutzeranleitung für das PC-Programm LUNA. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
- MEDLYN, B.E., BADECK, F.W., PURY, D., BARTON, C., BROADMEADOW, M., CEULEMANS, R., ANGELIS, P. DE, FORSTREUTER, M., JACH, M.E., KELLOMAKI, S., LAITAT, E., MAREK, M., PHILIPPOT, S., REY, A., STRASSEMAYER, J., LAITINEN, K., LIOZON, R., PORTIER, B., ROBERTNTZ, P., WANG, K., JARVIS, P.G. (1999): Effects of elevated CO₂ on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *Plant, Cell and Environment* 22 (12): S. 1475–1495.
- MCNEEL, J.F. (1994): Modelling Harvester-Forwarder system performance in a selection harvest. *International Journal of Forest Engineering* 6 (1): S. 7–14
- MITCHELL, C.P. (2000): Development of decision support systems for bioenergy applications. *Biomass & Bioenergy* 18: S. 265–278

- MORAT, J., FORBRIG, A., GRAUPNER, J. (1998): Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF). Bericht Nr. 25, 110 S.
- NÄF, J. (1998): Kalkulationsgrundlagen für das Vorliefern/Rücken mit Forsttraktor nach ABEGG (1980) und (1991) modifiziert nach LEMM (1995). Interner Bericht WSL.
- NBBW (Nachhaltigkeitsbeirat der Landesregierung Baden-Württemberg) (2008): Energie aus Biomasse: Potenziale und Empfehlungen für Baden-Württemberg. Stuttgart, 24 S.
- NICHOLS, E., LARSEN, T., SPECTOR, S., DAVIS, A.L., ESCOBAR, F., FAVILA, M., VULINEC, K. (2007): Global dung beetle response to tropical forest modification and fragmentation: a quantitative literature review and meta-analysis. *Biological Conservation*. Oxford, UK 137 (1): S. 1–9
- NIMZ, R. (2002): Einbeziehung der Leistungsfähigkeit des Fahrers in Produktivitätsmodelle für Harvester. *Forsttechnische Informationen* (12): S. 142–144
- NURMINEN, T., KORPUNEN, H., UUSITALO, J. (2006): Time consumption anaysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40 (2): S. 335–363
- Ö-NORM M 7132: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff – Begriffsbestimmungen und Merkmale
- OHRNER, G. (1999): Wie wirtschaftlich arbeiten Harvester? *Forst und Holz* (23): S. 727–732
- OLIVIER, A. (2004): Kosten und Leistung bei der Energieholzernte. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 113 S.
- OVASKAINEN, H., UUSITALO, J., VÄÄTÄINEN, K. (2004): Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 15 (2): S. 67–77
- PAQUETTE, A., BOUCHARD, A., COGLIASTRO, A. (2006): Survival and growth of under-planted trees: a meta-analysis across four biomes. *Ecological Applications*. Ecological Society of America, Washington, USA, 16 (4): S. 1575–1589
- PAUSCH, R. (2002): Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayerischer Mittelgebirge. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München, 301 S.
- PAUSCH, R. (2007): Starkholz und Energieholz. *AFZ-DerWald* (14): S. 746–748
- PAUSCH, R. und PONITZ, K. (2002): Harvesterleistung und Hiebsbedingungen. *Forst und Technik* (4): S. 10–14

