

# Wertschöpfungskette Waldhackgut – Optimierung von Ernte, Transport und Logistik

Martin Kühmaier<sup>1\*</sup>, Christian Kanzian, Franz Holzleitner, Christian Rottensteiner,  
Günter Affenzeller, Karl Stampfer

## Zusammenfassung

Für eine effiziente Energieholzbereitstellung und eine kostendeckende Versorgung der Biomassewerke sind geeignete Systeme für die Prozesse Ernte, Transport, Hacken und Lagerung des Holzes auszuwählen und zu koordinieren. Wichtige Kriterien für die Auswahl der Maschinen sind die Bestandes- und Standortverhältnisse, die anfallenden Mengen und deren Anordnung (Überstellzeiten) sowie die Transportdistanz zum Werk. Nur eine ganzheitliche Betrachtung der Bereitstellungskette ermöglicht eine optimale Abstimmung der einzelnen Prozesse.

Für die Planung des jahreszeitlichen Ablaufes der Prozesse sind der Bedarf der Werke, der Trocknungsverlauf von Energieholz, die Verfügbarkeit der Biomasse und vorhandene Maschinenkapazitäten entscheidend. Die Entscheidung, ob für die Lagerung ein zentraler Platz (Terminal) eingerichtet werden soll und dessen Ausstattung sind ebenfalls vom Bedarf und Angebot von Energieholz in der Region und der Notwendigkeit der Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Versorgung abhängig. Für die Planung von zentralen Terminals empfiehlt sich auf alle Fälle der Einsatz eines Optimierungsmodells.

*Schlagwörter:* Energieholz, Logistik, Bereitstellungskette, Versorgungsnetzwerk, Lagerung

## Summary

For an efficient and cost-covering energy supply of biomass plants adequate systems for harvesting, transport, chipping and storage should be chosen and coordinated. Important criteria for the selection of systems and equipment are stand and terrain conditions, harvesting volume and their spatial arrangement, and transport distance to the plant. Only a holistic examination of supply chains allows an optimal adjustment of the different processes.

For the adjustment of the seasonal schedule of the various tasks the knowledge of the demand of the plants, the drying process, the supply of biomass and available equipment capacities is necessary. The decision whether a terminal should be established or not, depends also on the supply and demand of energy wood in the region and on the need if the supply has to be kept up during the whole year. For decision support in energy wood logistics the insertion of an optimization model has been evaluated as very helpful.

*Keywords:* energy wood, logistics, supply chain, supply network, storage

## 1 Einleitung

Biomassewerke haben einen ständigen Bedarf an Energieholz. Da die Kapazitäten an den Werken meist gering und die Lagerkosten relativ hoch sind, ist eine kontinuierliche Anlieferung von Brennmaterial notwendig. Besonders im Winter, wenn der Bedarf für die Wärme- und Stromerzeugung am höchsten ist, können die vorhandenen Energieholzreserven aufgrund der Wintersperre nur zum Teil genutzt werden. Das Zusammentreffen der Bedarfsspitzen und der Angebotsknappheit erfordert Strategien, welche eine Unterversorgung der Werke verhindert. Eine dieser Strategien könnte die Errichtung und der Betrieb von Energieholzlagerplätzen (Terminals) sein.

Die Ausstattung der Terminals ist den Anforderungen der Energieholzlogistik anzupassen. Das Holz wird auf den Terminals gelagert und somit die Qualität (Wassergehalt) verbessert, zerkleinert (hacken) und Vermarktungsprozesse

durchgeführt werden. Der Standort, die Ausstattung, die Umschlagmenge, die Lagerdauer und die durchgeführten Prozesse hängen jedoch von den Umfeldbedingungen, der regionalen Versorgungsstruktur und alternativen Bereitstellungsmöglichkeiten ab. Die positiven Effekte der vorhandenen Sicherheitsbestände, der Durchführung und Überwachung der Trocknung und der höheren Produktivitäten (beim Hacken) stehen jedoch erhöhte Transportdistanzen gegenüber dem direkten Transport und zusätzliche Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Lagerplätze. Entscheidungen für die Errichtung eines Terminals sind somit sehr komplex und benötigen eine Entscheidungsunterstützung, welche im Rahmen der Entwicklung eines Optimierungsmodells umgesetzt wurde.

Die wichtigsten Prozesse in der Bereitstellungskette umfassen die Ernte, Lagerung, Hacken und Transport. Zu Beginn des „Biomasse-Booms“ war die Ernte des Energieholzes meist nur ein Nebenprodukt zur konventionellen Holzern-

<sup>1</sup> Institut für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter Jordan Straße 82/3, A-1190 WIEN

\* Kontakt: Dipl.Ing. Martin KÜHMAIER, e-mail: martin.kuehmaier(at)boku.ac.at

te. So wurde zum Beispiel der Schlagabraum bei der Ernte im Baumverfahren zusätzlich für die Energiegewinnung verwertet. In den letzten Jahren wurden jedoch einige Systeme entwickelt und erprobt, welche nur auf die Erzeugung von Energieholz fokussieren. Drei ausgewählte Verfahren werden in diesem Beitrag näher vorgestellt.

Ein wichtiges Kriterium zur Systematisierung von Bereitstellungs-ketten ist die Wahl des Lager-, bzw. Hackortes und des Materials (Abbildung 1). Die Effizienz des Hackens wird in erster Linie vom Material und von der Konzentration des Energieholzes ab. Eine häufige Überstellung der Maschinen vermindert die Produktivität. Durch das Hacken erfolgt eine Veränderung des Zustandes des Materials, was wiederum Auswirkungen auf die Produktivität des Transportfahrzeuges hat. Bei sperrigem Material kann in der Regel weniger aufgeladen werden, was eine höhere Anzahl an Transportbewegungen verursacht.

Die Aufgabe der Logistik ist es, die einzelnen Prozesse aufeinander abzustimmen und die regionale Versorgung zu (kosten)optimalen Bedingungen zu gewährleisten. Ziel dieses Beitrags ist es, die wichtigsten Prozesse vorzustellen und Möglichkeiten zur Optimierung aufzuzeigen.

## 2 Material und Methodik

Für die untersuchten Erntesysteme werden die einzelnen Prozessabläufe identifiziert und mögliche Einflussfaktoren (Baumvolumen, Baumart, Bestandesdichte, Neigung, usw.) auf die Effizienz des Systems ausgeschieden. Zur Ermittlung der Interaktion der Faktoren und für die Generierung von Produktivitätsmodellen werden Datenerhebungen in Form von Zeitstudien durchgeführt. Die anschließende statistische Auswertung leitet aus den Variablen und Einflussparametern lineare Modelle her.

Für die Lagerung des Energieholzes wurden mögliche Prozesse und Maschinen identifiziert und daraus unterschiedliche Ausstattungsvarianten hergeleitet. Die untersuchten Lagerplätze umfassen einfache geschotterte Plätze bis hin zu Terminals mit überdachter Lagerung auf befestigter Fläche und Maschinen/Geräte für den innerbetrieblichen Transport und Qualitätsbestimmung. Für alle Varianten wurden die möglichen Nutzeneffekte den anfallenden Kosten gegenübergestellt.

Für eine Beurteilung der Effizienz des Zerkleinerungsprozesses (Hacken) wurden wie bei der Analyse der Ernte Zeitstudien und anschließende statistische Auswertungen durchgeführt. Es wurde versucht Zusammenhänge zwischen der Produktivität von Hackeinsätzen in Abhängigkeit von Material und Einsatzort zu generieren.

