

134. Jahrgang (2017), Heft 3, S. 201–224

**Austrian Journal of  
Forest Science**

---

**Centralblatt**  
für das gesamte  
Forstwesen**Regionale Energieholzlogistik – Optimale Standorte  
und Einzugsgebiete von Lagerplätzen**Christian Kanzian <sup>1\*</sup>, Martin Kühmaier <sup>1</sup>**Keywords:***Biomass, Location-Allocation-Problem, Supply Network Optimization, Mixed integer programming***Abstract**

The share of renewable energy produced from solid biomass increases. The additional demand of solid biomass in terms of energy wood has to be supplied efficiently. To secure these requires a good supply network. The presented study describes a framework, which uses a MIP optimization model and scenario analysis to determine optimal storage locations, supply areas and transport distances. Different levels of energy wood potentials in the study area Styria will be tested. The costs for comminution and transport amount between 10.70 and 11.50 EUR per cubic meter loose in optimal cases, whereby transport costs have a share of 68 to 78%. Should 30% of the yearly demand supplied via storages, the model suggests four central locations for storage in the study area. Transport distances from forest to storage locations are in a range of 19 to 23 km and from storage to heating plants.

---

<sup>1</sup> Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien

\* korrespondierender Autor: Christian Kanzian (christian.kanzian@boku.ac.at)

## Zusammenfassung

Der Anteil an erneuerbarer Energie, produziert aus fester Biomasse, nimmt zu. Der zusätzliche Bedarf an fester Biomasse in Form von Energieholz soll möglichst effizient gedeckt werden. Um dies zu gewährleisten braucht es ein gutes Versorgungsnetzwerk. Die vorliegende Studie beschreibt ein Konzept, welches mit Hilfe eines MIP-Optimierungsmodells und Szenarienanalysen, optimale Lagerplatzstandorte, Einzugsgebiete und Transportdistanzen liefert. Es werden unterschiedliche Energieholzpotenzialszenarien im Projektgebiet Bundesland Steiermark getestet. Die Kosten für Hacken und Transport betragen bei einer optimierten Lösung zwischen 10,70 und 11,50 €/Srm, wobei die Transportkosten mit einem Anteil von 68 bis 78% den Hauptteil ausmachen. Werden 30% des jährlichen Umschlages über Lager transportiert, schlägt das Modell vier zentrale Standorte vor. Die Belieferungsdistanzen liegen mit 19 bis 23 km nahe beieinander, die Auslieferungsdistanzen variieren mit 7 bis 29 km stärker.

### 1. Einleitung

Die Produktion erneuerbarer Energie gewinnt an Bedeutung, da sich Österreich im Rahmen von EU-Richtlinien das Ziel gesetzt hat, den Anteil erneuerbarer Energie von 23,3% auf 34% zu steigern. Mit dem Ökostromgesetz, das die Einspeisetarife für Stromproduktion aus erneuerbaren Ressourcen regelt, wird versucht einen Anreiz für Unternehmen zu schaffen in erneuerbare Energieproduktion zu investieren. Die Förderungen lösten einen Bau-Boom bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) aus. Die größte KWK-Anlage Österreichs mit einem Jahresbedarf von 245.000 m<sup>3</sup> Holz wurde in Wien Simmering realisiert (Kanzian 2008). Schätzungen, auf Basis der geplanten Anlagen, gingen von einer Zunahme der Energieholznachfrage zwischen 2004 bis 2007 von 2,1 auf 5,0 Mio. m<sup>3</sup> nur für KWK-Anlagen aus (Katzensteiner und Nemestothy 2006).

Betrachtet man die Mengenstromanalyse von Holz in Österreich so zeigt sich das 5,1 Mio. m<sup>3</sup> Holzhackgut direkt vom Wald in die energetische Verwertung fließen, wovon die KWK-Anlagen mit 2,2 Mio. m<sup>3</sup> einen Anteil von 43% einnehmen. Die restliche Menge verteilt sich auf Heizwerke (Strimitzer 2015).