- PETERSEN, H. (2004): Quantifizierung der Auswirkungen einer Variation von Eingriffsintensität und Sortenbildung auf Massenanzahl und Kosten bei der Energieholzbereitstellung am Beispiel verschiedener waldbaulicher Ausgangssituationen. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- PFAU, J. (1997): Bewirtschaftung von Harvester-Mittelblöcken mit dem Pferd. Forsttechnische Informationen (1–2): S. 9–12
- PRÖLL, W. (2004): Was man über Harvester wissen sollte. Land Technik Leute, Pöllau, 9, S. 16–18
- PUGET, P. und LAL, R. (2005): Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. Soil & Tillage Research. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 80 (1–2): S. 201–213
- PURFÜRST, F.T. (2007): Human influences on harvest operations. Austro2007/FORMEC'07: Meeting the Needs of Tomorrow's Forests – New Developments in Forest Engineering, 07.–11.10.2007, Wien, Österreich
- QM (2004): GOOD, J., BÜHLER, R., BUNK, H., DEINES, T., JENNI, A., KRAPP, G., PEX, B. (2004): "Qualitätsmanagement (QM) Holzheizwerke"; Planungshandbuch. Straubing, 244 S.
- RAAB, S. (1999): Arbeitsverfahren für die Pflege in der Fichte. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 20, Freising, 86 S.
- RECHBERGER, S., 1999: Grundlagendaten für ein Produktionssystem Seilschlepper. Interner Bericht WSL, 4 S.
- REFA (1998): Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft. REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung, Stuttgart, 175 S.
- RIECHSTEINER, D. (2000): Grundlagen und Herleitung des Produktionssystems 'Vollernter': Typ mittel, Typ groß. Interner Bericht der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
- RIEGER, G. (1983): Einsatz, Kosten und Leistung forstlicher Maschinen. Eine Analyse der Datenstruktur von Holzerntemaschinen aus dem Staatsforstbetrieb Baden-Württemberg. Dissertation am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. 274 S.
- ROHRSCHEIDER, L. (2007): Behandlung fehlender Daten. Diplomarbeit an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin, 95 S.
- RP FREIBURG (2002): Regierungspräsidium Freiburg, Orientierungsliste Maschinenmietsätze.
- SABSCH, R. und MEIßNER, H. (2000): Kombierter Pferde-/Kranvollerntereinsatz in Kiefer. AFZ-DerWald (18-19): S. 986–987

- SAUTER, U. H., MEHLIN, I., GRAMMEL, R. (1998): Vollmechanisierte Holzernte am Steilhang mit Vollerntertechnik. *AFZ-DerWald* (14): S. 722–724
- SCHÄFFER, J. (2002): Befahren von Waldböden – ein Kavaliersdelikt? *Der Waldwirt* 29 (12): S. 21–23
- SCHAFFER, E. und PICHLER, H. (2008): BioBereit Manual. Handbuch zum Berechnungsblatt Bio-brennstofferte. Entwickelt für das Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier (FPP), Wien, Österreich, 26 S.
- SCHULER, U. und CREMER, T., (2007): Vorkonzentration von Hackmaterial mittels Langholz-LKW: Folgen für die Wirtschaftlichkeit von Energieholz-Bereitstellungsketten. Unveröffentlichter Projektbericht des Instituts für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 116 S.
- SCHULER, U., CREMER, T., BECKER, G. (2007): Vorkonzentration von Hackmaterial mittels Langholz-LKW. *Forst und Holz* (12): S. 41–45
- SIKANEN, L., RÖSER, D., ASIKAINEN, A. (2007): Holistic design of forest energy supply chains in varying european conditions. Vortrag im Rahmen der 3rd Forest Engineering Conference vom 01.10.07–04.10.07 in Mont Tremblant, Kanada
- SIRÉN, M. und AALTIO, H. (2003): Productivity and costs of thinning harvesters and harvester-forwarders. *International Journal of Forest Engineering* 14 (1): S. 39–48
- SPINELLI, R. (2001): ChipCost Software und “Instructions for operating the ChipCost software”. Download vom 02.08.2007 unter <http://www.ivalsa.cnr.it/chipcost/chipcost.htm>
- SPINELLI, R. und HARTSOUGH, B. (2001): A survey of Italian chipping operations. *Biomass & Bioenergy* 21: S. 433–444.
- SPINELLI, R. und PETTENELLA, D. (2001): Strategie comparate per la produzione di cippato. *Monti e Boschi* (1): S. 32–37
- SPINELLI, R. (2003): CNR’s ChipCost Project – state of the art on a national scale. *Wood Energy* (1): S. 38–41
- SPINELLI, R., OWENDE, P.M.O., WARD, S.M., TORNERO, M. (2004): Comparison of short-wood forwarding systems used in Iberia. *Silva Fennica* 38 (1): S. 85–94.
- SPINELLI, R. und MAGAGNOTTI, N. (2007): Guidelines for the development of forest chips supply chain models: the Italian experience in the eastern Alps. *Austro2007/FORMEC’07*, 07–11.10.2007, Wien und Heiligenkreuz, Österreich, 9 S.
- SPINELLI, R. und MAGAGNOTTI, N. (2007): Estimating the productivity of chipping operations. Tagungsführer zur FORMEC 2008 vom 02.–05.06.2008 in Schmallenberg, S. 159–165.
- SPINELLI, R. und VISSER, R. (2008): Analysing and estimating delays in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering* 19 (1): S. 36–41

