

Produktivitätsmodelle „Forwarder Rundholz“ und „Forwarder Energieholz“

Teil A: Grundlagen

Marc Werder
Janine Schweier
Renato Lemm
Fritz Frutig
Dario Pedolin
Oliver Thees



Eidg. Forschungsanstalt WSL
Forschungsgruppe Nachhaltige Forstwirtschaft

Update Vs. 2.0, 13. August 2024

Die Produktivitätsmodelle „Forwarder Rundholz“ und „Forwarder Energieholz“ sind 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>). Die Modelle „Forwarder Rundholz“ und „Forwarder Energieholz“ wurden im Jahr 2017 erstellt und im Jahr 2024 mit dem Untermodell "Traktionshilfswinde (THW)" ergänzt. Der Teil A des Dokumentes beschreibt das Modell, der Teil B die statistische Analyse der Datensätze und die Herleitung des Grundmodells für das Rücken von Rundholz mit Forwarder.

Version	Bearbeiter	Datum	Kommentar
2.0	M. Werder/ J. Schweier	20.03.2024	Überarbeitung und Ergänzung mit dem Untermodell «THW»
1.1	F. Frutig/ R. Lemm	04.06.2018	Schlussredaktion
1.1	R.Lemm	09.11.2017	Korrekturen
1.1	F. Frutig/ R. Lemm	12.04.2017	
1.1	F. Frutig/ O.Thees	08.02.2017	
1.0	R. Lemm	31.10.2016	

Inhaltsübersicht

1	Grundlagen	5
1.1	Entstehung und Verwendung	5
1.2	Begriffe	5
1.3	Beurteilung und Besonderheiten	5
2	Datengrundlagen	6
3	Produktionssystem – Beschreibung	7
3.1	Produktionsprozess „Rücken mit Forwarder“ vom Bestand zur Waldstrasse	7
3.2	Prozess und Faktoren beim «Einsatz einer Traktionshilfswinde (THW)»	7
3.3	Input/Output-Zustand	8
3.3.1	Input	8
3.3.2	Output	8
3.4	Berechneter Output	8
3.5	Arbeitsbedingungen	9
3.5.1	Technik und Personal	9
3.5.2	Gelände und Erschliessung	9
3.5.3	Bestand	9
4	Produktionssystem - mathematische Darstellung	10
4.1	Systemübersicht "Rücken mit Forwarder"	10
4.2	Einflussgrößen	10
4.3	Modell für das Rücken von Rundholz mit Forwarder	11
4.4	Produktivität beim Rücken von Energieholz mit Forwarder	12
4.4.1	Produktivität Rundholzzücken (eigene Datengrundlagen)	13
4.4.2	Produktivität Energieholzzücken aus Produktivität Rundholzzücken	14
4.4.3	Korrekturfaktor $KF_{\text{Rundholz-Energieholz}}$ nach Cremer (2008)	14
4.4.4	Berechnung Energieholzvolumen	15
4.5	Zusatzmodell für das Rücken mit Forwarder mit Traktionshilfswinde	24
5	Zeitsystem und Umrechnungen im Produktivitätsmodell "Forwarder"	26
5.1	Zeitsystem	26
5.3	Berechnung der System- und Faktorzeiten pro m^3	27
6	Berechnung von Zeitbedarf und Kosten	27
6.1	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro m^3	27
6.2	Kosten der Produktionsfaktoren pro m^3	28
6.3	Berechnungsbeispiele	29
6.3.1	Bsp Fichte: Rücken Rund- und Energieholz mit Forwarder mit THW	29
6.3.2	Bsp. Buche: Rücken Rund- und Energieholz mit Forwarder ohne THW ..	31
7	Abkürzungen und Definitionen	32
8	Literaturverzeichnis	32

Wichtig für die Anwendung

In diesem Grundlagenbericht wird der Masseinheit m³ für die Holzvolumina (z.B. Holzmenge, Volumenmittelstamm) der Zusatz o.R. (ohne Rinde) angefügt. Die Produktivitäten wurden jeweils auf das für den Verkauf vermessene Holz bezogen, d.h. Holz ohne Rinde. Wird die aufzuarbeitende Holzmenge in Rinde eingegeben, wird das Volumen automatisch auf „ohne Rinde“ umgerechnet.

Für die Umrechnung von Holzmenge und Volumenmittelstamm gilt:

$$\text{Holzmenge}_{\text{ohne Rinde}} = K_{\text{BA}} * \text{Holzmenge}_{\text{in Rinde}}$$

Umrechnungsfaktoren K_{BA} vom Zustand „in Rinde“ in den Zustand „ohne Rinde“:

Fichte/Tanne:	0.88
Föhre:	0.87
Lärche:	0.87
Buche:	0.92
Esche:	0.86
Ahorn:	0.90
Eiche:	0.85

Im Modell wird als Defaultwert ein Einheitsfaktor von 0.89 verwendet (gemäss Volumenanteilen der Baumarten aus dem Schweizer Landesforstinventar LFI).

Quelle:

http://bfw.ac.at/ort1/Vortraege_als_pdf/Vortraege_Neueinsteiger/Holzmessen_Neueinsteiger.pdf

3.Juli 2015

1 Grundlagen

1.1 Entstehung und Verwendung

Die Daten für das Grundmodell stammen aus zwei staatlichen Maschinenstützpunkten in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Ausgewertet wurden 636 Datensätze aus den Jahren 2007-2015 aus Holzschlägen, in denen Rundholz sortimentsweise gerückt wurde. Weil diese Daten nicht zum Zwecke der Erstellung eines Produktivitätsmodelles erhoben wurden, sondern zur Dokumentation von Arbeits-einsätzen, fehlen einige wichtige Einflussgrößen. Diese wurden für das Produktivitätsmodell "Forwarder Rundholz" anhand einer internen Kalkulationsgrundlage von ThüringenForst (2010) bestimmt. Es sind dies die Zuschläge und Abzüge für Fahrdistanzen, Hangneigung, Anzahl Sortimente und Vorkonzentration des Holzes an der Rückegasse. Grundlage für die Reduktionsfaktoren beim Rücken von Energieholz bildeten Literaturangaben (Cremer 2008).

Das bisherige HeProMo-Produktivitätsmodell für Forwarder schätzte die Produktivität für das Rücken von Rundholz. Berechnungsgrundlagen für die Produktivität des zunehmend an Bedeutung gewinnenden Energieholzes fehlten bisher. Deshalb wurde ein neues Modell "Forwarder Energieholz" erstellt. Energieholz wird meist in Form von grob entastetem, oft krummschaftigem Rundholz oder Vollbaumteilen gerückt, was gegenüber Rundholz unterschiedliche Ladevolumen und Ladezeiten zur Folge hat. Aus den Grundlagen von Cremer (2008) konnte ein Reduktionsfaktor für das Rücken von Energierundholz hergeleitet werden. Im Energieholz können zusätzlich zum Kronenmaterial auch einzelne Vollbäume geringen Durchmessers enthalten sein.

Die beiden Modelle "Forwarder Rundholz" bzw. "Forwarder Energieholz" dienen der Schätzung (Vorkalkulation) der Produktivitäten beim Rücken von Rundholz bzw. Energieholz. Die Modelle wurden, wie alle anderen Produktivitätsmodelle, in ein IT-gestütztes Berechnungsinstrument umgesetzt, mit dem sich der Zeitbedarf und die Kosten des Rückens von Rundholz und von Energieholz mit dem Forwarder auf einfache Weise schätzen lassen.

1.2 Begriffe

Schaftholz:

Oberirdisches Holz des Stammes vom Stammanlauf bis zum Baumwipfel inkl. Stock und Rinde, jedoch ohne Astholz.

Rundholz:

Nach den «Schweizerischen Holzhandels-Gebräuchen» sortierbares Holz ohne Rinde der Klassen 1 bis 6.

Derbholz:

Oberirdische Baumteile (Holzmasse von Schaft und Ästen in Rinde), deren Durchmesser über der Rinde mindestens 7 cm beträgt.

Astderbholz:

Holzmasse von Ästen in Rinde mit einem Durchmesser von mindestens 7 cm.

Reisig:

Ast- und Schaftholz mit einem Durchmesser von weniger als 7 cm.

Energierundholz:

Energierundholz besteht aus grob geastetem Schaftholz. Ebenso werden faule Schaftabschnitte oder solche von schlechterer Qualität dem Energierundholz zugeteilt.

1.3 Beurteilung und Besonderheiten

Die schwedischen Grundlagen für das bisherige Modell für das Rücken von Rundholz stammen von 1985 und wurden 1997 mittels Überprüfungen in der Forstpraxis an die Schweizerischen Verhältnisse angepasst. Obwohl das technische Grundkonzept der Forwarder sowie die Arbeitsverfahren weitgehend unverändert geblieben sind, hat doch die technische Entwicklung bei Hydraulik und Steuerung zu einer bedeutenden Leistungssteigerung von bis zu 20% geführt. Das neue Modell für das Rundholzrücken mit Forwarder basiert auf aktuellen deutschen Leistungsdaten von 2007-2015. Da Maschinen und Arbeitsverfahren beim Rücken mit Forwarder in Mitteleuropa kaum wesentlich differieren, kann mit diesen

Ergebnissen die Vorhersagegenauigkeit bei der Anwendung unter schweizerischen Verhältnissen gegenüber dem alten Modell verbessert werden. Manuelle Zeitstudien sind sehr arbeits- und kosten- aufwändig und konnten deshalb im Rahmen dieser Aktualisierung nicht durchgeführt werden. Eine umfangreiche Literaturrecherche hat ergeben, dass die Arbeit von Cremer (2008) gute Grundlagen für die Produktivität beim Rücken von Energieholz mit dem Forwarder liefert. Aufgrund der ähnlichen Rahmenbedingungen in Süddeutschland kann davon ausgegangen werden, dass sich die Ergebnisse auch für die Anwendung in der Schweiz eignen und für die Reduktion der Produktivitäten beim Rücken von Energieholz im neuen Produktivitätsmodell herangezogen werden können.

2 Datengrundlagen

Die Datensätze für das Rücken von Rundholz mit Forwarder stammen wie erwähnt aus zwei forstlichen Maschinenstützpunkten in Süddeutschland. Aus dem Datensatz von 665 Holzschlägen wurden in einer ersten Analyse 29 Ausreisser und andere unplausible Datensätze eliminiert, so dass noch 636 Datensätze ausgewertet werden konnten. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die bei den Rückarbeiten eingesetzten Maschinentypen und die jeweilige Anzahl Einsätze. Es wurden vorwiegend Forwarder der mittleren Nutzlastklasse (9-14 Tonnen) eingesetzt. Die insgesamt gerückte Holzmenge betrug rund 450'000 m³ o.R.

Tabelle 1: Maschinentypen und gemessene Produktivität.

Bezeichnung	Nutzlast- klasse	Anzahl Einsätze N	Median BHD [cm]	Median gemessene Produktivität [m ³ /PSH ₁₅]
8-Rad Tragschlepper mit Add Blue	mittel	28	26	13.97
EcoLog 564	mittel	21	22	11.29
EcoLog 564B	mittel	118	24	9.97
HSM 208F BigFoot	mittel	142	25	11.82
HSM 208F	klein	37	24	7.83
Valmet 840	mittel	42	23	11.23
Valmet 840.3	mittel	62	23	11.58
Forcar FC 200 mit Traktionswinde	gross	27	25	12.24
HSM 208F 11t Kombi	mittel	22	24	11.41
Rottne Rapid	mittel	1	18	15.24
Rottne F10B	mittel	27	22	10.86
Valmet 840TX	mittel	22	26	11.26
Valmet 840.2	mittel	19	22	9.29
Valmet 860.4	mittel	68	25	11.81
Total		636	18-26	--

Zur Verringerung des Radschlupfs in steilem Gelände und zur Erschliessung von Hängen mit einer Neigung von über 30-35% werden bei bodengestützten Verfahren vermehrt Traktionshilfswinden (THW) eingesetzt.

