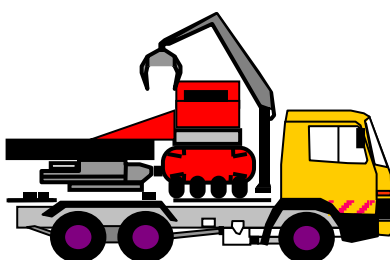


# Produktivitätsmodell „Hacker“

## Teil A: Grundlagen

Renato Lemm  
Fritz Frutig  
Dario Pedolin  
Oliver Thees (Leitung)



FE Waldressourcen und Waldmanagement  
Gruppe „Forstliche Produktionssysteme“  
Eidg. Forschungsanstalt WSL  
8. März 2019

Das Produktivitätsmodell „Hacker“ ist Teil einer Sammlung von Produktivitätsmodellen der Holzernte, welche von der Eidg. Forschungsanstalt WSL entwickelt wurden und unter dem Namen „HeProMo“ auf dem Internet zur Verfügung gestellt werden (<http://www.waldwissen.net>). Der Teil A des Dokumentes beschreibt die Ernteverfahren und das Modell „Hacken an der Waldstrasse“. Der Teil B „Analyse der Datensätze und Diskussion der Modellierung“ fehlt hier, weil keine Datensätze ausgewertet wurden.

Bearbeiter	Datum	Kommentar
R. Lemm	28.08.2015	
F.Frutig/R. Lemm	24.08.2016	Überarbeitung
R.Lemm	04.04.2018	Korrektur
R. Lemm /F. Frutig	08.03.2019	Änderungen
F. Frutig	20.05.2019	Schlussredaktion

# Inhaltsübersicht

<b>1</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
1.1	Entstehung und Verwendung.....	4
1.2	Beurteilung und Besonderheiten .....	4
<b>2</b>	<b>Produktionssystem – Beschreibung .....</b>	<b>4</b>
2.1	Produktionsprozess Hacken an der Waldstrasse .....	4
2.2	Input/Output-Zustand .....	5
2.2.1	Input .....	5
2.2.2	Output .....	5
2.3	Technik und Personal .....	5
2.4	Berechneter Output .....	5
<b>3</b>	<b>Produktionssystem – mathematische Darstellung .....</b>	<b>5</b>
3.1	Systemübersicht .....	5
3.2	Einflussgrößen .....	6
3.3	Vergleich der Hackermodelle von Ghaffariyan und Kuptz.....	6
3.4	Mathematisches Modell.....	9
<b>4</b>	<b>Zeitsystem und Umrechnungen im Produktivitätsmodell “Hacker” .....</b>	<b>11</b>
4.1	Zeitsystem .....	11
	Berechnung der System- und Faktorzeiten pro Schüttraummeter .....	11
<b>5</b>	<b>Berechnung von Zeitbedarf und Kosten.....</b>	<b>12</b>
5.1	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro Srm .....	12
5.2	Kosten der Produktionsfaktoren pro Srm .....	12
5.3	Kostenansätze für Grosshacker .....	13
5.4	Berechnungsbeispiel .....	13
<b>6</b>	<b>Abkürzungen und Definitionen.....</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Anhang: Methoden zur Abschätzung des Poltervolumens.....</b>	<b>15</b>
7.1	Schätzmethode 1.....	15
7.1.1	Raumvolumen für Hackguthaufen aus Energierundholz .....	15
7.1.2	Raumvolumen für Hackguthaufen aus Waldrestholz .....	15
7.1.3	Faktoren zur Bestimmung der Hackgutmenge aus dem Raumvolumen .	16
7.2	Schätzmethoden 2, 3 und 4.....	17
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>Beurteilung der Qualität des Modells „Hacker“ .....</b>	<b>19</b>

**Hinweis**

Im Handel und im Transport von Energieholz in Form von Waldhackschnitzeln werden die Volumina in Schüttraummetern angegeben. Für die Umrechnung von fester Holzmasse ( $\text{m}^3$ ) in Schüttraummeter (Srm) wird der Faktor 2.8 verwendet (Schweizer Handelsgebräuche für Rohholz, Ausgabe 2010).  $1 \text{ m}^3$  entspricht also 2.8 Srm.

# 1 Grundlagen

## 1.1 Entstehung und Verwendung

Zeitstudienenerhebungen sind sehr arbeits- und kostenintensiv. Deshalb wurde in einer umfangreichen Literaturrecherche abgeklärt, welche Grundlagen für ein Produktivitätsmodell für Hacken an der Waldstrasse allenfalls bereits vorhanden sind. Dabei hat sich die Untersuchung "Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel" von Kuptz et al. (2015) als umfassendste und aktuellste Grundlage erwiesen. Das nachfolgende Produktivitätsmodell "Hacker" beruht weitgehend auf den Ergebnissen dieser Untersuchung. An 36 Einsatztagen wurden Zeitstudien beim Hacken durchgeführt, davon wurde an 10 Tagen die gesamte Tagesarbeitszeit erfasst und an 26 Tagen Ausschnitte davon.

## 1.2 Beurteilung und Besonderheiten

Die Ergebnisse der Zeiterhebungen lassen sich unserer Ansicht nach gut auf die Verhältnisse in der Schweiz anwenden. Beim Hacken an der Waldstrasse sind keine bedeutenden Unterschiede in den Arbeitsverfahren und den Einsatzbedingungen zwischen Deutschland und der Schweiz festzustellen. Die Ergebnisse der Untersuchung von Kuptz et al. (2015) sind sehr aktuell und die Zeiterhebungen genügend umfangreich, dass sie für ein Produktivitätsmodell verwendet werden können. Die festgestellten Abhängigkeiten von den Eingangsvariablen "Hackgutart" und "Motorleistung des Hackers" scheinen plausibel.

# 2 Produktionssystem – Beschreibung

## 2.1 Produktionsprozess Hacken an der Waldstrasse

Abbildung 1 zeigt die Integration des Produktionsprozesses „Hacken“ in die Holzerntelogistik vom Bestand zum Endverbraucher.

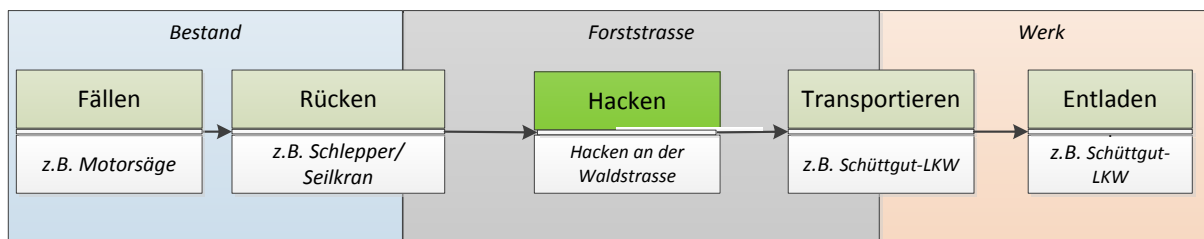


Abbildung 1: Integration des Produktionsprozesses „Hacken“ in die Logistikkette vom Bestand zum Endverbraucher.

