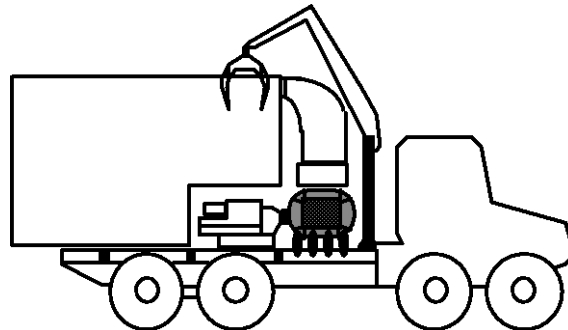


Produktivitätsmodelle für die Holzernte mit Hilfe komponentenbasierter Softwaretechnologie

Grundlagen für die Programmierung

Produktionssystem „Mobiler Hacker mit Aufbaucontainer“

- Mittlere Hacker (auf Forwarder aufgebaut)
- Grosshacker (auf Lastwagen aufgebaut)



Abteilung Management Waldnutzung
Eidg. Forschungsanstalt WSL, 2003, 2007, 2014

Inhaltsübersicht

1	Grundlagen	3
1.1	Entstehung und Verwendung.....	3
1.2	Verzeichnis der Quellen	3
1.3	Beurteilung und besondere Schwierigkeiten	3
1.4	Zeitangaben - Gliederung und Bezugsgrößen	3
2	Produktionssystem - verbal-bildliche Darstellung	4
2.1.	Produktionsfaktoren	4
2.2.	Produktionsprozess.....	4
2.2.1.	Arbeitsaufgaben	4
2.2.2	Arbeitsabläufe	4
2.3	Input- und Outputzustände	5
2.3.1	Input-Zustand	5
2.3.2	Output-Zustand.....	5
2.3.3	Veränderungen.....	5
2.4	Erforderliche Arbeitsbedingungen.....	6
2.4.1	Technik und Personal	6
2.4.2	Gelände und Erschliessung	6
2.4.3	Waldbestände und waldbauliche Massnahmen	6
2.4.4	Weitere.....	6
2.5	Berechneter Output.....	6
3	Produktionssystem - mathematische Darstellung	7
3.1	Systemübersicht "Mobiler, kranbeschickter Hacker".....	7
3.2	Systemzusammensetzung.....	7
3.3	Arbeitsproduktivität in PSH ₁₅ -Zeiten pro m ³	8
3.3.1	Ermittlung der Hackgutmenge.....	8
3.3.2	Teilsystem Fahren	10
3.3.3	Teilsystem Hacken	15
3.3.4	Teilsystem Entladen	16
3.3.5	Zeit pro Rückefahrt und Arbeitseffizienz als PSH ₁₅ -Zeit pro m ³	17
3.4	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro m ³	18
3.5	Abkürzungen und Definitionsbereich.....	18
3.6	Berechnungsbeispiel	21
4	Anhang.....	23
A1:	Volumen von Baumteilen (andere Methode)	23
A2:	Zeitsystem im Komponentenmodell "mobiler Hacker mit Aufbaucontainer".....	26
A3:	Erläuterungen zum Teilsystem Hacken.....	27
A3.1	Formel Stampfer.....	27
A3.2	Untersuchung mittels Einzugsgrösse	28
A3.3	Stückzahl pro Zyklus als Funktion vom Brusthöhendurchmesser.....	30
A3.4	SpZ und VpZ bei Astmaterial	30
A4:	Umrechnungsfaktor $F_{\text{Verteilzeit}}$ für PSH ₁₅ in t_{Hacker}	31
A5:	Hackertypen.....	31
A5.1	Typenherleitung.....	31
A5.2	Mittlerer Hacker	32
A5.3	Grosshacker	32
5	Literaturverzeichnis	33

1 Grundlagen

1.1 Entstehung und Verwendung

Verschiedene Autoren in Europa haben sich mit der Frage der Bereitstellung von Waldhackgut resp. Waldhackschnitzeln beschäftigt. Zur Zeit existieren aber keine praxistauglichen Kalkulationsgrundlagen für den Einsatz von Hackern (Eigenheer, 1998).

Daher wurde ein eigenes Produktivitätsmodell zur Schätzung der Leistung bei der Herstellung von Waldhackschnitzeln entwickelt. Dieses stützt sich auf das Modell für den Einzelprozess „Hacken“ (Stampfer et al., 1997) und auf das Modell Forwarderrücken für die Fahrbewegung (Lüthy, 1997). Die Verknüpfung der unterschiedlichen Modellteile mit dem neu entwickelten Modul "Hackgut", welches die Eingabe der Bestandesdaten koordiniert, sind in einem internen Bericht der WSL (Riechsteiner, 1999) dargestellt.

Die Kalkulationsgrundlage gilt für mobile, kranbeschickte Hacker mittlerer Grösse und Grosshacker.

1.2 Verzeichnis der Quellen

EIGENHEER, U.; 1998: Produktivitätsmodelle für die Erzeugung von Waldhackschnitzeln mit mobilen, kranbeschickten Hackern. Semesterarbeit.

LÜTHY, C.; 1997: Kalkulationsgrundlage für das Holzrücken mit Forwarder. Interner Bericht, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

RIECHSTEINER, D.; 1999: Grundlagen und Herleitung des Produktionssystems mobiler kranbeschickter Hacker mit Aufbaucontainer. Interner Bericht, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

STAMPFER, E.; STAMPFER, K.; TRZESNIEWSKI, A.; 1997: Bereitstellung von Waldhackgut. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 29. BOKU Wien, Institut für Forsttechnik, Hrsg.: Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien.

1.3 Beurteilung und besondere Schwierigkeiten

Leistungsdaten von Feldversuchen mit Hackern sind in der Literatur vorhanden. Da Angaben zu den Beständen, wie durchschnittlicher Brusthöhendurchmesser des Aushiebes (dBHD), mittlere Rückedistanz, Volumen pro Zyklus etc. meist fehlen, ist es äusserst schwierig, zweckmässige und flexible Modelle zu erstellen. Weiter sind in der Literatur keine einheitlichen Zeitangaben vorhanden, was die Auswertung der Feldversuche ebenfalls erschwert.

1.4 Zeitangaben - Gliederung und Bezugsgrössen

Das Modell von Stampfer (1997) für das Hacken und das Modell von Lüthy (1997) für das Rücken liefern Zeitangaben als PSH₁₅ Zeiten (siehe Anhang).

2 Produktionssystem - verbal-bildliche Darstellung

2.1. Produktionsfaktoren

Das Produktionssystem „mobiler kranbeschickter Hacker“ für das Hacken des Hackgutes und das Rücken der entstandenen Hackschnitzel umfasst folgende Produktionsfaktoren:

- 1 mobiler, kranbeschickter Hacker mit Aufbaucontainer
- 1 Fahrer (Maschinist)

2.2. Produktionsprozess

2.2.1. Arbeitsaufgaben

Die Arbeitsaufgabe besteht darin, Holz in Form von Vollbäumen, Kronenmaterial oder Rundholzabschnitten zu hacken (=Baumbearbeitung) und die Waldhackschnitzel anschliessend auf lastwagenerreichbare Lagerplätze zu transportieren (=Geländetransport). Die Zwischenlagerung kann, abhängig vom nachfolgenden Transportprozess, in Containern oder direkt auf dem Boden erfolgen.

2.2.2 Arbeitsabläufe

Das Modell bildet folgende Aktivitäten oder Einzelprozesse der Baumbearbeitung und des Geländetransportes ab (vgl. Abbildung 1): Leerfahrt, Hacken (inkl. Beschicken, Hacken, Bunkern d.h. Einblasen in den Aufbaucontainer), Fahren beim Hacken, Lastfahrt, Entladen. Beim „Fahren beim Hacken“ handelt es sich um die in der Regel kurzen Fahrten von Hackgutpolter zu Hackgutpolter. Das Entladen der Hackschnitzel erfolgt durch Auskippen des Aufbaucontainers. Das Modell bildet keine Vorliefer- und Informationsprozesse ab.

Prozess Bereitstellung von Waldhackschnitzeln - Schnittstellen und abgebildete Aktivitäten:

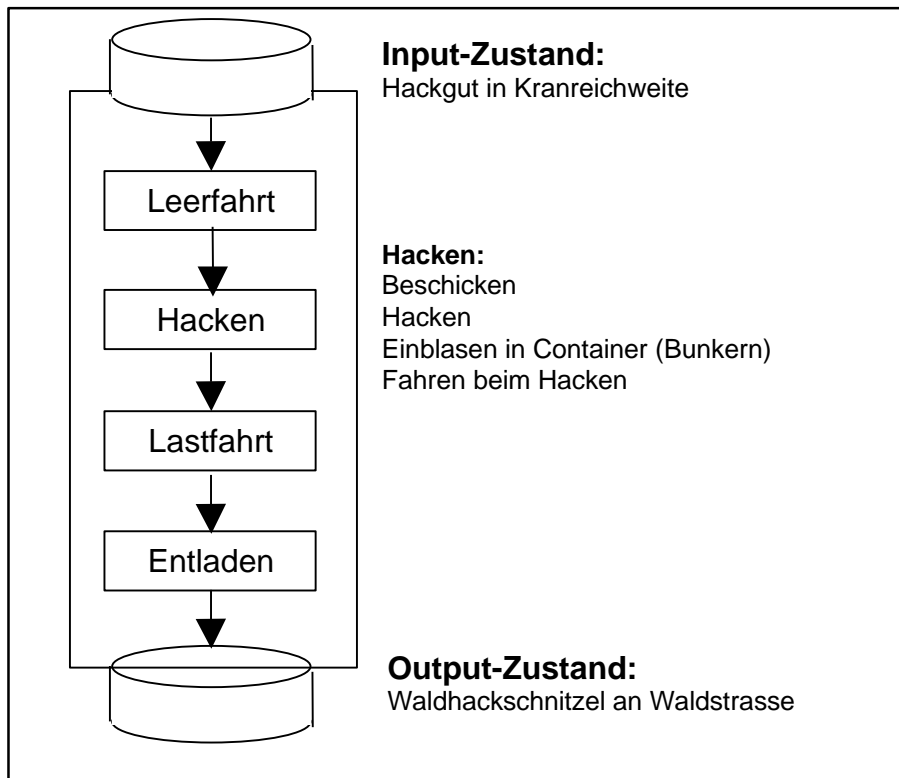


Abbildung 1: Ablauf eines Verarbeitungs- und Rückezyklus.

2.3 Input- und Outputzustände

2.3.1 Input-Zustand

Hackgut in Form von Vollbäumen, Kronenmaterial oder Rundholzabschnitten, vorgeliefert in Kranreichweite des mobilen Hackers (mittels Vollernter, Seilwinde, Pferd etc.).

Die Holzmenge pro Laufmeter Erschliessungslinie sollte 0.6 m^3 und der mittlere BHD des Aushiebes 30 cm nicht übersteigen. Das Teilmodell für den Forwarder gilt nur bis zu einem mittleren BHD von 30 cm. Für grössere BHD wurde das Modell nicht überprüft.

2.3.2 Output-Zustand

Material: Hackschnitzel.

Das gehackte Holz lagert am Abladeort in Form von Waldhackschnitzeln auf dem Boden oder in Containern.

2.3.3 Veränderungen

Vollbäume, Kronenmaterial oder Rundholzabschnitte, meist an den Rand von Rückegassen, Maschinenwegen oder Waldstrassen vorgeliefert, werden zu Hackschnitzeln verarbeitet und zum Lagerplatz transportiert. Dieser befindet sich in der Regel am Rande von lastwagenfahrbaren Waldstrassen, wo die Waldhackschnitzel meist in Containern transportbereit zwischengelagert werden.

2.4 Erforderliche Arbeitsbedingungen

2.4.1 Technik und Personal

- Mittlerer Hacker (Forwarder-Aufbau) oder Grosshacker (Lkw-Aufbau) mit Kranbeschickung und Aufbaucontainer (Bunker) mit Kippvorrichtung.
- Trommelhacker.
- Hydraulikkran, Reichweite ca. 5-8 m, grössere Reichweiten möglich (nicht überprüft).
- Der Maschinist muss auf der eingesetzten Maschine und bezüglich der übrigen Bedingungen des Auftrages geübt sein.