Für den Transport von Energieholz wurden mögliche Transportsysteme identifiziert (GANZ et al. 2005). Die Einsetzbarkeit variiert je nach Verkehrsträger, Material und Transportdistanz. Für die Berechnung der Transportkosten werden Netzwerkanalysen durchgeführt, welche

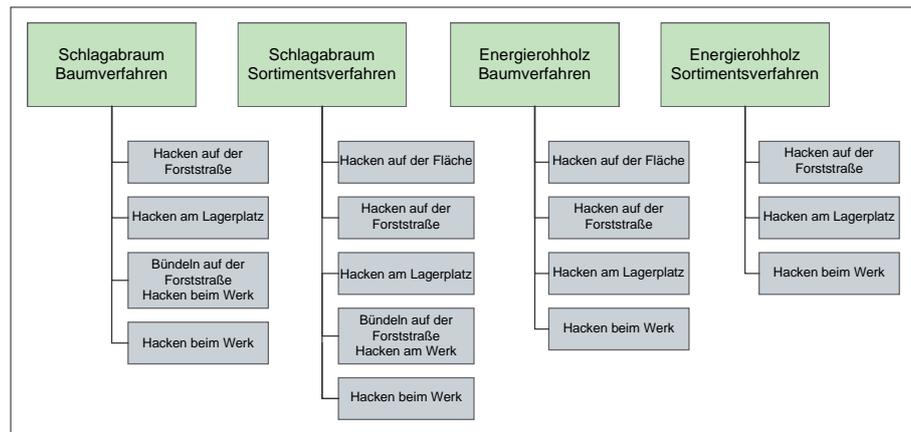


Abbildung 1: Systematisierung der Waldhackgutbereitstellungssysteme nach Ausgangsmaterial und Ort des Hackens

mit Hilfe von GPS die Geschwindigkeiten für definierte Straßenkategorien ermittelt. Neben der Distanz sind die Ladedichten und -kapazitäten ein wichtiges Unterscheidungskriterium.

Für die Optimierung des Transports, der Zerkleinerung und der Trocknung von Energieholz werden die optimalen Orte und Ausstattung der Lagerplätze bestimmt. Dafür wurde im ersten Schritt eine Standortanalyse für die Auswahl von potenziellen Lagerstandorten und anschließend auf Basis dieser Logistikknoten die bestgeeigneten Orte und Kategorien von Terminals ausgewählt. Die Optimierung erfolgt auf der Basis von GIS und einer Optimierungssoftware. Das ganzzahlige, lineare Optimierungsmodell berechnet die kostenoptimalen Materialflüsse und entscheidet, welche Terminals eröffnet werden, von welchen Waldflächen sie beliefert werden und zu welchen Werken sie liefern sollen. Das Modell entscheidet auch, welche Mengen direkt vom Wald zum Werk und welcher Anteil über Terminals geliefert werden soll.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Ernte von Energieholz

#### 3.1.1 Energieholzbereitstellung mit Fallbeilklingenaggregat Naarva Grip

Quelle: AFFENZELLER & STAMPFER (2007)

Bei unterbrochener Arbeitskette werden in einem ersten Arbeitsgang alle Bäume in der Rückegasse, sowie links und rechts davon, mittels Negativauslese ausgewählt, gefällt und vorkonzentriert abgelegt. In einem zweiten Arbeitsgang wird das Material mit Traktor und Krananhänger zum Lagerplatz an der Forststraße gerückt. Die Anschaffungskosten für Traktor und Krananhänger, die als Basis für die Maschinenkostenberechnung herangezogen werden, stammen von PRÖLL et al., (2005). Die Anschaffungskosten für das Fallbeilaggregat stammen von BILEK (2006). Für die Kombination Traktor, Krananhänger mit Fallbeilklinge ergeben sich inklusive Lohn Kosten von 64,4 €/pro Produktiver Systemstunde (PSH15). Bei einer durchschnittlich erreichten Produktivität von 3,99 SRM/PSH15 entstehen ohne Hacken und Transport Kosten von 16,1 €/SRM (Tabelle 1).

### 3.1.2 Energieholzbereitstellung mit Forwarder und Fäller-Sammler Moipu 400E

Quelle: AFFENZELLER & STAMPFER (2008)

Als Basismaschine dient ein Forwarder der Type Timberjack 1110 D mit einer Motorleistung von 126 kW sowie einer Ladekapazität von 12 t. Anstelle einer Greifzange arbeitet am Timberjack CF5 Kran das Aggregat Moipu 400E. Die Rückegasse wird mit dem Rungenkorb voraus befahren, die Bäume werden gefällt und seitlich vorkonzentriert in Bündeln abgelegt (1). Der Bestand links und rechts der Gasse bleibt zunächst unberührt. Nachdem die Bäume der gesamten Gasse gefällt wurden, wird das angefallene „Trassenholz“ am Ende der Trasse beginnend geladen und zur Forststraße gerückt (2). Im Anschluss wird der restliche Bestand durchforstet, wobei wiederum am Ende der Gasse begonnen wird (3). Die gefällten Bäume werden im Aggregat fallweise akkumuliert und anschließend direkt in den Rungenkorb geladen. Bei voller Fuhre wird wiederum gerückt.

Die Anschaffungskosten für die Maschine belaufen sich laut Unternehmer auf insgesamt €260.750.-, wobei davon knapp €34.000.- auf das Aggregat entfallen. Pro Jahr ist die Maschine 1500 Stunden im Einsatz. In Summe ergeben sich Maschinenkosten von 66,6 Euro pro Maschinenarbeitsstunde (PMH15). Inklusiv Lohnkosten belaufen sich die Systemkosten auf 89,5 €/PSH15. Die erzielte Produktivität von 3,16 m<sup>3</sup>/PSH15 bzw. 9,5 SRM/PSH15. Ohne Überstellung entstehen Erntekosten von 9,4 €/SRM. Veranschlagt man Hackkosten mit insgesamt 3,1 €/SRM (vgl. AFFENZELLER UND STAMPFER, 2007), resultieren daraus Bereitstellungskosten frei Waldstraße von 12,5 €/SRM. Bei Einbeziehung von diversen Zuschlägen steigen die Bereitstellungskosten auf 15,2 €/SRM (Tabelle 2).

### 3.1.3 Waldhackgutbereitstellung mit dem System SILVATEC

Quelle: ROTTENSTEINER & STAMPFER (2010)

Das System Silvatec umfasst die Arbeitsgänge Fällen, Hacken und Ausführen der Hackschnitzel zur Forststraße. Zwischen dem Fällen und den anderen Arbeitsschritten gibt es einen zeitlichen Unterbruch. Hacken, Ausführen und Transport werden zeitlich unmittelbar aufeinander ausgeführt. In einem ersten Arbeitsgang werden die Bäume auf der Rückegasse mit einem Fäller-Bündler gefällt, jedoch noch nicht am Boden abgelegt, sondern gegen seitlich der Gasse stehende Bäume gelehnt. Dies ist notwendig, um die Rückegasse für die nachfolgende Bearbeitung der seitlichen Bestandesflächen frei zu halten. Ist die Maschine am Ende einer Gasse angekommen, beginnt die eigentliche Durchforstung. Sowohl die direkt aus dem Bestand entnommenen als auch die entlang der Rückegasse angelehnten Bäume werden möglichst parallel zur Längsachse der Rückegasse abgelegt.

Tabelle 1: Systemkosten für Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingengregat

Systemkombination	Anschaffungspreis [€]	Jährliche Auslastung [PMH15]	Maschinenkosten [€/PMH15]	Produktivität [SRM/PMH15]	Kostenträger [€/SRM]
Valtra 8050	61.667	1.800	22,5		5,6
Krananhänger 12t	51.000	1.200	17,1		4,3
Naarva-Grip 1500-25	13.750	500	6,7		1,7
Personal			18,0		4,5
System			64,4	3,99	16,1

Tabelle 2: Bereitstellungskosten für das System Forwarder und Fäller-Sammler [€/SRM]

	frei Waldstraße aufgeschlüsselt	frei Waldstraße summiert (Rohholz)	frei Waldstraße (gehackt)
ohne Zuschläge	9,4	9,4	12,5
mit Überstellungskosten	1,0	10,4	13,5
mit Overheadkosten [30%]	3,1	13,5	16,6
mit Unternehmerlohn [7%]	0,7	14,3	17,4
Stundensatz Unternehmer [115 €/h]	12,1		15,2

Tabelle 3: Kosten der Waldhackgutbereitstellung mit dem System Silvatec

Maschine	Anschaffungskosten [€]	Systemkosten [€/PSH15]	Produktivität [SRM/PSH15]	Kosten [€/SRM]
Fäller-Bündler	457.000	130,85	15,39	8,50
Hacker	500.000	152,50	42,60	3,58
Shuttle	260.000	88,08	42,60	2,07
Summe	1.217.000	-	-	14,15

Nach einigen Wochen Trocknungszeit wird die auf der Trasse liegende Biomasse von einem mobilen Hacker gehackt. Die Hackschnitzel werden mittels Gebläse in einen am Hacker befindlichen Container geblasen. Ist dieser Behälter voll, kann er hochgekippt werden und sein Inhalt wird in einen Hackschnitzel-Forwarder, ein sogenanntes Shuttle, umgeladen. Das Umladen geschieht im vorliegenden Fall meist an der Forststraße, da sich das im praktischen Einsatz etabliert hat, kann grundsätzlich aber auch im Bestand erfolgen. Anschließend fährt das Shuttle zur nächstgelegenen Kreuzung bzw. zu einer Straßenverbreiterung oder einem Landeplatz, um das Hackgut auf einen Schüttgutanhänger zu laden. Für den Fäller-Bündler ergeben sich Kosten von 130,85 €/PSH15 oder 8,50 €/SRM. Hacken und Rücken kosten 5,63 €/SRM. Insgesamt ergaben sich Kosten von 14,15 €/SRM (Tabelle 3). Die Produktivität des Hackers lag bei 42,60 SRM/PSH15. Das Shuttle erreichte inklusive Wartezeiten eine Produktivität von 42,8 SRM/PSH15.