Der Prozess der Hackschnitzelbereitstellung umfasst üblicherweise folgende Arbeiten:

- Fällen und gegebenenfalls Aufarbeiten der Bäume
- Rücken des Holzes bzw. der Vollbäume an eine lastwagenbefahrbare Waldstrasse
- Hacken an der Waldstrasse
- Transportieren der Hackschnitzel zum Verbraucher
- Entladen beim Verbraucher.

Im Gegensatz zu anderen Holzernteverfahren, die i.d.R. an der Waldstrasse mit dem Produkt Rundholz enden, müssen bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln noch weitere Teilarbeiten durchgeführt werden, wie Hacken, ggfs. Zwischenlagern, Transport zum Verbraucher und Entladen.

Der Prozess „Hacken auf der Rückegasse“ wird heute nur noch selten durchgeführt und deshalb hier nicht weiter betrachtet.

## 2.2 Input/Output-Zustand

### 2.2.1 Input

Das Hackgut ist an einer lastwagenbefahrbaren Strasse bereitgestellt. Für das Produktivitätsmodell werden zwei Formen von Hackgut unterschieden (Abb. 3):

- Energierundholz (grob geastetes Stammholz kurz oder lang)
- Waldrestholz (überwiegend Baumkronen und Äste).

### 2.2.2 Output

Die Waldhackschnitzel liegen in Containern oder Mulden.

## 2.3 Technik und Personal

Hacker montiert auf Anhänger oder LKW

1 Maschinenführer

## 2.4 Berechneter Output

Produktivität in  $S_{rm}/PSH_{15}$  (produktive Arbeitszeit).

# 3 Produktionssystem – mathematische Darstellung

## 3.1 Systemübersicht

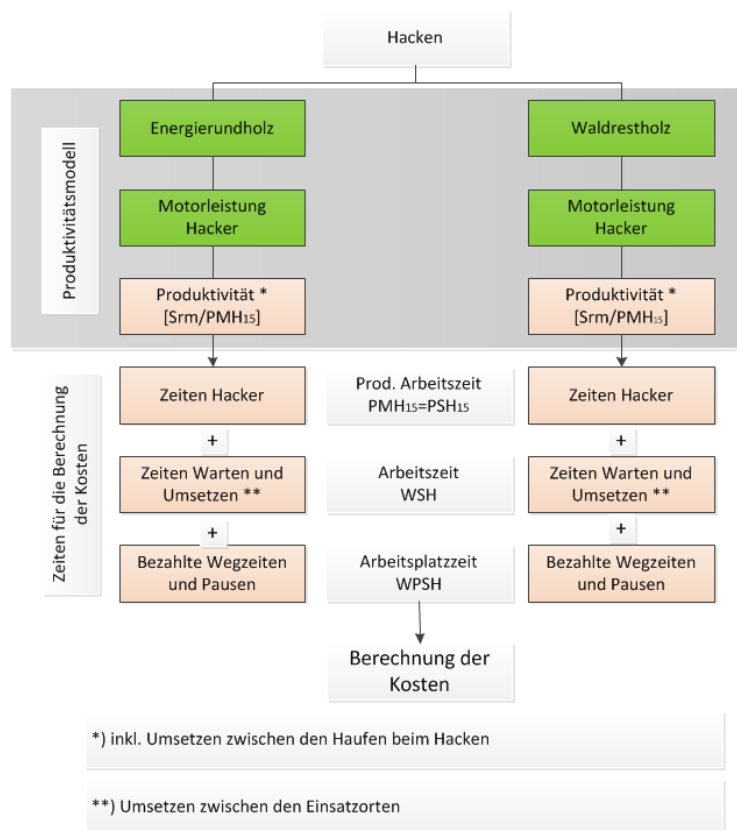


Abbildung 2: Einflussgrößen auf die Produktivität beim Hacken und Darstellung der Zeitaufwände für die Kostenberechnung.

Für die gesamte Logistikkette "Hackschnitzelbereitstellung" werden zurzeit folgende Modelle in HeProMo angeboten:

Fällen: „Motormanuelle Holzhauerei“

Rücken: „Schlepper“, "Mobilseilkran", "Konventioneller Seilkran"

Hacken: „Hacker“ (vorliegendes Modell)

Transportieren: Neues Modell „Waldhackschnitzel-Transport“.

### 3.2 Einflussgrößen

Nach Kuptz et al. (2015) hängt die Produktivität beim Hacken hauptsächlich von zwei Einflussgrößen ab, der Art des Hackgutes und der Motorleistung des Hackers.

Beim Hackgut wird unterschieden zwischen Waldrestholz und Energierundholz (Abb. 3).

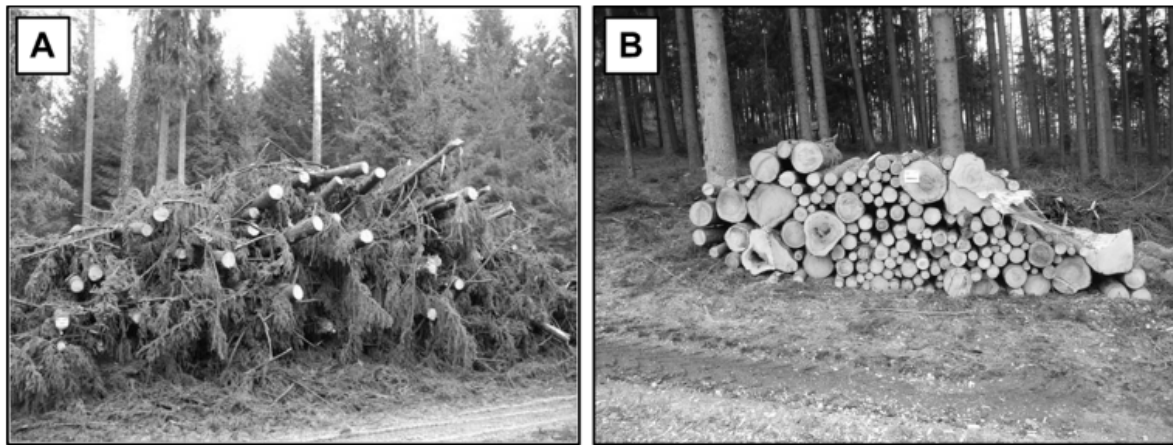


Abbildung 3: A) Waldrestholz setzt sich überwiegend aus Baumkronen, Ästen, Vollbaumteilen sowie kleinen Vollbäumen aus Erstdurchforstungen zusammen. B) Energierundholz ist grob geastetes und auch dörres Stammholz in kurzer oder langer Form. Ebenso werden faule Stammabschnitte oder solche schlechterer Qualität dem Energierundholz zugeteilt (Bilder aus Kuptz et al., 2015).