2.4.2 Gelände und Erschliessung

Mittlere Hacker:

- Befahrbares Gelände für Maschinen mit Radfahrgestellen mit einem Gesamtgewicht bis ca. 20 Tonnen.
- Rückegassennetze, auch Erschliessungen mit Maschinenwegen (Breite mindestens 3 m) sowie Einsatz von der Waldstrasse aus.

Grosshacker:

- Lastwagenbefahrbare Waldstrasse

2.4.3 Waldbestände und waldbauliche Massnahmen

- Nur wenige Einschränkungen: Nadel- und Laubholzbestände, Mischbestände aus Nadel- und Laubholz; Stangen- und eher schwache Baumhölzer.
- Durchforstungen (mittlerer BHD des Aushiebes max. 30 cm).

2.4.4 Weitere

Der limitierende Faktor für die Verwendbarkeit des Modelles stellt der durchschnittliche BHD des Aushiebes (dBHD) dar. Die untere Grenze wird durch das Modul "Rohpoltervolumen" des Teilsystems „Fahren“ festgelegt (minimaler dBHD = 8 cm, Lüthy, 1997). Die obere Grenze wird durch die Formel von Stampfer (Stampfer et al., 1997) im Modul "Volumen pro Zyklus" (Teilsystem Hacken) bestimmt. Das Volumen pro Zyklus (VpZ) darf maximal den Wert 1.3 m^3 annehmen. Für einen Silvenwert von 1 ist dies bei einem dBHD von 36 cm der Fall. Dabei spielt die Baumart (Ndh / Lbh) keine Rolle.

Weitere Grenzen können dem Definitionsbereich in Kapitel 3.5 entnommen werden.

2.5 Berechneter Output

- Zeitbedarf in produktiven Systemstunden des Produktionssystems (PSH_{15} pro m^3 oder Srm) (Effizienz).
- m^3 oder Srm pro Zeiteinheit (technische Arbeitsproduktivität).
- Arbeitszeit des Produktionsfaktors Hacker in PMH_{15} pro m^3 oder Srm.
- m^3 oder Srm: Angaben in Efm (nicht Tariffestmeter).

3 Produktionssystem - mathematische Darstellung

3.1 Systemübersicht "Mobiler, kranbeschickter Hacker"

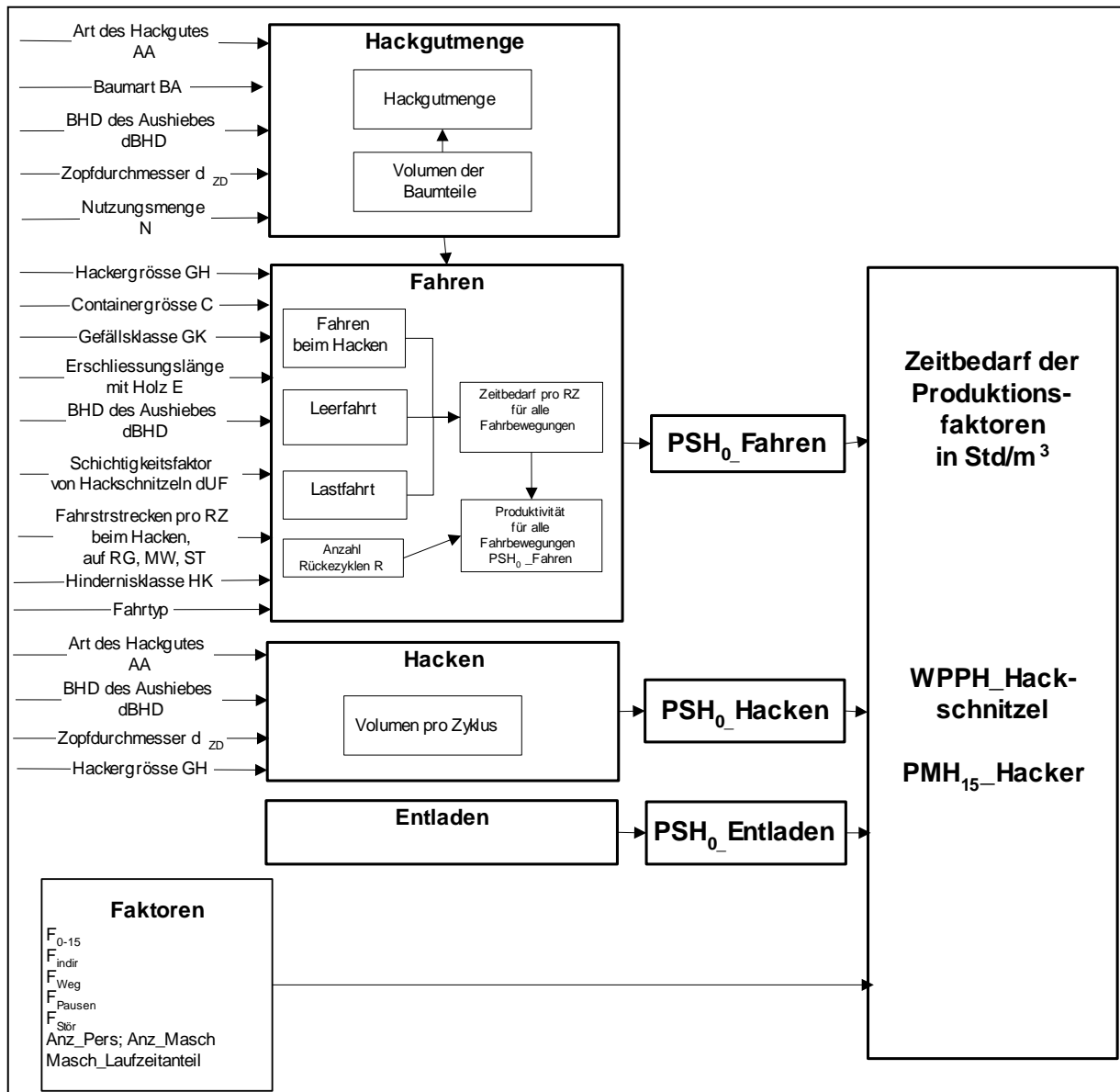


Abbildung 2: Übersicht des Datenflusses im Hackersmodell.

3.2 Systemzusammensetzung

Personal:	Der mobile, kranbeschickte Hacker wird von einem Maschinisten bedient.	1 Arbeitskraft
Maschinen:	Mobiler kranbeschickter Hacker mit Aufbaucontainer (mittlerer Hacker oder Grosshacker)	1 Maschine

Tabelle 1: Systemzusammensetzung.

3.3 Arbeitsproduktivität in PSH₁₅-Zeiten pro m3

3.3.1 Ermittlung der Hackgutmenge

Die Hackgutmenge

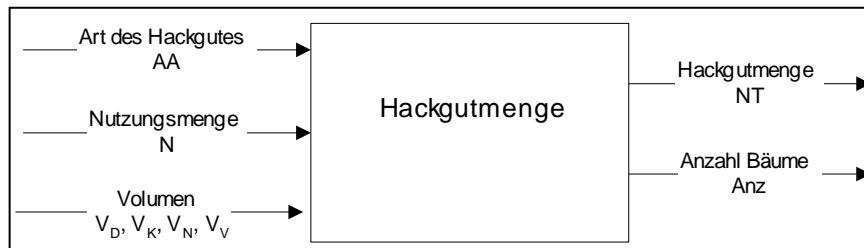


Abbildung 3: Input und Output Hackgutmenge.

Input		Formel	Output	
AA	[-]	<i>falls AA = Vollbaum</i> $NT = V_V \cdot Anz$ <i>falls AA = Kronenmaterial</i> $NT = V_K \cdot Anz$ <i>falls AA = Rundholzabschnitte</i> $NT = V_N \cdot Anz$	NT	[m ³ i.R.]
V _V	[m ³ i.R.]			
V _K	[m ³ i.R.]			
V _N	[m ³ i.R.]	$Anz = \frac{N}{V_D}$	Anz	[-]
N	[m ³ i.R.]			
V _D	[m ³ i.R.]			

Abbildung 4. Formeln zur Ermittlung der Hackgutmenge.

Volumen von Baumteilen

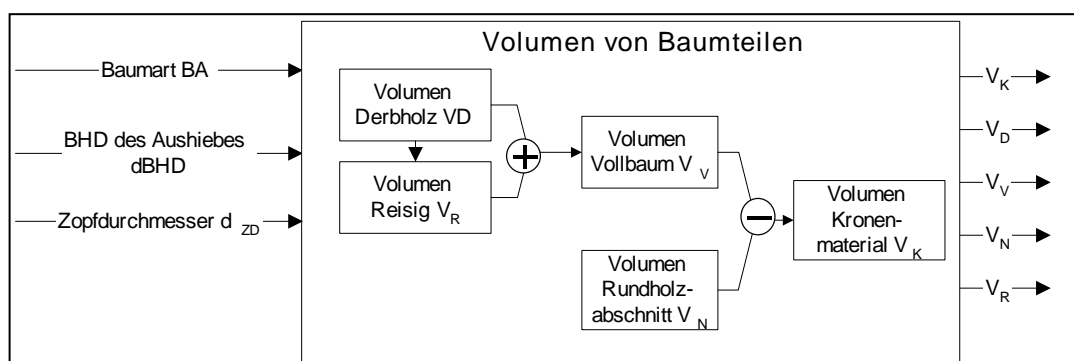


Abbildung 5: Input und Output bei der Ermittlung des Volumens von Baumteilen.

Input		Formel	Output	
$dBHD$	[cm]	$V_V = V_D + V_R$	V_V	[m ³ i.R.]
BA	[-]	$V_D = 0.0002 \cdot dBHD^{2.3897}$ <i>Riechsteiner (1999)*</i>	V_D	[m ³ i.R.]
		$V_R = R_I \cdot dBHD^{R_2} \cdot V_D$	V_R	[m ³ i.R.]
d_{ZD}	[cm]	<i>falls BA = Nadelholz:</i> $R_I = 10.009$ $R_2 = -1.1549$ $V_K = V_V - V_N$ $V_N = AL_{ZD} \cdot \pi \cdot \left(\frac{dMD}{200} \right)^2$ (zu V_N s.Bem. 1 unten) $AL_{ZD} = \frac{d_{ZD} - dBHD}{Km} + 1.3$ $dMD = d \left(h = \frac{AL_{ZD}}{2} \right) = Km \cdot \left(\frac{AL_{ZD}}{2} - 1.3 \right) + dBHD$ $Km = N_1 \cdot dBHD^2 + N_2 \cdot dBHD + N_3$ <i>falls BA = Nadelholz</i> $N_1 = 4E-05; N_2 = -0.0215; N_3 = -0.4238$ <i>falls BA = Laubholz</i> $N_1 = 6E-05; N_2 = -0.0264; N_3 = -0.3887$	V_K	[m ³ i.R.]
			V_N	[m ³ i.R.]

* $V_D Ndh \approx V_D Lbh$, deshalb wurde nicht nach Baumarten unterschieden.

Abbildung 6: Formeln zur Ermittlung des Volumens von Baumteilen.

(1) Bemerkung zur Berechnung von V_N

Im Betrieb zeigte sich bald einmal, dass oben angegebene Berechnung von V_N , als Zylinder, für einzelne, spezielle Fälle zu ungenau war und zu groben Fehlern führte. Im Modell implementierten wir in der Folge eine Lösung auf Kegelbasis. V_N wird dabei als unterer Teil (Basis bis Höhe wo der Zopfdurchmesser auftritt) eines Kegels mit der Gesamthöhe = Baumschaftlänge wie folgt ermittelt:

$dVolumenKegelBasis = dVolumenKegelGesamt - dVolumenKegelSpitze$

wobei: $dVolumenKegelGesamt = (dxPI / 3) \cdot (dBasisDurchm_cm / 200) \wedge 2 \cdot dGesamtLaenge_m$

und $dVolumenKegelSpitze = (dxPI / 3) \cdot (dZopfDrm_cm / 200) \wedge 2 \cdot dSpitzLaenge_m$

mit $dGesamtLaenge_m = (0 - dBHD_cm / adxKm(aha)) + dxBRUSTHOEHE_m$

$dSpitzLaenge_m = dGesamtLaenge_m - adxALzd(aha)$

$dBasisDurchm_cm = dBHD_cm - adxKm(aha) \cdot dxBRUSTHOEHE_m$.