- STAMPFER, E., STAMPFER, K., TRZESNIOWSKI, A. (1997): Bereitstellung von Waldhackgut. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 29. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien. 70 S.
- STAMPFER, K. (2000): Forstmaschinen und Holzbringung I/II. Schriftenreihe des Instituts für Forsttechnik, Band 2, 3. Auflage. Universität für Bodenkultur, Wien, 39 S.
- STAMPFER, K. (2001): Harvester. Leistungsdaten MHT Robin, Neuson 11002 HV, Impex Königstiger. Untersuchungsergebnisse aus Aufnahmen bei Geländeneigungen von 20–60 %. FPP-Schriftenreihe, Wien, 16 S.
- STAMPFER, K. und STEINMÜLLER, T. (2004): Leistungsdaten Valmet 911.1 X3 M. Endbericht des Departments für Wald- und Bodenwissenschaften der Universität für Bodenkultur, Wien, 14 S.
- STERNER, V. (2004): Leistungs- und Kostenanalyse einer Bündelmaschine für Reisig – Einsatz des Fiberpac 370 B unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 128 S.
- STEVENS, J. (1986): Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 515 S.
- STISSEL, A. (2002): Integrierte Waldhackschnitzelgewinnung in Durchforstungsmaßnahmen fünfzigjähriger Kiefernbestände. Diplomarbeit an der FH Eberswalde, 64 S.
- STUROS, J. A., BARRON, R. M., MIYATA, E. S., STEINHILB, H. M. (1983): The economics of a mechanized multiproduct harvesting system for stand conversion of northern hardwoods. North Central Forest Experiment Station, Forest Service – US Department of Agriculture, Minnesota, 12 S.
- SUCHOMEL, C. (2008): Literaturstudie: Vollmechanisierte Holzerntesysteme in Laubholzbeständen (technische Optionen, Wirtschaftlichkeit, waldbauliche und ökologische Restriktionen). Projektbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 54 S.
- THEES, O., FRUTIG, F., BREITENSTEIN, M., LEMM, R., KAUFMANN, E., KEILEN, K. (2003): Schätzung des Potenzials an Energieholz im Schweizer Wald und Kalkulation der Bereitstellungspreise. Bericht zu einem Teilprojekt des Forschungsprojekts ECOGAS. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 53 S.
- THOMAS, S.C. und WINNER, W.E. (2002): Photosynthetic differences between saplings and adult trees: an integration of field results by meta-analysis. Tree Physiology. Heron Publishing, Victoria, Canada 22 (2–3): S. 117–127.
- WILPERT, K. VON, SCHÄFFER, J., ZIRLEWAGEN, D. (2007) Höhere Nutzungsintensität: Folgen für den Nährstoffhaushalt und Möglichkeiten des Holzasche-Recyclings. Vortrag im

- Rahmen der Fachtagung „Der Forstbetrieb als professioneller Lieferant von Bioenergie“ am 20.–21.9.2007 in Freiburg
- WARKOTSCH, W. (1975): Darstellung und Analyse von Systemen und Verfahren der Holzernte. AFZ-DerWald (30): S. 859–861
- WEIXLER, H., FELLER, S., SCHAUER, H. (1997): Der Raupen-Harvester IMPEX 1650 T „Königstiger“ im Einsatz. AFZ-DerWald (22): S. 1182–1184
- WEIXLER, H., FELLER, S., GÖLDNER, A., KRAUSENBOECK, B., REMLER, N., WEBENAU, B. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der LWF Nr. 21, Freising, 103 S.
- WIRTH, C., SCHUMACHER, J., SCHULZE, E.D. (2003): Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach towards prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology (24): S. 121–139
- WIRTZ, M. (2004): Über das Problem fehlender Werte: Wie der Einfluss fehlender Informationen auf Analyseergebnisse entdeckt und reduziert werden kann. Rehabilitation 43: S. 109–115
- WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München, 209 S.
- WITTKOPF, S., HÖMER, U., FELLER, S. (2003): Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 38, Freising, 84 S.
- WSL (2007): HeProMo – Holzernteproduktivitätsmodelle. Version 1.01 (Stand: 15.03.2007). Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. CD
- WSRG (Wood Supply Research Group) (1998): HDSS International – a harvesting decision support system. Forestry department, University of Aberdeen, Schottland/IEA Bioenergy
- ZAHN, B. (2006): Erprobung eines Forwarders mit Fällgreifer zur Ernte von Energieholz sowie Untersuchung verschiedener Zerkleinerungs- und Transportvarianten von Hackgut. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 114 S.
- ŽELJKO, Z. und JURIJ, M. (2005): Mathematical models for optimization of group work in harvesting operation. Croatian Journal of Forest Engineering 26 (1): S. 29–37
- ZIANIS, D. und MENCUCCINI, M. (2004): On simplifying allometric analyses of forest biomass. Forest Ecology Management 187, S. 211–332