Die zweite wichtige Eingangsvariable ist die Motorleistung des Hackers, welche in kW angegeben wird.

### 3.3 Vergleich der Hackermodelle von Ghaffariyan und Kuptz

Verschiedene Arbeiten zum Thema Hacken zeigen übereinstimmend, dass die Hackerproduktivität hauptsächlich von der Motorleistung des Hackers und vom mittleren Stückinhalt des Hackgutes abhängt. Bei Ghaffariyan et al. (2013) wird die Produktivität in Tonnen Grünbiomasse/PMH<sub>0</sub> angegeben. Für die Umrechnung in Srm/PMH<sub>0</sub> bzw. Srm/PMH<sub>15</sub> kommt es also darauf an, wie hoch der Wassergehalt des Hackgutes zum Zeitpunkt des Hackens ist.

### Modell nach Ghaffariyan et al. (2013)

Berechnungsformel für die Produktivität beim Hacken:

$$\text{Produktivität} \left( \frac{GMt}{PMH0} \right) = -24.2 + 0.05 \times \text{Motorleistung} + 28.2 \times \text{Betriebstyp} \\ - 1.67 \times \text{Ablageort Hackschnitzel} + 26.3 \times \text{Mittl. Stückinhalt (m}^3\text{)}$$

Legende:

Produktivität: Grünbiomasse (Tonnen) pro PMH0

Motorleistung in kW

Betriebstyp: Hackschnitzel = 1; Zellstoff = 2

Ablageort Hackschnitzel:

Hackschnitzel in LKW – Muldenaufbau geblasen = 1

in Lkw – Container oder Schüttgutan Anhänger = 2

auf Haufen = 3

in Container auf Hacker aufgebaut = 4

### Modell nach Kuptz et al. (2015)

Berechnungsformeln für die Produktivität beim Hacken:

**Energierundholz:**

$$\text{Produktivität} \left[ \frac{Srm}{MAS} \right] = 0.2848 * \text{MotorleistungHacker}^{1.0276}$$

**Waldrestholz:**

$$\text{Produktivität} = 0.5177 \times \text{MotorleistungHacker}^{0.8486}$$

MotorleistungHacker in [kW]

In Tabelle 1 sind die Produktivitäten für verschiedene Hackertypen dargestellt (Kuptz et al 2015).

Tabelle 2 zeigt die Produktivitäten berechnet mit dem Modell von Ghaffariyan et al. (2013) und Tabelle 3 diejenigen berechnet mit dem Modell von Kuptz et al. (2015).

*Tabelle 1: Produktivität für verschiedene Hackertypen, jeweils für Waldrestholz (blau) und Energierundholz (rot), berechnet mit den Formeln von Kuptz et al. (2015).*

Hackertyp	Einheit	Motorleistung [kW]	Zielsortimente	Produktivität [Srm/MAS]
Farmi 260 HF-EM	Srm/PMH <sub>15</sub>	82	Waldrestholz	21.8
	Srm/PMH <sub>15</sub>	82	Energierundholz	26.4
Musmax Wood Terminator 9 XL Z	Srm/PMH <sub>15</sub>	154	Waldrestholz	37.2
	Srm/PMH <sub>15</sub>	154	Energierundholz	50.4
Komptech Chippo 510C	Srm/PMH <sub>15</sub>	278	Waldrestholz	61.4
	Srm/PMH <sub>15</sub>	278	Energierundholz	92.5
Jenz Hem 582 R	Srm/PMH <sub>15</sub>	353	Waldrestholz	75.2
	Srm/PMH <sub>15</sub>	353	Energierundholz	118.2
Albach Silvator 2000	Srm/PMH <sub>15</sub>	455	Waldrestholz	93.3
	Srm/PMH <sub>15</sub>	455	Energierundholz	153.4

Tabelle 2: Berechnung der Produktivität nach dem Modell von Ghaffariyan et al. (2013) für Waldrestholz (blau) und Energierundholz (rot) und jeweils für verschiedene Motorleistungen der Hacker.

Motorleistung [kW]	Betriebs- typ	Ab- lage- ort	Mittl. Stück- inhalt [t]	Mittl. Stück- inhalt [m <sup>3</sup> ]	Grünbio- masse [t/PMH <sub>0</sub> ]	Grünbio- masse [m <sup>3</sup> /PMH <sub>0</sub> ]	Grünbio masse [Srm/ PMH <sub>0</sub> ]	Grünbio- masse [t/PMH <sub>15</sub> ]	Grünbio masse m <sup>3</sup> / PMH <sub>15</sub>	Produk- tivität [Srm/ PMH <sub>15</sub> ]
50	1	1	0.078	<b>0.12</b>	8.0	12.3	34.4	7.5	11.6	<b>32.5</b>
150	1	1	0.078	<b>0.12</b>	13.0	20.0	55.9	12.3	18.8	<b>52.8</b>
250	1	1	0.078	<b>0.12</b>	18.0	27.7	77.5	17.0	26.1	<b>73.1</b>
350	1	1	0.078	<b>0.12</b>	23.0	35.4	99.0	21.7	33.4	<b>93.4</b>
450	1	1	0.078	<b>0.12</b>	28.0	43.1	120.6	26.4	40.6	<b>113.7</b>
50	1	1	0.455	<b>0.7</b>	23.2	35.8	100.1	21.9	33.7	<b>94.4</b>
150	1	1	0.455	<b>0.7</b>	28.2	43.4	121.6	26.6	41.0	<b>114.8</b>
250	1	1	0.455	<b>0.7</b>	33.2	51.1	143.2	31.4	48.2	<b>135.1</b>
350	1	1	0.455	<b>0.7</b>	38.2	58.8	164.7	36.1	55.5	<b>155.4</b>
450	1	1	0.455	<b>0.7</b>	43.2	66.5	186.3	40.8	62.8	<b>175.7</b>

Für die Umrechnung einer Tonne Grünmasse in m<sup>3</sup>/PMH<sub>0</sub> wurde für die Rohdichte der Hackschnitzel 650 kg/m<sup>3</sup> angenommen. Als mittlerer Stückinhalt für Waldrestholz wurde 0.12 m<sup>3</sup> und für Energierundholz 0.70 m<sup>3</sup> angenommen. Die Umrechnung von PMH<sub>0</sub> in PMH<sub>15</sub> erfolgte mit dem Faktor 1.06. Die Werte in den fett markierten Spalten in Tabelle 2 (Berechnung nach Ghaffariyan) sind für den Vergleich der Produktivitäten mit Tabelle 3 (Berechnung nach Kuptz) massgebend.

Tabelle 3: Berechnung der Produktivität nach dem Modell von Kuptz et al. (2015) für Waldrestholz (blau) und Energierundholz (rot) und jeweils für verschiedene Motorleistungen der Hacker.