Mit dem Einsatz der THW entsteht ein Mehraufwand (unterstützende Arbeit). Dieser wurde auf der Grundlage von zwei im Jahr 2022 durchgeführten Studien berechnet, in welchen 53 Umhänge- (Rückegassenwechsel) und 200 An- und Abhängeereignisse ausgewertet wurden. Die Ergebnisse wurden ausserdem durch ausgewählte Unternehmer auf ihre Plausibilität geprüft. Das Untermodell „Einsatz mit Traktionshilfswinde“ dient somit als Ergänzung des Grundmodells und wurde im Jahr 2024 in die beiden bestehenden Forwarder Modelle integriert.

3 Produktionssystem – Beschreibung

In einem ersten Schritt wird die Produktivität für das Rücken von Rundholz mit dem Forwarder berechnet und aus diesem Wert in einem zweiten Schritt die Produktivität für das Rücken des Energieholzes abgeleitet (Abb. 2).

3.1 Produktionsprozess „Rücken mit Forwarder“ vom Bestand zur Waldstrasse

Es werden zwei verschiedene Produktionsprozesse dargestellt:

- Rücken von Rundholzabschnitten von 2-6m Länge.
- Rücken von Energieholz in Form von grob entasteten Rundholzabschnitten und Kronenmaterial sowie einzelne Vollbäume geringen Durchmessers.

Der Arbeitsablauf sieht für beide Produktionsprozesse gleich aus: Der Forwarder (Tragschlepper) lädt mit dem aufgebauten Kran Rundholz bzw. Energieholz in den Rungenkorb (in der Regel sortimentsweise), rückt das aufgeladene Holz an die Waldstrasse und lädt es dort auf Rundholzpolter bzw. Energieholzhaufen ab. Dabei kann nur in der Reichweite des Krans liegendes Holz aufgeladen werden. Abschnitte, die nach dem Fällen und Aufarbeiten ausserhalb der Kranreichweite im Bestand liegen, müssen zuerst an die Rückegasse oder Waldstrasse vorgerückt werden (Abb. 1).

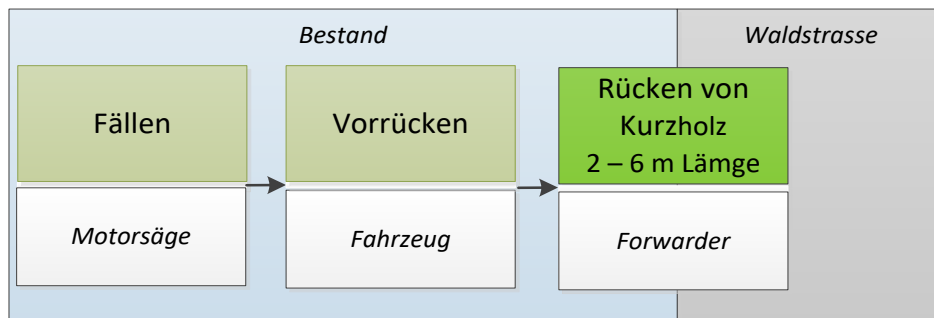


Abbildung 1: Integration des Produktionsprozesses „Forwarder“ in die Logistikkette vom stehenden Baum bis zum Holzpolter/Energieholzhaufen an der Waldstrasse.

3.2 Prozess und Faktoren beim «Einsatz einer Traktionshilfswinde (THW)»

Beim Einsatz einer Traktionshilfswinde (THW) wird der Arbeitsablauf beim «Rücken mit Forwarder» um folgende Arbeitsschritte (unterstützende Arbeiten, ISH) ergänzt:

- (1) Installation der THW am Arbeitsort.
- (2) Anhängen der THW vor der Einfahrt auf die Rückegasse am Anker oder am Forwarder.
- (3) Abhängen der THW vor der Einfahrt auf die Strasse.
- (4) Überstellen der THW bei einem Rückegassenwechsel.
- (5) Deinstallation ab Arbeitsort.

Die Zusammenstellung dieser Produktionsfaktoren kann je nach verwendetem Windensystem (aktiv/passiv) variieren. Grundsätzlich können zwei Hauptsysteme unterschieden werden (Tabelle 2). Beim Einsatz eines Forwarders mit eingebauter THW (passiv), setzt sich, neben der Installation und Deinstallation, der Zusatzaufwand aus dem An-, Abhängen der THW sowie dem Umhängen der Seilwinde an den nächsten Ankerbaum bei einem Rückegassenwechsel zusammen. Beim Einsatz einer externen Winde eingesetzt (aktiv) wird diese jeweils selbst auf die nächste Rückegasse versetzt und am Forwarder angehängt.

Tabelle 2: Faktoren innerhalb der Systeme.

Forwarder mit eingebauter THW (passiv)	Forwarder mit externer THW (aktiv)
1 x MaschinenführerIn	1 x MaschinenführerIn
1 x Forwarder (mit interner THW)	1 x Forwarder
-	1 x Externe Winde

Der Zeitaufwand für das Überstellen der THW sowie für das An- bzw. Abhängen am Forwarder unterscheidet sich dabei je nach Erschliessungssituation stark. Es können grundsätzlich drei Szenarien unterschieden werden:

- (1) *Geringer Aufwand:* Es gibt an der oberen Bestandesgrenze einen mit Maschinen befahrbaren Weg.

Eine durch Maschinen befahrbare Strasse an der oberen Bestandesgrenze erleichtert den THW-Einsatz bedeutend. So kann auch ein Gassenwechsel üblicherweise innert weniger Minuten vollzogen werden.

- (2) *Mittlerer Aufwand:* Es gibt an der oberen Bestandesgrenze eine Strasse, die jedoch nicht mit der Maschine befahren werden (bspw. Mit Traktionsbändern auf Teerstrasse).

In diesem Fall muss das Seil der Traktionswinde jeweils von Hand durch den Bestand gezogen werden, um den Gassenwechsel von unten zu vollziehen. Dies ist, besonders bei langen Rückegassen, mit einem erheblichen Zusatzaufwand verbunden und z.T. nicht ohne weiteres Bodenpersonal möglich.

- (3) *Grosser Aufwand:* Es gibt keinen befahrbaren Zugang (Strasse oder Maschinenweg) an der oberen Bestandesgrenze.

In diesem Fall ist der Einsatz einer externen (mobilen) THW nicht (oder nur mit Umlenkung) möglich. Das Seil muss bei jedem Gassenwechsel durch den Bestand hochgezogen und an einem geeigneten Ankerbaum befestigt werden.

Aufgrund der verfügbaren Datengrundlage beschränken wir uns bei der Herleitung des Modells vorerst auf das erste Szenario [geringer Aufwand] mit aktiver (externer) THW. Die im Modell berechneten Aufwandszeiten beziehen sich demnach immer auf eine Erschliessungssituation, die über einen mit Maschinen befahrbaren Weg an der oberen Bestandesgrenze verfügt und es wird von dem Gebrauch einer aktiven THW ausgegangen (z.B. T-Winch).

3.3 Input/Output-Zustand

3.3.1 Input

- Rundholz und grob entastetes Energierundholz von 2-6 m Länge sowie Kronenmaterial und einzelne Vollbäume geringen Durchmessers, die in Kranreichweite liegen.

3.3.2 Output

- Die transportierten Holzabschnitte lagern am Abladeort (Waldstrasse) in Form von krangesetzten Holzhaufen (Rundholzpolter bzw. Energieholzhaufen).

3.4 Berechneter Output

- Produktivität des Rückens von Rundholz (technische Arbeitsproduktivität) des Produktionsfaktors Forwarder als Zeitbedarf [PSH_{15}] pro aufgearbeitete Holzmenge [m^3 o.R.].

- Produktivität des Rückens von Energieholz (technische Arbeitsproduktivität) des Produktionsfaktors Forwarder als Zeitbedarf [PSH₁₅]pro aufgearbeitete Holzmenge [m³ i.R.].

3.5 Arbeitsbedingungen

3.5.1 Technik und Personal

- Forwarder der Nutzlastklasse 9-14 Tonnen (Maschinenkategorie mittel und gross).
- *Traktionshilfswinde (aktiv)*.
- Der Maschinist muss auf der eingesetzten Maschine und bezüglich der übrigen Bedingungen geübt sein.

3.5.2 Gelände und Erschliessung

- Das Gelände ist für Maschinen mit Radfahrgestellen befahrbar (Hangneigung, Bodentragfähigkeit, Bodenrauheit).
- Eine Feinerschliessung mit Rückegassen ist vorhanden, seltener wird auch direkt von der Waldstrasse aus geladen.

3.5.3 Bestand

- Bestände aller Baumarten.

4 Produktionssystem - mathematische Darstellung

4.1 Systemübersicht "Rücken mit Forwarder"

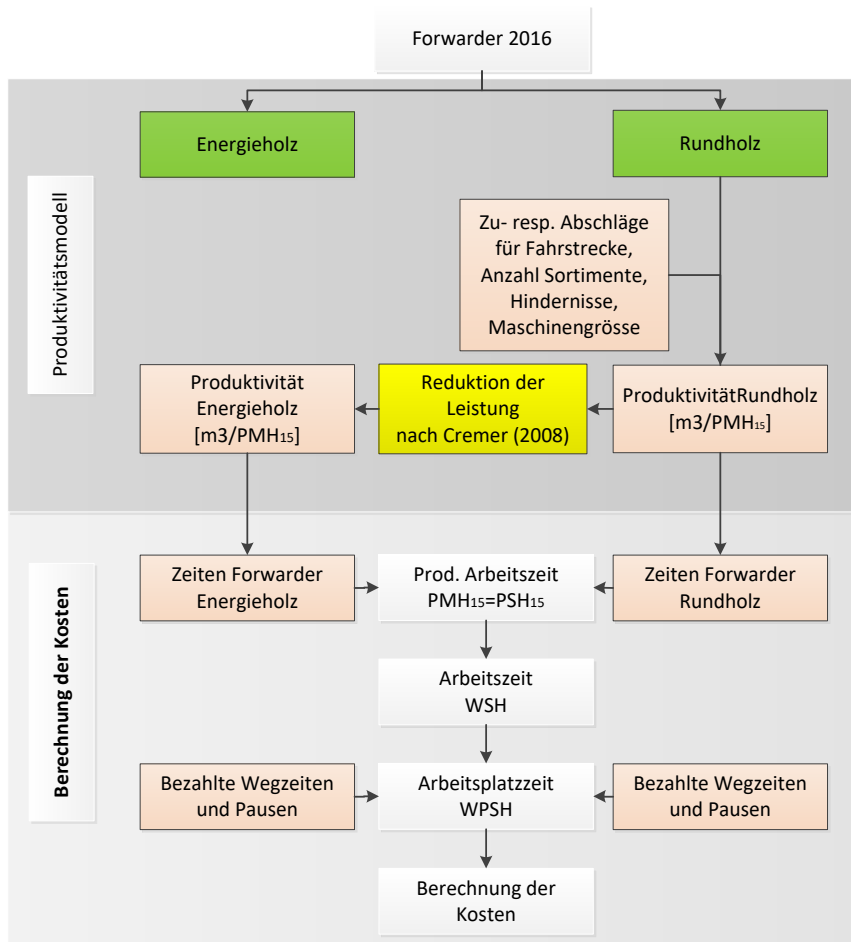


Abbildung 2: Einflussgrößen auf die Produktivität beim Rücken mit Forwarder und Darstellung der Zeitaufwände für die Kostenberechnung.