10 Anhang

10.1 Histogramme und Normalverteilungsdiagramme

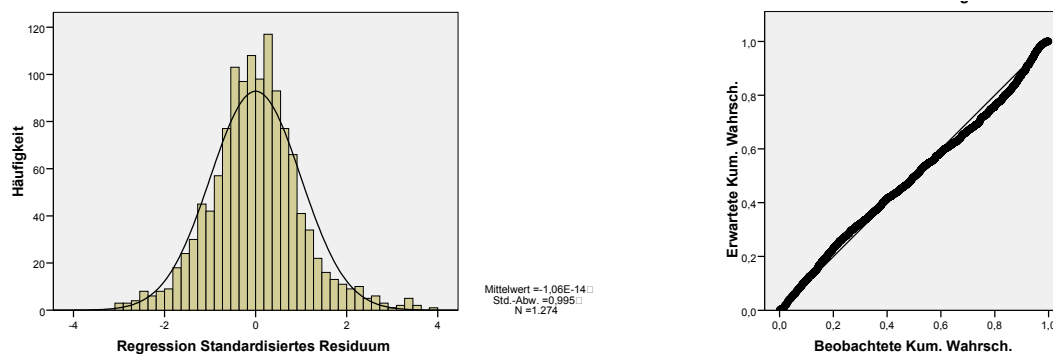


Abbildung 45: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Harvester beim vollmechanisierten Einschlag von Rundholz

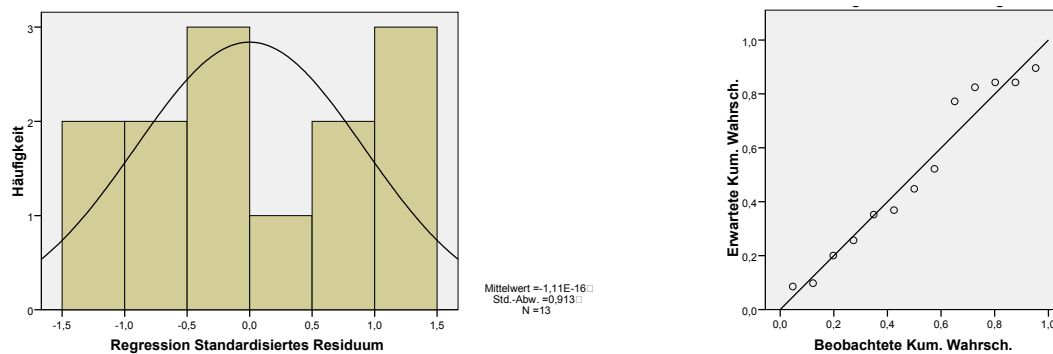


Abbildung 46: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Harvester beim Einschlag von Energieholz

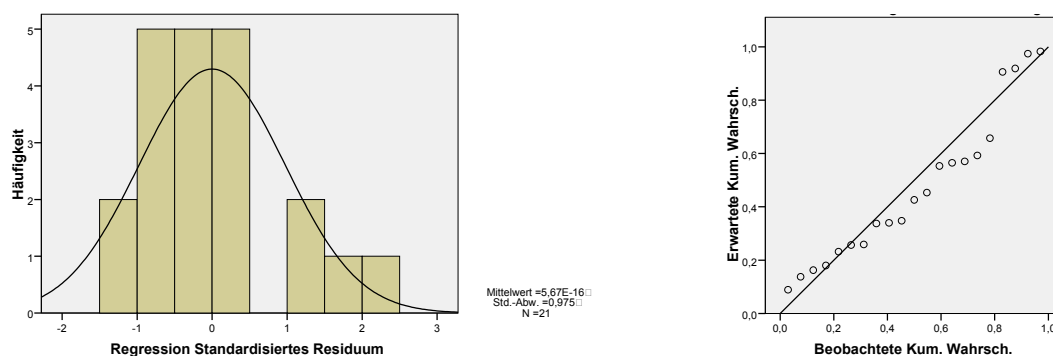


Abbildung 47: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Waldarbeiter beim Einschlag von Energieholz