Bemerkungen zur Ausbauchung:

Mittels Ausbauchungsreihe wird die Schaftform des Massenmittelstammes bestimmt, wobei näherungsweise die Form eines geraden Kegels angenommen wird (Siehe Graphik rechts). Ausbauchungsreihen geben die baumartenspezifischen (hier für Fichte und Buche) Verhältnisse von Durchmessern in verschiedenen Stammhöhen zu einem Bezugsdurchmesser an.

Aus diesem Verhältnis wird für verschiedene $dBHD$ - Klassen (8, 12, 16,... 68, 94 cm) die Schaftform berechnet, d.h. der Schaftdurchmesser in verschiedenen Schafthöhen $d(h)$. Pro $dBHD$ -Klasse wird nun mit einem linearen Ansatz die Schaftform ausgeglichen.

Schaftform:

$d(h) = Km \cdot h + Kq$

dabei zeigt sich, dass Km eine Funktion von $dBHD$ ist. Dicke Bäume sind abholziger als dünne.

$Km = N_1 \cdot dBHD^2 + N_2 \cdot dBHD + N_3$ Koeffizienten aus den Steigungen ermittelt.

$Kq = dBHD - Km \cdot 1.3$

falls BA = Nadelholz:

$N_1 = 4E-05$

$N_2 = -0.0215$

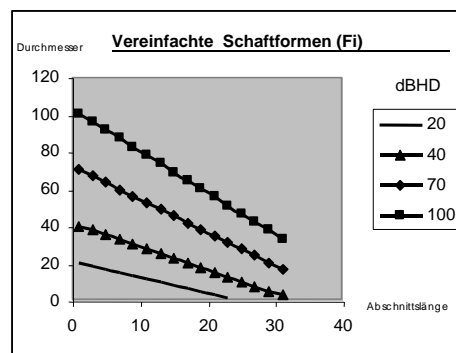
$N_3 = -0.4238$

falls BA = Laubholz:

$N_1 = 6E-05$

$N_2 = -0.0264$

$N_3 = -0.3887$



In 1.3 Meter Höhe entspricht $d_{(1,3)}$ gerade dem Brusthöhendurchmesser.

Aus:

$$d_{(1,3)} = K_m \cdot 1.3 + K_q = dBHD$$

Folgt:

$$d_{(h)} = K_m \cdot (h - 1.3) + dBHD$$

$$dMD = d_{(h=ALZD/2)} = K_m \cdot (ALZD/2 - 1.3) + dBHD$$

$$d_{(ALZD)} = d_{ZD} = K_m \cdot (ALZD - 1.3) + dBHD = K_m \cdot ALZD - K_m \cdot 1.3 + dBHD$$

$$ALZD = 1.3 + (d_{ZD} - dBHD) / K_m$$

3.3.2 Teilsystem Fahren

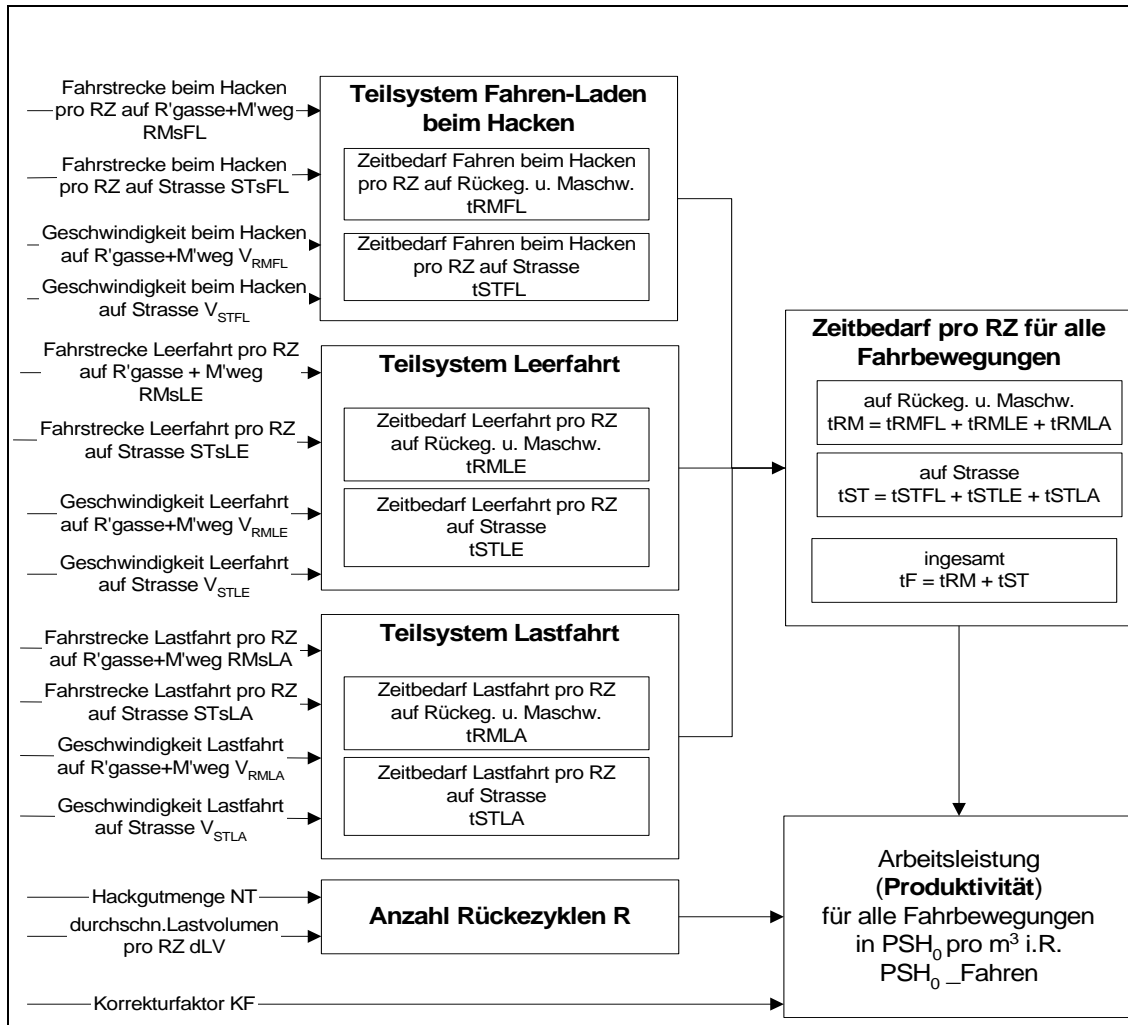


Abbildung 7: Übersicht Zeitbedarf für alle Fahrbewegungen

Produktivität für alle Fahrbewegungen in PSH_0 pro m^3 i.R.

Input		Formel	Output	
NT	$[m^3 \text{ i.R.}]$	$PSH_{15_Fahren} = \frac{t_F}{60} \cdot \frac{R}{NT} \cdot KF \text{ und}$ $R = \frac{NT}{dLV}$	R	[-]
dLV	$[m^3 \text{ i.R.}]$		$PSH_{15_}$	
tF	$\left[\frac{\text{min}}{RZ} \right]$			

KF F_{0-15}	$[-]$	$PSH_{15-Fahren} = \frac{tF}{60} \cdot \frac{1}{dLV} \cdot KF$ $PSH_{0-Fahren} = \frac{PSH_{15-Fahren}}{F_{0-15}}$	$Fahren$ $PSH_{0-Fahren}$	$\left[\frac{Std}{m^3 i.R.} \right]$
--------------------	-------	--	------------------------------	---------------------------------------

Abbildung 8: Formeln zur Berechnung der Produktivität für alle Fahrbewegungen in PSH0 pro m3 i.R.

Zeitbedarf für alle Fahrbewegungen im mittleren Rückezyklus (RZ) auf Rückegassen und Maschinenwegen sowie Strassen

Input		Formel	Output	
RM_sFL V_{RMFL}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tRM = tRMFL + tRMLE + tRMLA$ $tRMFL = \frac{RM_sFL}{V_{RMFL}}$	tRM $tRMFL$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$ $\left[\frac{min}{RZ} \right]$
RM_sLE V_{RMLE}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tRMLE = \frac{RM_sLE}{V_{RMLE}}$	$tRMLE$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$
RM_sLA V_{RMLA}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tRMLA = \frac{RM_sLA}{V_{RMLA}}$	$tRMLA$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$
ST_sFL V_{STFL}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tST = tSTFL + tSTLE + tSTLA$ $tSTFL = \frac{ST_sFL}{V_{STFL}}$	tST $tSTFL$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$ $\left[\frac{min}{RZ} \right]$
ST_sLE V_{STLE}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tSTLE = \frac{ST_sLE}{V_{STLE}}$	$tSTLE$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$
ST_sLA V_{STLA}	$\left[\frac{m}{min} \right]$	$tSTLA = \frac{ST_sLA}{V_{STLA}}$	$tSTLA$	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$
		$tF = tRM + tST$	tF	$\left[\frac{min}{RZ} \right]$

Abbildung 9: Formeln zur Berechnung des Zeitbedarfs für alle Fahrbewegungen im mittleren Rückezyklus auf Rückegassen und Maschinenwegen sowie auf Waldstrassen.

Geschwindigkeiten auf Rückegasse und Maschinenweg

Input		Formel	Output	
<i>HK</i>	[-]	BG = 89 m/min;	V_{RMFL}	$\left[\frac{m}{min} \right]$
<i>GK</i>	[-]	CG _x = 22 m/min		
<i>Fahrttyp</i>	[-]	CG _y = 11 m/min	V_{RMLE}	$\left[\frac{m}{min} \right]$
		CG _z = 7.5 m/min		
		$V_{RM} = (BG - CG_x * [HK - 1]) +$	V_{RMLA}	$\left[\frac{m}{min} \right]$
		$\begin{bmatrix} 0 & \text{falls } \textit{Fahrttyp} = eb \\ (-CG_y * [GK - 1]) & \text{falls } \textit{Fahrttyp} = af \\ (-CG_z * [GK - 1]) & \text{falls } \textit{Fahrttyp} = ab \end{bmatrix}$		
		$15 \leq V_{RMLE} = V_{RM} \bullet 1.0$		
		$15 \leq V_{RMLA} = V_{RM} \bullet 0.64$		
		$15 \leq V_{RMFL} = V_{RM} \bullet 0.5$		
		Die drei Fahrttypen eben, aufwärts und abwärts werden im Modell zu je einem Drittel berücksichtigt.		

Abbildung 10: Formeln zur Berechnung der Geschwindigkeiten auf Rückegasse und Maschinenweg

Hindernisklassen

Hindernisklasse Hk	Hindernishöhe/-tiefe 10 – 30 cm	Hindernishöhe/-tiefe 31 – 50 cm	Hindernishöhe/-tiefe 51 – 90 cm
	[Anzahl Hindernisse pro 100 m Feinerschliessung]		
1	0	0	0
2	< 15	< 3	< 3
3	15 - 150	3 - 15	< 3
4	> 150	> 16	3 - 15

Tabelle 2: Hindernisklassen (Lüthy, 1997).

Gefällsklassentabelle

Gefällsklasse	Steigung oder Gefälle [%]
1	< 10
2	10-20
3	> 20

Tabelle 3: Gefällsklassen (Lüthy, 1997).

Geschwindigkeiten auf Strasse

Input		Formel	Output	
<i>STsLE</i>	[m]	$V_{STFL} = 60 \text{ m/min}$	V_{STFL}	$\left[\frac{m}{min} \right]$
		$V_{STLE} = 126.45 + 0.314 \times STsLE$ <i>falls</i> ($V_{STLE} \geq 200 \text{ m/min}$) <i>dann</i> ($V_{STLE} = 200 \text{ m/min}$)	V_{STLE}	$\left[\frac{m}{min} \right]$
<i>STsLA</i>	[m]	$V_{STLA} = 69.1 + 0.8 \times STsLA$ <i>falls</i> ($V_{STLA} \geq 200 \text{ m/min}$) <i>dann</i> ($V_{STLA} = 200 \text{ m/min}$)	V_{STLA}	$\left[\frac{m}{min} \right]$

Abbildung 11: Formeln zur Berechnung der Geschwindigkeiten auf Strasse.