Motorleistung (kW)	Zielsortiment	Produktivität [Srm/PMH <sub>15</sub> ]
50	Waldrestholz	14.3
150	Waldrestholz	36.4
250	Waldrestholz	56.1
350	Waldrestholz	74.6
450	Waldrestholz	92.4
50	Energierundholz	15.9
150	Energierundholz	49.1
250	Energierundholz	82.9
350	Energierundholz	117.2
450	Energierundholz	151.7



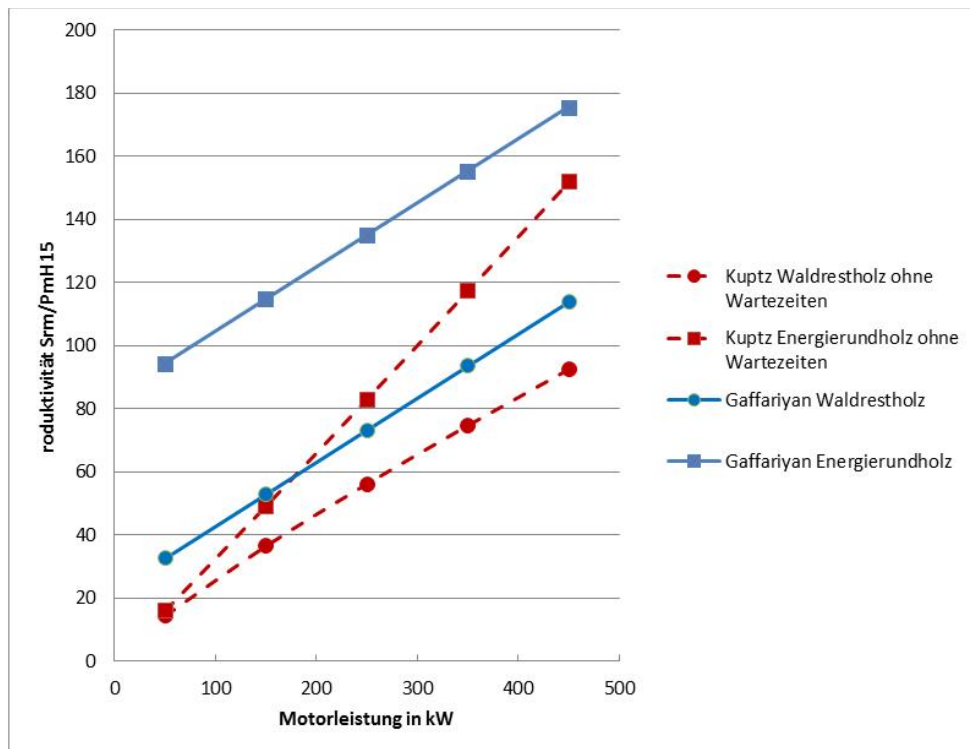


Abbildung 4: Vergleich der Produktivitäten, die mit den Modellen von Ghaffariyan et al. (2013) und Kuptz et al. (2015) geschätzt wurden. Annahmen im Modell von Ghaffariyan: Waldfrisches Fichtenholz (Wassergehalt 60%, Rohdichte  $650 \text{ kg/m}^3$ ); mittlerer Stückinhalt  $0.12 \text{ m}^3$  bei Waldrestholz und  $0.70 \text{ m}^3$  bei Energierundholz; Umrechnungsfaktor von 1.06 für die Umrechnung von  $\text{PMH}_0$  in  $\text{PMH}_{15}$ .

Der Vergleich der Modelle von Ghaffariyan et al. (2013) und Kuptz et al. (2015) zeigt für die Produktivitätswerte von Waldrestholz einen ähnlichen Verlauf über den gesamten Bereich der Motorleistungen der Hacker. Für das Energierundholz sind die Produktivitäten im Bereich der unteren Leistungsklassen der Hacker bei Ghaffariyan deutlich höher als bei Kuptz. Im Bereich der leistungsstärkeren Hacker nähern sich die beiden Modelle an.

Für die Angabe der Produktivität in  $\text{Srm/PMH}_{15}$  müssen beim Modell von Ghaffariyan verschiedene Annahmen getroffen werden, so insbesondere über die Rohdichte und den mittleren Stückinhalt des Hackgutes, da die Produktivität im Modell in Tonnen Grünbiomasse pro  $\text{PMH}_0$  angegeben wird. Weiter muss auch eine Annahme für die Umrechnung von  $\text{PMH}_0$  in  $\text{PMH}_{15}$  getroffen werden. All diese Annahmen sind mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Im Modell von Kuptz müssen dagegen lediglich die Art des Hackgutes und die Motorleistung des Hackers gewählt werden, was erheblich einfacher und zuverlässiger ist. Deshalb wird als Grundlage für unser Produktivitätsmodell das Modell von Kuptz et al. (2013) verwendet.

### 3.4 Mathematisches Modell

Nebst der reinen Hackzeit muss ein Produktivitätsmodell auch die Wartezeiten infolge von Muldenwechseln und Engpässen in der Transportlogistik sowie die Umsetzzeiten zwischen den Haufen beim Hacken und zwischen den Arbeitsorten berücksichtigen. Weil aus diesen Gründen die theoretisch mögliche Hackerleistung auf Dauer kaum erreicht wird, gehen Schulmeyer et al. (2016) davon aus, dass die reine Hackzeit in der Praxis nur rund 2/3 der gesamten Arbeitszeit beträgt. Rund ein Drittel der Arbeitszeit entfällt also auf Stand-, Umsetz- und Wartezeiten. Die reine Hackzeit muss folglich um 50% erhöht werden um die gesamte Arbeitszeit WSH zu erhalten.

Zur gesamten Arbeitszeit WSH müssen noch die bezahlten Arbeitswege und Pausen des Personals (in der Regel 1 Maschinist) dazugerechnet werden, um die sogenannte Arbeitsplatzzeit WPSH zu erhalten. Diese bildet die Basis für die Kostenberechnung.

Kleine Hackholzhaufen bedingen ein häufigeres Umsetzen des Hackers beim Hacken. Die einzelnen Hackholzhaufen sollten also möglichst gross sein. Im Anhang werden drei Methoden zur Schätzung der Schüttraumvolumina von Hackholzhaufen beschrieben.