4.2 Einflussgrößen

Rundholzmodell:

- Mittlerer Bruthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes.
- Fahrdistanz bis zum Polter an der Waldstrasse.
- Hindernisse auf der Feinerschliessung Anzahl Sortimente.
- Forwardergrösse (Nutzlastklasse).

Energieholzmodell:

- Produktivität beim Rücken von Rundholz.
- Energieholzanfall pro ha.
- Zopfdurchmesser (Durchmesser bis zu welchem Rundholz ausgehalten wird).
- Rückegassenabstand.
- Forwardergrösse (Nutzlastklasse).

4.3 Modell für das Rücken von Rundholz mit Forwarder

Die Berechnung des Rückens von Rundholz mit Forwarder erfolgt durch:

1. Berechnung der Grundproduktivität beim Rücken von Rundholz mit dem Forwarder (Formel 1)
2. Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren auf die Produktivität. Die Zuschläge und Abzüge für Fahrdistanzen, Hangneigung (ohne/ mit THW), Anzahl Sortimenten und Vorkonzentration des Holzes an der Rückegasse basieren auf internen Unterlagen von Thüringen Forst (2010) und Gesprächen mit Forstunternehmern (2024) (Formel 2).

$$Prod_{Rundolz} = (4.14 + 0.31 \times BHD_{mit}) * R_{gesamt} \quad [m^3 o. R./PMH_{15}] \quad \text{Formel 1}$$

BHD_{mit} : mittlerer Brusthöhendurchmesser des Aushiebes

$$R_{gesamt} = 1 - R_{RüEntf} - R_{Hang} - R_{Sort} - R_{BesErsch} - R_{RüGasAbst} + R_{ForwTyp} \quad \text{Formel 2}$$

$$R_{RüEntf} = \text{Prozent}/100$$

Reduktion der Produktivität wegen Rückeentfernung > 200 m:

201-400 m	5.0%
401-600 m	10.0%
601-900 m	15.0%
901-1200 m	17.5%
> 1200 m	20.0%

$$R_{Hang} = \text{Prozent}/100$$

Reduktion der Produktivität wegen Hangneigung grösser 15%:

15 – 24 %	2.5%
25 – 34 %	5%
35 – 44 %	10 % (mit THW)
45 – 60 %	15 % (mit THW)

$$R_{Sort} = \text{Prozent}/100$$

Reduktion der Produktivität für getrenntes Poltern von mehr als 3 verschiedenen Sortimenten:

4 - 6	2.5%
7 - 10	5.0%
> 10	7.5%

$$R_{BesErsch} = \text{Prozent}/100$$

Reduktion der Produktivität bei besonderen Erschwernissen:

keine	0%
wenige	5%
viele	10%

$$R_{RüGasAbst} = \text{Prozent}/100$$

Reduktion der Produktivität falls Rückegassenabstand kleiner als 40m, abgeleitet anhand des bisherigen Forwardermodells (HeProMo 2003):

30m=5.0%.

Die ausgewerteten Daten für das Rücken mit Forwarder stammen alle aus Harvesterschlägen. Die Vorkonzentration des aufgearbeiteten Holzes an der Rückegasse durch den Harvester ist damit in der Grundproduktivität bereits enthalten.

$$R_{ForwTyp} = \text{Prozent}/100$$

Erhöhung der Produktivität beim Einsatz eines Forwarders der Grössenklasse "gross" anstelle von "mittel": 20.0%

Quelle: Mittlere Produktivitätserhöhung berechnet nach Cremer (2008, S. 108).

4.4 Produktivität beim Rücken von Energieholz mit Forwarder

Das Ergebnis aus den Untersuchungen von Cremer (2008) ist ein bestimmtes Verhältnis der Produktivität beim Energieholzrücken zu derjenigen beim Rundholzrücken. Dieses Verhältnis wenden wir auf unser Modell des Rundholzrückens an, um die Produktivität des Energieholzrückens zu schätzen.

Die Berechnung der Produktivität des Rundholzrückens beruht auf 636 Datensätzen aus deutschen Forstbetrieben. Den Grundlagendaten liegt ein Rückegassenabstand von 40m zu Grunde. Für kleinere Rückegassenabstände (30m bzw. 20m) wird ein Korrekturfaktor für die Produktivität verwendet, welcher anhand des bisherigen Produktivitätsmodells HeProMo 2003 hergeleitet wurde.

1. **Berechnung der Produktivität Rundholzrücken und Berechnung Reduktionsfaktor R_{Gesamt}**
2. **Berechnung der Produktivität Energieholzrücken aus der Produktivität Rundholzrücken**
3. **Berechnung des Korrekturfaktors $KF_{\text{Rundholz-Energieholz}}$ nach Cremer (2008).**

Diese Berechnung setzt folgende Größen als bekannt voraus:

- Zopfdurchmesser, d.h. Durchmesser an der Stelle wo Rund- und Energieholz getrennt werden
 - Energieholzanfall pro ha:
 - konkrete Eingangsgröße (gesamte Energieholzmenge geteilt durch Schlagfläche)
 - klein ($15 \text{ m}^3 \text{ i.R.}$)
 - mittel ($70 \text{ m}^3 \text{ i.R.}$)
 - gross ($130 \text{ m}^3 \text{ i.R.}$)
 - benutzerdefiniert
 - Rückegassenabstand: Defaultwert 40m.
 - Größenklasse des eingesetzten Forwarders:
 - mittel: < 10 to Nutzlast
 - gross: > 10 to Nutzlast.
4. **Berechnung des gesamten Energieholzvolumens (Energieholzanfall)**
Das Energieholzvolumen ist für die Berechnung des Zeitaufwandes und der Kosten beim Energieholzrücken erforderlich. Dieses Energieholzvolumen wird
 - entweder als bekannter Wert direkt ins Modell eingegeben,
 - oder mit dem Modell Energieholz berechnet.

Hinweis:

Ast- und allenfalls Reisiganteile müssen, falls sie genutzt werden sollen, als zusätzliche Menge berücksichtigt werden. Dies könnte insbesondere beim Laubholz der Fall sein.

4.4.1 Produktivität Rundholzrücken (eigene Datengrundlagen)

$$Prod_{RundHolz} = (4.14 + 0.31 \times BHD_{mit}) * R_{Gesamt}$$

Falls $BHD_{mit} > 35 \text{ cm}$ und $< 50 \text{ cm}$

$$Prod_{RundHolz} = (4.14 + 0.31 \times 35) * R_{Gesamt}$$

Formel 1

Für $BHD_{mit} > 50 \text{ cm}$ undefiniert.

Die uns zur Verfügung gestellten Daten umfassen einen Datenbereich für BHD_{mit} zwischen 15 cm und 35 cm. Die Daten von Cremer stammen aus einem Bereich zwischen 10 und 43 cm. Das Modell von Cremer zeigt im Bereich 40-50 cm ein Optimum. Die Produktivität unseres Modells wird bei einem BHD_{mit} von 35 cm begrenzt (vgl. Abbildung 3).

Reduktionsfaktor aus Zu- und Abschlägen (bezogen auf die Produktivität):

$$R_{Gesamt} = 1 - R_{RüEntf} - R_{Hang} - R_{Sort} - R_{BesErsch} - R_{RüGasAbst} + R_{ForwTyp}$$

Formel 2

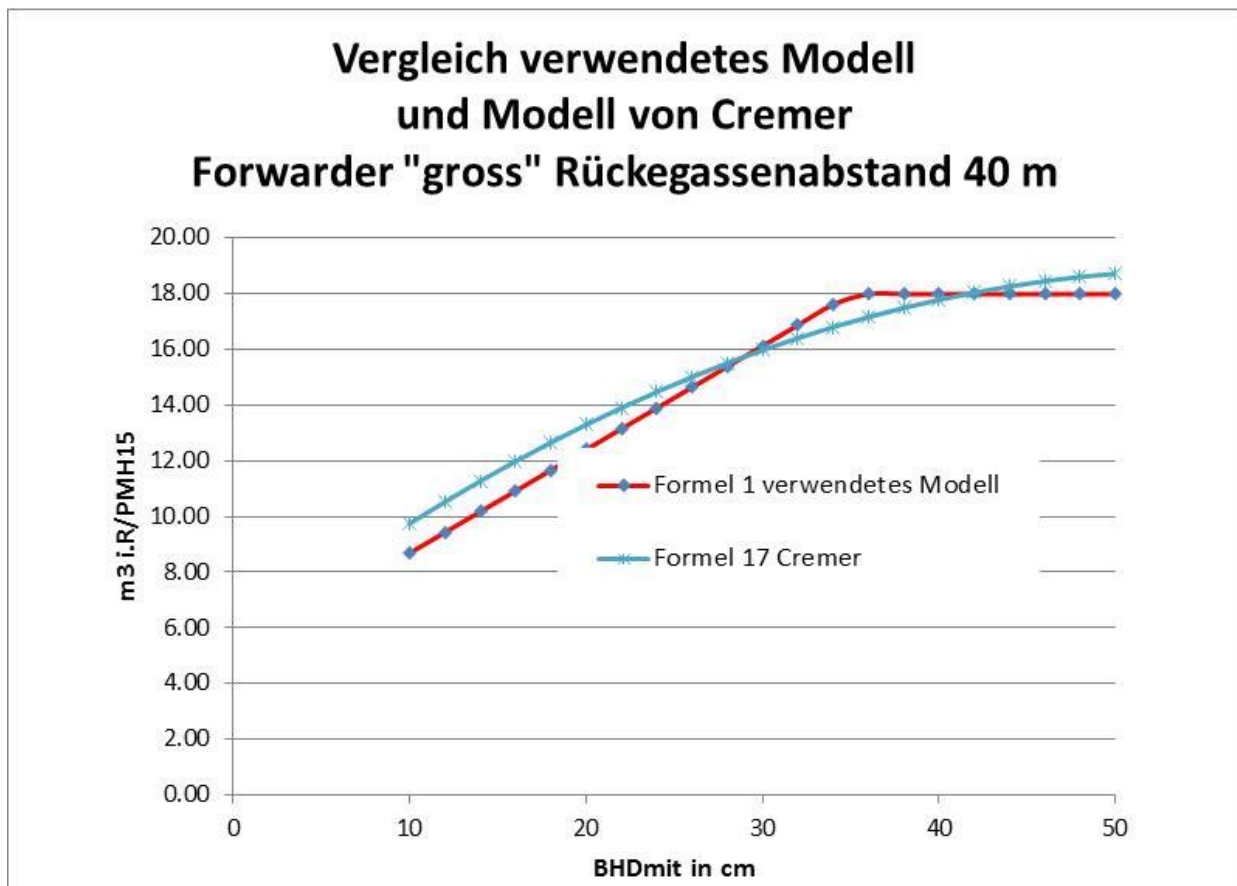


Abbildung 3: Vergleich verwendetes Modell und Modell von Cremer für einen Forwarder "gross" und einen Rückegassenabstand von 40 m. Fahrdistanz, Hangneigung Anzahl Sortimente und Erschwernisse werden im verwendeten Modell ohne Reduktionsfaktor verwendet.