### 3.1.4 Vergleich der Studien

Um die verschiedenen Studien im Hinblick auf die Kosten je Schüttraummeter vergleichen zu können, wurden die Werte für das durchschnittliche Baumvolumen und die Rückedistanz dieser Studie in die jeweiligen Produktivitätsmodelle eingesetzt und somit die entsprechenden Kosten unter gegebenen Eingangsbedingungen simuliert (Abbildung 2).

## 3.2 Hacken von Energieholz

Der Hackprozess wurde anhand vorhandener Daten aus bisherigen Studien analysiert. Insgesamt gehen eine Menge von knapp 10.000 SRM und 118 Maschinenstunden in die Untersuchung ein (Abbildung 3). Das Hacken von Bündel

und Rundholz erzielte dabei die höchsten Produktivitäten. Bei ersteren sind jedoch die Unterbrechungen deutlich größer und somit die Produktivität um 26 SRM/PSH15 geringer. Vergleicht man das Zerkleinern von Rundholz und Schlagabraum, erzielt das erste Verfahren um circa 150 % bessere Werte.

Eine weitere Unterscheidung wurde zwischen Schreddern und Trommelhackern durchgeführt. Letztere erreichen mit durchschnittlich 77 SRM/PSH15 um 26 % höhere Produktivitäten. Beiden Untersuchungen ergaben sich durchschnittliche Wartezeiten von 19 %. Diese Werte sollten jedoch nicht verallgemeinert werden, sondern immer auf den Maschinentyp und die Anordnung und Ausgestaltung des Materials bezogen werden.

### 3.3 Lagerung von Energieholz

Wie auch in anderen Bereichen der Wirtschaft kann ein zentraler Lagerplatz für Energieholz eine Sicherungs- und Versorgungsfunktion, eine Ausgleichsfunktion, eine Produktionsfunktion sowie eine Spekulativfunktion erfüllen. Die wichtigsten Prozesse am Lagerplatz sind die Übernahme, die Mengen- bzw. Qualitätskontrolle, das Einlagern, innerbetrieblicher Transport, das Lagern (Trocknen) und das Auslagern bzw. der Abtransport (KÜHMAIER et al. 2007).

Ein Terminal hat die Funktionen und Prozesse mit der bestmöglichen Ausstattung zu erfüllen. Je nach Lagerdauer, Umschlagsmenge und durchzuführenden Prozessen ist der Terminal zu gestalten. Möglichkeiten zur Optimierung der Umschlagsmenge werden in Kapitel 0 erläutert. Im Folgenden werden die Ausstattung und Kosten von drei unterschiedlichen Lagervarianten beschrieben:

#### 3.3.1 Kleines Terminal

Kleine Lagerplätze (bis 30.000 SRM Jahrumschlag) verfügen meist über keine infrastrukturelle Ausstattung. Hier werden Flächen zur Lagerung des Holzes, zur Manipulation sowie zum Abtransport benötigt. Der Antransport des Holzes erfolgt meist getrennt von der weiteren Verarbeitung und ist als vorgelagerter Prozess meist abgeschlossen. Optima-

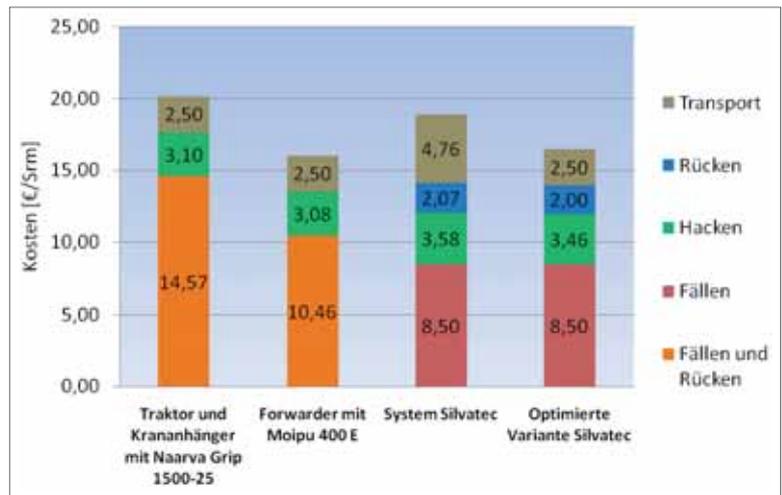


Abbildung 2: Kostenvergleich von Waldhackgutbereitstellungssystemen

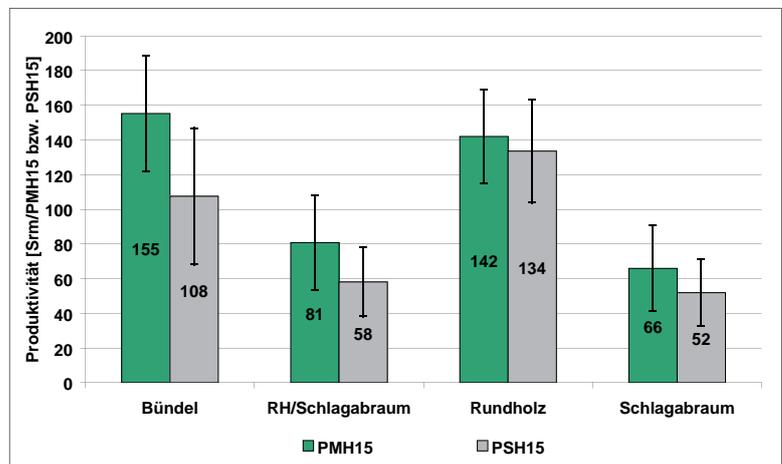


Abbildung 3: Produktivität von Hackeinsätzen (KÜHMAIER et al. 2007)

lerweise gibt es getrennte Zu- und Abfahrtsmöglichkeiten bzw. eine Wendemöglichkeit, damit sich die Prozesse Hacken und Transport nicht gegenseitig behindern. Der Abtransport des Hackgutes erfolgt sofort (Abbildung 4). Der Brennwert wird mit Hilfe öffentlicher Waagen bestimmt oder es wird nach Volumen abgerechnet.

#### 3.3.2 Großes Terminal

Bei großen Lagerplätzen werden bereits solche Mengen umgeschlagen (30.000 bis 100.000 SRM), sodass ein