Versorgungsketten und Infrastrukturen für die Energieholzbereitstellung, wie sie für die Versorgung der Holzindustrie mit Rohholz über Jahrzehnte gewachsen sind, entstehen gerade erst bzw. werden über die wachsende Erfahrung laufend verbessert. Die Logistik- bzw. Wertschöpfungskette Waldhackgut wird häufig als simple Kette von Prozessen gesehen. In der Realität 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 besser zum Ausdruck (Andersson u. a. 2002).

Das Thema Optimierung von Biomasseversorgungsketten und -netzwerken wurde in den letzten Jahren wissenschaftlich intensiv bearbeitet, wie die exponentielle Zunahme an Publikationen zeigt (De Meyer u. a. 2014). Eriksson und Björheden (1989) versuchten als eine der ersten mittels linearer Programmierung den optimalen Versorgungsweg für ein Heizwerk zu ermitteln. Fünf alternative Produktionswege wurden in Betracht gezogen: (1) direkter Transport des Rohmaterials zum Werk, (2) Transport des Rohmaterials über einen Lagerplatz zum Werk, (3) Transport des Rohmaterials zum Lagerplatz und Hacken am Lagerplatz sowie Transport zum Werk, (4) Hacken im Wald, Lagerung und Weitertransport zum Werk und (5) Hacken im Wald und direkter Transport zum Werk. Basierend auf Annahmen zu den eingesetzten Maschinen, Kosten usw. stellten sich die direkten Varianten als die wirtschaftlichsten heraus (Prozessketten 1 und 5). Die Möglichkeit einer Verbesserung der Brennstoffqualität durch Lagerung und Mischung, sowie der Einsatz von Großhackern konnte die Profitabilität von Lagerplätzen nicht ausreichend erhöhen. Über kurze Transportdistanzen stellte der direkte Transport unter schwedischen Verhältnissen die beste Alternative dar.

Um die Entscheidung, wann und wo Schlagabraum bzw. Energieholz zu Waldhackgut verarbeitet und wie das Material transportiert und gelagert wird, zu erleichtern, formulierten Gunnarsson u. a. (2004) ein gemischt ganzzahliges, lineares Modell (Mix Integer Programming Model - MIP). Das Modell berücksichtigt auch die Zulieferung von Sägenebenprodukten sowie den Import und gibt Antworten auf die Frage, welche Lagerplätze verwendet werden sollen. Planungshorizont ist ein Jahr, welches auf Monate heruntergebrochen wird. Das Modell inkludiert eine Vielzahl von möglichen Stoffflüssen, wie von unterschiedlichen Nutzungen entweder im direkten Transport bzw. via Lagerplatz zum Heizwerk oder durch Import über einen Hafen zum Lagerplatz usw. transportiert werden könnte. Anhand von sechs unterschiedlichen Szenarien wird das Modell getestet. Falls im Wald gehackt wird, erfolgt der Transport direkt zum Werk. Die Berücksichtigung von Sägenebenprodukten erzwingt eine Lagerung von Brennstoff auf Lagerplätzen (Gunnarsson u. a. 2004).

In Österreich widmeten sich ebenfalls eine Reihe von Studien der Frage nach den optimalen Standorten für Lagerplätze und den entsprechenden Transportmodi. Kanizian u. a. (2006, 2009) verwenden ein zweistufiges Prozedere mit linearen Modellen zur Wahl von Lagerstandorten in einem regionalen Netzwerk für das Projektgebiet Mittelkärnten. Dabei erfolgte eine direkte Zuordnung des Energieholzes zu den Lagerplätzen und Heizwerken aus einem geometrischen Raster von theoretischen Polterstandorten. Jeder Polterstandort wurde dabei genau einem Lagerplatz oder Heizwerk zugewiesen ähnlich wie in Ranta (2002) beschrieben.