*Produktivitätsmodell auf der Grundlage des Modelles von Kuptz et al. (2015):*

#### **Produktivität von Energierundholz $Prod_{RundHolz}$**

$$Prod_{RundHolz} = 0.2848 \times MotorleistungHacker^{1.0276}$$

$$PMH_{15\_Hacken\_RundHolz} = 1/Prod_{RundHolz}$$

*Zuschlag für Warte – und Umsetzzeiten  $t_{indirekte\ Arbeit}$  (Schulmeyer et al. (2016):*

$$t_{indirekte\ Arbeit} = 1/2 \times PMH_{15\_Hacken\_RundHolz}$$

*Dieser Zuschlag ist eine indirekte Zeit und wird somit erst bei der Kostenberechnung des Personals verwendet.*

#### **Produktivität von Waldrestholz $Prod_{RestHolz}$**

$$Prod_{RestHolz} = 0.5177 \times MotorleistungHacker^{0.8486}$$

$$PMH_{15\_Hacken\_RestHolz} = 1/Prod_{RestHolz}$$

*Zuschlag für Warte – und Umsetzzeiten  $t_{indirekte\ Arbeit}$  (Schulmeyer et al. (2016):*

$$t_{indirekte\ Arbeit} = 1/2 \times PMH_{15\_Hacken\_RestHolz}$$

*Dieser Zuschlag ist eine indirekte Zeit und wird somit erst bei der Kostenberechnung des Personals verwendet.*

#### **Legende:**

*MotorleistungHacker : Motorleistung des Hackers in [kW]*

*PMH<sub>15\\_Hacken\\_RundHolz</sub> : Zeitbedarf für das Hacken eines Srm Energierundholz in [PMH<sub>15</sub>]*

*PMH<sub>15\\_Hacken\\_RestHolz</sub> : Zeitbedarf für das Hacken eines Srm Waldrestholz in [PMH<sub>15</sub>]*

*t<sub>indirekte Arbeit</sub> : Zeiten für Warten und Umsetzen in [PMH<sub>15</sub>]  
frei wählbar; Defaultwert  $1/2$  der reinen Hackerzeiten.*

*Prod<sub>RundHolz</sub> : Produktivität für das Hacken eines Srm Energierundholz in  $\left[ \frac{Srm}{PMH_{15}} \right]$*

*Prod<sub>RestHolz</sub> : Produktivität für das Hacken eines Srm Waldrestholz in  $\left[ \frac{Srm}{PMH_{15}} \right]$*

## 4 Zeitsystem und Umrechnungen im Produktivitätsmodell "Hacker"

### 4.1 Zeitsystem

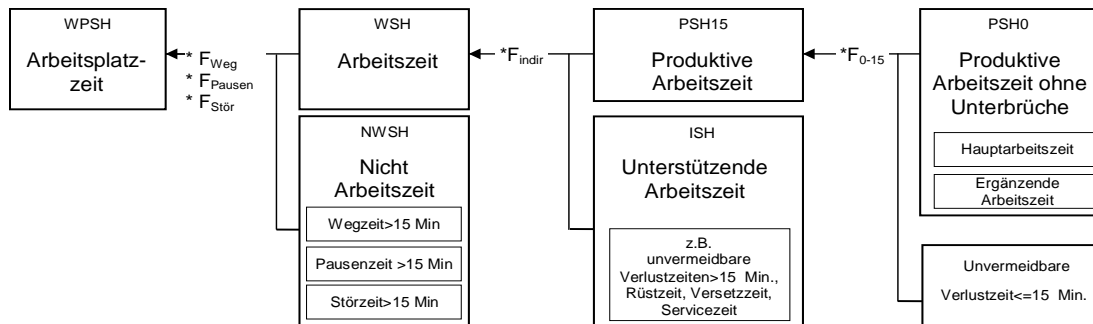


Abbildung 5: Verwendetes Zeitsystem (Björheden und Thompson 1995, Heinemann 1997; verändert).

Die in Abbildung 4 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-, der Maschinen- oder der Personalarbeitszeit. In Anlehnung an die Originalgrundlagen wurden die Abkürzungen von den englischen Begriffen abgeleitet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Zeitbegriffe.

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 <sub>15</sub> =MAS
Personal (...personal hour)	WPPH	NWPH	WPH	IPH	PPH

### Berechnung der System- und Faktorzeiten pro Schüttraummeter

Schüttraummeter (Srm) werden in der Regel in Rinde angegeben. Es kommt bei der Berechnung der Produktivität jedoch nicht darauf an, ob mit oder ohne Rinde gehackt wird.

Maschinen:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Anzahl Srm in Rinde}}{PMH_{15}}$$

$$PMH_{15} = 1 / \text{Produktivität}$$

Personal:

$$WPPH = PMH_{15} \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör}$$

In  $F_{indir}$  sind die unvermeidbaren Verlustzeiten > 15 Min., wie Rüstzeit, Umsetzzeit und Servicezeit enthalten.

In unserem Fall beträg  $F_{indir} = 1.5$

Gemäss Schulmeyer et al. (2016) im LWF-Merkblatt Nr. 10 beträgt die durch Umsetz- und Wartezeiten bedingte Auslastung eines Hackers durchschnittlich nur 2/3 der gesamten Arbeitszeit WSH, d.h.

$$t_{indirekte \text{ Arbeit}} = \frac{1}{2} \times PMH_{15 \text{ Hacken Rund Holz}} \quad \text{oder}$$

$$t_{indirekte \text{ Arbeit}} = \frac{1}{2} \times PMH_{15 \text{ Hacken Rest Holz}}$$

Daraus ergibt sich für  $F_{indir} = 1.5$

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

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

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

## 5 Berechnung von Zeitbedarf und Kosten

### 5.1 Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro Srm

Tabelle 5: Formeln zur Berechnung des Zeitbedarfs der Produktionsfaktoren pro Srm.

Input		Formel	Output	
Produktivität	$\left[\frac{Srm}{PMH_{15}}\right]$	$PMH_{15} = 1/Produktivität$	$PMH_{15}$	$\left[\frac{PMH_{15}}{Srm}\right]$
		$WPPH = PMH_{15} \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör}$	$WPPH$	$\left[\frac{PMH_{15}}{Srm}\right]$
		<b>Faktoren:</b>		
		$F_{indir}$	$[-]$	$F_{indir}$ = frei wählbar; im Modell 1.5 als Defaultwert gesetzt
		$F_{Weg}$	$[-]$	$F_{Weg} \times F_{Pausen} =$ ist frei wählbar, im Modell $\frac{540\text{ Min}}{(540-60)Min} = 1.125$ als Default eingesetzt
$F_{Pausen}$	$[-]$			
$F_{Stör}$	$[-]$	$F_{Stör} =$ frei wählbar; im Modell 1.0 als Default eingesetzt		

### 5.2 Kosten der Produktionsfaktoren pro Srm

<b>Kosten Hacken<sub>Rundholz</sub></b> $= PMH_{15\text{HackenRundHolz}} \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör} \times \text{Kostenansatz Maschinist}$ $+ PMH_{15\text{HackenRundHolz}} \times \text{Kostenansatz Hacker}$	
<b>Kosten Hacken<sub>Restholz</sub></b> $= PMH_{15\text{HackenRestHolz}} \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör} \times \text{Kostenansatz Maschinist}$ $+ PMH_{15\text{HackenRestHolz}} \times \text{Kostenansatz Hacker}$	
<b>Legende:</b>	
<b>Kosten Hacken<sub>Rundholz</sub> pro Srm i. R.:</b> Gesamtkosten für das Hacken von Rundholz in Rinde pro Srm <b>Kosten Hacken<sub>Restholz</sub> pro Srm i. R.:</b> Gesamtkosten für das Hacken von Restholz in Rinde pro Srm <b>Kostenansatz Maschinist:</b> Kostenansatz Maschinist [CHF/PMH15] <b>Kostenansatz Hacker:</b> Kostenansatz Hacker ohne Maschinist [CHF/PMH15] <b>PMH<sub>15HackenRundHolz</sub>:</b> Produktive Hackerarbeitszeit beim Aufarbeiten von Energierundholz mit Unterbrechungen < 15 Min $F_{indir}$ i. R. <b>PMH<sub>15HackenRestHolz</sub>:</b> Produktive Hackerarbeitszeit beim Aufarbeiten von Energierestholz mit Unterbrechungen < 15 Min $F_{indir}$ i. R. <b><math>F_{indir}, F_{Weg}, F_{Pausen}, F_{Stör}</math>:</b> Defaultwerte der Faktoren siehe oben	