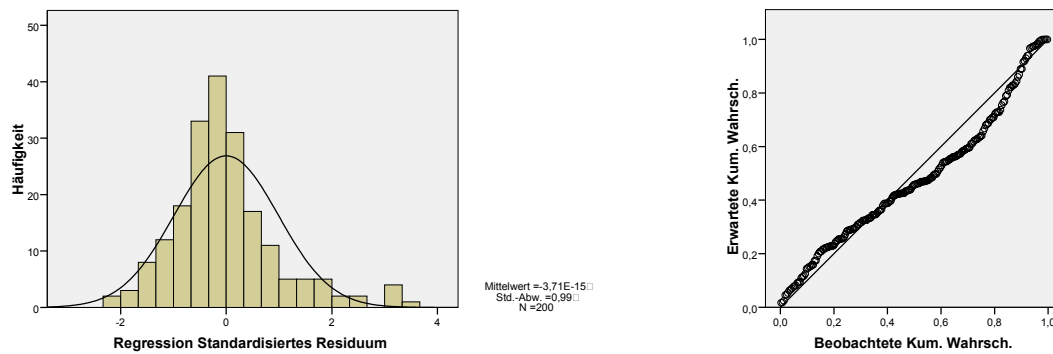


Abbildung 48: Histogramm und Normalverteilungsdigramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Modell 1)

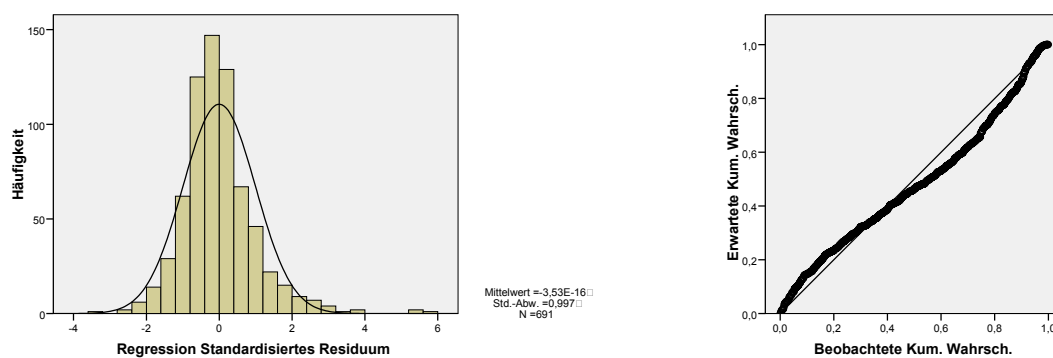


Abbildung 49: Histogramm und Normalverteilungsdigramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Rundholz (Modell 2)

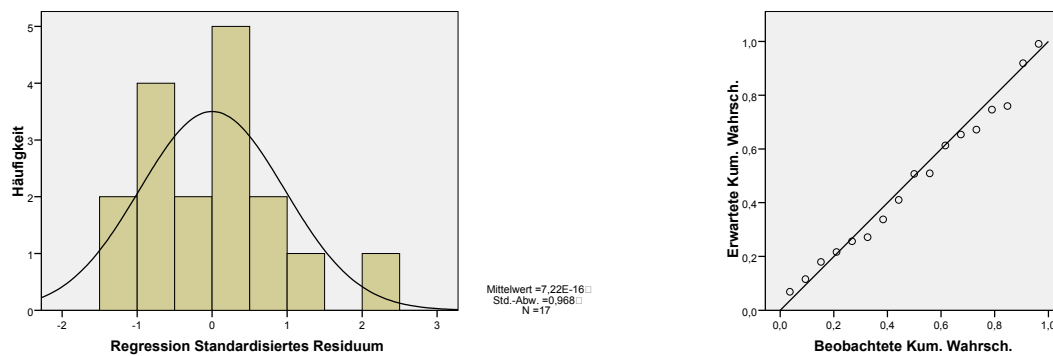


Abbildung 50: Histogramm und Normalverteilungsdigramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forstspeziialschlepper beim Rücken von Rundholz