Für die Suche nach optimalen Standorten für Lagerplätze zur Versorgung von KWK-Anlagen entwickelten Rauch und Gronalt (2010) ein MIP Modell, welches alle Transportströme in einer Zielfunktion berücksichtigt und die Gesamtkosten für Lagerung und Transport minimiert. Das Projektgebiet umfaßt die fünf Bundesländer Wien, Niederösterreich, Burgenland, Oberösterreich und Salzburg. Die Ressourcen wurden für

38 inländische und zusätzlich 4 ausländische Bezirke geschätzt und die Transportdistanzen von den Einstiegspunkten der Forststraße zum öffentlichen Straßennetz zu den Lagerplätzen und Heizwerken ermittelt. Von 38 Lagerplätzen sollten im optimalen Fall 19 genutzt werden, wobei allerdings nur 40% des Bedarfs über diese transportiert werden sollte. 60% des Bedarfes kommen über den direkten Weg vom Wald zu den den KWK-Anlagen.

Neben den Standorten von Lagerplätzen, sind deren Einzugsgebiete, mittlere sowie maximale Transportdistanzen und die zu erwartenden Kosten von großem Interesse für die praktische Umsetzung. Die Versorgungsplanung ist mit vielen Unsicherheiten behaftet, wobei die für den Markt verfügbare Holzmenge und die räumliche Verteilung einen erheblichen Einfluß haben kann. Bisherige Studien analysieren die Optimierungsergebnisse unzureichend und geben keinen Aufschluß über den Einfluß der Energieholzverfügbarkeit auf die Ergebnisse.

Vahrenkamp und Mattfeld (2007) beschreiben drei unterschiedliche Modellierungsmöglichkeiten in der Standorttheorie: (1) diskrete, (2) kontinuierliche und (3) semidiskrete Modelle. Geht man von einem Netzwerk mit Entfernungsdaten aus indem nur Standorte an den Knoten zugelassen sind, spricht man von einem diskreten Modell. Bei kontinuierlichen Modellen können Standorte innerhalb von euklidischen Ebenen in beliebigen Punkten aufgesucht werden. Können Standorte in den Knoten und auf beliebigen Punkten entlang der Kanten aufgesucht werden, handelt es sich um ein semidiskretes Modell.

Die vorliegende Studie verwendet ein diskretes Standortmodell und beschreibt ein Konzept welches ein MIP-Modell nutzt um die Verteilung der Lagerplätze auf regionaler Ebenen (Location), sowie die optimalen Einzugsgebiete und Transportdistanzen für diese Plätze zu bestimmen. Die Ressourcen aus dem Wald werden Lagerplätzen und Heizwerken zugeordnet (Allocation). In der Literatur wird dies als Location-Allocation-Problem bezeichnet (Vahrenkamp und Mattfeld 2007). Über detaillierte Sensitivitätsanalysen wird der Einfluß der Energieholzpotenzialverfügbarkeit auf die Standortwahl, Transportdistanzen und den daraus resultierenden Versorgungskosten für das Projektgebiet Steiermark aufgezeigt. Diese Arbeit wurde in Kooperation mit dem Waldverband Steiermark GmbH durchgeführt.

## **2. Material und Methoden**

Die Entwicklung von Versorgungsszenarien wird im wesentlichen von den vier Faktoren Bedarf, Potenzial, Bereitstellungsketten und Lagerung bestimmt (Abb. 1).

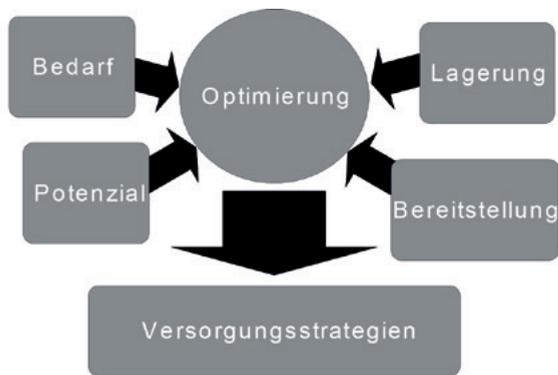


Abbildung 1: Rahmen und Konzept für die Optimierung von Versorgungsnetzwerken bzw. Erstellung von Versorgungsstrategien für Energieholz.