Leer- und Lastfahrtstrecke im mittleren Ruckzyklus (RZ)

Input		Formel	Output	
GH	[-]	Falls $GH = \text{mittlerer Hacker}$:		
		$RM_sLE = ALE \bullet RM_sLELA$	RM_sLE	[m]
RM_sLELA^*	[m]	$RM_sLA = (1 - ALE) \bullet RM_sLELA$	RM_sLA	[m]
		Falls $GH = \text{Grosshacker}$:		
ALE	[-]	$RM_sLE = 0; RM_sLA = 0$	ST_sLE	[m]
ST_sLELA^*	[m]	$ST_sLE = ALE \bullet ST_sLELA$	ST_sLA	[m]
		$ST_sLA = (1 - ALE) \bullet ST_sLELA$		

* Eingabegrößen im Berechnungsmodell.

Abbildung 12: Formeln zur Berechnung der Leer- und Lastfahrtstrecke im mittleren Ruckzyklus (RZ).

Fahrtstrecke beim Hacken

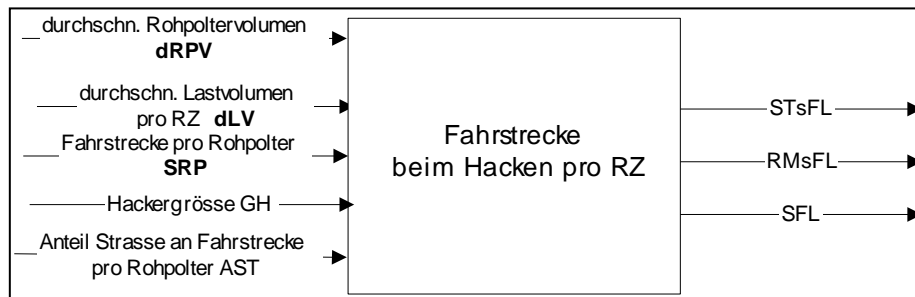


Abbildung 13: Input und Output Fahrtstrecke beim Hacken.

Input		Formel	Output	
dLV	[m ³ i.R.]	$SFL = \frac{dLV \bullet SRP}{dRPV}$	SFL	[m]
SRP	[m]			
$dRPV$	[m ³ i.R.]			
GH	[-]	Falls $GH = \text{mittlerer Hacker}$	ST_sFL	[m]
		$ST_sFL = AST \bullet SFL$		
AST	[-]	$RM_sFL = (1 - AST) \bullet SFL$	RM_sFL	[m]
		Falls $GH = \text{Grosshacker}$		
		$ST_sFL = SFL$		
		$RM_sFL = 0$		

Abbildung 14: Formeln zur Berechnung der Fahrtstrecke beim Hacken.

Das Rohpoltervolumen

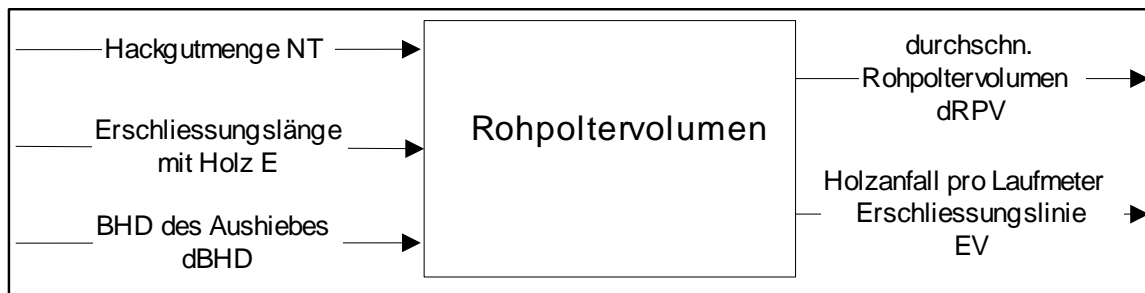


Abbildung 15: Input und Output Rohpoltervolumen.

Input		Formel	Output	
$dBHD$	[cm]	$dRPV = 0.0247 \cdot dBHD + 1.0644 \cdot EV - 0.31973$ $EV = 1.18 \cdot NT / E$ <i>(aus Annahmen vereinfachtes Modell)</i>	$dRPV$	[m ³ i.R.]
E	[m]		EV	$\left[\frac{m^3 \text{ i.R.}}{m} \right]$
NT	[m ³]			

Abbildung 16: Formel zur Berechnung des Rohpoltervolumens.

Lastvolumen pro Rückefahrt

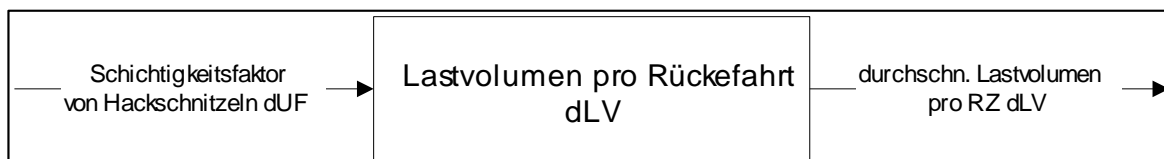


Abbildung 17: Input und Output Lastvolumen pro Rückefahrt.

Input		Formel	Output	
C	[Srm]	$dLV = C \cdot dBH \cdot dUF$ $dBH = 0.95^1$	dLV	[m ³ i.R.]

Abbildung 18: Formel zur Berechnung des Lastvolumens pro Rückefahrt.

Fahrstrecke pro Rohpolter

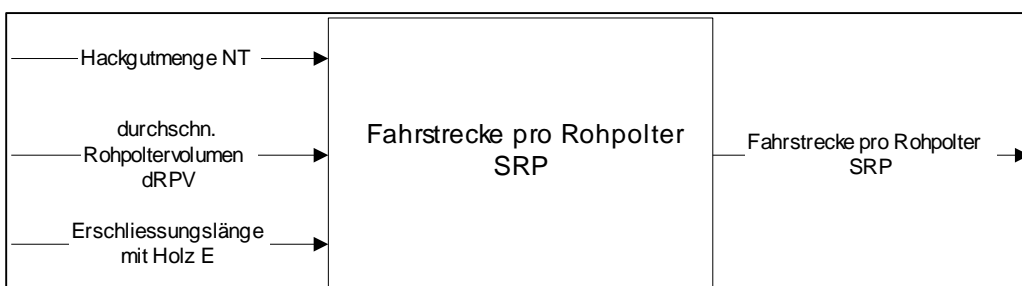


Abbildung 19: Input und Output Fahrstrecke pro Rohpolter.

¹ Die durchschnittliche Beladehöhe wurde unabhängig von der Fahrstrecke auf 0.95 gesetzt.

Input		Formel	Output	
E	[m]	$SRP = \frac{E}{NRP}$ $NRP = \frac{NT}{dRPV}$	SRP	[m]
NT	[m ³ i.R.]		NRP	[-]
$dRPV$	[m ³ i.R.]			

Abbildung 20: Formeln zur Berechnung der Fahrstrecke pro Rohpolter.

3.3.3 Teilsystem Hacken

Zeitbedarf Hacken

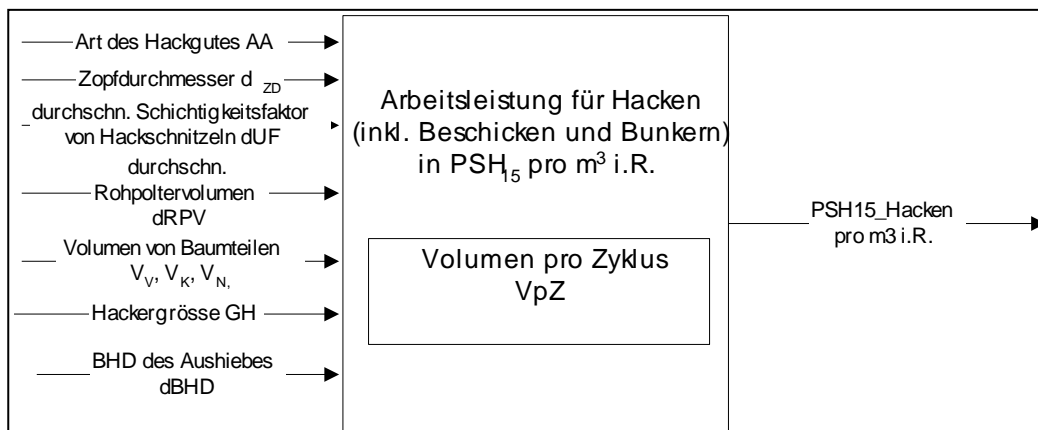


Abbildung 21: Input und Output Zeitbedarf Hacken.

Input		Formel	Output	
VpZ	[m ³ i.R.]	$PSH_{15_Hacken} = \left(\left(\frac{17.55 + 165.48 \cdot VpZ - 74.33 \cdot VpZ^2}{-10.48 \cdot VB} \right) \cdot GHF \cdot dUF \right)^{-1}$ <p>falls AA = Rundholzabschnitte dann VB=1 falls AA = Vollbaum oder Kronenmaterial dann VB=0</p> <p>falls GH = Grosshacker dann GHF = 2.5, falls GH = mittlerer Hacker dann GHF = 1.0, GHF = Grosshackerfaktor (vgl. Anhang 5)</p>	PSH_{15_Hacken}	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
dUF	[-]		VB	[-]
AA	[-]		GHF	[-]
GH	[-]			

Anmerkung

Die Formel von E. Stampfer et. al. 1997 liefert die Hackleistung in Srm^3/PSH_{15} (siehe A3.1 Formel Stampfer). In unserem Modell ist die Bezugsgrösse durchgehend m^3 . Erst ganz am Schluss werden die Werte in Srm^3 umgerechnet. Deshalb müssen in obiger Formel die Srm^3 aus der Formel Stampfer mit dem Umrechnungsfaktor dUF von Srm^3 in m^3 umgerechnet werden.

Abbildung 22: Formeln zur Berechnung des Zeitbedarfes für das Hacken.

Volumen pro Kranzyklus

Input		Formel	Output	
dRPV	[m ³ i.R.]	<i>falls dRPV < VZ dann VpZ = dRPV, sonst VpZ = VZ)</i>	VpZ	[m ³ i.R.]
AA	[-]	<i>falls AA = Vollbaum:</i> $VZ = V_v \cdot SpZ$ <i>falls AA = Kronenmaterial:</i> $VZ = V_k \cdot SpZ$ <i>falls AA = Rundholzabschnitte:</i> $VZ = V_n \cdot SpZ$	VZ	[m ³ i.R.]

Abbildung 23: Formeln zur Berechnung des Volumens pro Kranzyklus.

Zusammenhang Stückzahl pro Hackzyklus SpZ und dBHD

dBHD	[cm]	<i>falls AA = Vollbaum oder Rundholzabschnitte:</i> <i>falls dBHD ≤ 20 cm:</i> $SpZ = 11.494 \cdot dBHD^{-0.7854}$ Riechsteiner (1999) <i>falls dBHD > 20 cm:</i> $SpZ = 1.5357 \cdot dBHD^{-0.1176}$ Riechsteiner (1999) <i>falls SpZ < 1 dann SpZ = 1</i>	SpZ	[-]
dZD	[cm]	<i>falls AA = Kronenmaterial:</i> <i>falls dZD ≤ 20 cm:</i> $SpZ = 11.494 \cdot dZD^{-0.7854}$ Riechsteiner (1999) <i>falls dZD > 20 cm:</i> $SpZ = 1.5357 \cdot dZD^{-0.1176}$ Riechsteiner (1999) <i>falls SpZ < 1 dann SpZ = 1</i>	SpZ	[-]

Abbildung 24: Formeln für die Berechnung der Stückzahl pro Zyklus SpZ (Einzelheiten dazu findet man im Anhang 3.3).

3.3.4 Teilsystem Entladen

Zeitbedarf Entladen

Über den Zeitbedarf für das Kippen des Bunkers in den Grosscontainer auf der Waldstrasse ist in der Literatur ebenfalls wenig zu finden. Einzig Feller (1998) stellte in seiner Untersuchung fest, dass der Zeitbedarf ca. 19% der Hackzeit (in RAZ) beträgt. Als Default wird für das Entladen ein Zeitbedarf von 20% der Hackzeit (PSH₁₅) angenommen.