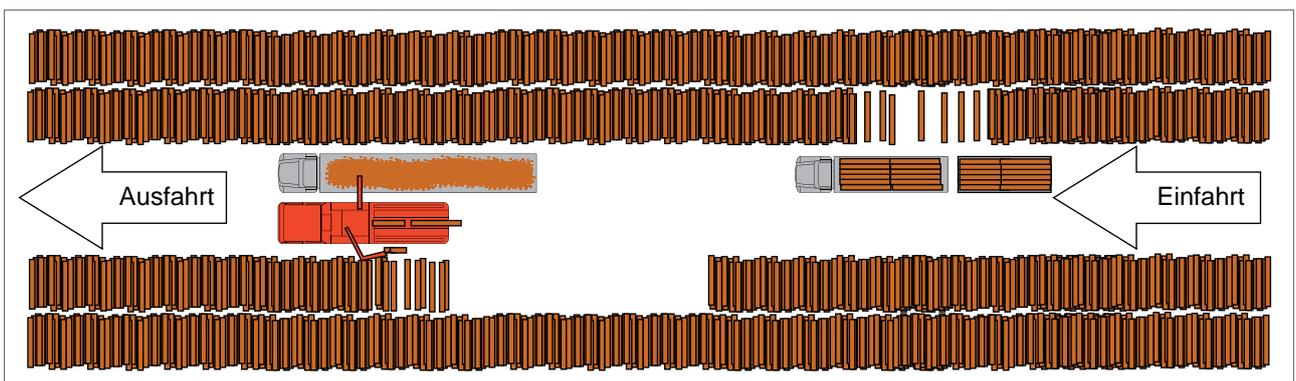


Abbildung 4: Beispiel für einen Lagerplatz ohne Hackgutlagerung

Sicherheitsbestand an Hackgut zu empfehlen ist, der plötzliche Nachfragesteigerungen abdecken kann. Die Qualitätsbestimmung erfolgt nach Gewicht und Wassergehalt. Somit sind zusätzlich zu den Anforderungen der kleinen Lagerplätze eine Brückenwaage, Bürocontainer und eine Fläche zur Hackgutlagerung notwendig. Die Qualitätsbestimmung und somit der Standort der Waage sollte sich im Einfahrtsbereich des Platzes befinden, um die entsprechenden Messungen bei An- und Abtransport zu bestimmen. Die Lagerung des Hackgutes erfolgt im Freien. Einzelne Bereiche des Lagerplatzes, vor allem für die Hackgutlagerung, können asphaltiert werden (Abbildung 5).

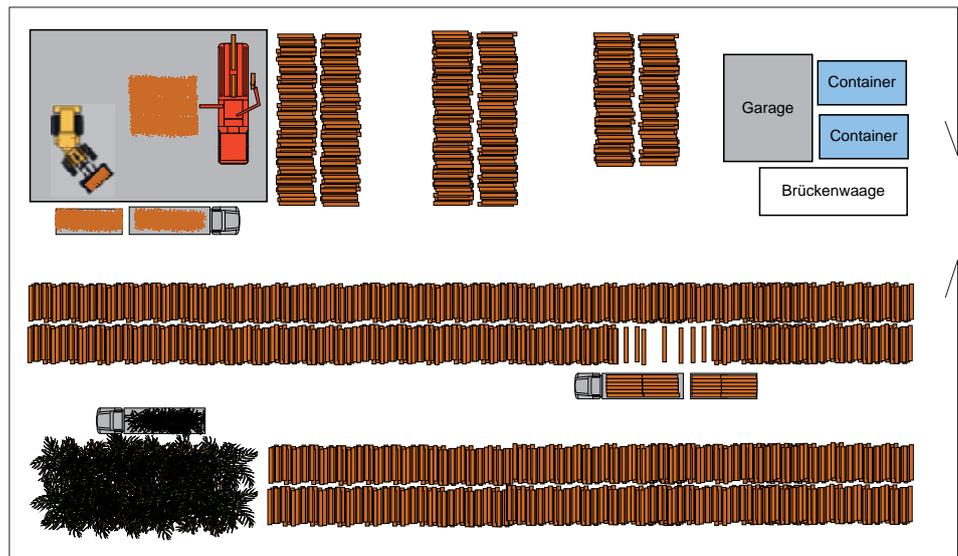


Abbildung 5: Beispiel für einen Lagerplatz mit Hackgutlagerung im Freien

Tabelle 4: Lagerkosten für kleine und große Terminals bei unterschiedlichen Umschlagsmengen und -dauern

Umschlagsmenge in SRM	Kosten bei einer Lagerdauer von 6 Monaten	Kosten bei einer Lagerdauer von 3 Monaten	Art des Terminals
1.000	4,33	3,96	klein
5.000	2,77	2,40	klein
10.000	2,57	2,20	klein
30.000	2,44	2,07	klein
50.000	2,86	2,37	groß
100.000	2,52	2,03	groß

### 3.3.3 Lagerkosten

Die Lagerkosten variieren in Abhängigkeit von Lagerkapazität und Umschlagshäufigkeit. Je mehr Mengen über das Terminal umgeschlagen, desto geringer werden die Kosten. Insgesamt zeigt sich dass sich die Zusatzkosten für die Lagerung meist zwischen zwei und drei Euro pro SRM bewegen (KÜHMAIER et al. 2007 - Tabelle 4).

Kleinere Terminals erweisen sich auf den ersten Blick als kostengünstiger. Hinzu kommt das große Terminals auch größere Einzugsgebiete und somit höhere Transportkosten aufweisen. Allerdings beinhaltet eine zentrale Lagerung größerer Mengen mögliche positive Effekte, welche hier nicht berücksichtigt wurden:

- Höherer Sicherheitsbestand zur Vermeidung der Unterversorgung
- Lagerung außerhalb des Waldes zur Vermeidung von Käferbefall
- Produktivitätssteigerung beim Hacken (Mengenkonzentration) und beim Transport (höhere Ladedichten)
- Verringerung von hohen Lagerkosten am Biomassewerk

## 3.4 Transport von Energieholz

Für den Transport von Energieholz gibt es viele Möglichkeiten. Die unterschiedlichen Transportvarianten eignen sich je nach verwendetem Fahrzeug und Aufbau für verschiedene Einsatzbereiche (siehe Abbildung 6).

Eine optimale Produktivität beim Transport erfordert eine hohe Auslastung der gegebenen

Kapazität. Limitierend wirken die gesetzlichen Rahmenbedingungen auf die Nutzlast. Aus dem Containerinhalt und der Nutzlast lässt sich eine ideale Schüttdichte für Hackgut von 285 kg/SRM für das System Lkw und Abrollcontainer berechnen (GANZ et al. 2005). Wird dieser Wert überschritten kann das Ladevolumen nicht mehr ausgenutzt werden, da das höchstzulässige Gesamtgewicht überschritten wird.

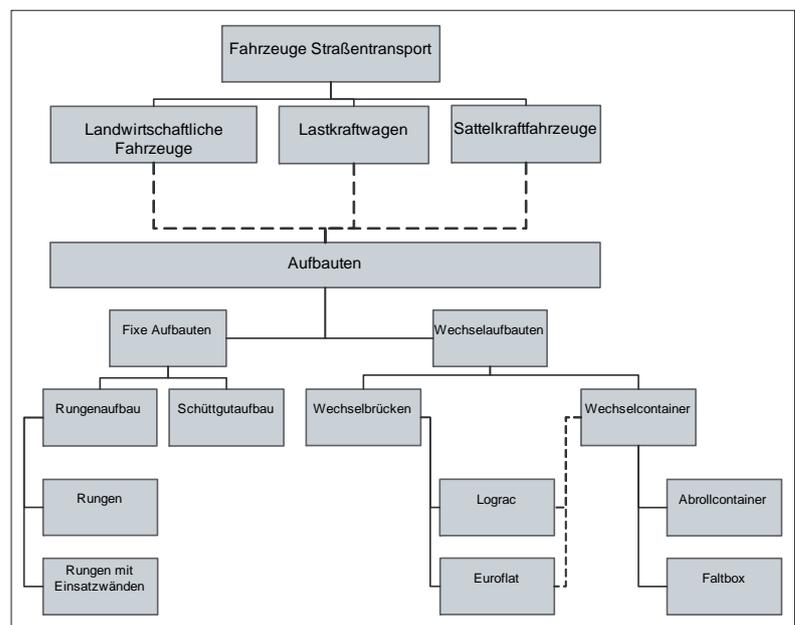


Abbildung 6: Überblick über Transportmöglichkeiten (GANZ et al. 2005)

Beim Lkw mit Anhänger und Abrollcontainer sinkt dieser auf 270 kg/SRM aufgrund des im Verhältnis höheren Eigengewichtes. Das entspricht bei Fichtenhackgut einem Wassergehalt von ca. 45% und bei Buchenhackgut hingegen einem rechnerischen Wassergehalt von unter 20%.

Aus den Abmaßdaten der Studie System Schüttgut-Lkw mit Ladekran ergibt sich eine mittlere Schüttdichte von 370 kg/SRM. Zum Vergleich werden die Kosten mit der idealen und dieser dargestellt. Für den Lkw ergeben sich auf Basis der getroffenen Annahmen Produktivitäten von 16,5 SRM/h bei 20 km Distanz. Diese sinkt bei 60 km Transportdistanz auf 10,5 SRM/h. Die Kosten bezogen auf den Schüttraummeter steigen daher von 3,0 €SRM auf 4,8 €SRM (Abbildung 7).