In mehreren Projekten wurde das Konzept fortlaufend weiterentwickelt (Kanzian u. a. 2013; Kanzian u. a. 2006, 2009; Kühmaier u. a. 2007) und beinhaltet folgende Schritte:

- Erhebung des Bedarfs an Waldhackgut
- Schätzung des Energieholzpotenzials
- Auswahl der Bereitstellungsketten, im speziellen des Hackortes und der Transportmittel
- Vorauswahl von Lagerplatz-Standorten, Berechnung der Kosten
- Mathematische Optimierung der definierten Warenströme
- Analyse und Visualisierung der Optimierungsergebnisse

## 2.1 Projektgebiet – Potenzial und Bedarf

Das Projektgebiet umfasst das Bundesland Steiermark mit einer Waldfläche von über einer Million Hektar. Es gibt mehrere Möglichkeiten das Energieholzpotenzial auf regionaler Ebene zu schätzen. Beispielsweise können Einschlagsstatistiken ausgewertet oder Inventurdaten analysiert werden. Schätzungen mittels Inventurdaten mit Waldwachstumssimulatoren und Schaftkurven- und Biomassefunktionen für die Ausformung wurden z.B. in Kanzian und Kindermann (2013) präsentiert. Da die Auswertung der Einschlagsdaten finanziell günstiger ist, wurde für die Studie diese Me-

thode gewählt. Die Schätzung des Potenzials wurde sowohl für den Projektpartner, die Waldverband Steiermark GmbH (WVB), als auch für den gesamten Einschlag der Steiermark vorgenommen. Insgesamt könnten ca. 1,6 Mio. Srm/a energetisch genutzt werden (Potenzial P1). Von dieser Menge könnten ca. 275.000 Srm/a durch die WVB bereitgestellt werden (Potenzial P2).

Der Bedarf wurde durch die WVB erhoben. In Summe werden pro Jahr 540.000 Schüttraummeter (Srm/a) Waldhackgut verbraucht, wobei 65 Heizwerke in die Analyse einbezogen wurden. Es zeigt sich, dass der Bedarf unterschiedlich auf die Bezirke verteilt ist (Abb. 2). In den forstpolitischen Bezirken Stainach und Liezen liegt der Bedarf nahe am geschätzten Potenzial, während in Leoben, Bruck/Mur und Mürzzuschlag reichlich Spielraum für neue Heizwerke vorhanden ist (Tab. 1).

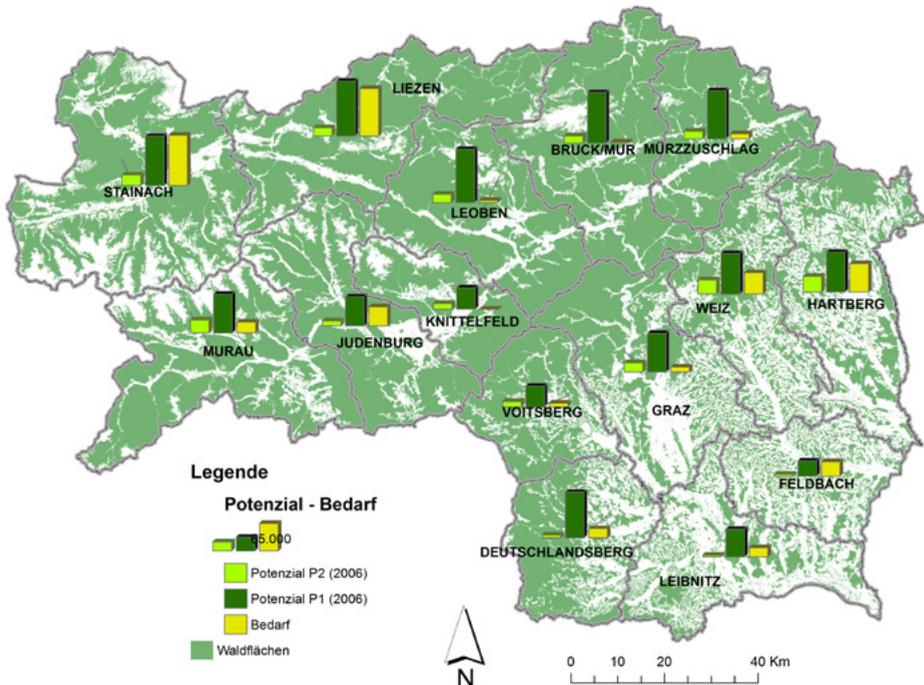


Abbildung 2: Projektregion ist das Bundesland Steiermark mit einer Waldfläche von über 1 Mio. ha. Das Energieholzpotenzial für Szenario P1 und P2 ist dem Bedarf auf Bezirksebene gegenübergestellt.