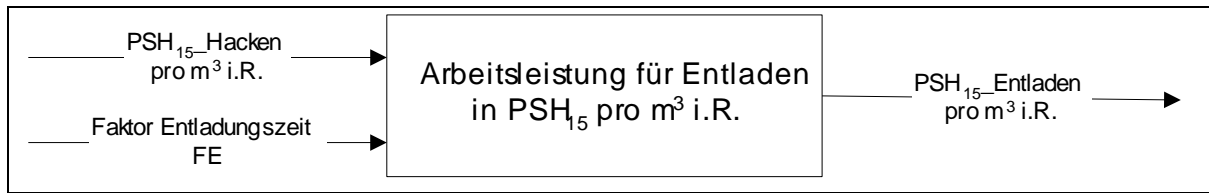


Abbildung 25: Input und Output Zeitbedarf Entladen.

Input		Formel	Output	
FE PSH_{15_Hacken}	$\left[\frac{\text{min}}{m^3} \right]$	$PSH_{15_Entladen} = PSH_{15_Hacken} \bullet FE$	$PSH_{15_Entladen}$	$\left[\frac{\text{Std.}}{m^3 i.R.} \right]$

Abbildung 26: Formel zur Berechnung des Zeitbedarfs für das Entladen.

3.3.5 Zeit pro Rückfahrt und Arbeitseffizienz als PSH_{15} -Zeit pro m^3

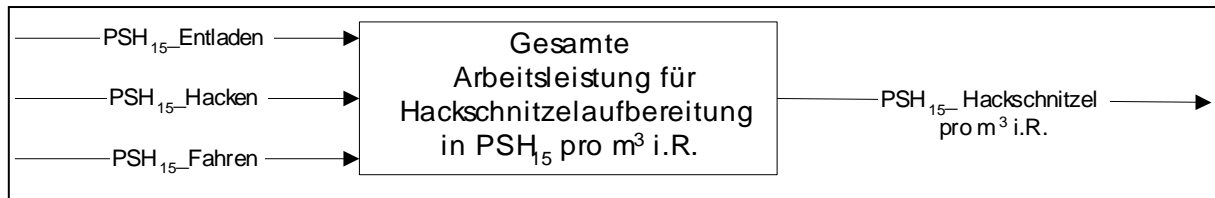


Abbildung 27: : Input und Output Totale Systemzeit.

Input		Formel	Output	
$PSH_{15_Entladen}$ PSH_{15_Fahren} PSH_{15_Hacken}	$\left[\frac{\text{min}}{m^3 i.R.} \right]$	$PSH_{15_Hackschnitzel} = PSH_{15_Entladen} + PSH_{15_Fahren} + PSH_{15_Hacken}$	$PSH_{15_Hack-schnitzel}$	$\left[\frac{\text{Std.}}{m^3 i.R.} \right]$

Abbildung 28: Formeln zur Berechnung von Zeit pro Rückfahrt und Arbeitseffizienz.

3.4 Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro m³

Input		Formel	Output	
Anzahl Personen	[-]	$WPPH_Hackschnitzel = \left(Anzahl_Pers \cdot PSH_0_Hackschnitzel \cdot F_{0-15} \cdot F_{indir} \cdot F_{Weg} \cdot F_{Pausen} \cdot F_{Stör} \right)$ $PSH_0_Hackschnitzel = \frac{PSH_{15_Hackschnitzel}}{F_{0-15}}$ $PMH_{15_Hacker} = (PSH_0 \cdot Masch_Laufzeitanteil \cdot F_{0-15})$ <p>Faktoren :</p> $Anzahl_Pers = 1$ $F_{indir} = \frac{F_{Verteilzeit}}{F_{0-15}}$ $F_{Verteilzeit} = \text{individuell} = 1,41 \text{ [Riechsteiner, 1999]}$ <p>und Anhang 4</p>	WPPH_Hack-schnitzel	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
F_{Weg}	[-]			
$F_{Stör}$	[-]			
F_{Pausen}	[-]			
$F_{Verteilzeit}$	[-]			
F_{0-15}	[-]		PMH _{15_H} acker	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
F_{indir}	[-]			
Masch_Laufzeitanteil	[-]			

Abbildung 29: Formeln zur Berechnung des Zeitbedarfs der Produktionsfaktoren pro m³.

3.5 Abkürzungen und Definitionsbereich

Anmerkung: Zur Abbildung der Fahrbewegungen im Hackermodell wurde das Modell für das Fahren mit dem Forwarder verwendet. Deshalb erscheint in der Definition einzelner Abkürzungen die Bezeichnung „Rückezyklus“.

Abk.	Definition	Default-Werte	Def. Bereich	Einheit
AA	Art des Hackgutes: Vollbaum / Kronenmaterial / Rundholzabschnitte		-	[-]
AL _{ZD}	Länge des mittleren Rundholzabschnittes bis zum Zopfdurchmesser		≥ 0	[m]
ALE	Anteil Leerfahrt pro mittlerer Rückezyklus	0.5		[-]
Anz	Anzahl Bäume		> 0	[-]
Anzahl Personen	Anzahl Personen, die bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln zum Einsatz gelangen.	1	1	[-]
ARM	Anteil Rückegasse/Maschinenweg an Fahrstrecke pro Rohpolter	1-AST		[-]
AST	Anteil Strasse an Fahrstrecke pro Rohpolter	0.3 ²		[-]
BA	Baumart: Nadelholz / Laubholz		-	[-]
BG	Basis-Geschwindigkeit beim Fahren mit dem Hacker	89		$\left[\frac{m}{min} \right]$
C	Containergrösse		> 0	[Srm]
CG _x	Geschwindigkeitsveränderung gegenüber der Basisgeschwindigkeit beim Fahren auf Rückegassen und Maschinenwegen, Fahrtyp = eben	22		$\left[\frac{m}{min} \right]$
CG _y	zusätzliche Geschwindigkeitsveränderung, Fahrtyp = aufwärts	11		$\left[\frac{m}{min} \right]$
CG _z	zusätzliche Geschwindigkeitsveränderung, Fahrtyp = abwärts	7.5		$\left[\frac{m}{min} \right]$

² In Software anders implementiert: AST = FahrstreckeStrasse/FahrstreckeGesamt

Abk.	Definition	Default-Werte	Def. Bereich	Einheit
<i>dBH</i>	durchschnittliche Beladehöhe	0.85 -0.95		[-]
<i>dBHD</i>	durchschnittlicher BHD des Aushiebes		8 - 36 ³	[cm]
<i>dLV</i>	durchschnittliches Lastvolumen pro Ruckezyklus		10 - 30	[m ³ i.R.]
<i>dMD</i>	Mittendurchmesser des mittleren Rundholzabschnittes		≥ 0	[cm]
<i>dRPV</i>	durchschnittliches Rohpoltervolumen		> 0	[m ³ i.R.]
<i>dUF</i>	durchschnittlicher Schichtigkeitsfaktor von Hackschnitzeln (Umrechnung von Srm in m3)	0.4		[-]
<i>dZD</i>	durchschnittlicher Zopfdurchmesser des mittleren Rundholzabschnittes (inkl. Zumass)		0 - 36	[cm]
<i>E</i>	Erschliessungslänge mit Holz		> 0	[m]
<i>EV</i>	Erschliessungslänge mit Holz im Rohpoltermodell		8 - 54	$\left[\frac{m^3 i.R.}{100m} \right]$
<i>Fahrttyp</i>	Fahrttyp charakterisiert, ob die Fahrt eben (eb), aufwärts (af), oder abwärts (ab) verläuft.	eb	eb, af, ab	[-]
<i>F..</i> <i>F₀₋₁₅</i> <i>F_{indir}</i> <i>F_{Pausen}</i> <i>F_{Weg}</i> <i>F_{Stör}</i> <i>F_{Verteilzeit}</i>	Multiplikationsfaktoren für: unvermeidbare Verlustzeiten >15 Min. indirekte Arbeitszeiten Pausen >15 Min. Wegzeiten >15 Min. Störzeiten >15 Min. Verteilzeiten	1.41	≥ 1.0	[-]
<i>FE</i>	Faktor zur Schätzung der Entladezeit	0.2		[-]
<i>GH</i>	Hackergrösse: mittlerer Hacker / Grosshacker		mittlerer H., GrossH.	[-]
<i>GHF</i>	Grosshackerfaktor	2.5		[-]
<i>GK</i>	Gefällsklasse (siehe Tab.3)		1-3	[-]
<i>HK</i>	Hindernisklasse (siehe Tab.2)		1 - 4	[-]
<i>KF</i>	Korrekturfaktor zur Anpassung der Modellergebnisse an die Feldversuche	1.2		[-]
<i>Km</i>	Parameter für Bestimmung der Schaffform		< 0	[-]
<i>Kq</i>	Parameter für Bestimmung der Schaffform		> 0	[-]
<i>N</i>	Gesamt-Nutzungsmenge		> 10	[m ³ i.R.]
<i>NRP</i>	Anzahl Rohpolter		0-99999	[-]
<i>NT</i>	Hackgutmenge (abhängig von Auswahl)		> 10	[m ³ i.R.]
<i>PMH₁₅ Hacker</i>	Produktive Maschinenarbeitszeit (MAS) des Hackers pro m ³ i.R. bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln (siehe Anhang)		≥ 0	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
<i>PSH₀ Fahren</i> <i>Hacken</i> <i>Entladen</i> <i>Hackschnitzeln</i>	Systemzeit ohne Unterbrüche pro m ³ i.R. (siehe Anhang) für: alle Fahrbewegungen Beschicken, Hacken und Bunkern (Einblasen in den Container (Bunker)) Entladen des Containers gesamte Bereitsstellung von Hackschnitzeln		≥ 0	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
<i>PSH₁₅ Fahren, Hacken,</i>	Produktive Arbeitszeit pro m ³ i.R. (siehe Anhang)			

³ In der Software bis 50cm zugelassen. Allfällige Fehler bei der Volumenberchnung werden vom Programm gemeldet.

Abk.	Definition	Default-Werte	Def. Bereich	Einheit
<i>Entladen Hack-schnitzel</i>	für: siehe PSH ₀		≥ 0	$\left[\frac{Std.}{m^3 i.R.} \right]$
<i>R</i>	Anzahl Ruckezyklen		≥ 0	[-]
<i>RM_sFL</i>	Fahrstrecke Fahren beim Hacken auf Rückegasse, Maschinenweg im mittleren Ruckezyklus		≥ 0	[m]
<i>RM_sLA</i>	Fahrstrecke Lastfahrt pro mittlerer Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	[m]
<i>RM_sLE</i>	Fahrstrecke Leerfahrt pro mittlerer Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	[m]
<i>RM_sLELA</i>	Leer- und Lastfahrten pro mittlerer Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		0-99999	[m]
<i>RZ</i>	Ruckezyklus		≥ 0	[-]
<i>S</i>	Fahrstrecke aller Leer- und Lastfahrten auf Rückegasse, Maschinenweg und Strasse pro mittlerem Ruckezyklus		≥ 0	[m]
<i>SFL</i>	Fahrstrecke beim Hacken im Ruckezyklus		≥ 0	[m]
<i>SpZ</i>	Stückzahl pro Kranzyklus		≥ 0	[N]
<i>SRP</i>	Fahrstrecke pro Rohpolter		≥ 0	[m]
<i>ST_sFL</i>	Fahrstrecke Fahren beim Hacken auf Strasse im mittleren Ruckezyklus		≥ 0	[m]
<i>ST_sLA</i>	Fahrstrecke Lastfahrt pro mittlerer Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	[m]
<i>ST_sLE</i>	Fahrstrecke Leerfahrt pro mittlerer Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	[m]
<i>ST_sLELA</i>	Leer- und Lastfahrten pro mittlerer Ruckezyklus auf Strasse		0-99999	[m]
<i>t_F</i>	Zeitbedarf für alle Fahrbewegungen des mittleren Ruckezyklus		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{RM}</i>	Zeitbedarf für alle Fahrbewegungen im mittleren Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{RM}FL</i>	Zeitbedarf für Fahren beim Hacken im mittleren Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{RM}LA</i>	Zeitbedarf für Lastfahrten im mittleren Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{RM}LE</i>	Zeitbedarf für Leerfahrten im mittleren Ruckezyklus auf Rückegasse und Maschinenweg		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{ST}</i>	Zeitbedarf für alle Fahrbewegungen im mittleren Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{ST}FL</i>	Zeitbedarf für Fahren beim Laden im mittleren Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{ST}LA</i>	Zeitbedarf für Lastfahrten im mittleren Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>t_{ST}LE</i>	Zeitbedarf für Leerfahrten im mittleren Ruckezyklus auf Strasse		≥ 0	$\left[\frac{\min}{RZ} \right]$
<i>VB</i>	Auswahl Sortiment oder Vollbaum für Formel Stampfer (Stampfer et al., 1997)		-	[-]