Vergleicht man verschiedene Schüttdichten und unterschiedliche Wartezeiten (Warten I) so zeigt sich, dass die Schüttdichte einen wesentlich höheren Einfluss auf die Kosten ausübt als die Reduktion der Wartezeiten. So reduzieren sich beim Wegfallen der Wartezeiten (Warten I) bei einer Distanz von 50 km die Kosten um 0,3 €SRM auf 5,1 €SRM. Sinkt im Vergleich dazu die Schüttdichte auf den Idealwert ab, beträgt die Differenz 1,0 bzw. 0,7 €SRM.

### 3.5 Optimierung des Versorgungsnetzwerks

#### 3.5.1 Logistisches System

Ein logistisches System kann vereinfacht als eine übergreifende Kette zwischen Lieferant und Kunde, gegliedert nach Prozessen abgebildet werden. Dieses System lässt sich durch Modifikation auch für die Energieholzlogistik adaptieren (Abbildung 9; RANTA, 2002). Dem Materialfluss vom Lieferanten zum Kunden steht der Informationsfluss gegenüber. Den Prozessen Beschaffung, Produktion und Distribution werden die forstspezifischen Prozesse Energieholzernte, Zerkleinerung und/oder Komprimierung sowie Transport zugeordnet. Eine Reduktion auf das dargestellte, vereinfachte System erscheint in der Praxis nicht

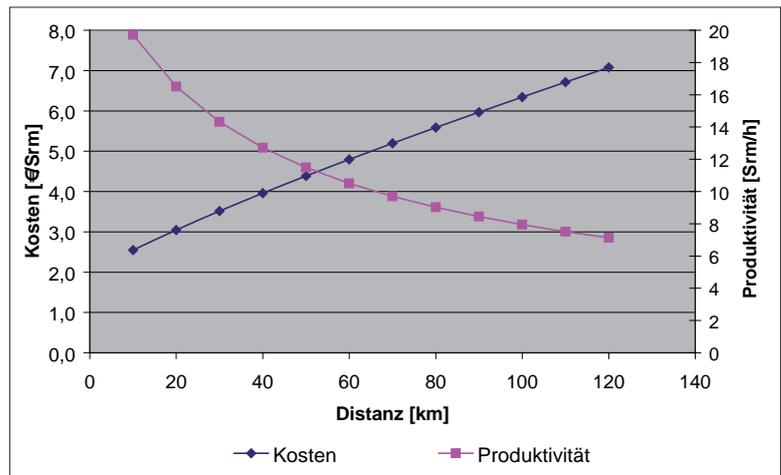


Abbildung 7: Geschätzte Kosten und Produktivität für einen Lkw mit Abrollcontainer bei einer Schüttdichte von 285 kg/SRM (Produktivität inkl. Wartezeiten ohne Anfahrtszeit).

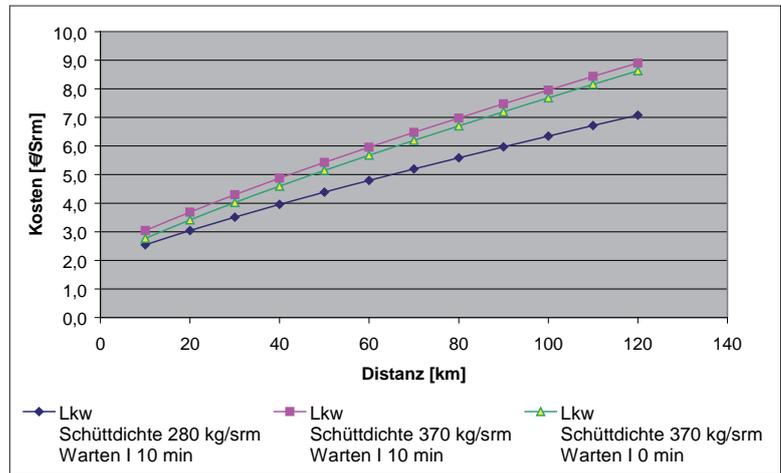


Abbildung 8: Geschätzte Kosten für den Transport von Waldhackgut mit Lkw und Abrollcontainer bei unterschiedlichen Schüttdichten und Wartezeiten.

realistisch. Die Beschaffung und Produktion werden hier als simple Prozesse dargestellt. Tatsächlich gestaltet sich der Ablauf als sehr komplex, da an jedem Punkt eine Reihe von Entscheidungen getroffen werden können bzw. müssen, welche großen Einfluss auf den weiteren Materialfluss haben (ANDERSSON et al., 2002). Alleine die Wahl des Hackortes, welcher den Zustand des Energieholzes beim

Transport bestimmt, hat große Auswirkungen auf die Logistikkette.

Die Logistikkette bzw. Wertschöpfungskette Waldhackgut kann daher nicht als simple Kette von der Rohstoffquelle zum Verbraucher gesehen werden. Vielmehr laufen eine Reihe von Prozessen parallel bzw. eng verzahnt ab. Der Begriff Versorgungsnetzwerk beinhaltet ein Set aus Bereitstellungsketten und möglichen Stoffflüssen und bringt somit die Komplexität

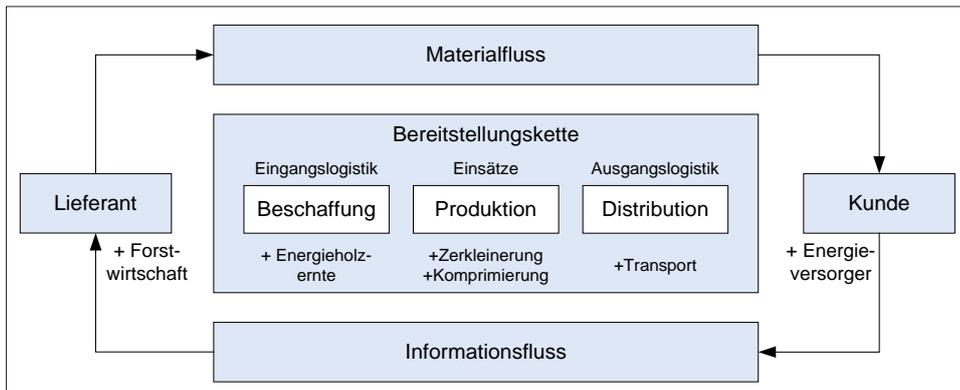


Abbildung 9: Vereinfachtes, logistisches System für die Waldhackgutbereitstellung (RANTA, 2002)

besser zum Ausdruck (ANDERSSON et al., 2002).

### 3.5.2 Materialflüsse

Der Materialfluss beschränkt sich im Wesentlichen auf drei Warenströme (Abbildung 10):

- (1) vom Wald direkt zum Werk
- (2) vom Wald zu einem regionalen Terminal (BMLZ)
- (3) vom regionalen Terminal (BMLZ) zum Werk

Weiters ist eine Entscheidung über den Hackort des Energieholzes zu treffen, was gleichzeitig den Zustand beim Transport und somit die Wahl des Transportmittels festlegt. Bei der Analyse der reinen Transportkosten erweist sich der Schüttgut-LKW als günstigeres Transportmittel im Vergleich zum Rundholz-LKW. Das Hacken kann bei der direkten Versorgung im Wald oder Werk stattfinden. Um diesen Umstand Rechnung zu tragen, werden für den Warenstrom (1) Mischkosten für das Hacken und den Transport berechnet. Bei der Verwendung von verschiedenen Transportmitteln in einer Kette verursacht das Umladen meist hohe Kosten. Daher werden der Transport vom Wald zum Terminal (2) ausschließlich mit dem Rundholz-LKW und die anschließende Distribution vom Terminal zum Werk (3) mittels Schüttgut-LKW abgewickelt. Sollte das Potenzial in der Projektregion insuffizient sein, um die Werke zu versorgen, muss Waldhackgut aus anderen Quellen (Import aus anderen Regionen, Sägebrennprodukte ...) beschafft werden. Diese Quellen werden im Modell über die Entscheidungsvariable Fehlmenge repräsentiert, aber nicht weiter behandelt.