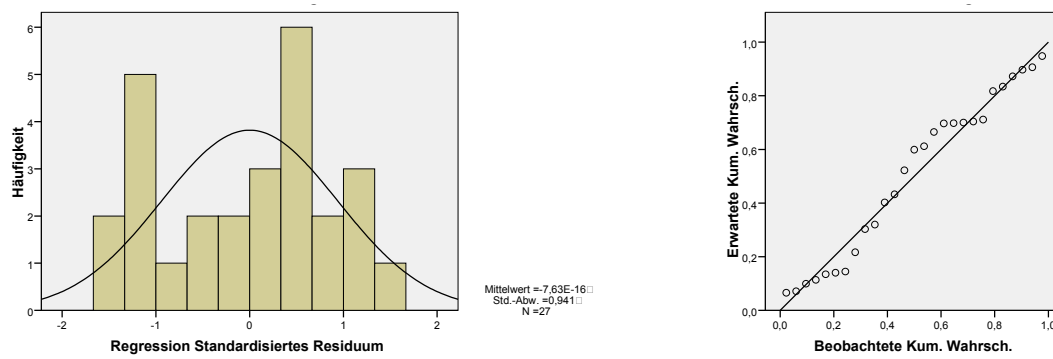


Abbildung 51: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Produktivitätsmodells für Forwarder beim Rücken von Energieholz

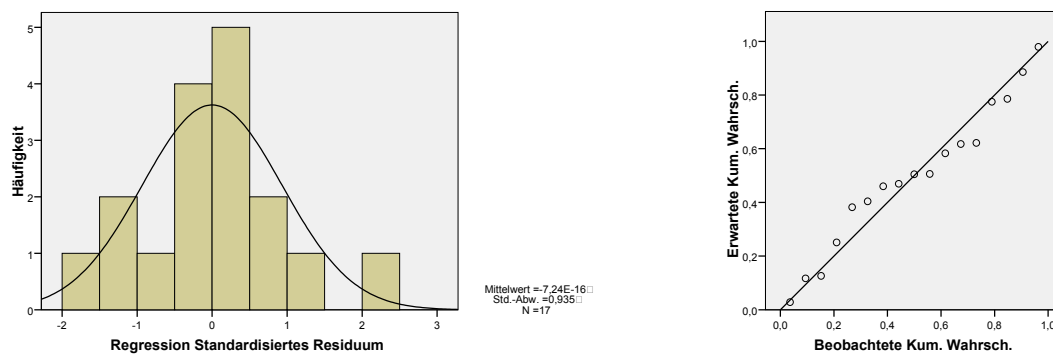


Abbildung 52: Histogramm und Normalverteilungsdiagramm der standardisierten Residuen des Modells zur Herleitung einer kalkulatorischen Produktivität für Forstspezialschlepper beim Rücken von Energieholz

10.2 Übersicht über die Produktivitätsmodelle für die einzelnen Verfahrensschritte

Tabelle 64: Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Rundholz

Verfahrensschritt	Produktivitätsmodell			Gültigkeitsbereich
Einschlag, vollmechanisiert	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = -0,022 * \text{BHD}^2 + 1,466 * \text{BHD} + \text{Laubholz} * (4,216 - 0,292 * \text{BHD}) - \text{Kiefer} (7,391 + 0,297 * \text{BHD}) + 2,308 * \text{Harvestertyp „Rottne“} + 0,579 * \text{Harvestertyp „TJ 1470“} - 0,678 * \text{Harvestertyp „TJ 1270“} - 1,867 * \text{Harvestertyp „Skogsjan“} - 2,171 * \text{Harvestertyp „Silvatec“} - 2,636 * \text{Rückegassenabstand} - 4,707$			Siehe Tabelle 18 (S. 52)
Einschlag, motormanuell	Fichte	Ohne Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,064 * \text{BHD} + 1,1029$	BHD: 19,5–49,0 cm
		Mit Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,0744 * \text{BHD} + 0,3892$	
	Kiefer	Ohne Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,1331 * \text{BHD} + 0,1302$	BHD: 19,4–45,3 cm
		Mit Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,1413 * \text{BHD} - 0,8462$	
	Laubholz	Ohne Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,0634 * \text{BHD} + 1,9045$	BHD: 20,3–34,4 cm
		Mit Industrieholzaushaltung	$\text{Produktivität [Efm/h GAZ]} = 0,0923 * \text{BHD} - 0,7177$	