Abk.	Definition	Default-Werte	Def. Bereich	Einheit
V_D	Volumen des Massenmittelstammes (Derbholz)		≥ 0	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_K	Volumen Kronenmaterial des Massenmittelst.		≥ 0	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_N	Volumen eines mittleren Rundholzabschnittes		≥ 0	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_{pZ}	Volumen pro Hackzyklus		0.1 - 1.3	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_R	Volumen Reisig des Massenmittelstammes		≥ 0	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_{RMFL}	Geschwindigkeit auf Rückegasse und Maschinenweg beim Hacken		>0	$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_{RMLA}	Geschwindigkeit auf Rückegasse und Maschinenweg bei Lastfahrt		>0	$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_{RMLE}	Geschwindigkeit auf Rückegasse und Maschinenweg bei Leerfahrt		>0	$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_{STFL}	Geschwindigkeit auf Strasse beim Hacken	60		$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_{STLA}	Geschwindigkeit auf Strasse bei Lastfahrt		>0	$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_{STLE}	Geschwindigkeit auf Strasse bei Leerfahrt		>0	$\left[\frac{m}{min} \right]$
V_V	Volumen Vollbaum des Massenmittelstammes		≥ 0	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_Z	Volumen pro Hackzyklus ⁴		0.1 - 1.3	$[m^3 \text{ i.R.}]$
$WPPH_{\text{Hackschnitzel}}$	Arbeitsplatzzeit für das Personal pro m^3 i.R. bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln (siehe Anhang)		≥ 0	$\left[\frac{Std.}{m^3 \text{ i.R.}} \right]$

Tabelle 4: Abkürzungen und Definitionen.

3.6 Berechnungsbeispiel

Eingabe

Bestandesdaten:				Nutzungsdaten:			
Hindernisklasse	HK	1		Baumart	BA	1	
Gefällsklasse	GK	1		Hackgut	AA	0	
Fahrttyp		af		Silvenwert	SW	1	
E_Länge mit Holz	E	200	m	dBHD	dBHD	15	cm
Leer & Last RG	FRM	200	m	Zopfdurchmesser	dZD	0	cm
Leer & Last ST	FST	50	m	Nutzmenge	N	160	$m^3 \text{ i.R.}$
Default-Werte:				Maschinendaten:			
Umrechnung Srm	dUF	0.4		Containergrösse	C	30	Srm
Anteil Leer	ALE	0.5		Hackergrösse	GH	0	
Anteil Last	ALA	0.5					
Basis-Geschw.	BG	89					
Geschw. Änderung	CGx	22					
	Cgy	11					
	CGz	7.5					
Gesch Strasse Laden	VSTFL	60					
Korrekturfaktor	KF	1.2					
Entladefaktor	FE	0.2					

⁴ Rechnerischer Wert für V_{pZ} , nur relevant falls $dRPV \geq V_{pZ}$

Totale Systemzeit

Fahren		0.37	min/m ³ i.R.	Nutzungsmenge	m ³	230.18	
Hacken		2.67	min/m ³ i.R.	VpZ	m ⁴	0.26	
Entladen		0.53	min/m ³ i.R.	SpZ	m ⁵	1.42	
Total		3.58	min/m ³ i.R.	Vv	m ⁶	0.19	
				Vk	m ⁷	0.08	
Leistung		0.28	m ³ i.R./min	Vn	m ⁸	0.10	
		0.70	Srm/min	Vd	m ⁹	0.13	
		41.92	Srm/h	AL	m	20.75	
Effizienz		0.02	h/Srm				
Zeit/Objekt		13.73	h				

Tabelle 5: Berechnungsbeispiel (Riechsteiner, 1999).

4 Anhang

A1: Volumen von Baumteilen (andere Methode)

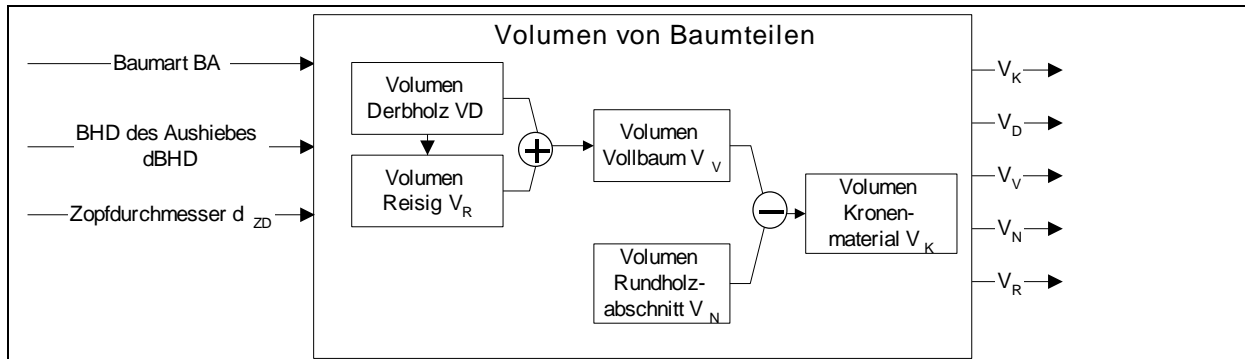


Abbildung 30: Input und Output bei der Ermittlung des Volumens von Baumteilen.

Input		Formel	Output	
h_{dom}	[m]	$\frac{V_D}{G}(h_{dom}) = C_1 * EXP(\frac{C_2}{h_{dom}})$		
$dBHD$	[cm]	$F_V = f(\frac{V_D}{G}) = C_3 * EXP(\frac{C_4}{\frac{V_D}{G} + 0.5})$		
BA	[-]	$F_V = \frac{V_V}{V_D}$	V_V	[m ³ i.R.]
		$V_V = F_V * V_D$	V_D	[m ³ i.R.]
d_{ZD}	[cm]	$V_D = C_1 * EXP(\frac{C_2}{h_{dom}}) * dBHD^2 * \pi / 40000$	V_R	[m ³ i.R.]
		$V_R = V_V - V_D$	V_K	[m ³ i.R.]
			V_N	[m ³ i.R.]
		$\begin{array}{ccccc} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ \text{Fichte} & 33.54 & -28.01 & 0.94 & 3.06 \\ \text{Buche} & & & & \end{array}$		
		$V_K = V_V - V_N$		
		$V_N = AL_{ZD} \cdot \pi \cdot \left(\frac{dMD}{200}\right)^2$		
		$AL_{ZD} = \frac{d_{ZD} - dBHD}{Km} + 1.3$		
		$dMD = \left(h = \frac{AL_{ZD}}{2}\right) = Km \cdot \left(\frac{AL_{ZD}}{2} - 1.3\right) + dBHD$		
		$Km = N_1 \cdot dBHD^2 + N_2 \cdot dBHD + N_3$		
		<i>falls BA = Nadelholz</i> $N_1 = 4E - 05; N_2 = -0.0215; N_3 = -0.4238$		
		<i>falls BA = Laubholz</i> $N_1 = 6E - 05; N_2 = -0.0264; N_3 = -0.3887$		

Abbildung 31: Formeln zur Ermittlung des Volumens von Baumteilen.

Input		Formel	Output	
AA	$[-]$	falls AA = Vollbaum $NT = V_V \bullet Anz$ falls AA = Kronenmaterial $NT = V_K \bullet Anz$ falls AA = Rundholzabschnitte $NT = V_N \bullet Anz$	NT	$[m^3 \text{ i.R.}]$
V_V	$[m^3 \text{ i.R.}]$			
V_K	$[m^3 \text{ i.R.}]$			
V_N	$[m^3 \text{ i.R.}]$	falls AA = Rundholzabschnitte $NT = V_N \bullet Anz$	Anz	$[-]$
N V_D	$[m^3 \text{ i.R.}]$ $[m^3 \text{ i.R.}]$			
		$Anz = \frac{N}{V_D}$		

Abbildung 32: Formeln zur Ermittlung des Volumens von Baumteilen

Hdom	V7/G Fi	V7/G Bu	Modell
10	2.1	2.5	2.04
15	5.3	5.2	5.19
20	8.2	8	8.27
25	10.8	11	10.94
30	13.2	14.2	13.19
35	15.1	17.6	15.07
40	16.7	21.1	16.66

Tabelle 6: Formhöhenwerte in Abhängigkeit von h_{dom} (Forstkalender 1998, S.181).

arith. Mittelhöhe	FD	FV	FV/FD	Modell FV/FD=f(FD)
6	1.2	6.6	5.500	5.685
7	2	7	3.500	3.197
8	2.9	7.5	2.586	2.313
9	3.8	8	2.105	1.916
10	4.6	8.5	1.848	1.714
11	5.4	8.9	1.648	1.580
12	6.1	9.3	1.525	1.496
13	6.9	9.8	1.420	1.423
14	7.5	10.2	1.360	1.379
15	8.1	10.6	1.309	1.343
16	8.7	11	1.264	1.312
17	9.3	11.4	1.226	1.286
18	9.8	11.8	1.204	1.266
19	10.3	12.2	1.184	1.249
20	10.8	12.6	1.167	1.234
21	11.3	13	1.150	1.219
22	11.7	13.4	1.145	1.209
23	12.1	13.7	1.132	1.200
24	12.5	14.1	1.128	1.191
25	12.8	14.4	1.125	1.184
26	13.1	14.7	1.122	1.178
27	13.5	15	1.111	1.171
28	13.8	15.3	1.109	1.165
29	14.1	15.6	1.106	1.160

30	14.4	15.9	1.104	1.155
31	14.6	16.1	1.103	1.152
32	14.9	16.3	1.094	1.148

Tabelle 7: Werte der Formhöhe für Derbholz und Vollbaum.

Bemerkungen

Beim Arbeiten mit diesen Formeln treten, gewisse Probleme auf.