Tabelle 1: Bedarf und Potenzial Übersicht nach Bezirken getrennt für den gesamten Einschlag (P1) und die Menge welche über die Waldverband Steiermark GmbH (WVB) abgewickelt wird.

Bezirksforstinspektion	Bedarf (Srm/a)	P1 (Srm/a)	P2 (Srm/a)	Anteil WVB (%)
Bruck/Mur	3.000	137.000	17.000	12
Deutschlandsberg	22.350	116.000	7.000	6
Feldbach	34.100	40.000	4.000	10
Graz	12.050	114.000	22.000	19
Hartberg	66.800	130.000	37.000	28
Judenburg	47.800	81.000	12.000	15
Knittelfeld	0	64.000	14.000	22
Leibnitz	21.770	70.000	4.000	6
Leoben	6.100	147.000	20.000	14
Liezen	112.600	150.000	20.000	13
Murau	25.350	122.000	30.000	25
Mürzzuschlag	12.000	132.000	17.000	13
Stainach	134.800	142.000	25.000	18
Voitsberg	8.950	62.000	13.000	21
Weiz	50.900	130.000	34.000	26
Gesamt	558.570	1.637.000	276.000	17

Für die Optimierung ist es notwendig, dass das Potenzial und der Energieholzbedarf georeferenziert vorliegen. Da Informationen über tatsächliche Polterstandorte fehlen, wird das Potenzial durch fiktive Polter repräsentiert. Diese Polter werden in einem Raster von 1x1 km über der Waldfläche angelegt. Das Potenzial eines Bezirkes wird gleichmäßig auf diese Punkte verteilt. Die Bezirke weisen eine Flächengröße von 1.094 km<sup>2</sup> im Mittel auf, wobei die Bandbreite von 579 bis 1.880 km<sup>2</sup> reicht. Im Rahmen einer Modellimplementierung beim Projektpartner können je nach Datenverfügbarkeit die fiktiven Polter durch reale Daten ersetzt werden.

## 2.2 Transport- und Hackkosten

Die Kosten pro Schüttraummeter ergeben sich aus dem Zeitaufwand für die einzelnen Tätigkeiten, dem Stundensatz des Transportfahrzeuges, den Mautkosten und dem Ladevolumen. Zeiten für Laden, Entladen und Stundensätze werden aus vor-

handenen Studien entnommen (Kühmaier u. a. 2007). Die Fahrzeiten und Mautkosten werden mit einer GIS-Analyse auf Basis eines routingfähigen Straßennetzes berechnet. Für jede Kombination - Polter, Lager und Heizwerk - wird die schnellste und nicht die kürzeste Verbindung ermittelt und die jeweiligen Werte wie Zeitbedarf, Distanz und Mautkosten in einer Tabelle gespeichert. Insgesamt ergeben sich für das Projektgebiet ca. 320.000 mögliche Fahrtrouten. Die Kostenmatrix berechnet das Optimierungsprogramm zur Laufzeit nach der Funktion (1) .

$$tc_{ijk} = \frac{(t^L + t^D * 2 + t^U + p^W * t^D * 2) * c^h + c^{toll}}{l^V} \quad (1)$$

$t^L$  = Ladezeit

$t^D$  = Fahrzeit

$t^U$  = Entladezeit

$p^W$  = Anteil der Wartezeit von der Fahrzeit

$c^h$  = Stundenkosten LKW

$c^{toll}$  = Mautkosten für die Strecke

$l^V$  = Ladevolumen

### 2.3 Lagerplätze

Durch die Projektpartner wurden 20 potenzielle Lagerstandorte erhoben. Weitere 95 Standorte wurden über Standortsanalysen im GIS festgelegt (Kühmaier u. a. 2007), um eine größere Wahl an Standorten zu erhalten. In das MIP-Modell fließen fixe und variable Kosten der Lager sowie Kapazitätsgrenzen ein. Die jährlichen Fixkosten pro Lager werden mit 25.700€ und die Variablen mit 1,14€/Srm festgelegt. Als Mindestumschlag werden 10.000 Srm/a und als Obergrenze 38.500 Srm/a unterstellt (Kühmaier u. a. 2007). Der Mindestumschlag soll eine Auslastung garantieren bei der Eröffnung eines Lagers und die Fixkosten rechtfertigen welche sich mit der Investition ergeben. Die Obergrenze für den Umschlag ergibt sich aus der unterstellten Infrastruktur.