Dabei ist:

BHD	= BHD des ausscheidenden Bestands [cm]
Laubholz	= Dummy-Variable; nimmt in Laubholzbeständen den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Kiefer	= Dummy-Variable; nimmt in Kiefernbeständen den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Rottne“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Rottne“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „TJ 1470“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „TJ 1470“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „TJ 1270“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „TJ 1270“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Skogsjan“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Skogsjan“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Harvestertyp „Silvatec“	= Dummy-Variable, nimmt bei Einsatz eines Harvesters des Typs „Silvatec“ den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0
Rückegassenabstand	= Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Tabelle 65: Produktivitätsmodelle für den Einschlag von Energieholz

Verfahrensschritt	Produktivitätsmodell	Gültigkeitsbereich
Einschlag, voll-mechanisiert	$Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ] = 2,525 * BHD + 14,598 * Rückegassenabstand - 36,026$	BHD: 12,9–27,9 cm (Rückegassenabstand 20 m)
		BHD: 16,6–25,5 cm (Rückegassenabstand 40 m)
Einschlag, motormanuell	$Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ] = 0,737 * BHD - 5,548$	BHD: 14,8–45,6 cm

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Rückegassenabstand = Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Tabelle 66: Produktivitätsmodelle für das motormanuelle Fällen und Vorliefern von Rund- und Energieholz

Verfahrensschritt	Produktivitätsmodell	Gültigkeitsbereich
Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Rundholz ⁷⁶	$Produktivität [Efm/h GAZ] = 7,3417 * (ln BHD) - 16,644$	BHD: 13,0–18,0 cm
Motormanuelles Fällen und Vorliefern von Energieholz ⁷⁷	$Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ] = 0,924 * BHD - 5,105$	BHD: 16,6–21,2 cm

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

⁷⁶ Nur in Verbindung mit der Aushaltung von Rundholz an der Rückegasse durch Harvester

⁷⁷ Nur in Verbindung mit der Aushaltung von Rundholz an der Rückegasse durch Harvester

Tabelle 67: Produktivitätsmodelle für das Rücken von Rundholz

Verfahrensschritt	Produktivitätsmodell	Gültigkeitsbereich
Rücken mit Forwarder (a)	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = -0,010 * BHD^2 + 0,742 * BHD + 2,726 * \text{Rückegassenabstand} + 0,014 * \text{Rundholzanfall je Hektar} - 0,916$	Rückegassenabstand 20 m: BHD: 10,9–44,0 cm Rundholzanfall je Hektar: 10,0–171,6 Efm/ha
		Rückegassenabstand 40 m: BHD: 13,2–29,0 cm Rundholzanfall je Hektar: 23,0–119,0 Efm/ha
Rücken mit Forwarder (b)	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = -0,005 * BHD^2 + 0,469 * BHD + 0,089 * (BHD * \text{Obere Leistungsklasse}) + 3,159 * \text{Rückegassenabstand} + 2,975$	Siehe Tabelle 38 (S. 87)
Rücken mit Forstspezialschlepper	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 8,428 * (\ln BHD) - 18,082$	BHD: 18,2–49,0 cm

Dabei ist:

BHD = BHD des ausscheidenden Bestands [cm]

Rückegassenabstand = Dummy-Variable, nimmt bei einem Rückegassenabstand von 40 m den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Rundholzanfall je Hektar = Rundholzanfall je Hektar [Efm/ha]

Obere Leistungsklasse = Dummy-Variable, nimmt bei einem Forwarder der oberen Leistungsklasse den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0

Tabelle 68: Produktivitätsmodelle für das Rücken und den Zwischentransport von Energieholz