- H/BHD sollte nicht beliebig sein
- Bei Vorgabe Zopfdurchmesser 7 cm sollte $V_N=V_D$ sein. Dies ist bei der ursprünglichen Form Riechsteiner besser gewährleistet.
- Vorteil liegt darin, dass man für verschiedene Oberhöhen die Volumenbestimmung durchführen kann.
- Bei sehr kleinen Zahlen für V_D steigt die Anzahl Bäume sehr stark an, was zu grossen Volumenwerten für Kronenmaterial, etc führt.
- Unterschiede im Kronenmaterial

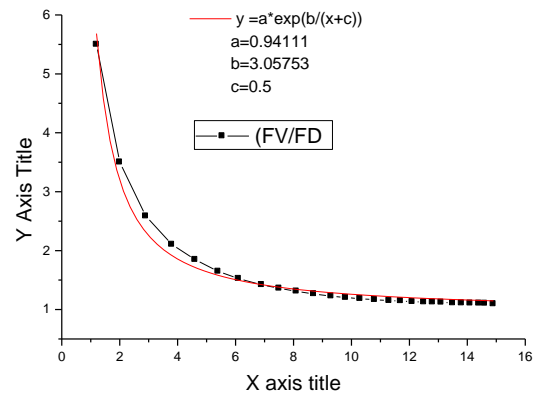
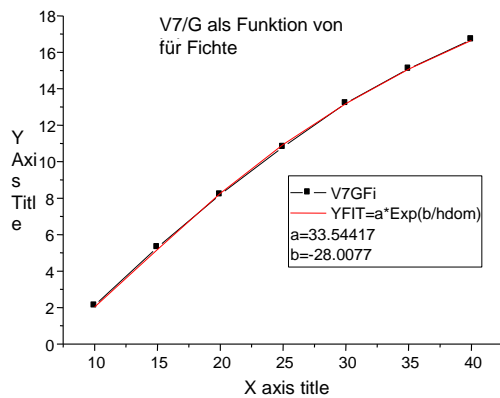
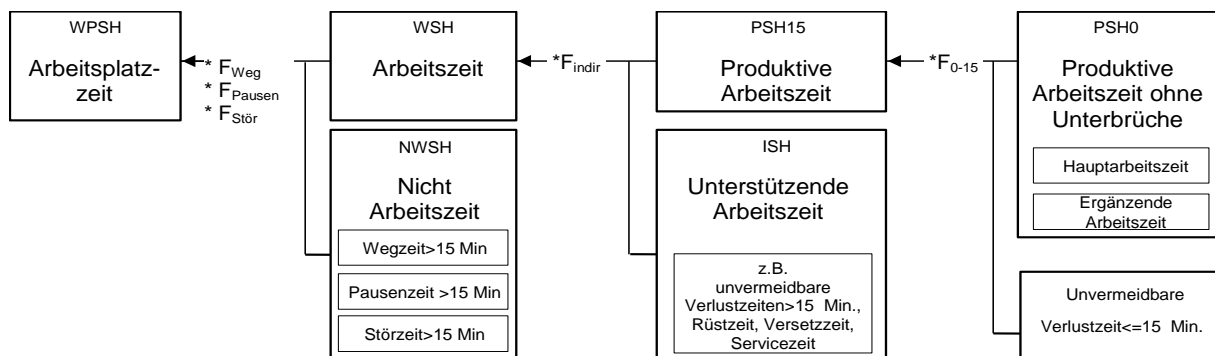


Abbildung 33: V7/G als Funktion von h_{dom} für Fichte

A2: Zeitsystem im Komponentenmodell “Mobiler Hacker mit Aufbaucontainer”



(nach Björheden & Thompson 1995 und Heinimann 1997, verändert Björheden & Thompson 1995: An International Nomenclature For Forest Work Study, Swedish University of Agricultural Sciences Department of Operational Efficiency, Sweden; Heinimann, H.R. 1997: Skript Forstl. Verfahrenstechnik, ETH Zürich)

Abbildung 34: Verwendetes Zeitsystem

Die in Abbildung 34 aufgeführten Zeiten können grundsätzlich für das Produktionssystem als ganzes sowie für die beteiligten Produktionsfaktoren (Maschinen, Personal) ermittelt werden. Je nachdem spricht man zum Beispiel von der System-, von der Maschinen- oder von der Personalarbeitszeit. In Anlehnung an die Originalgrundlagen wurden die Abkürzungen von den englischen Begriffen abgeleitet.

Betrachtetes Objekt	Arbeitsplatzzeit				
	Nicht Arbeitszeit (non work time)		Arbeitszeit (Work time)		
	workplace...	non work...	work...	indirect...	productive...
System (...system hour)	WPSH	NWSH	WSH	ISH	PSH
Maschine (...machine hour)	WPMH	NWMH	WMH	IMH	PMH
Personal (...personal hour)	WPPH	NWPH	WPH	IPH	PPH

Tabelle 8: Übersicht über die verwendeten Zeitbegriffe.

Berechnung der System- und Faktorzeiten

System :

$$PSH_{15} = PSH_0 * F_{0-15}$$

$$WSH = PSH_{15} + ISH = PSH_{15} * F_{indir}$$

$$WPSH = WSH + NWSH = WSH * F_{Weg} * F_{Pausen} * F_{Stör}$$

Personal :

$$PPH_0 = Anz_Pers * PSH_0$$

$$PPH_{15} = PPH_0 * F_{0-15}$$

$$WPH = PPH_{15} + IPH = PPH_{15} * F_{indir}$$

$$WPPH = WPH * F_{Weg} * F_{Pausen} * F_{Stör}$$

Maschinen :

$$PMH_0 = Anz_Masch * PSH_0 * Masch_Laufzeitanteil$$

$$PMH_{15} = PMH_0 * F_{0-15}$$

$$WMH = PMH_{15} + IMH = PMH_{15} * F_{indir}$$

$$WPMH = WMH * F_{Stör}$$

$$F_{0-15} = \frac{PSH_{15}}{PSH_0}$$

$$F_{indir} = 1 + \frac{ISH}{PSH_{15}}$$

$$F_{Weg} = 1 + \frac{\text{bez. Wegzeit pro Tag}}{\text{bez. WSH (Arbeitszeit) pro Tag}}$$

$$F_{Pausen} = 1 + \frac{\text{bez. Pausenzeit pro Tag}}{\text{bez. WSH (Arbeitszeit) pro Tag}}$$

$$F_{stör} = 1 + \frac{\text{Störzeiten} > 15\text{Min.}}{WSH}$$

Abbildung 35: Formeln zur Berechnung der System- und Faktorzeiten.

A3: Erläuterungen zum Teilsystem Hacken

A3.1 Formel Stampfer

Die einzige brauchbare Formel, die in der Literatur gefunden werden konnte, ist diejenige von Stampfer (Stampfer et. al., 1997). Sie gilt für mittlere, kranbeschnittene Hacker, berechnet die Leistung in $\text{Srm}^3/\text{PSH}_{15}$ für das Hacken von Vollbäumen und Sortimenten und hat folgende Eingangsgrößen:

Eingangsgrösse	Einheit	Bemerkung
Volumen pro Zyklus (VpZ)	fm (=Tfm)	- Zyklus: Die Zeit von der Auflage eines Bündels in den Einzug/Förderband bis zum nächsten Bündel. - liefert bis zu einem VpZ von 1.3 m ³ realistische Werte.
Vollbaum/Sortiment	0/1	- Dummy-Variable

Tabelle 9: Eingangsgrößen Teilsystem Hacken

Einerseits ist die Eingangsgrösse "Volumen pro Zyklus (VpZ)" schwer zu bestimmen, andererseits sollen die Bestandesdaten nur einmal erhoben werden. Im Teilsystem Fahren wird der Bestand mittels dBHD (der Nutzungsmenge), Erschliessungslänge mit Holz und Hackgutmenge umschrieben und daraus das durchschnittliche Rohpoltervolumen berechnet.

Es wird nun versucht, eine Funktion zwischen dem dBHD des zu hackenden Holzes und dem "Volumen pro Zyklus (VpZ)" herzuleiten. Da die Beziehung dBHD zu VpZ tarifabhängig ist, erscheint es sinnvoll, die Beziehung dBHD zu "Stückzahl pro Zyklus (SpZ)" herzuleiten und diese mit dem jeweils für die örtlichen Gegebenheiten gültigen Massenmittelstamm hochzurechnen.

Gemäss Becker (Becker et al., 1986) ist die Abhängigkeit der Baumzahl vom BHD pro Krangriff als gesichert anzusehen (Korrelationskoeffizient $r=-0.7$).

Einzig aus der Untersuchung von Becker (Becker et al., 1986) und Plath (Plath, et al., 1996) lässt sich die Stückzahl pro Zyklus herleiten.

Quelle	BHD	Hackort	Hackgut	Distanz	Nutzmenge Sm3	Nutzmenge m3	Sm3/hRAZ	Sm3/hGAZ	Fläche [ha]	Stückzahl	SpZ	VpZ [fm]	B/Art
Becker	7.5	RG	gezopft	130	50	20.0	10.7	12.2	0.19	689	3.19	0.09	Lbh
Becker	7.4	B	Vollbaum	188	26	10.4	6.5	8.7	0.11	563	3.18	0.06	Lbh
Becker	9.5	WS	Vollbaum	59	53	21.2	17.7	18.2	0.22	421	2.03	0.1	Lbh
Becker	10.8	Platz	Vollbaum	23	178	71.2	16.2	17.6	0.58	1024	1.54	0.11	Lbh
Becker	10.5	WS	gezopft	382	217	86.8	8.4	11.9	0.68	1334	1.57	0.1	Ndh
Becker	9.1	B	Vollbaum	158	459	183.6	11.0	15.8	1.00	3642	1.73	0.09	Lbh
Becker	14.7	B	Vollbaum	235	286	114.4	12.5	22.0	0.35	1102	1.37	0.14	Lbh
Becker	8.1	B	Vollbaum	152	140	56.0	9.7	13.0	0.5	1469	1.7	0.06	Lbh
Becker	6.0	RG	gezopft	550	196	78.4	8.1	10.4	0.69	5013	1.51	0.02	Ndh
Plath	8.0	WS	Vollbaum		580	232.0	27.0	31.4	0.69	3039	3.4	0.27	Ndh

Tabelle 10: Grunddaten aus der Literatur.

Infolge der kleinen Grunddatenmenge und der kleinen Differenz zwischen der SpZ von gezopften Bäumen und Vollbäumen, wird über die gesamte Datenmenge eine Regression gebildet. Das durchschnittliche Rohpoltervolumen, welches einen limitierenden Faktor für die Anzahl Bäume pro Krangriff (= SpZ) darstellt, hat eine zu vernachlässigende Bedeutung (Becker et. al, 1986).

Die letzte Zeile aus den Becker-Daten (BHD = 6 cm) wurde infolge der grossen Abweichung zu den restlichen Daten bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Hackgut	BHD	SpZ	Quelle
G	7.5	3.19	Becker
G	10.5	1.57	Becker
VB	7.4	3.18	Becker
VB	9.5	2.03	Becker
VB	10.8	1.54	Becker
VB	9.1	1.73	Becker
VB	14.7	1.37	Becker
VB	8.1	1.7	Becker
VB	8	3.38	Plath

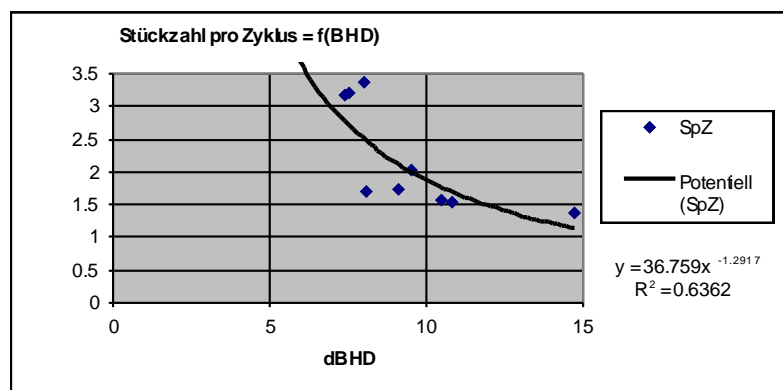


Tabelle 11: Grunddaten SpZ.

Abbildung 36: Stückzahl pro Zyklus (SpZ) abh. vom BHD.

Da diese Beziehung nur für kleine BHD gültig ist, wird versucht mittels Greifer- und Einzugsgrösse des Hackers den weiteren Verlauf der Kurve herzuleiten

A3.2 Untersuchung mittels Einzugsgrösse

Gemäss P. Schaad, Forstunternehmer, zitiert in der Semesterarbeit von U. Eigenheer (Eigenheer, 1998) liegt die optimale Hackerleistung bei etwa halber Ausfüllung der Einzugsöffnung. Falls mehr ausgefüllt ist, reicht die Motorleistung oft nicht mehr aus, um ohne Unterbruch zu hacken. Bei Überlastung wird der Hackrotor vom Hackmotor abgeriegelt. Bei einer mittleren Einzugsgrösse von 47*67 (Typ Erjo vgl. Riechsteiner (1999) und Anhang 5) beläuft sich der maximale Stammdurchmesser auf 45 cm.

Der Greifer von mittleren, kranbeschildeten Hackern hat einen Querschnitt von ca. 0.35 m². Die halbe Einzugsöffnung, Bedingung für eine optimale Hackleistung beläuft

sich auf ca. 0.15 m². Die Einzugsöffnung stellt folglich den limitierenden Faktor für die Anzahl Stämme pro Zyklus dar.

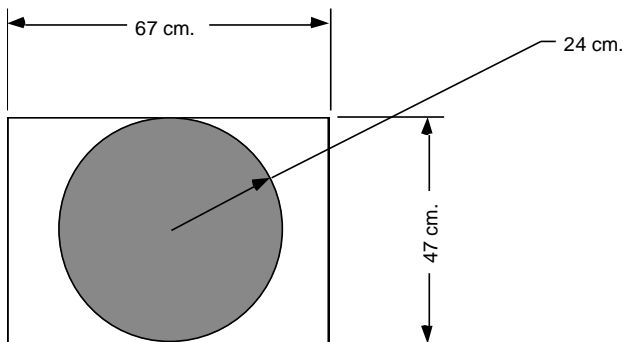


Abbildung 37: Einzugsöffnung schematisch (grau: halber Einzug).