4.4.2 Produktivität Energieholzrücken aus Produktivität Rundholzrücken

$$\frac{Prod_{Rundholz}}{Prod_{Energieholz}} = KF_{Rundholz-Energieholz}$$

Legende:

$Prod_{Rundholz}$: Produktivität RundholzRücken mit Forwarder in $\frac{m^3 o. R.}{PMH_{15}}$ nach Cremer (2008)

$Prod_{Energieholz}$: Produktivität EnergieholzRücken mit Forwarder in $\frac{m^3 i. R.}{PMH_{15}}$ nach Cremer (2008)

$KF_{Rundholz-Energieholz}$: Korrekturfaktor zur Berechnung der Produktivität Energieholz aus der Produktivität des Rundholzes



4.4.3 Korrekturfaktor $KF_{Rundholz-Energieholz}$ nach Cremer (2008)

Der Korrekturfaktor $KF_{Stammholz-Energieholz}$ ergibt sich aus dem Verhältnis der Produktivität für das Rundholzrücken und der Produktivität für das Energieholzrücken (Cremer 2008).

Um die Produktivität des Energieholzrückens mit Forwarder zu erhalten, wird die Produktivität für das Rundholzrücken (Formel 1) um den Faktor $KF_{Rundholz-Energieholz}$ (Formel 3) reduziert.

$$\begin{aligned}
 KF_{Rundholz-Energieholz} &= (-0.005 \times BHD_{mit}^2 + 0.469 \times BHD_{mit} + 0.089 \times BHD_{mit} \times ForwarderTyp \\
 &\quad + 3.159 \times \text{Rückegassenabstand} + 2.975) / (6.171 \times \ln(BHD_{mit}) \\
 &\quad + 0.021 \times \text{Energieholzanfall pro ha} + 0.268 \times \text{Zopfdurchmesser} - 15.586)
 \end{aligned}$$

Formel 3

Legende: Energieholzanfall pro ha: Volumen geerntetes **Energieholz pro ha**; falls keine eigenen Daten bekannt sind wird der Defaultwert von $70 \frac{m^3 i.R.}{ha}$ verwendet

Zopfdurchmesser: Durchmesser beim Trennschnitt zwischen Rundholz und Energieholz in cm; Defaultwert: 10 cm i.R.

Rückegassenabstand:

falls Abstand der Rückegassen 40 m ist Rückegassenabstand = 1;

falls Rückegassenabstand 30 m ist Rückegassenabstand = 0.5

falls Rückegassenabstand 20 m ist Rückegassenabstand = 0;

ForwarderTyp:

falls "gross" ForwarderTyp = 1; sonst ForwarderTyp = 0;

Default = ForwarderTyp "mittel" = 0

Gültigkeitsbereiche gemäss Cremer (2008):

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

4.4.4 Berechnung Energieholzvolumen

Die Berechnung des Schichtholzvolumens kann mit dem Modell „Berechnung Schichtvolumen eines Baumes“ erfolgen oder vorgegeben werden.

Will man den Energieholzanfall berechnen so geht man wie folgt vor. Der Energieholzanfall setzt sich aus den folgenden Teilen zusammen (Abbildung 4).

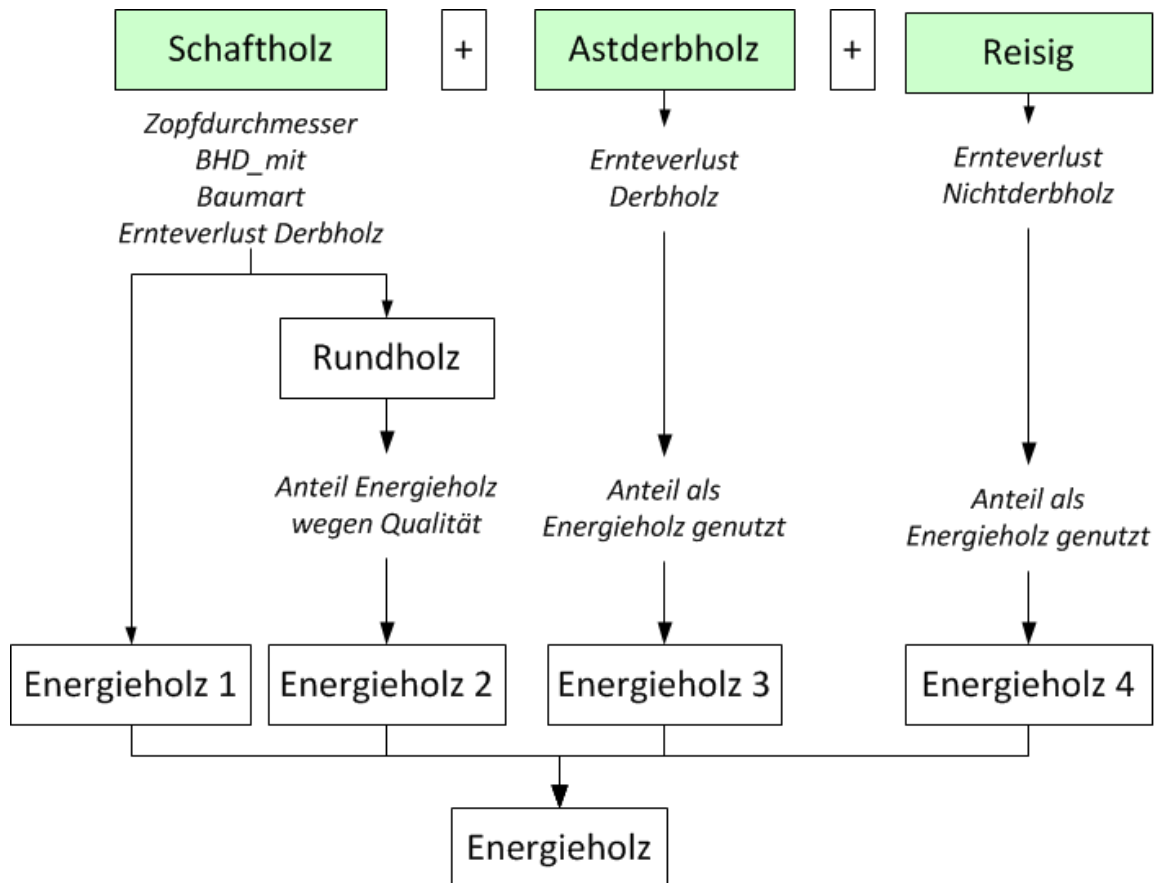


Abbildung 4: Einflussgrößen (kursiv) auf den Energieholzanfall in einem Holzschlag.

Die Berechnung des Schichtholzvolumens kann mit dem Modell „Berechnung Schichtvolumen eines Baumes“ erfolgen oder vorgegeben werden.

Für einen Nadelholz-Schlag gilt:

$$\begin{aligned} \text{Energieholz } 1_N &= \text{AnteilEnergieholz_vomSchaft}_N \times (VSH_N - VStock) \times (1 - EVDH_N) \\ \text{Energieholz } 2_N &= (1 - \text{AnteilEnergieholz_vomSchaft}_N) \times AE_N \times (VSH_N - VStock) \times (1 - EVDH_N) \\ \text{Energieholz } 3_N &= AAD_N \times VADH_N \times (1 - EVDH_N) \\ \text{Energieholz } 4_N &= AR_N \times VR_N \times (1 - EVNDH_N) \\ \text{Energieholz }_N &= \text{Energieholz } 1_N + \text{Energieholz } 2_N + \text{Energieholz } 3_N + \text{Energieholz } 4_N \quad \text{Formel 4} \end{aligned}$$

Für einen Laubholz-Schlag gilt:

$$\begin{aligned} \text{Energieholz } 1_L &= \text{AnteilEnergieholz_vomSchaft}_L \times (VSH_L - VStock) \times (1 - EVDH_L) \\ \text{Energieholz } 2_L &= (1 - \text{AnteilEnergieholz_vomSchaft}_L) \times AE_L \times (VSH_L - VStock) \times (1 - EVDH_L) \\ \text{Energieholz } 3_L &= AAD_L \times VADH_L \times (1 - EVDH_L) \\ \text{Energieholz } 4_L &= AR_L \times VR_L \times (1 - EVNDH_L) \\ \text{Energieholz }_L &= \text{Energieholz } 1_L + \text{Energieholz } 2_L + \text{Energieholz } 3_L + \text{Energieholz } 4_L \quad \text{Formel 5} \end{aligned}$$

L_{\square} : Laubholz

N_{\square} : Nadelholz

$\text{AnteilEnergieholz_vomSchaft}_{\square}$: Anteil Energieholz vom Schaft (vgl. Tab 6):

VSH_{\square} : Volumen Schaftholz o. R.

$VADH_{\square}$: Volumen Ast – Derbholz i. R.

VR_{\square} : Volumen Reisig i. R.

$VStock_{\square}$: Volumen Stock i.R. (Stockhöhe 30 cm, ca. 3% vom Schaftholz: SORSIM (Holm et al. 2012))

$EVDH_{\square}$: Ernteverlust beim Derbholz, s. Tab. 9:

$EVNDH_{\square}$: Ernteverlust beim NichtDerbholz, s. Tab. 9:

AE_{\square} : Anteil Rundholz ohne Stock, der wegen schlechter Qualität als Energieholz verwendet wird

AAD_{\square} : Anteil Astderbholz, der als Energieholz verwendet wird \square

AR_{\square} : Anteil Reisig, der als Energieholz verwendet wird \square

Unbekannte Grössen sind dabei:

- Schaftholzvolumen.
- AnteilEnergieholz_vom Schaft: Anteil an Energieholz am Schaft ohne Stock.
- AE: Anteil Rundholz ohne Stock, der wegen schlechter Qualität als Energieholz genutzt wird.
- AAD: Anteil Astderbholz, der als Energieholz genutzt wird. (Annahme Laubholz 100%, Nadelholz 0%).
- AR: Anteil an Reisig, der als Energieholz genutzt wird (Annahme Laubholz 0%, Nadelholz 100%).

Die Bestimmung dieser Grössen erfolgt durch:

- Berechnung des Schaftholzvolumens oder direktes Erfassen des Schaftholzvolumens als Eingangsgrösse.
- Die Berechnung des Volumenanteils Energieholz am Schaftholz ist abhängig von der Stelle am Baumschaft, bis zu welcher das Rundholz ausgehalten wird. Diese Stelle wird durch den Zopfdurchmesser, bis zu welchem man Rundholz aushalten will oder kann, bestimmt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 6 zusammengestellt und in der Abbildung 6 visualisiert. Der Anteil Rundholz ohne Stock AE, der z.B. wegen schlechter Qualität als Energieholz genutzt wird, ist eine Eingangsgrösse.
- Astderbholz (d.h. Holz das dicker als 7 cm i.R. ist) findet man mengenmässig fast nur beim Laubholz (Abb. 7, 8 und 9). Es wird angenommen, dass 100% davon energetisch oder stofflich genutzt werden. Der Anteil, der energetisch oder stofflich genutzt wird, ist eine Eingangsgrösse.
- Reisig (Holz dünner als 7 cm i.R.) von diesen Dimensionen findet man mengenmässig nur beim Nadelholz (Abb. 7, 8 und 9). Der Anteil des Reisigs, das energetisch oder stofflich genutzt wird, liegt zwischen 0 und 100%. Beim Wert 0% bleibt alles Reisig im Bestand, z.B. aus Gründen des Nährstoff-

entzuges. Beim Wert 100% wird alles Reisig als Energieholz genutzt. Der Anteil, der energetisch oder stofflich genutzt wird, ist eine Eingangsgrösse.