## 2.4 Szenarienanalyse

Unsicherheiten im Zusammenhang mit den Eingangsdaten, aber auch die Reaktion des MIP-Modells auf Kostenänderungen z. B. beim Transport, lassen sich über Sensitivitätsanalysen genauer untersuchen. Das Potenzial an Waldhackgut für die Region wurde über Schätzungen festgelegt und zwei Potenzialszenarien P1 und P2 definiert. Die Auswirkungen von Potenzialänderungen auf die Ergebnisse werden durch Änderung der Verfügbarkeit geprüft. So wird für P1 die Verfügbarkeit von 50 bis 100% getestet (Tab. 2). P2 stellt jene Menge dar die der WVB im Moment bereitstellt. Wie sich eine Erhöhung der Menge auf die Ergebnisse auswirkt, wird im Bereich von 100 bis 150% simuliert. Ebenfalls analysiert wurden die Auswirkungen des Mindestumschlages über Lagerplätze einerseits auf die Kosten und andererseits auf die Transportdistanzen. Speziell für den WVB von Interesse sind die zu präferierenden Regionen für Lagerplätze. Sollte das Modell keine Plätze vorschlagen, wird die Eröffnung über eine Mindestanzahl an Lagerplätzen erzwungen (Tab. 2).

Tabelle 2: Szenarien- und Sensitivitätsanalysen in der Übersicht.

Potenzial	Potenzial Verfügbar- keit [%]	Transportkosten [%]	Umschlag über Lager [%]	Mindestanzahl Lager
P1	50-100	80-150	0-50	-
P2	100-150	100-150	0-50	0-7

## 2.5 Modellformulierung und Implementierung

Die Frage des optimalen Versorgungsnetzwerkes mit Lagerplätzen wird über mathematische Optimierung gelöst. Die unterstellte Netzwerkstruktur ist einfach gehalten und besteht aus Poltern, Lagerplätzen und den Heizwerken (Abb. 3).

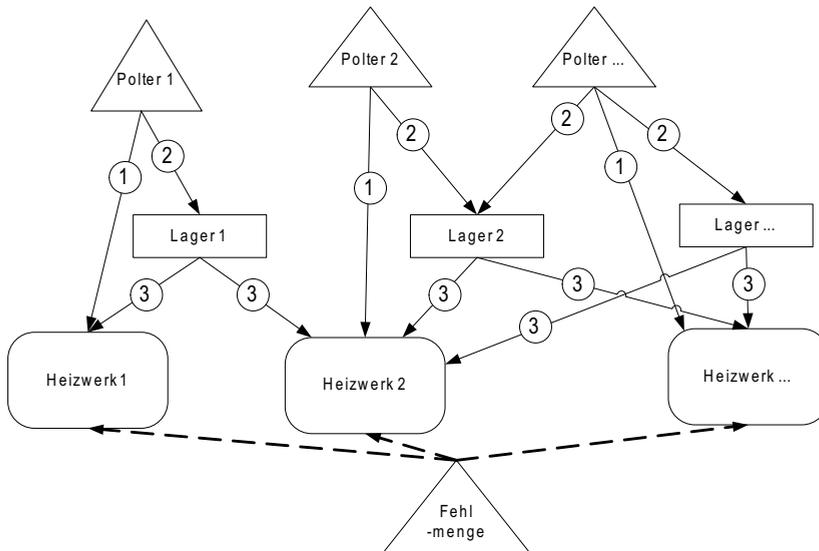


Abbildung 3: Grafische Darstellung des Versorgungsnetzwerkes als Basis für das mathematische Optimierungsmodell.