### 5.3 Kostenansätze für Grosshacker

Abgaben zu Kostenansätzen für Grosshacker finden sich nur schwerlich, da die Hackkosten in der Regel pro Schüttraummeter abgerechnet werden. Die Maschinenstundenkosten hängen vor allem von der Grösse (max. Holzdurchmesser, Motorleistung) des Hackers bzw. der Hackleistung ab.

In Tabelle 6 werden Grössenordnungen für Maschinenstundenkosten inkl. Maschinist für Grosshacker angegeben. Diese können für Berechnungen verwendet werden, falls keine genaueren Werte vorliegen. Die Werte wurden aufgrund von eigenen Maschinenkostenberechnungen und Literaturrecherchen ermittelt.

Für die produktiven Hackerzeiten dürften die Kosten für einen Grosshacker inkl. Maschinisten im Bereich von 450-550 CHF/PMH<sub>15</sub> liegen. Anfahrtswege zum Hackort werden von den Unternehmern in der Regel zusätzlich verrechnet, ebenso Wartezeiten (z.B. infolge von Unterbrüchen in der Logistikkette).

Leistungsbereich [kW] (PS)	Maschinenstundenkosten [CHF/PMH <sub>15</sub> ]	Verrechnungssatz [CHF/PMH <sub>15</sub> ]
<b>200-299</b> (272-407)	450	495
<b>300-399</b> (408-543)	500	550
<b>&gt; 400</b> (> 544)	550	605

*Tabelle 6: Aufgrund eigener Maschinenkostenberechnungen geschätzte Kostenansätze für Grosshacker auf Lastwagen. Der Verrechnungssatz berücksichtigt einen Zuschlag von 10% für Aquisition, Verwaltung, Risiko und Gewinn.*

### 5.4 Berechnungsbeispiel

Ein Hackguthaufen aus Energierundholz soll mit einem Grosshacker der obersten Leistungsklasse 4 mit einer Motorleistung von 580 PS gehackt werden. Die Berechnung der mutmasslichen Hackschnitzelmenge aus dem Hackguthaufen nach dem Quadersektionsverfahren gemäss Anhang 7 ergab 180 Srm (grün=Eingangsgrössen, rot=berechnete Werte).

	Wert	[Einheit]	Bemerkungen
Hackgutmenge	180	Srm	
Motorleistung Hacker	350	kW	Umrechnung: 1kW=1.36 PS
Kostenansatz Maschinist	70	CHF/WPPH	
Kostenansatz Hacker ohne Maschinist	600	CHF/PMH <sub>15</sub>	
Produktivität für <b>Energierundholz</b>	117.17	Srm/PMH <sub>15</sub>	$Prod_{Erundh} = 0.2848 \times 426^{1.0276}$
Produktive Hackzeit pro Srm	0.51	Min./Srm	PMH <sub>15</sub>
Produktive Hackzeit PMH <sub>15</sub>	92.17	Min.	PMH <sub>15</sub>
Arbeitsplatzzeit Personal (WPPH)	155.54	Min.	$WPSH = PMH_{15} \times F_{indir} \times F_{Weg/Pausen} \times F_{Stör}$ ; wobei $F_{indir} = 1.5$ ; $F_{Weg/Pausen} = 1.125$ , $F_{Stör} = 1$
Für Hacker: PMH <sub>15</sub>	92.17	Min.	
Kosten Maschinist	181.46	CHF	
Kosten Hacker	921.72	CHF	
<b>Kosten</b>	<b>6.13</b>	<b>CHF/Srm</b>	

Gleiches Beispiel wie oben, jedoch für einen Hackguthaufen aus Waldrestholz.

	Wert	[Einheit]	Bemerkungen
Hackgutmenge	180	Srm	
Motorleistung Hacker	350	kW	Umrechnung: 1kW=1.36 PS
Kostenansatz Maschinist	70	CHF/WPPH	
Kostenansatz Hacker ohne Maschinist	600	CHF/PMH <sub>15</sub>	
Produktivität für <b>Waldrestholz</b>	74.64	Srm/PMH <sub>15</sub>	$Prod_{Erundh}=0.2848 \times 426^{1.0276}$
Produktive Hackzeit pro Srm	0.80	Min./Srm	PMH <sub>15</sub>
Produktive Hackzeit PMH <sub>15</sub>	144.69	Min.	PMH <sub>15</sub>
Arbeitsplatzzeit Personal (WPPH)	244.17	Min.	WPSH = PMH <sub>15</sub> x F <sub>indir</sub> x F <sub>Weg/Pausen</sub> x F <sub>Stör</sub> ; wobei F <sub>indir</sub> = 1.5; F <sub>Weg/Pausen</sub> =1.125, F <sub>stör</sub> =1
Für Hacker: PMH <sub>15</sub>	144.69	Min.	
Kosten Maschinist	284.87	CHF	
Kosten Hacker	1446.94	CHF	
<b>Kosten</b>	<b>9.62</b>	<b>CHF/Srm</b>	

Bei Annahme einer durchschnittlichen Aufteilung der Hackguthaufen auf 70% Energierundholz und 30% Waldrestholz ergeben sich für das gewählte Beispiel mittlere Kosten von 7.18 CHF/Srm.

## 6 Abkürzungen und Definitionen

Tabelle 7: Abkürzungen und Definitionen für das Modell "Hacker".