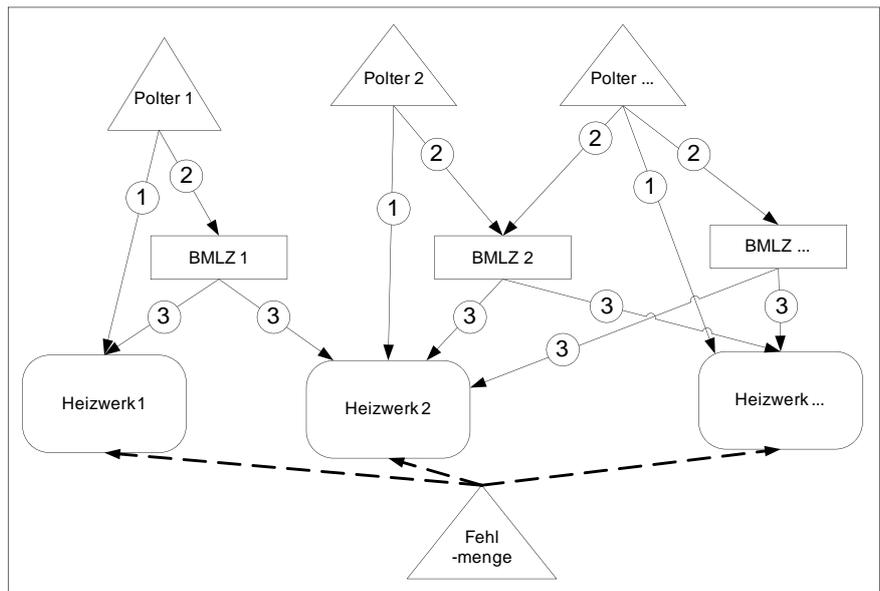


Abbildung 10: Definierte Materialflüsse von Waldhackgut im Modell

Die Hacken kann bei der direkten Versorgung im Wald oder Werk stattfinden. Um diesen Umstand Rechnung zu tragen, werden für den Warenstrom (1) Mischkosten für das Hacken und den Transport berechnet. Bei der Verwendung von verschiedenen Transportmitteln in einer Kette verursacht das Umladen meist hohe Kosten. Daher werden der Transport vom Wald zum Terminal (2) ausschließlich mit dem Rundholz-LKW und die anschließende Distribution vom Terminal zum Werk (3) mittels Schüttgut-LKW abgewickelt. Sollte das Potenzial in der Projektregion insuffizient sein, um die Werke zu versorgen, muss Waldhackgut aus anderen Quellen (Import aus anderen Regionen, Sägebrennprodukte ...) beschafft werden. Diese Quellen werden im Modell über die Entscheidungsvariable Fehlmenge repräsentiert, aber nicht weiter behandelt.

schlag von 30 % des Jahreseinschlages bzw. rund 83.000 SRM vorsieht. In diesem Fall werden vier Terminal-Standorte (Nummer 49, 85, WV\_B\_19 und WV\_B\_20) eröffnet, deren Jahresumschlag jeweils zwischen 15.000 und 23.000 SRM liegt. Die optimalen jährlichen Lieferungen vom Standort WV\_B\_19 wären zum Beispiel 5.700 SRM nach Fladnitz a. d. T., 6.300 SRM nach Passail, 3.400 SRM nach Weiz 1 und 5.900 SRM nach Weiz 2 (Werte gerundet - Tabelle 5). Vom Terminal 49 zum Werk Kapfenberg werden nur 29 SRM/a vorgeschlagen, weil für die Auslieferung keine Mindestmengen in Form von Nebenbedingungen formuliert wurden. Das wäre in der Umsetzung nicht wirtschaftlich, da diese Menge kleiner als eine Lkw-Ladung ist. Auf das Ergebnis hat dies keinen Einfluss. Die Auslieferung von diesem Terminal kostet rund 3,20 EUR/SRM

Die Einbeziehung von Terminals in das Versorgungsnetzwerk verursacht grundsätzlich höhere Kosten (KÜHMAIER et al., 2007), wenn sich die Relationen der Transportkosten wie in den Annahmen verhalten. Die direkten Transportdistanzen zu den Werken fallen relativ niedrig aus. Jeder Terminal-Standort, der sich nicht auf der direkten Verbindung zwischen Wald und Werk befindet, verursacht deswegen verhältnismäßig hohe zusätzliche Transportkilometer. Aus Sicht der Versorgungssicherheit und aus wirtschaftlich-strategischen Gründen (Bündelung von Kleinmengen) kann es trotzdem sinnvoll sein, ein Netz aus Terminals aufzubauen.

### 3.5.3 Versorgungsbeispiel für die Waldverband Steiermark GmbH

Quelle: SCHNEDL et al. (2008)

Für den Waldverband Steiermark wurde ein Versorgungsszenario umgesetzt, welches einen Mindestum-

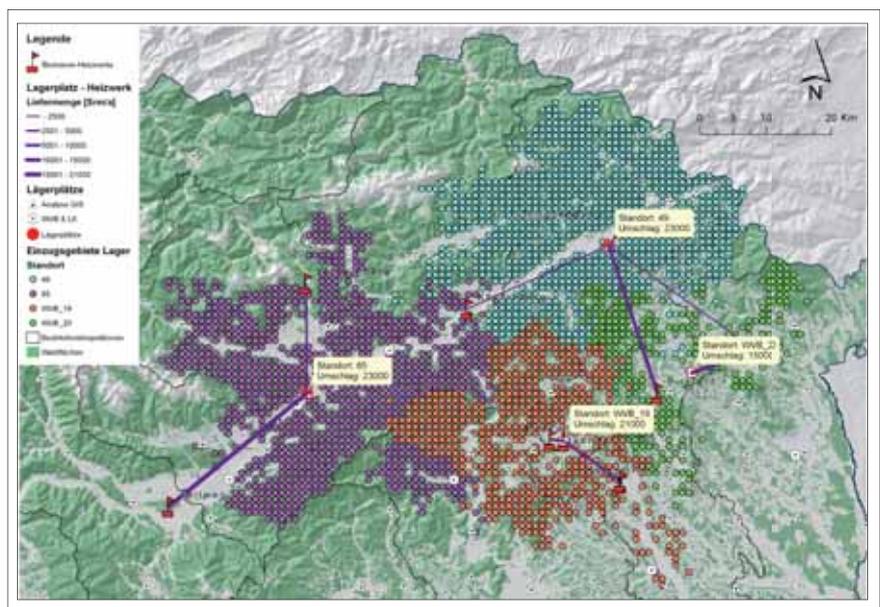


Abbildung 11: Eröffnete Terminals und Visualisierung der Warenströme zu den Heizwerken bei einer Vorgabe, dass mindestens 30 % des Potenzials über Terminals umgeschlagen werden sollen

kosten und die Belieferung rund 4,30 EUR/SRM. Im Durchschnitt belasten Kosten von 10,70 EUR/SRM den über Terminal laufenden Schüttraummeter Waldhackgut. Die Belieferungskosten betragen 4,60 EUR/SRM und haben einen Anteil an den Kosten von 78%. Die Versorgungskosten für das gesamte Netzwerk liegen bei 8,90 EUR/SRM. Bei ca. 80.000 SRM/a kumulierter Energieholzmenge müssen Distanzen bis zu knapp 40 km zurückgelegt werden (Abbildung 13 - a). Die Grenzkosten steigen zwar auf über 6,00 EUR/SRM an, die Durchschnittskosten bleiben allerdings im Bereich von knapp über 4,00 EUR/SRM bei einer kumulierten Menge von 80.000 SRM/a (Abbildung 13 - b). Zwischen den einzelnen Terminal-Standorten bestehen keine Unterschiede hinsichtlich der Zulieferdistanz, welche im Median bei 22-23 km liegt (Abbildung 14 - a). Die Auslieferdistanzen sind etwas unterschiedlich, fallen aber in der Regel nicht höher als 30 km aus (Abbildung 14 - b).