- Die Abzüge durch Ernteverluste sind in jedem Fall zu berücksichtigen. Defaultwerte sind in Tabelle 9 zu finden.

4.4.4.1 Berechnung des Volumens an Schaftholz

Die Berechnung der Schaftholztarife **von Einzelbäumen** erfolgt nach Formel 6 (Brassel et al. 2001, S. 166 ff).

$$V_K = e^{(b_{0k} + b_{1k} \times \ln(Bhd) + b_{2k} \times \ln^4(Bhd) + b_{3k} \times GWL + b_{4k} \times d_{dom} + b_{6k} \times H\ddot{u}M)} \quad \text{Formel 6}$$

Mit:

V_K : Schaftholzvolumen in m^3 in Rinde

k : Tarifnummer 201 – 205 für Nadelholz; 216 – 220 für Laubholz (Tab. 1)

$b_{0k} - b_{6k}$: Modellkoeffizienten (Tab. 4)

Bhd : Brusthöhendurchmesser in cm

GWL : Gesamtwuchsleistung in kg Trockensubstanz pro Hektar und Jahr (Tab. 3)

d_{dom} : mittlerer Bhd der hundert stärksten Bäume pro Hektar (Tab. 4 Ersatz durch Entw. stufe)

$H\ddot{u}M$: Höhe über Meer in m

b_{7k} : Angabe, ob der Baum zur Ober – oder Unterschicht gehört. Wird hier weggelassen .

Tabelle 3: Definition der Tarif Nummern (für die Auswahl der Koeffizienten in Tabelle 6).

Region	LBH Nr (Buche)	NDH Nr (Fichte)
Jura	216	201
Mittelland	217	202
Voralpen	218	203
Alpen	219	204
Alpen Südseite	220	205

Tabelle 4: Definition der Wuchsleistungen.

GWL [kg/ha und J]	Wert im Modell
gering (<1500)	1500
mässig (1500-3000)	2300
gut (3000-4500)	3700
sehr gut (> 4500)	5000

Tabelle 5: Definition der Entwicklungsstufen.

Entwicklungs-Stufe	Wert im Modell d_{dom} [cm]
Stangenholz 12 – 30cm	21
Baumholz I 31 – 40cm	35
Baumholz II 41 – 50cm	45
Baumholz III >50cm	55

Tabelle 6: Parameter zu den Tarifnummern 201-205 und 216-220.

Tarif-Nummern	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
201	-9.6939329	2.8757162	-0.00360841	2.38E-05	0.006454553	-0.35423996	-0.00019064	-0.29332692
202	-10.190717	3.01181565	-0.00436003	5.66E-05	0.005186263	0	-5.09E-05	-0.12489026
203	-10.40762	3.14895427	-0.00476514	3.67E-05	0.005617423	-0.29285027	-0.00020783	-0.34535746
204	-11.225599	3.43239299	-0.0058899	3.39E-05	0.005502126	-0.28350633	-0.00022606	-0.37261846
205	-11.024619	3.20871603	-0.0050543	1.15564E-04	0.003814261	-0.25367643	-4.37E-05	-0.36882915
216	-9.7605762	2.83855622	-0.00324786	4.15E-05	0.006981857	-0.19001432	-0.00015251	-0.39760821
217	-10.869359	3.20963764	-0.00453908	5.83E-05	0.00326154	-0.08886847	0	-0.4372086
218	-10.596355	3.11284073	-0.00462775	4.70E-05	0.008531597	-0.28987184	-0.00015084	-0.27801706
219	-11.036856	3.27767482	-0.00587506	3.35E-05	0.014177976	-0.12590653	-0.00039528	-0.51779497
220	-8.1151843	2.17166411	-0.00086928	0	0.007345411	-0.22094684	0	-0.17981836

Beispiele (Abb.5) von LFI Schaftholz-Tarifen für Laubholz (Buche) und Nadelholz (Fichte):

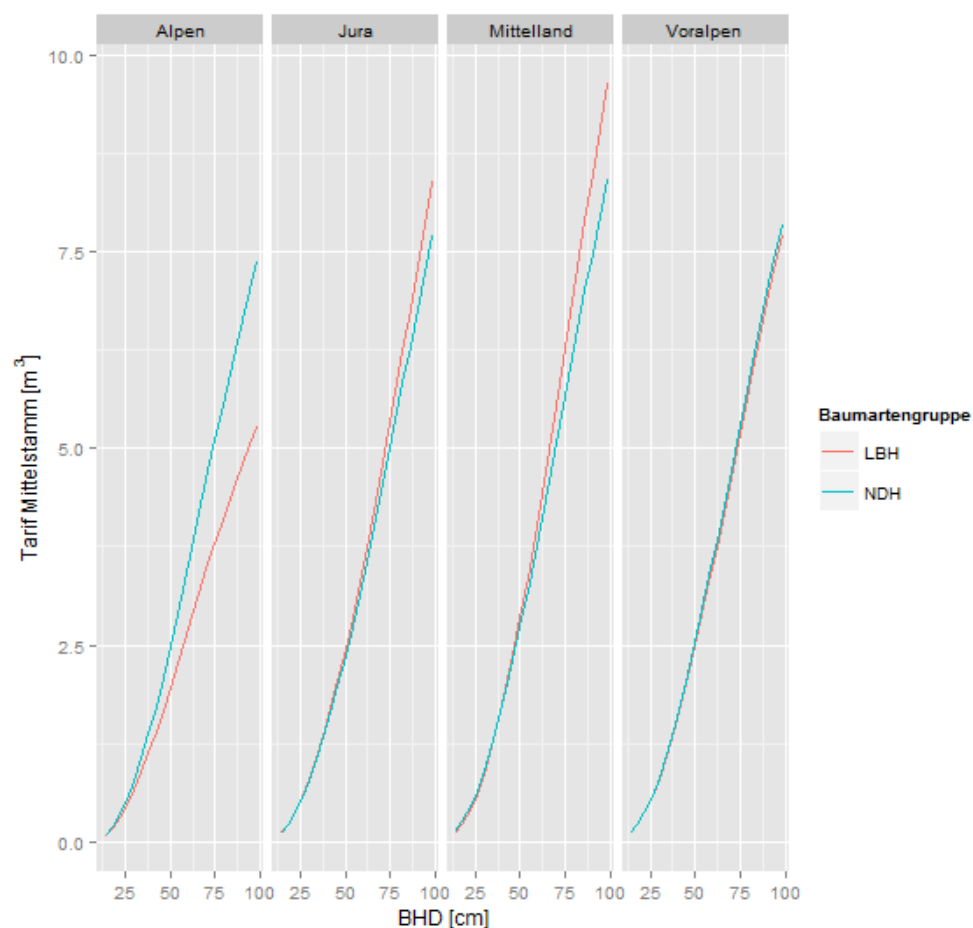


Abbildung 5: Schaftholz-Tarife für vier Produktionsregionen und zwei Baumartengruppen.

Um das Volumen des ausscheidenden Bestandes zu erhalten, wird das Volumen des Einzelbaumes (BHD_mit) mit der Anzahl Bäume multipliziert.

4.4.4.2 Berechnung Energieholzanteil am Rundholz bei unterschiedlichem Zopfdurchmesser und BHD

Die Berechnung des Anteils Energieholz am Schaft bei unterschiedlichem Zopf und BHD wurde mit dem Sortimentssimulator „Sorsim“ (Holm et al. 2012) durchgeführt. Dabei wurden jeweils theoretische Holzschläge Fichte und Buche sortimentiert.

Als Modellbestände wurden Bestände gewählt mit einem mittleren BHD von 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm und 55 cm. Für jeden dieser Bestände wurde für die Durchmesserverteilung der Bäume eine Weibullfunktion (Formel 7) erzeugt. Der Lageparameter a wurde auf 0 gesetzt, der Masstabparameter b auf den mittleren Brusthöhendurchmesser und der Formparameter c auf den Wert 5. Die Scheitelhöhe wurde pro Baum so gewählt, dass der Schlankheitsgrad 80 betrug. Aus den Simulationen mit dem Sortimentsimulator SorSim (Holm et al. 2012) konnte pro Bestand das Verhältnis von Energieholz in Rinde zu Schaftholz ohne Rinde für unterschiedliche Zopfdurchmesser berechnet werden. Die Berechnungen wurden für das Schaftholz ohne oberirdischen Stock (30 cm) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 für Fichte als Nadelholzvertreter und für Buche als Laubholzvertreter zusammengestellt.

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \quad \text{Formel 7}$$

Tabelle 7: Ergebnisse der Sortimentseinteilung mit „SorSim“ für unterschiedliche Zopfdurchmesser (Zopf) und mittlere Bruthöhendurchmesser (BHD_mit) eines Holzschlages.

BHD_mit	Zopf	Energieholzanteil AE vom Schaftholz	
		Fichte	Buche
15	0	0.000	0.000
15	7	0.056	0.056
15	10	0.235	0.247
15	15	0.611	0.572
15	20	1.000	1.000
25	0	0.000	0.000
25	7	0.019	0.011
25	10	0.038	0.045
25	15	0.148	0.127
25	20	0.383	0.399
25	25	0.720	0.694
25	30	0.967	0.913
25	35	1.000	1.000
35	0	0.000	0.000
35	7	0.009	0.006
35	10	0.015	0.014
35	15	0.061	0.053
35	20	0.137	0.162
35	25	0.314	0.284
35	30	0.613	0.519
35	35	0.854	0.780
35	40	0.979	0.928
35	45	1.000	0.987
35	50	1.000	1.000
45	0	0.000	0.000
45	7	0.004	0.005
45	10	0.007	0.007
45	15	0.032	0.027
45	20	0.072	0.075
45	25	0.161	0.143
45	30	0.332	0.270
45	35	0.564	0.447
45	40	0.803	0.645
45	45	0.935	0.821
45	50	0.985	0.945
45	55	1.000	0.982
45	60	1.000	1.000
55	0	0.000	0.000
55	7	0.002	0.003
55	10	0.004	0.004
55	15	0.019	0.015
55	20	0.041	0.038
55	25	0.086	0.077
55	30	0.173	0.140
55	35	0.299	0.229
55	40	0.502	0.363
55	45	0.742	0.505
55	50	0.894	0.673
55	55	0.932	0.806
55	60	0.989	0.915
55	65	1.000	0.983
55	70	1.000	1.000

Für das Modell werden die Zopfwerte 7, 10, 15, 20, usw. bis 70 cm verwendet. Für Bestände mit einem mittleren Brusthöhendurchmesser (BHD_mit) verschieden von den tabellierten Werten, können die Energieholzanteile interpoliert werden. Dass die Zopfwerte grösser als Bhd_mit sein können, hängt damit zusammen, dass es sich bei Bhd_mit um den Bestandesmittelwert handelt, bei dem die Bhd der Einzelbäume auch grösser als Bhd_mit sind. Abbildung 6 zeigt die tabellierten Werte.