Abkürzung	Definition	Default-wert	Def. bereich	Einheit
<i>MotorleistungHacker</i>	Motorleistung des Hackers in kW (1 kW = 1.36 PS)	350	100-500	kW
<i>Waldrestholz</i>	Siehe Abbildung 3			
<i>Energierundholz</i>	Siehe Abbildung 3			
Faktoren $F_{indir}$ $F_{Pause}$ $F_{Weg}$ $F_{Stör}$	Multiplikationsfaktoren für ... indirekte Arbeitszeiten Pausen >15 Min. Wegzeiten >15 Min. Gewählter Defaultwert: $F_{Pause} * F_{Weg} = 1.125$ Störzeiten >15 Min.	1.5  1.125 1.0	 $\geq 1.0$ $\geq 1.0$	 [-] [-]
Srm	Schüttraummeter. Ein m <sup>3</sup> Holzmasse entspricht 2.8 Srm Hackschnitzel		$\geq 0$	[Srm]
$PMH_{15}$	Produktive Hackerzeit mit Unterbrüchen < 15 Min. pro Srm			$\left[ \frac{PMH_{15}}{Srm} \right]$
Produktivität	Gehacktes Holzvolumen in Srm pro Maschinenarbeitsstunde			$\left[ \frac{Srm}{PMH_{15}} \right]$
<i>WPPH</i>	Arbeitsplatzzeit des Personals (Maschinist) = PMH <sub>15</sub> x F <sub>indir</sub> x F <sub>Weg/Pausen</sub> x F <sub>Stör</sub> F <sub>indir</sub> =1.5, in F <sub>indir</sub> sind die Wartezeiten während des Hackens (z.B. Muldenwechsel) und die Umsetzzeiten enthalten.		$\geq 0$	$\left[ \frac{PMH_{15}}{Srm} \right]$
WPSH	Arbeitsplatzzeit des Sytems=WPPH		$\geq 0$	$\left[ \frac{PMH_{15}}{Srm} \right]$

## 7 Anhang: Methoden zur Abschätzung des Poltervolumens

### 7.1 Schätzmethode 1

Falsch eingeschätzte Hackschnitzelmengen aus Hackguthaufen führen zu Unsicherheiten in der bereitgestellten Liefermenge, erschweren die Planung von Hackereinsätzen und Transportkapazitäten und führen zu höheren Bereitstellungskosten.

Zur Abschätzung der Hackgutmenge eignet sich die praxistaugliche Methode nach Kuptz et al. (2015). Das Hackgut wird wegen der unterschiedlichen Ausformung in die beiden Hackgutarten "Energierundholz" und "Waldrestholz" eingeteilt. Die Schätzung der Hackschnitzelmenge erfolgt für die beiden Hackgutarten mit unterschiedlichen Verfahren.

Die Berechnung der Hackgutmenge [Srm] erfolgt in zwei Schritten:

1. Berechnung des Poltervolumens in Raummeter (Rm) für das Energierundholz oder für das Waldrestholz
2. Multiplikation dieses Poltervolumens mit dem Korrekturfaktor der Stirnfläche (Kronenfussfläche)

Die nachfolgend empfohlenen Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Hackholzmenge stammen aus der Auswertung von Daten aus mehreren 100 Hackholzhäufen.

#### 7.1.1 Raumvolumen für Hackguthaufen aus Energierundholz

Für Energierundholz eignet sich das Quader-Sektionsverfahren:

$$V_{QS}[Rm] = I_{BSS} \times h_{SkSS} \times \frac{t_l + t_r}{2}$$

$$V_{QS}[Rm] = I_{BSS} \times h_{SkSS} \times t_M$$

Legende:

$V_{QS}$ : Raumvolumen des Hackguthaufens, berechnet nach dem Quader-Sektionsverfahren

$I_{BSS}$ : Basislänge Stirnseite

$h_{SkSS}$ : mittlere Höhe der Sektionen der Stirnseite

$t_l$  und  $t_r$ : Tiefe links und rechts geteilt durch 2 ergibt die mittlere Tiefe  $t_M$

[Rm]: Raummeter

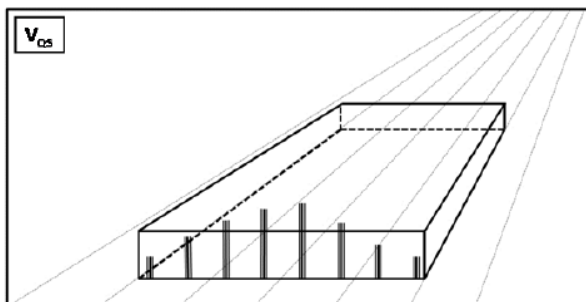


Abbildung 7: Beim Quader-Sektionsverfahren werden die Polter an der Stirnseite in 1m breite Sektionen  $h_{SkSS}$  unterteilt, deren Höhe jeweils gemessen wird. Der Mittelwert aus diesen einzelnen Höhen ergibt die mittlere Höhe des Hackguthaufens.

#### 7.1.2 Raumvolumen für Hackguthaufen aus Waldrestholz

Für Hackguthaufen aus Waldrestholz eignet sich das Zylinder-Verfahren:

$$V_{Zy}[Rm] = \frac{\pi}{4} \times I_{BSS} \times h_{SS} \times t_M$$

Legende:

$V_{Zy}$ : Raumvolumen des Hackguthaufens, berechnet nach dem Zylinder-Verfahren

$I_{BSS}$ : **halbe** Basislänge Stirnseite

$h_{SS}$ : Höhe Stirnseite

$t_l$  und  $t_r$ : Tiefe links und rechts geteilt durch 2 ergibt die mittlere Tiefe  $t_M$

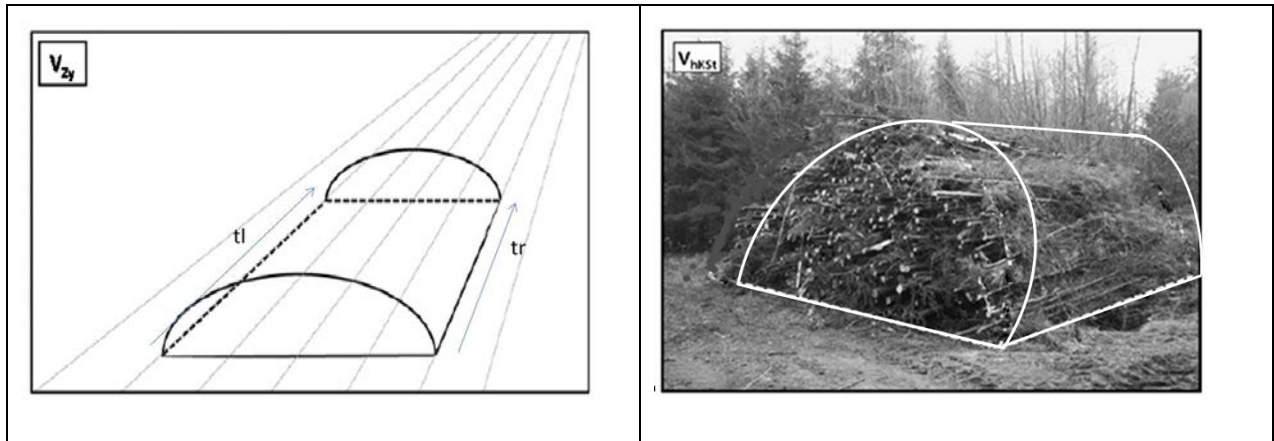


Abbildung 8: Verfahren mit Zylinderform.