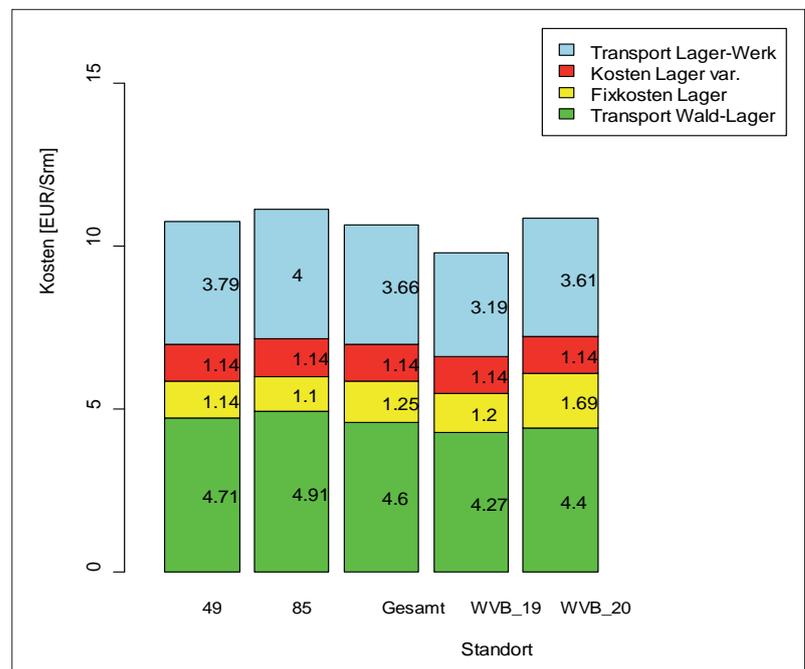
### 3.5.4 Schlussfolgerungen

Die Frage der optimalen Allokation von Terminals ist komplex, da viele Faktoren und Parameter eine Rolle spielen. Im Gegensatz zur Betrachtung von Bereitstellungsketten, welche linear ablaufen, handelt es sich um ein Netzwerkproblem aus Wald-, Terminal- und Heizwerk-Standorten. Als Basis für die Standortentscheidung wurde ein geografisches (GIS-) Modell und ein mathematisches (MIP-) Optimierungsmodell entwickelt, mithilfe derer die Auswahl operational erfolgen kann.

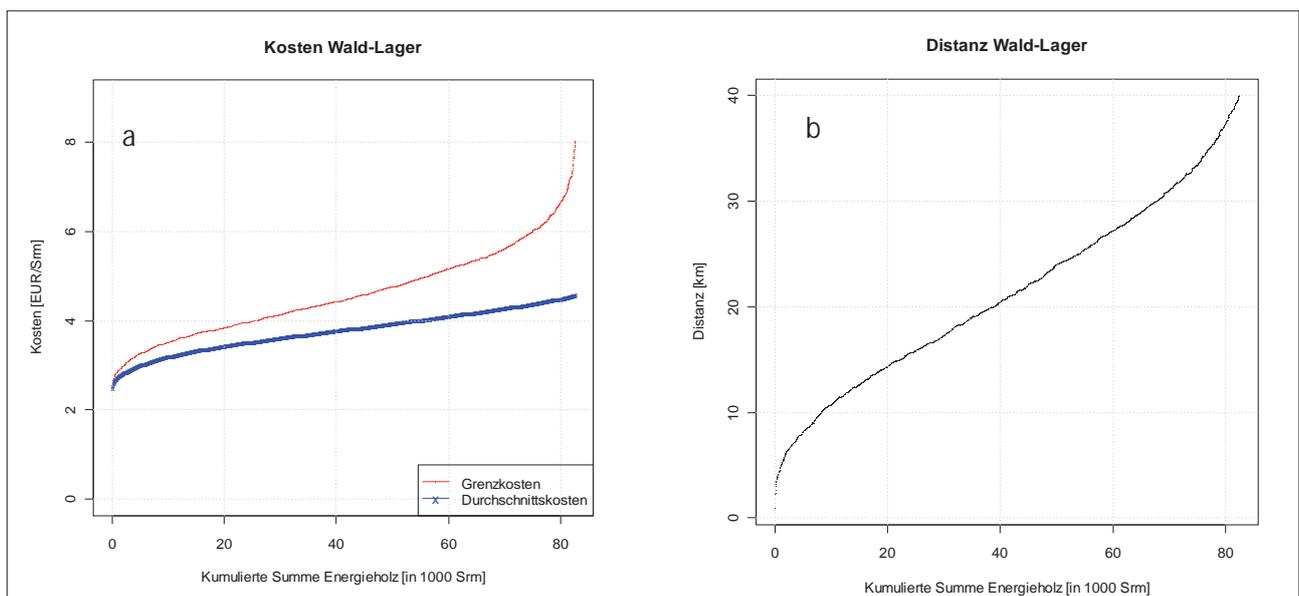
Über definierte Standortskriterien wurde eine Vorauswahl von Standorten getroffen.

**Tabelle 5: Optimale Warenströme von den Terminals zu den Biomassewerken in SRM/a**

Heizwerk/Terminal	49	85	WVB 19	WVB 20	Summe
Birkfeld 1	12.777				12.777
Fladnitz a.d. T.			5.747		5.747
Kapfenberg	29				29
Langenwang 2	8.641				8.641
Passail			6.300		6.300
Vorau	1.073			15.185	16.258
Vordernberg		3.590			3.590
Weiz 1			3.375		3.375
Weiz 2			5.944		5.944
Zeltweg		19.873			19.873
Summe	22.520	23.463	21.366	15.185	82.533



**Abbildung 12: Kostenstruktur der eröffneten Terminals getrennt nach Transport-, fixen und variablen Kosten**



**Abbildung 13: Grenz- und Durchschnittskosten bei der Belieferung der Terminals (a). Potenzialverfügbarkeit im Umkreis der Terminals in Abhängigkeit von der kumulierten Energieholzmenge (b).**

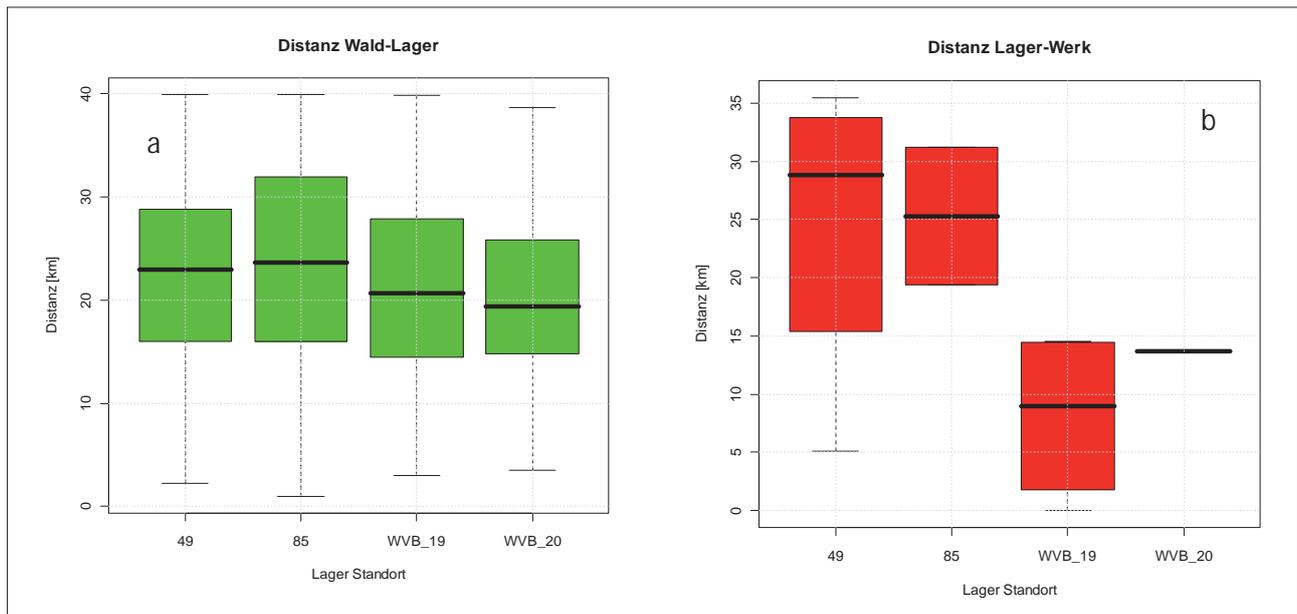


Abbildung 14: Zu- und Auslieferdistanzen für die eröffneten Terminals

Mithilfe des MIP-Modells wurden die Potenziellen als vor Ort Erhobene näher analysiert wurden. Das Optimierungsmodell entscheidet, welche Mengen vom Wald zu den Heizwerken transportieren und ob Terminals eröffnete werden sollen. Gleichzeitig wird auch der Mengenstrom von den Terminals zu den Heizwerken optimiert.