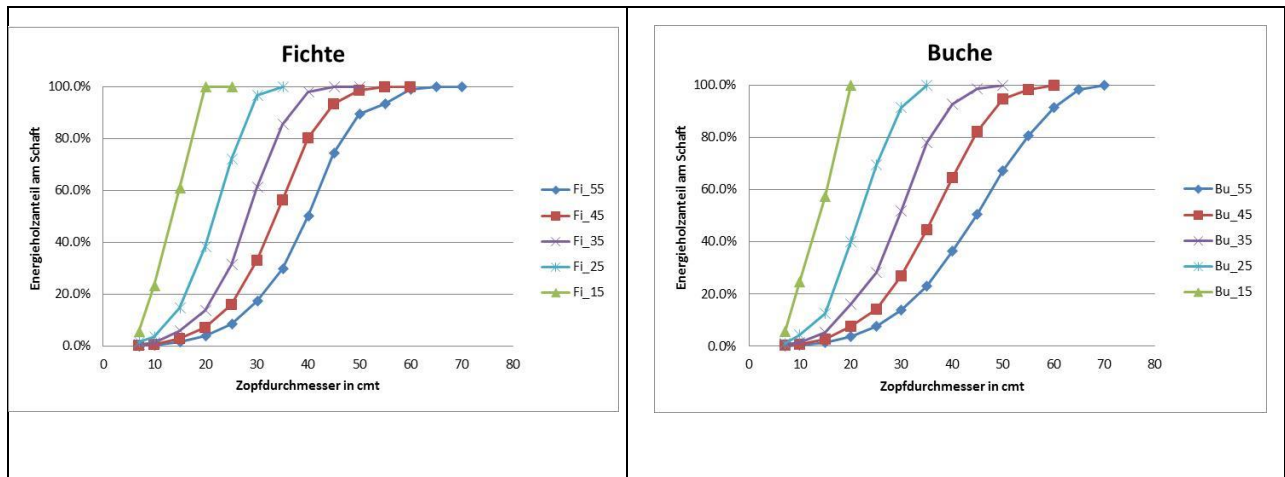


Abbildung 6: Anteil Energieholzvolumen eines Schaftes bei unterschiedlichem Brusthöhendurchmesser (BHD_mit) und Zopfdurchmesser, ab welchem Energieholz ausgehalten wird für die Baumarten Fichte (links) und Buche (rechts).

4.4.4.3 Berechnung des Volumens von Astderbholz beim Laubholz

Das Energieholz aus Astderbholz berechnet sich folgendermassen:

$$AAD \times VADH_{\square} \times (1 - EVDH_{\square})$$

$$p_i = \frac{VADH_L}{VSH_L} = \frac{\text{Exp}(\text{logit}(p_i))}{1 + \text{Exp}(\text{logit}(p_i))} \quad (\text{Brassel und Lischke 2001, S. 173})$$

$$\text{logit}(p_i) = b_0 + b_1 \times Bhd + b_2 \times h_2 + b_3 \times h_3 \quad \text{Formel 8}$$

$VADH_L$: Volumen Astderbholz beim Laubholz

VSH_L : Volumen Schaftholz i. R. Laubholz

$EVDH_L$: Ernteverlust Derbholz z.B. Tabelle 9

AAD : Anteil des Astderbholzes, der als Energieholz verwendet wird.

Die Koeffizienten sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Für Fichte gilt $p_i = 0$ d.h. Astderbholz Nadel ungefähr = 0

Tabelle 8: Astderbholz Koeffizienten.

Baumart/Region	Höhe ü.M. min.	Höhe ü.M. max.	b0	b1	b2	b3	h2	h3
LBH Jura	600	1250	-4.8322966	0.05631471	0	0	1	0
LBH Jura	>1250	3000	-4.8322966	0.05631471	0		0	1
LBH Jura	0	600	-4.8322966	0.05631471	0	0	0	0
LBH Mittelland	>600	1250	-5.9903924	0.10188909	0	0	1	0
LBH Mittelland	>1250	3000	-5.9903924	0.10188909	0	0	0	1
LBH Mittelland	0	600	-5.9903924	0.10188909	0	0	0	0
LBH Voralpen... AlpenS	>600	1250	-4.9853383	0.07394173	-0.7056977	0	0	1
LBH Voralpen... AlpenS	>1250	3000	-4.9853383	0.07394173	-0.7056977	0	1	0
LBH Voralpen... AlpenS	0	600	-4.9853383	0.07394173	-0.7056977	0	0	0
NDH Alpen	1000	1500	-8.733078	0.05920815	0	0	1	0
NDH Alpen	>1500	3000	-8.733078	0.05920815	0	0	0	1
NDH andere	600	1250	-8.733078	0.05920815	0	0	1	0
NDH andere	>1250	3000	-8.733078	0.05920815	0	0	0	1
NDH andere	0	600	-8.733078	0.05920815	0	0	0	0

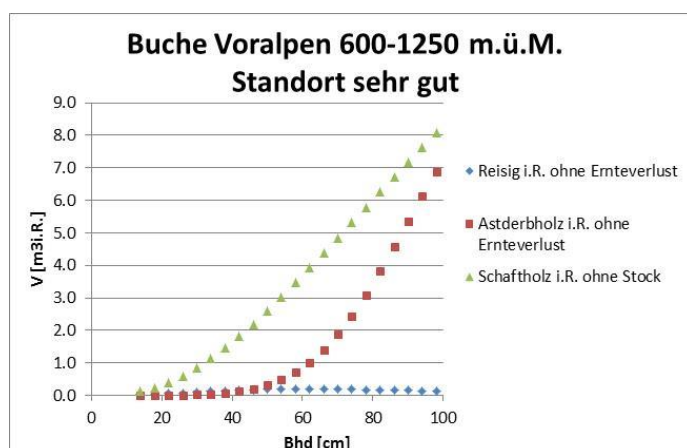


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Schaftholz i.R. ohne Stock und Astderbholz inkl. Reisig i.R. ohne Ernteverlust einer Buche in den Voralpen. Die Angaben beziehen sich auf einen Baum.

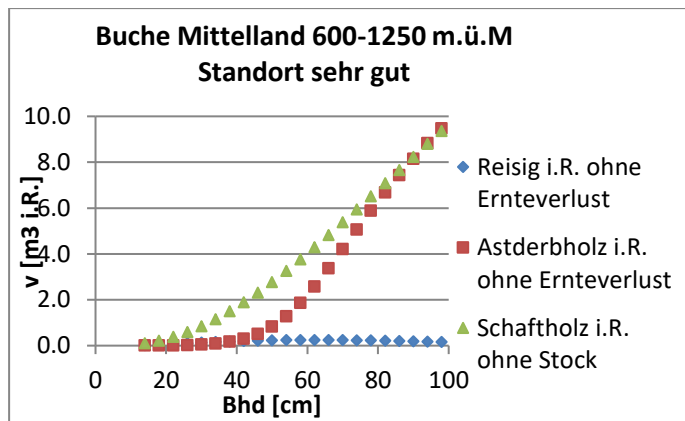


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Schaftholz i.R. ohne Stock, Astderbholz und Reisig jedoch ohne Ernteverlust: Das Beispiel zeigt eine Buche im Mittelland, die auf einem sehr guten Standort wächst. Die Angaben beziehen sich auf einen Baum.

4.4.4.4 Berechnung des Volumens an Reisig VR beim Nadelholz

Aus dem Schaftholzvolumen kann das Reisigvolumen berechnet werden (Quelle: Programmiercode vom LFI).

Der Beitrag des Reisigs zum Energieholz beträgt:

$$AR \times VR_N \times (1 - EVNDH_N)$$

$$p_i = \frac{VR_N}{VSH_N} = \frac{\text{Exp}(\text{logit}(p_i))}{1 + \text{Exp}(\text{logit}(p_i))}$$

$$\text{logit}(p_i) = b_0 + b_1 \times Bhd + b_2 \times h_2 + b_3 \times h_3 \quad \text{Formel 9}$$

VR_N : Volumen an Reisig beim Nadelholz

VSH_N : Volumen Schaftholz i. R. Nadelholz

$EVNDH_N$: Ernteverlust beim NichtDerbholz Tabelle 9

AR : Anteil des Reisig, der als Energieholz verwendet wird.

Die Koeffizienten sind in Tabelle 9 zusammengestellt

Tabelle 9: Koeffizienten für Reisig.

Baumart/Region	Höhe ü:M.min	Höhe ü:M.max	b0	b1	b2	b3	h2	h3
LBH Jura	601	1250	-0.84755833	-0.03342084			1	0
LBH Jura	>1250	3000	-0.84755833	-0.03342084			0	1
LBHMittelland	601	1250	-0.75961939	-0.03355523			1	0
LBH Voralpen Alpen	601	1250	-2.2772572	-0.03117276	1.21051434		1	0
LBH Voralpen Alpen	>1250	3000	-2.2772572	-0.03117276	1.21051434		0	1
LBH Voralpen Alpen	0	600	-2.2772572	-0.03117276	1.21051434		0	0
NDH Alpen	1000	1500	-1.20641326	-0.01918645	0	0.44296676	1	0
NDH Alpen	>1500	3000	-1.20641326	-0.01918645	0	0.44296676	0	1
NDH andere Regionen	601	1250	-1.20641326	-0.01918645	0	0.44296676	1	0
NDH andere Regionen	>1250	3000	-1.20641326	-0.01918645	0	0.44296676	0	1
NDH Andere	0	600	-1.20641326	-0.01918645	0	0.44296676	0	0

Abbildung 9 zeigt Schaftholz, Astderbholz und Reisig bei Fichte (Alpen) in Abhängigkeit vom BHD.

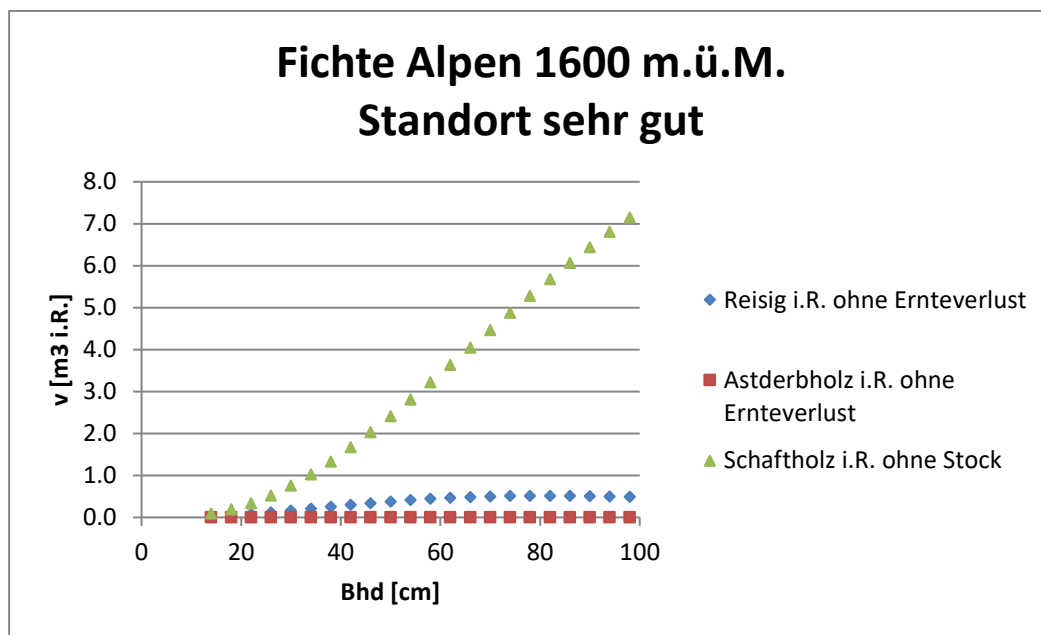


Abbildung 9: Schaftholz, Astderbholz und Reisig bei Fichten unterschiedlichen Brusthöhendurchmessers (Bhd) in den Alpen, jeweils ohne Ernteverlust.