Verfahrensschritt	Produktivitätsmodell	Gültigkeitsbereich
Rücken mit Forwarder	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 6,171 * (\ln \text{BHD}) + 0,021 * \text{Energieholzanfall je Hektar} + 0,268 * \text{Zopfdurchmesser} - 15,586$	BHD: 13,5–38,5 cm Zopfdurchmesser: 8–15 cm Energieholzanfall je Hektar: 4–130,5 Efm/ha
Rücken mit Forstspeziialschlepper	$\text{Kalk. Produktivität [Efm/h RAZ]} = 6,235 * (\ln \text{BHD}) + 0,076 * \text{Energieholzanfall je Hektar} - 18,452$	BHD: 18,2–47,9 cm Energieholzanfall je Hektar: 14–139 Efm/ha
Zwischentransport auf zentralen Hackplatz mit Langholz-LKW	Ohne Industrieholzaushaltung $\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 0,049 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt})^2 - 1,5604 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt}) + 21,848$ Mit Industrieholzaushaltung $\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 0,0543 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt})^2 - 1,6014 * (\text{Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt}) + 19,238$	Fahrdistanz (Leer- und Lastfahrt): 0,8–5,6 km Nur in Fichtenbeständen gültig

Dabei ist:

BHD	= BHD des ausscheidenden Bestands [cm]
Energieholzanfall je Hektar	= Energieholzanfall je Hektar [Efm/ha]
Zopfdurchmesser	= Aufarbeitungsdurchmesser des Rundholzes [cm]
Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt	= Fahrdistanz Leer- und Lastfahrt [km]

Tabelle 69: Produktivitätsmittelwerte der unterschiedlichen Hacksysteme beim Hacken von Energieholz

Verfahrensschritt	Ausgangsmaterial	Mittelwerte
Hacken auf der Rückegasse (inkl. Rücken der Hackschnitzel an die Waldstraße)	Vollbaumnutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 11,0$
	Kronennutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 10,3$
Hacken an der Waldstraße in Aufsattelcontainer	Vollbaumnutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 21,2$
	Kronennutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 14,6$
Hacken an der Waldstraße in externen Container	Vollbaumnutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 22,9$
	Kronennutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 21,8$
Hacken an einem zentralen Platz	Kronennutzung	$\text{Produktivität [Efm/h RAZ]} = 33,8$

10.3 Nettoflächenerlöse bei veränderten Industrieholz- und Hackschnitzelpreisen

Tabelle 70: Nettoflächenerlöse in den Beispielbeständen (Stamm- und Industrieholzpreise: Stand 1/2007, jedoch 50 % höhere Industrieholzpreise; Hackschnitzelpreis 55 €/Efm; in €/ha)

	Verfahren Nr.	Kürzel	NH 251	NH 273	LH 104	LH 101	KI 203	KI 207
Aushaltungs- variante 1 (Aushaltung von Stammholz und Industrieholz)	1	TM40WS	5.297	7.168	1.479	2.828	2.612	4.353
	2	VM40WS	5.305	7.019	1.213	2.365	2.467	4.067
	3	VM40RG	5.305	7.019	1.213	2.365	2.467	4.067
	4	VM20WS	5.896	7.411	1.616	2.703	2.838	4.379
	5	VM20RG	5.896	7.411	1.616	2.703	2.838	4.379
	6	VM20ZP	5.896	7.411	1.616	2.703	2.838	4.379
Aushaltungs- variante 2 (Aushaltung von Stammholz, Industrieholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	5.639	7.574	1.714	3.482	3.139	4.760
	2	VM40WS	5.997	7.502	2.140	3.135	3.199	4.538
	3	VM40RG	6.021	7.463	2.200	3.067	3.185	4.495
	4	VM20WS	6.588	7.894	2.543	3.473	3.570	4.850
	5	VM20RG	6.612	7.856	2.603	3.406	3.557	4.807
	6	VM20ZP	6.526	7.856	---	---	---	---
Aushaltungs- variante 3 (Aushaltung von Stammholz und Hackschnitzeln)	1	TM40WS	5.631	7.545	1.754	3.194	3.012	4.700
	2	VM40WS	5.581	7.379	1.711	2.816	2.797	4.416
	3	VM40RG	5.505	7.298	1.560	2.636	2.663	4.324
	4	VM20WS	6.199	7.777	---	3.170	3.197	4.735
	5	VM20RG	6.123	7.696	---	2.990	3.063	4.643
	6	VM20ZP	6.129	7.744	---	---	---	---