Für das Versorgungsnetzwerk aus 10.871 Waldstandorten, 115 Terminal-Standorten und 65 Heizwerken wurden eine Reihe von Szenarien berechnet, um die Sensitivität des Netzwerkes gegenüber Änderungen im Potenzial an Waldhackgut, Transportkosten und Vorgaben zur Errichtung von Terminals zu untersuchen. Grundsätzlich bedeutet die Einbeziehung von Terminals ins Liefernetzwerk einen Nachteil gegenüber einer optimierten Direktversorgung aus Sicht der Kosten. Wenn diese Zusatzkosten in Kauf genommen werden, hängt die optimale Lage einerseits vom verfügbaren Potenzial und andererseits vom Bedarf in den Regionen ab. Im Fall der WVB-GesmbH, welche in den Bezirken Hartberg und Weiz einen beachtlichen Teil des jährlichen Holzverkaufs abwickelt, wären Standorte in diesen Bezirken optimal. Unabhängig von der WVB-GesmbH wäre bei der Umsetzung eines steierischen Versorgungsnetzwerkes für Waldhackgut vor allem die Obersteiermark prädestiniert.

Die Logistikkosten für ein Terminal belaufen sich je nach Szenario zwischen 10,70 EUR/SRM und 11,50 EUR/SRM bezogen auf den Umschlag. Den größten Anteil nehmen die Transportkosten mit 68 % bis 78 % ein. Die optimalen mittleren Belieferungsdistanzen betragen zwischen 20 und 22 km und ändern sich kaum bei den analysierten Szenarien. Die Auslieferungsdistanzen hingegen reagieren sehr wohl in Abhängigkeit der Eingangsdaten. Hier ist die Bandbreite der optimalen Distanzen größer mit Werten von 54,5 bis 17,5 km.

Anhand verschiedener Szenarien kann die Funktionsfähigkeit der präsentierten Modelle auf regionaler Ebene mit einem großen Datenpool demonstriert werden. Die Anwendung von Optimierungsmodellen kann eine wesentliche Unterstützung bei der Planung von Versorgungsnetzwerken

sein. Im Hinblick auf eine Umsetzung müssen allerdings die Eingangsdaten und Parameter konkreter ausgearbeitet werden. So sind für jeden Standort die individuell entstehenden Kosten zu kalkulieren. Die möglichen Lieferanten und Kunden mit den Angebots- und Bedarfsdaten müssen erfasst werden. Regionale Unternehmer und deren Maschinenausstattung sowie Kostensätze müssen ebenfalls bei der Kalkulation der Bereitstellungskosten beachtet werden.

## 4 Diskussion und Ausblick

Trotz zahlreicher Studien und Untersuchungen gibt es immer noch offene Fragen und ein großes Potenzial zur Optimierung der Energieholzbereitstellung. Für die Ernte des Holzes sollen bestehende Systeme auf deren Anwendbarkeit laufend untersucht werden und neue Systeme getestet werden. Vor allem für Durchforstungsbestände ist es wichtig, effiziente Systeme einzusetzen. Für die Auswahl von Erntesystemen ist ein Instrument zur Entscheidungsunterstützung sehr hilfreich.

Die Abfolge von Lagerung, Hacken und Transport ist eine essentielle Frage bei der Ausgestaltung der Bereitstellungskette. Eine Trocknung des Holzes und anschließendes Hacken am Waldort wirkt sich meist positiv auf die Produktivität des Transportes aus. Das Hacken an einem zentralen Lagerplatz wirkt sich wiederum positiv auf die Effizienz des Zerkleinerns und ermöglicht eine Sicherstellung der Versorgung. Die Planung der Abfolgen ist sehr komplex und ist oft nur mit einem mathematischen Optimierungsmodell zu lösen. Welche Hack-Maschinen eingesetzt werden, hängt von der Menge und der Anordnung der Polter/Haufen ab. Kann der Hacker ununterbrochen beschickt werden, eignen sich große, leistungsfähige Maschinen (z.B. Hacker auf LKW-Aufbau). Sind die Anfahrts- und Überstellungszeiten jedoch sehr hoch, sollten kleinere Maschinen eingesetzt werden, da die unproduktiven Zeiten dann weniger ins Gewicht fallen.

Beim Transport des Energieholzes verhält es sich ähnlich. Auf sehr kurzen Strecken können kleine Maschinen (z.B.

Traktor mit Anhänger) eingesetzt werden, während auf größeren Distanzen auf leistungsfähigere Fahrzeuge (Sattelaufzieger mit Schüttgut-Aufbau, Abrollkipper mit Abrollcontainer) umgestiegen werden sollte. Bei sehr großen Distanzen ab circa 100 km kann auch der Bahntransport eine Alternative darstellen.

Die Lagerung und Trocknung von Energieholz muss aufgrund der Anforderungen der Werke fast immer durchgeführt werden. Der Standort und die Ausstattung eines Lagerplatzes orientieren sich an der Anordnung, Bedarf und Angebot von Waldstandorten und Biomassewerken. Weiters spielt auch die jahreszeitliche Verfügbarkeit und die Notwendigkeit der Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Versorgung eine wichtige Rolle. Für die Planung von zentralen Terminals empfiehlt sich auf alle Fälle der Einsatz eines Optimierungsmodells.

Die Kenntnis von Lagerdauer und Trocknungsverlauf sind für die Planung der jahreszeitlichen Abfolge der Bereitstellungsprozesse sehr wichtig. Die Lagerdauer ist neben dem gewünschten Wassergehalt auch von der Baumart, dem Material, dem Einlagerungszeitpunkt und den standörtlichen Gegebenheiten abhängig. Ein laufendes und geplantes Projekt soll neue Kenntnisse über die optimalen Lagerungsbedingungen von Energieholz und Hinweise zum Lagerbestandsmanagement geben.

## 5 Literatur

- AFFENZELLER, G. & STAMPFER, K. (2007): Energieholzbereitstellung mit Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingenaggregat. Fallstudie im Auftrag des Kooperationsabkommens Forst-Holz-Papier (FHP). Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 29 S.
- AFFENZELLER, G. & STAMPFER, K. (2008): Energieholzbereitstellung mit Forwarder und Fäller-Sammler Moipu 400E. Forschungsbericht für das Kooperationsabkommen Forst Holz Papier (FHP), durchgeführt am Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 20 S.
- ANDERSSON, G., ASIKAINEN, A., BJÖRHEDEN, R., HALL, P. W., HUDSON, J. B., JIRJIS, R., MEAD, D. J., NURMI, J. & WEETMAN, G. F. (2002): Bioenergy from Sustainable Forestry - Guiding Principles and Practice. Kluwer Acad. Publ., chapter Production of Forest Energy, 49-123 S.
- BILEK, F. (2006): Bilek Landmaschinen Großhandel Rechnitz, Maschineninformationsblatt 9 S.
- GANZ, M., HOLZLEITNER, F. & KANZIAN, C. (2005): Energieholzlogistik Kärnten - Transport von Energieholz. Forschungsbericht, Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 89 S.
- KANZIAN, C., FENZ, B., HOLZLEITNER, F., STAMPFER, K. (2006): Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass. Endbericht für das Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur, Wien. 29 S.
- KÜHMAIER, M., KANZIAN, C., HOLZLEITNER, F. & STAMPFER, K. (2007): Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Forschungsbericht, Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, 283 S.
- PRÖLL, W., BAUER, R., LUGMAYR, J., KOHL, J., HAUER, H. & PREIER, P. (2003): 500 Forstmaschinen: Maschinenbeschreibung und Selbstkostenrechnung. 3. Auflage. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien: CD-Rom.
- RANTA, T. (2002): Logging residues from regeneration fellings for bio-fuel production - A GIS-based availability and supply cost analysis. Dissertation, Lappeenranta University of Technology, 180 S.
- ROTTENSTEINER, C. & STAMPFER, K. (2010): Waldhackgutbereitstellung mit dem System Silvatec. Fallstudie im Auftrag des Kooperationsabkommens Forst-Holz-Papier (FHP). Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 25 S.
- SCHNEIDL, C., EHRENHÖFER, W., STAMPFER, K., KANZIAN, C., KÜHMAIER, M., JAUSCHNEGG, H., METSCHINA, C., LAMMER, H. & SCHEFF, J. (2008): Optimierung der regionalen Warenströme über Biomasse-Logistikzentren, 2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft, S. 1-252.