4.4.4.5 Ernteverluste

Die Ernteverluste (Tabelle 10) beim Derbholz (EVDH) und beim NichtDerbholz (EVNDH) wurden aus einer Vielzahl von Studien gemittelt.

Tabelle 10: Ernteverluste in % aus verschiedenen Quellen gemittelt.

Baumart	Derbholz EVDH	NichtDerbholz EVNDH
Nadelholz	8%	58%
Laubholz	13%	50%

4.5 Zusatzmodell für das Rücken mit Forwarder mit Traktionshilfswinde

In Arbeitsgebieten mit erhöhter Neigung (> 30-35%) werden beim bodengestützten Verfahren vermehrt Traktionshilfswinden (THW) eingesetzt. Diese ermöglichen eine bodengestützte Erschliessung von Gebieten, die ohne die Unterstützung einer THW nicht befahrbar wären, reduzieren den Radschlupfs und verbessern bei korrekter Anwendung den Wirkungsgrad der Kraftübetragung des Forwarders. Letztere zwei können zu einer Einsparung von Treibstoff beim Rücken im Bestand führen.

Die Erhöhung der Produktivität eines Forwarders aufgrund des Einsatzes einer THW in stärker geneigtem Gelände (> 30-35%) konnte in unseren Untersuchungen sowie gemäss Literatur nicht bestätigt werden (Seiwald, 2021). Gemäss Umfragen bei Forstbetrieben reduziert sich vielmehr die Produktivität aufgrund der erschwerten Arbeitsbedingungen (Ladungsgrösse nimmt ab, Stämme müssen anders gegriffen werden) trotz des Einsatzes einer THW. Für die Installation und Deinstallation, den Rückegassenwechsel sowie das Anhängen an den bzw. Abhängen der THW von dem Forwarder entsteht ein zusätzlicher Mehraufwand, der im Modell als unterstützende Arbeitszeit (ISH) erfasst wird. Diese Aufwandszeiten der THW haben keinen direkten Einfluss auf die Produktivität des Forwarders, erhöhen aber den Zeitaufwand des Maschinisten und die Kosten.

Die Berechnung des Zeitaufwandes beim Einsatz einer THW erfolgt demnach durch:

1. Installation und Deinstallation am Arbeitsplatz (THW_Installation).
2. Überstellung vom einen zum nächsten Arbeitsort (Rückegassenwechsel) (THW_Winch).
3. An- und Abhängen des Seils am Forwarder vor der Einfahrt auf die Rückegasse bzw. Strasse (THW_attach).

Die gesamten Berechnungen sind abhängig von der Anzahl an Rückegassen (n), die mit THW gefahren werden.

Die Formel für den Einsatz einer Traktionshilfswinde (THW) lautet somit:

$$ISH_{THW} = 2 \times THW_{Winch_Installation} + (n - 1) \times THW_{Winch_RGW} + 6n \times THW_{attach_detach} \quad \text{Formel 10}$$

$THW_{Winch_Installation}$: De – und Installation der THW im Bestand

THW_{Winch_RGW} : Verschieben der THW von der einen Rückegasse zur anderen

THW_{attach_detach} : An – und Abhängen der THW beim Forwarder *

* Die Auswertung der Zeitstudien basiert auf durchschnittlich 6 An- und Abhängeprozesse pro Rückegasse, bis alle Stämme von einer Rückegasse auf die jeweiligen Polter gerückt sind. Dieser ist als Defaultwert vorgegeben. **Falls die THW zum Abladen beim Polter nicht abgehängt wird, bspw. im Falle eines Zwischenpolters beim Gasseneingang, kann die Anzahl der An- und Abhängezyklen pro Rückegassen im Modell manuell angepasst werden.**

Die in den Zeitstudien erhobenen Zeiten zu den in der Formel beschriebenen Prozesse sind in Tabelle 11 vermerkt. Es handelt sich dabei um Durchschnittszeiten von Forwardern und Harvestern je Prozess.

Tabelle 11: Erhobene durchschnittliche Aufwandszeiten je Prozess.

Prozess	Anzahl erhobene Zyklen	Durchschnittsaufwandszeit	
		Sekunden	Uhrzeit
$THW_{Winch_Installation}$	59	1382	00:23:02
THW_{Winch_RGW}			
THW_{attach_detach}	206	73	00:01:13

Die Installation der THW bei der ersten Rückegasse und die Deinstallation nach der letzten Rückegasse wurde während der Datenerfassung mittels Zeitstudie nicht vom Prozess des Rückegassenwechsel der THW unterschieden. Gemäss den Erfahrungen kann angenommen werden, dass sich der Aufwand für die De- und Installation mit dem für einen Rückegassenwechsel deckt. Daher wurden im Modell für beide Prozesse der gleiche Zeitaufwand verwendet.

Der Anfangs- und Endzeitpunkt der einzelnen Prozesse ist in Tabelle 12 abgebildet.

Tabelle 12: Definition der einzelnen Prozesse beim Einsatz einer THW.

Prozess	Anfangszeitpunkt	Endzeitpunkt
THW _{Winch_Installation}	Die THW verlässt den Ausgangspunkt/Lagerplatz im Bestand.	Die THW ist bei der ersten Rückegasse fertig installiert.
THW _{Winch_RGW}	MaschinenführerIn steigt aus dem Forwarder aus. <i>Zu den Arbeiten gehören Abhängen des Seils am Forwarder, Verschieben der THW zur nächsten Rückegasse.</i>	MaschinenführerIn steigt in den Forwarder ein, um mit diesem ebenfalls den Rückegassenwechsel vorzunehmen. <i>Die Überführung des Forwardes sowie das darauffolgende Anhängen zählen nicht mehr zum Rückegassenwechsel der THW.</i>
THW _{attach_detach}	MaschinenführerIn steigt aus dem Forwarder aus, um das Seil der THW an der Maschine an- oder abzuhängen.	MaschinenführerIn steigt in den Forwarder ein.

5 Zeitsystem und Umrechnungen im Produktivitätsmodell "Forwarder"

5.1 Zeitsystem

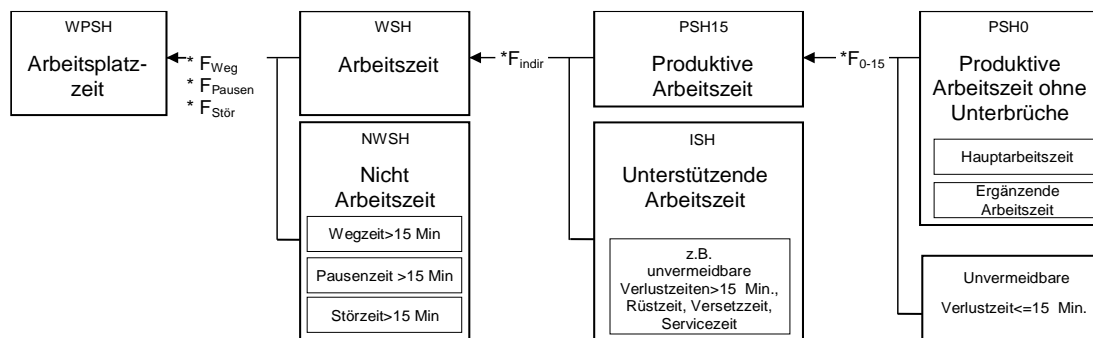


Abbildung 10: Verwendetes Zeitsystem (Björheden und Thompson 1995, Heinimann 1997; verändert).

Die in Abbildung 10 aufgeführten Zeiten können grundsätzlich für das Produktionssystem als Ganzes sowie für die Produktionsfaktoren Maschinen und 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 13).

Tabelle 13: 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 ₁₅ =MAS
Personal (...personal hour)	WPPH	NWPH	WPH	IPH	PPH

5.3 Berechnung der System- und Faktorzeiten pro m³

Maschinen:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Volumen ohne Rinde in m}^3}{PMH_{15}}$$

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

Personal:

$$WPPH = (PMH_{15} + ISH_{THW}) \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör}$$

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

F_{indir} = frei wählbar; im Modell 1.1 als Default gesetzt

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

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

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

6 Berechnung von Zeitbedarf und Kosten

6.1 Zeitbedarf der Produktionsfaktoren pro m³

Tabelle 14: Formeln zur Berechnung des Zeitbedarfs der Produktionsfaktoren pro m³.

Input		Formel	Output	
Produktivität	$\left[\frac{m3}{PMH_{15}}\right]$	$PMH_{15} = 1/Produktivität$	PMH_{15}	$\left[\frac{PMH_{15}}{m3}\right]$
		$WPPH = (PMH_{15} + ISH_{THW}) \times F_{indir} \times F_{Weg} \times F_{Pausen} \times F_{Stör}$	$WPPH$	$\left[\frac{PMH_{15}}{m3}\right]$
		Faktoren:		
F_{indir}	$[-]$	$F_{indir} = \text{frei wählbar; im Modell 1.1 als Default gesetzt}$		
F_{Weg}	$[-]$	$F_{Weg} \times F_{Pausen} = \text{ist frei wählbar,}$ $\text{im Modell } \frac{540 \text{ Min}}{(540-60)Min} = 1.125 \text{ als Default eingesetzt}$		
F_{Pausen}	$[-]$			
$F_{Stör}$	$[-]$	$F_{Stör} = \text{frei wählbar; im Modell 1.0 als Default eingesetzt}$		

6.2 Kosten der Produktionsfaktoren pro m³

$\begin{aligned} \text{Kosten Stammholz} &= (1/\text{Prod}_{\text{Stammholz}} \times F_{\text{indir}} \times F_{\text{Weg}} \times F_{\text{pausen}} \times F_{\text{Stör}} \times \text{Kostenansatz Maschinist}) \\ &+ (\frac{1}{\text{Prod}_{\text{Stammholz}}} \times \text{Kostenansatz Forwarder}) + (\text{ISH}_{\text{THW}} \times \text{Kostensatz THW}) \end{aligned}$	
$\begin{aligned} \text{Kosten Energieholz} &= (1/\text{Prod}_{\text{Energieholz}} \times F_{\text{indir}} \times F_{\text{Weg}} \times F_{\text{pausen}} \times F_{\text{Stör}} \times \\ &\text{Kostenansatz Maschinist}) + (\frac{1}{\text{Prod}_{\text{Energieholz}}} \times \text{Kostenansatz Forwarder}) + (\text{ISH}_{\text{THW}} \times \\ &\text{Kostensatz THW}) \end{aligned}$	
Legende: Kosten Rundholz pro m ³ o.R.: Gesamtkosten Rundholzholzlücken (Forwarder, THW und Maschinist) pro m ³ o.R. Kosten Energieholz pro m ³ i.R.: Gesamtkosten Energieholzholzlücken (Forwarder, THW und Maschinist) pro m ³ i.R.	
WPSH:	Arbeitsplatzzeit des Forwarders und Fahrers
Kostenansatz Maschinist:	Kostenansatz Maschinist [CHF/WPPH]
Kostenansatz Forwarder:	Kostenansatz Forwarder [CHF/PMH ₁₅]
Kostensatz Traktionshilfswinde:	Kostensatz THW [CHF/ISH]
$\text{Prod}_{\text{Rundholz}}$	Produktive Forwarderarbeitszeit beim Rücken von Rundholz mit Unterbrechungen <15 Min.
$\text{Prod}_{\text{Energieholz}}$	Produktive Forwarderarbeitszeit beim Rücken von Energieholz mit Unterbrechungen <15 Min.
ISH_{THW}	Unterstützende Arbeitszeit beim Einsatz einer Traktionshilfswinde
Kostensatz THW (2024) = CHF 50/ISH	

6.3 Berechnungsbeispiele

6.3.1 Beispiel Fichte: Rücken von Rund- und Energieholz mit Forwarder mit THW

Gesucht: Produktivität und Kosten des Rückens von Rund- und Energieholz mit Forwarder.