### 7.1.3 Faktoren zur Bestimmung der Hackgutmenge aus dem Raumvolumen

Die nach dem Quader-Sektionsverfahren bzw. dem Zylinderform-Verfahren berechneten Raumvolumen der Hackgutpolter können mittels Korrekturverfahren in Schüttraummeter umgerechnet werden. Damit lässt sich vor dem Hacken ermitteln, welche Hackschnitzelmenge sich aus einem Hackguthaufen ergeben wird.

Die Korrekturfaktoren gegenüber den unterstellten geometrischen Formen zur Bestimmung des Poltervolumens sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Wertebereiche sind so gewählt, dass 70% der Messwerte innerhalb des angegebenen Bereichs liegen. Bei stark ungleichmässiger Ausformung der Höhe an der Stirnseite wird auch für Waldrestholz das Sektionsverfahren empfohlen.

Tabelle 8: Korrekturfaktoren gegenüber den unterstellten geometrischen Formen zur Bestimmung des Poltervolumens (Kuptz et al. 2015).

Sortiment	Quader-Sektionsverfahren $V_{QS}$		Zylinder-Verfahren $V_{Zy}$	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
Waldrestholz	1.0	0.9-1.2	1.0	0.9-1.1
Energierundholz	1.0	0.9-1.1	0.9	0.8-1.1

Die Kronenfussfläche kann entweder geschätzt oder mit einem Holzrahmen von 1x1m Seitenlänge näherungsweise bestimmt werden. Diese Methode kann recht aufwendig sein.





Abbildung 9: Bestimmen des Flächenanteils der Kronenfüsse an der gesamten Stirnfläche des Polters. Diese Bestimmung kann stichprobenartig mittels eines Holzrahmens von 1x1m Seitenlänge erfolgen.

Tabelle 9: Faktoren für die Umrechnung vom Raummass [Rm] des Polters auf die zu erwartende Hackschnitzelmenge [Srm]. Die Kronenfussfläche wird als prozentualer Anteil an der gesamten Stirnfläche des Polters angegeben.

	Waldrestholz				Energierundholz					
Kronenfussfläche [%]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Umrechnungsfaktor	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6

**Beispiel:**

Energierundholzpolter:  $I_{BS} = 2.10 \text{ m}$ ;  $h_{SS} = 2.3 \text{ m}$ ;  $t_M = 3.10 \text{ m}$ ; Kronenfussanteil = 45%

$$V_{zy} = \frac{\pi}{4} \times 2.1 \times 2.30 \times 3.10 = 11.76 \text{ Rm}$$

$$\text{Hackschnitzelmenge} = 11.76 \times 1.1 = 12.9 \text{ Srm}$$

## 7.2 Schätzmethoden 2, 3 und 4

Die Raurica Waldholz AG (2010) hat in einer Studie untersucht, ob es zuverlässige Methoden zur Schätzung des Hackschnitzelvolumens von Energieholzhaufen gebe. Im Allgemeinen liegen die Schätzfehler bei grösseren Haufen höher als bei kleineren. Folgende Schätzmethoden eignen sich:

**Schätzmethode 2: für Poltergrösse < 200m<sup>3</sup>**

$$\text{Hackgutmenge [Srm]} = \text{Höhe} \times \text{Länge} \times \text{Tiefe} \times 0.6$$

**Schätzmethode 3: für Poltergrösse 200-1000m<sup>3</sup>**

$$\text{Hackgutmenge [Srm]} = \text{Höhe} \times \text{Länge} \times \text{Tiefe} \times 0.4$$

**Schätzmethode 4: für alle Poltergrössen**

$$\begin{aligned} \text{Hackgutmenge [Srm]} &= 2.8 (\text{Höhe} \times \text{Länge} \times \text{Tiefe} \times 0.5) \\ &\times (\text{Volumenanteil Nadelholz} \times 0.8 + \text{Volumenanteil Laubholz} \times 0.6) \\ &\times (\text{Volumenanteil Derbholz} \times 0.7 + \text{Volumenanteil Reisig} \times 0.5) \end{aligned}$$

**Beispiel:**

Energierundholzpolter; Höhe = 4.1 m; Länge = 15m; Tiefe = 5 m;  
nur Nadelholz; nur Derbholz.

$$\begin{aligned} \text{Hackgutmenge [Srm]} &= 2.8 \times (4.1 \times 15 \times 5 \times 0.5 \times (1.0 \times 0.8 + 0 \times 0.6) \times (1.0 \times 0.7 + 0.0 \times 0.5)) = 241 \end{aligned}$$

Die Schätzmethoden wurden anhand der vorhandenen Datensätze (Hackschnitzelmenge total 20'700 Srm) auf ihre Genauigkeit überprüft. Mit den Schätzmethoden 2 bis 4 betrug die Abweichung der geschätzten Hackschnitzelmenge weniger als 10% zur tatsächlichen Menge.

Die Schätzmethode 4, bei der auch der Nadelholz- bzw. Laubholzanteil sowie der Derbholzanteil berücksichtigt wurden, zeigte sich erwartungsgemäss als die genaueste Methode.

## **8 Literaturverzeichnis**

Björheden, R., Apel, K., Shiba, M., Thompson, M., 1995: IUFRO forest work study nomenclature. Swedish University of Agricultural Science. Dept. of Operational Efficiency, Garpenberg.

Cremer, T., 2008: Bereitstellung von Holzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft: Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse, Universitätsbibliothek Freiburg. 199 S.

Ghaffariyan, M., Spinelli, R. und Brown, M., 2013: A model to predict productivity of different chipping operations. J For Sci 75(3). 129-136.

Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K. und Ashton, S, 2009: Regional energy wood logistics—optimizing local fuel supply. Silva Fennica 43(1). 113-128.

Kuptz, D., Schulmeyer, F., Hüttl, K., Dietz, E., Turowski, P., Zormaier, F., Borchert, H. und Hartmann, H., 2015: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. LWF Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. 316 S.

Raurica Waldholz AG, 2010: Wie viel Holz ist im Polter? Wald und Holz(12). 26-27.

Schulmeyer, F., Mergler, F., Hüttl, K., Zormaier, F., 2016: Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Merkblatt 10, 6 S.

## 9 Beurteilung der Qualität des Modells „Hacker“

Kriterien	Bewertung			Bemerkungen
Datengrundlage aus den Jahren	2015			
Technische Aktualität (Verfahren)	aktuell	teilw.veraltet	veraltet	
Umfang der Datengrundlage	gross	mittel	klein	Untersuchung "Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel" (Kuptz et al, 2015). Zeiterhebung über 36 Tage, davon 10 Tage gesamte Arbeitszeit und 26 Tage Ausschnitte davon.
Anwendbarkeit auf CH-Verhältnisse	gut	mittel	schlecht	
Dokumentation der Anwendung	gut	mittel	gering	Teil A
Modell anhand der Grundlagendaten überprüft	ja	nein		
Detaillierungsgrad des Modells	gut	mittel		

Gesamturteil:



X

Beurteilung durch: R. Lemm, F. Frutig

Datum: 08. Dezember 2018