Durchmesser: 5 cm; Anzahl: 55 Stk.	Durchmesser: 10 cm; Anzahl: 16 Stk.	Durchmesser: 15 cm Anzahl: 7 Stk.
Durchmesser: 20 cm Anzahl: 4 Stk.	Durchmesser: 25 cm Anzahl: 2 Stk.	Durchmesser: 30 cm Anzahl: 1 Stk.

Abbildung 38: Anzahl Stück pro halber Einzugsfläche (Einzugsöffnung), abhängig vom Durchmesser.

Vergleicht man nun diese Daten mit denjenigen aus der Literatur, so zeigt sich, dass für kleine Durchmesser die berechneten Stückzahlen zu gross sind. Dies kommt v.a. durch die bei diesen Dimensionen kleinen Rohpoltervolumina zustande, wodurch die potentielle SpZ nicht ausgenutzt werden kann.

Bem.: Stampfer stellte fest, dass die Stückzahl pro Zyklus keinen signifikanten Einfluss auf die Hackleistung hat (Stampfer, 1997). Dies bezweifle ich, da die SpZ den örtlichen Gegebenheiten Rechnung trägt.

A3.3 Stückzahl pro Zyklus als Funktion vom Brusthöhendurchmesser

Um eine verlässliche Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser des zu hackenden Holzes BHD und der Stückzahl pro Zyklus SpZ herzuleiten, werden die gewonnenen Erkenntnisse kombiniert.

Die Kurve aus der Literatur nähert sich dem Wert 1 und behält diesen Wert bis zu dem maximal möglichen BHD von 45 cm, was logisch erscheint.

Die Verknüpfung der beiden Kurvenstücke und die zugehörigen Funktionen zeigt nachstehende Abbildung.

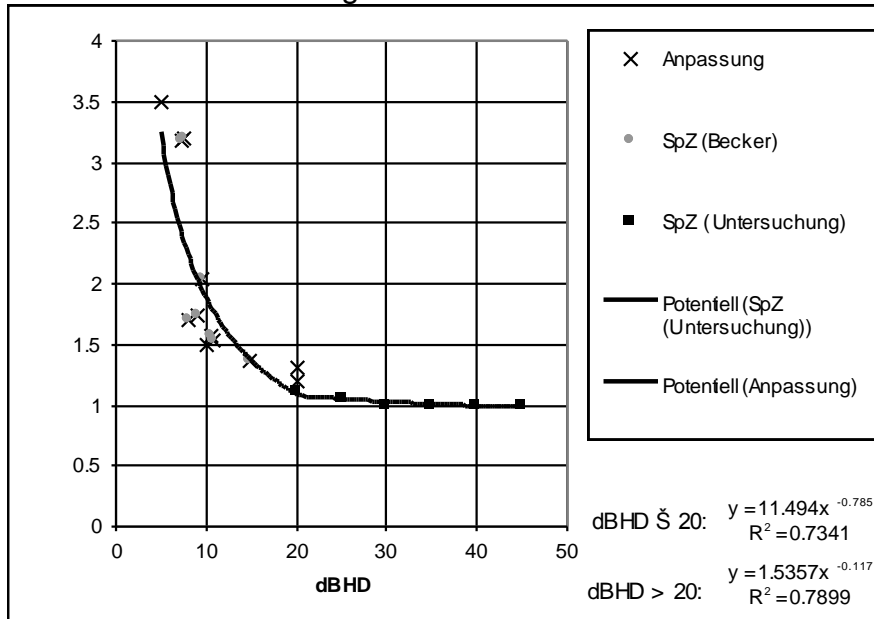


Abbildung 39: Stückzahl pro Zyklus als Funktion vom dBHD.

A3.4 SpZ und VpZ bei Astmaterial

Über das Hacken von Astmaterial ist in der Literatur nur wenig zu finden. Gemäss Definition hat Reisig einen maximalen Durchmesser von 7 cm. Dies entspricht einem Stückinhalt von ca. 0.02 fm, was einer Stückzahl pro halber Einzugsfläche von ca. 8 entspricht. Das VpZ beläuft sich folglich auf maximal 0.16 fm. Ebenfalls darf dieser Wert erst verwendet werden, wenn das Rohpoltervolumen grösser als dieser Wert ist.

A4: Umrechnungsfaktor $F_{\text{Verteilzeit}}$ für PSH15 in t_{Hacker}

Eine Auswertung des Verhältnisses von RAZ zu GAZ von bestehenden Versuchen ergab ein durchschnittliches $F_{\text{Verteilzeit}}$ von 1.41⁵. Die Standardabweichung beträgt 28%.

Literatur	$\text{Sm}^3/\text{h GAZ}$	$\text{Sm}^3/\text{h RAZ}$
Becker (1986)	10.7	12.2
Becker (1986)	6.5	8.7
Becker (1986)	17.7	18.2
Becker (1986)	16.2	17.6
Becker (1986)	8.4	11.9
Becker (1986)	11.0	15.8
Becker (1986)	12.5	22.0
Becker (1986)	9.7	13.0
Becker (1986)	8.1	10.4
Kalaja (1984)	16.0	26.6
Kalaja (1984)	18.0	30.0
Kalaja (1984)	21.5	35.5
Kalaja (1984)	22.1	36.7
Plath (1996)	26.9	54.6
Stampfer (1997)	34.9	40.6
Stampfer (1997)	23.2	27.7
Stampfer (1997)	60.2	68.8

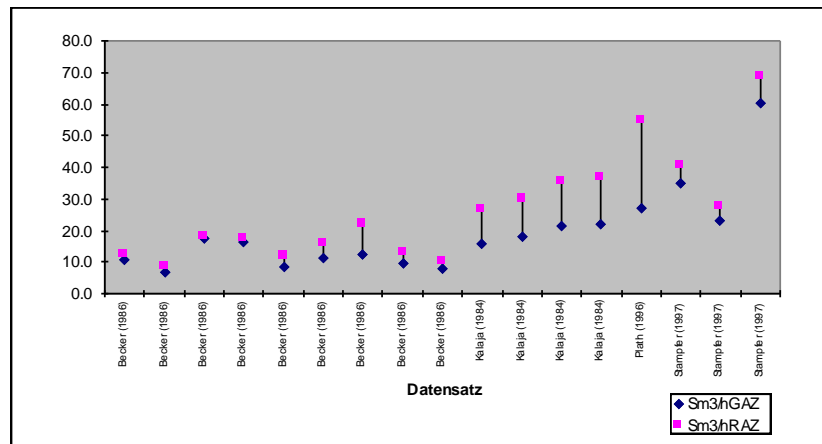


Tabelle 12: Grunddaten.

Abbildung 40: Verhältnis $\text{Sm}^3/\text{h GAZ}$ zu $\text{Sm}^3/\text{h RAZ}$.

A5: Hackertypen

Nachfolgend werden die beiden gebräuchlichsten Hackertypen beschrieben.

A5.1 Typenherleitung

Motorleistung	Einzugsöffnung	Einzugsöffnung	Typ	Fahrgestell
[kW]	[cm ²]	[cm]		
110	960	40*24	Klöckner/Welte	Forwarder
179	1120	56*20	Bruks Ösa	Forwarder
109	1120	28*40	-	Forwarder
270	3149	47*67	Erjo (GHH)	Forwarder
383	7571	113*67	Bruks 1004 CT	Lkw
302	4836	78*62	Bruks 803 CT	Forwarder
383	5616	78*72	Bruks 1203 CT	Lkw

Tabelle 13: Grundlegenden Typenherleitung.

⁵ Vermutlich inkl. Störungszeiten (Anmerkung F. Frutig, Jan. 2003)

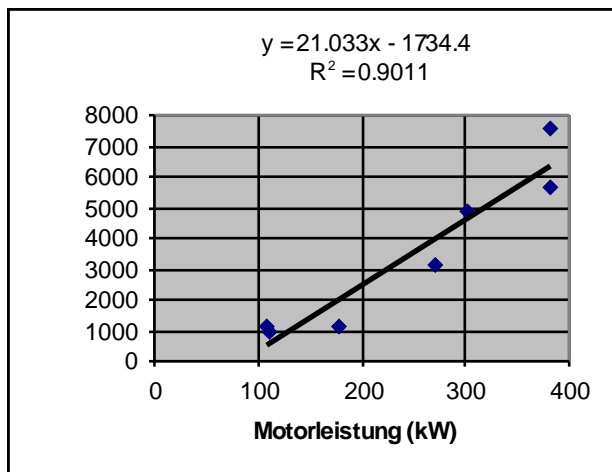


Abbildung 41: Einzugsöffnung = f(Motorleistung).

A5.2 Mittlerer Hacker

Bei mittleren Hackern mit einem Aufbaucontainer (Bunker) ist das Hackaggregat (meist Trommelhacker) auf das Fahrgestell eines Forwarders aufgebaut. Der mittlere Hacker operiert v.a. auf der Rückegasse/Maschinenweg.

Motorleistung	bis 300	kW
Einzugsöffnung	ca. 47*67	cm
Kranreichweite	9	m
Bunkergrösse	15	Srm ³
Leergewicht (ohne Trägerfahrzeug)	< 10	t
Hackleistung	10 - 50	Srm ³ /h

Tabelle 14: Maschinendaten mittlere Hacker.

A5.3 Grosshacker

Bei Grosshackern ist das Hackaggregat meist in das Fahrgestell eines Lkws integriert. Der Grosshacker operiert auf der Waldstrasse bzw. auf Aufarbeitungsplätzen.

Motorleistung	bis 300	kW
Einzugsöffnung	ca. 78*72	cm
Kranreichweite	9	m
Bunkergrösse	30	Srm ³
Leergewicht (ohne Trägerfahrzeug)	> 10	t
Hackleistung	50 - 120	Srm ³ /h

Tabelle 15: Maschinendaten Grosshacker.

Gemäss Remler (Remler et al., 1996) ist die durchschnittliche Leistung von Grosshackern ca. dreimal so hoch wie beim mittleren Hacker. Für die nachfolgenden Leistungsberechnungen wird ein vorsichtiger Faktor von 2.5 verwendet.

5 Literaturverzeichnis

BECKER, G.; BÖLTZ, K.; MÜLLER, A.; 1896: Nutzung forstlicher Biomasse durch Abschlussbericht zum EG-Projekt BOS/002/D(B). Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

BJÖRHEDEN & THOMPSON; 1995: An International Nomenclature For Forest Work Study, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, Sweden.

EIGENHEER, U.; 1998: Produktivitätsmodelle für die Erzeugung von Waldhackschnitzeln mit mobilen, kranbeschickten Hackern. Semesterarbeit ETHZ.

FELLER, S.; REMLER, N.; WEIXLER, H.; 1998: Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung. Bericht Nummer 16, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising.

HEINIMANN, H.R.; 1997: Skript Forstl. Verfahrenstechnik I, ETH Zürich.

KALAJA, H., 1984: The example of terrain chipping system in first commercial thinning. Folia Forestalia 584, Helsinki.

LÜTHY, C.; 1997: Kalkulationsgrundlage für das Holzrücken mit Forwarder. Interner Bericht, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

NÄF, J.; 1998: Ein Kalkulationsmodell für den Einsatz von Forwardern in Forstbetrieben. Interner Bericht, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

PLATH, H. J.; KROOP, M.; 1996: Gewinnung und Aufbereitung von Ganzbäumen zu Heizhackschnitzeln, AFZ / Der Wald, Nr. 17.

REMLER et al., 1996: Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Bericht 11, 66 S.

RIECHSTEINER, D. 1999: Mobiler, kranbeschickter Hacker mit Aufbaucontainer - Grundlagen und Herleitung des Produktionssystems. Interner Bericht WSL.

STAMPFER, E.; STAMPFER, K.; TRZESNIOWSKI, A.; 1997: Bereitstellung von Waldhackgut. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 29. BOKU Wien, Institut für Forsttechnik, Hrsg.: Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien.