Tabelle 15: Berechnungsbeispiel des Rückens von Rund- und Energieholz mit Forwarder für einen Fichtenholzschlag.

Gegeben:		Einheit	Berechnungsgang
Zopfdurchmesser	35	cm	
BHD_mit	55	cm	
Schaftholzmenge inkl Energieholzanteil m3 i.R. ohne Ernteverlust	240	m3 i.R.	
Rückedistanz 300 m; Anzahl Sortimente 5; Hangneigung 30%; Besondere Erschwernisse keine, Rückegassenabstand 30 m, Forwardertyp mittel			Dient zur Berechnung der Produktivität Stammholz
Anzahl Rückegassen mit THW	10	n	Dient zur Berechnung des Zeitaufwandes THW
Ernteverlust Nadelholz: Derbholz	0.08		
Ernteverlust Nadelholz: NichtDerbholz	0.58		
Energieholzanfall pro ha:	70	m3 i.R.	Default
Kostenansatz Forwarder mit Fahrer ohne Wegzeiten und Pausen	190	CHF/MAS	
berechnet:			
RGesamt	0.825		F2
KFstammholz-Energieholz	0.76		F3
Produktivität Stammholz	17.48	m3 o.R./MAS	F1
Produktivität Energieholz	22.96	m3 i.R./MAS	F1/F3
Zeitaufwand Traktionshilfswinde			
Verhältnis Energieholz zu Schaftholz	0.086		Aus Tabelle 2 Energieholzanteil am Schaftholz
Verhältnis Astderbholz zu Schaftholz	0.00		Aus Verhältnis Astderbholz zu Schaftholz (F8): Beim Nadelholz ca. 0
Verhältnis Reisig zu Schaftholz	0.15		Aus Verhältnis Reisig zu Schaftholz (Formel 9).
Energieholzvolumen aus Schaft	20.64	m3 i.R.	Schaftholzmenge m3 i.R. ohne EV*Verhältnis Energieholz zu Schaftholz
Energieholzvolumen aus Astderbholz	0.00	m3 i.R.	Schaftholzvolumen i.R.*Verhältnis Astderbholz zu Stammholz
Energieholzvolumen aus Reisig	37.09	m3 i.R.	Schaftholzvolumen i.R.*Verhältnis Reisig zu Stammholz
Schaftholzvolumen i.R.	219.36	m3 i.R.	Schaftholzmenge m3 i.R. ohne EV - Energieholzvolumen aus Schaft
Geerntetes Schaftholzvolumen i.R.	201.81	m3 i.R.	Schaftholzvolumen i.R.*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Schaft	18.99	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Schaft*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Astderbholz	0.00	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Astderbholz*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Reisig	15.58	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Reisig*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Gesamtes Energieholzvolumen	35	m3 i.R.	Summe der Energieholzvolumina
Geerntetes Holzvolumen insgesamt	236	m3 i.R.	Gesamtes Energieholzvolumen+geerntetes Schaftholzvolumen i.R.
Zeitaufwand Rücken mit Forwarder Stammholz	11.5	Stunden	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren für Rücken von Stammholz
Zeitaufwand Rücken mit Forwarder Energieholz	1.5	Stunden	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren für Rücken von Energieholz
Zeitaufwand Traktionshilfswinde (THW)	5.4	Stunden	F10
Kosten Rücken mit Forwarder Stammholz	2193	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Stammholz
Kosten Rücken mit Forwarder + THW Stammholz	2432	CHF	Kosten für Prod.fakt. für Rücken mit Stammholz + THW
Kosten Rücken mit Forwarder Energieholz	286	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Energieholz
Kosten Rücken mit Forwarder + THW Energieholz	317	CHF	Kosten für Prod.fakt. für Rücken Energieholz + THW

Kosten Traktionshilfswinde	50	CHF/ISH	
-----------------------------------	----	---------	--

Kosten Rücken mit Forwarder Stammholz pro m3 o.R.	10.87	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Stammholz pro m3 o.R.
+ THW	12.05	CHF	Kosten für Produktionsfaktoren für Rücken Stammholz + THW pro m3 o.R.
Kosten Rücken mit Forwarder Energieholz pro m3 i.R.	8.28	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Energieholz pro m3 i.R.
+ THW	9.06	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Energieholz + THW pro m3 i.R.

6.3.2 Beispiel Buche: Rücken von Rund- und Energieholz mit Forwarder ohne THW

Gesucht: Produktivität und Kosten des Rückens von Rund- und Energieholz mit Forwarder.

Tabelle 16: Berechnungsbeispiel des Rückens von Rund- und Energieholz mit Forwarder für einen Buchenholzschlag.

Gegeben:		Einheit	Berechnungsgang
Zopfdurchmesser	15	cm	
BHD_mit	35	cm	
Schaftholztauglicher Anteil bis zum Zopfdurchmesser	100	%	
Schaftholzvolumen i.R. ohne Ernteverlust	240	m3 i.R.	
Rückedistanz 300 m; Anzahl Sortimente 5; Hangneigung 30%; Besondere Erschwernisse keine, Rückegassenabstand 30 m, Forwardertyp mittel; 50% vom Schaftholz Energieholz			Dient zur Berechnung der Produktivität Stammholz
Ernteverlust Laubholz:Derbholz	0.13		
Energieholzanfall pro ha: 70 m3	70		Default
Kostenansatz Forwarder	120	CHF/MAS	
Kostenansatz Fahrer	70		
Rindenfaktor (1-Rindenabzug)	0.89		
berechnet:			
RGesamt	0.825		F2
KFStammholz-Energieholz	1.25		F3
ProdStammholz	12.37	m3 o.R./MAS	F1
ProdEnergieholz	9.87	m3 i.R./MAS	F1/F3
Verhältnis Energieholz zu Schaftholz	0.05		Aus Tabelle 2 Energieholzanteil am Schaftholz
Verhältnis Astderbholz zu Schaftholz	0.08		Aus Verhältnis Astderbholz zu Schaftholz (F8)
Verhältnis Reisig zu Schaftholz	0.00		Aus Verhältnis Reisig zu Schaftholz (Formel 9). Beim Laubholz ca. 0
Energieholzvolumen aus Schaft	12.72	m3 i.R.	Schaftholzmenge m3 i.R. ohne Ernteverlust*Energieholzanteil am Schaftholz
Energieholzvolumen aus Astderbholz	19.51	m3 i.R.	Schaftholzvolumen i.R.*Verhältnis Astderbholz zu Stammholz
Energieholzvolumen aus Reisig	0.00	m3 i.R.	Schaftholzvolumen i.R.*Verhältnis Reisig zu Stammholz
Schaftholzvolumen i.R.	227.28	m3 o.R.	Schaftholzmenge m3 i.R. ohne EV - Energieholzvolumen aus Schaft
Schaftholzvolumen o.R.	202.28	m3 i.R.	
Geerntetes Schaftholzvolumen o.R.	202.28	m3 o.R.	Schaftholzvolumen o.R.*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Schaft	11.07	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Schaft*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Astderbholz	19.38	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Astderbholz*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Geerntetes Energieholzvolumen aus Reisig	0.00	m3 i.R.	Energieholzvolumen aus Reisig*(1-EV). Ernteverlust (EV) Tab. 9
Gesamtes Energieholzvolumen	30.45	m3 i.R.	Summe der Energieholzvolumina
Geerntetes Holzvolumen insgesamt	233	m3 i.R.o.R.	Gesamtes Energieholzvolumen+geerntetes Schaftholzvolumen (i.R. o.R.)
Zeitaufwand Forwarder Stammholz	16.4	Stunden	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren für Rücken von Stammholz
Zeitaufwand Maschinist Stammholz	20.2	Stunden	
Zeitaufwand Forwarder Energieholz	3.09	Stunden	Zeitbedarf der Produktionsfaktoren für Rücken von Energieholz
Zeitaufwand Maschinist Energieholz	3.82	Stunden	
Kosten Rücken mit Forwarder Stammholz	3108	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Stammholz
Kosten Rücken mit Forwarder Energieholz	638	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Energieholz
Kosten Rücken mit Forwarder Stammholz pro m3 o.R.	15.36	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Stammholz pro m3 o.R.
Kosten Rücken mit Forwarder Energieholz pro m3 i.R.	20.94	CHF	Kosten der Produktionsfaktoren für Rücken Energieholz pro m3 i.R.

7 Abkürzungen und Definitionen

Tabelle 17: Abkürzungen und Definitionen für das Modell "Forwarder".

Abkürzung	Definition	Default-wert	Def. bereich	Einheit
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.	1.1 1.125 1.0	 ≥ 1.0 ≥ 1.0	 [-] [-]
PMH_{15}	Produktive Maschinenzeit inkl. Unterbrüche < 15 Min. pro m ³			$\left[\frac{PMH_{15}}{m^3} \right]$
ISH	Unterstützende Arbeitszeit			
WSH	Arbeitszeit = $(PMH_{15} + ISH_{THW}) \times F_{indir}$ $F_{indir} = 1.1$			
Produktivität	Gerücktes Holzvolumen in m ³ pro Maschinenarbeitsstunde			$\left[\frac{m^3}{PMH_{15}} \right]$
WPPH	Arbeitsplatzzeit des Personals (Maschinist)		≥ 0	$\left[\frac{PMH_{15}}{Srm} \right]$
WPSH	Arbeitsplatzzeit des Systems (Forwarder, THW + Maschinist)		≥ 0	$\left[\frac{PMH_{15}}{m^3} \right]$

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. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Brsg., 199 S.

Holm S., Lemm R., Erni V. 2012: Handbuch Sortimentsimulator «SorSim» Version 2.0.

Lemm R., Frutig F., Pedolin D., Thees O. 2016: HeProMo „Biomasseschätzer“ -Modell zur Berechnung der Biomasse von Waldbäumen, Teil A: Grundlagen (Internes Dokument).

Seiwald, M. 2021: Produktivitätsanalyse bei der Forwarder-Rückung am Steilhang mit T-WINCH 10.2 Unterstützung [Masterarbeit, Universität für Bodenkultur (BOKU)].

Thüringen Forst 2010: Kalkulationsgrundlage für die Rückung mit Forwarder. Kompendium zur Waldarbeit, Teil 15: Kalkulationsgrundlagen Rückung und maschinelle Holzernte. Internes Dokument, erste Herausgabe 2002.