Das Optimierungsmodell baut auf dem klassischen Transportmodell auf, bei dem der Warenstrom vom Wald zu den Heizwerken bzw. Lagerplätzen kostenoptimiert wird. Zur Abgrenzung der Einzugsgebiete erfolgt eine binäre Zuordnung jeder Quelle zu nur einem Werk bzw. Lager (Kanzian u. a. 2006; Ranta 2005). Sollte das Potenzial aus den Quellen nicht ausreichen, müssen sich die Werke aus anderen Quellen versorgen. Die entstehende Fehlmenge soll unter definierten Substitutionskosten ebenfalls optimal auf die Werke verteilt werden. Die Einbeziehung von Lagern in das Versorgungsnetzwerk erfordert die Berücksichtigung von fixen und variablen Lagerkosten, sowie der Transportkosten vom Lager zum Werk. Zusammen mit dem Transport vom Wald zum Werk, vom Wald zum Lager und den Substitutionskosten für nicht erfüllten Bedarf entsteht die Zielfunktion (2).

$$\begin{aligned}
 \min(z) = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} s_i f_{ij} + \sum_{j \in J} s c_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} c_{it} s_i f_{it} \\
 & + \sum_{i \in I} c_i^{fix} b_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i^{var} x_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} c_{it} x_{it}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Folgende Indexe werden verwendet:

$I$  . . . . Menge an Poltern

$J$  . . . . Menge an Heizwerken

$T$  . . . . Menge an Lagerplätzen

Folgende Entscheidungsvariablen werden verwendet:

$f_{ij}$  . . . . soll Potenzialpunkt ( $i$ ) - Werk ( $j$ ) zugewiesen werden (0/1)

$f_{it}$  . . . . soll Potenzialpunkt ( $i$ ) - Lagerplatz ( $t$ ) zugewiesen werden (0/1)

$b_t$  . . . . soll Lagerplatz ( $t$ ) errichtet werden (0/1)

$x_{tj}$  . . . . Menge an Waldhackgut welche von Lagerplatz ( $t$ ) nach Heizwerk ( $j$ )  
geliefert werden soll [Srm]

$y_j$  . . . . Fehlmenge am Heizwerk ( $j$ ) [Srm]

Weiters finden eine Reihe von Datenvariablen Eingang in das Optimierungsmodell:

$d_j$  . . . . jährlicher Bedarf an Waldhackgut im Heizwerk ( $j$ ) [Srm/a]

$c_{ij}$  . . . . Hack- und Transportkosten vom Potenzialpunkt ( $i$ ) zum Werk ( $j$ ), [€/Srm]

$s_i$  . . . . Energieholzpotenzial an Waldhackgut am Punkt ( $i$ )

$c_{it}$  . . . . Transportkosten vom Potenzialpunkt ( $i$ ) zum Lagerplatz ( $t$ ), [€/Srm]

$c_t^{fix}$  . . jährliche Fixkosten für Lagerplatz ( $t$ ) [€/Srm]

$c_{jt}^{var}$  . . Umschlagkosten am Lagerplatz ( $t$ ) [€/Srm]

$c_{tj}$  . . . . Hack- und Transportkosten vom Lagerplatz ( $t$ ) zum Werk ( $j$ ), [€/Srm]

$sc_j$  . . . . Substitutionskosten für entstehende Fehlmengen [€/Srm]

$v_t^{min}$  . . . Mindestumschlag am Lagerplatz ( $t$ ) [Srm/a]

$v_t^{max}$  . . . Maximaler Umschlag am Lagerplatz  $t$  [Srm/a]

$p$  . . . . Mindestanteil vom gesamten Waldhackgut-Umsatz in der Region, welcher über Lager abgewickelt werden soll [%]

$n$  . . . . . Mindestanzahl von Lagerplätzen die eröffnet werden sollen

Die Nebenbedingung (3) stellt sicher das der Bedarf der Heizwerke erfüllt wird. Jeder Potenzialpunkt darf aber maximal einmal einem Lagerplatz oder Heizwerk zugewiesen werden (4).

$$\sum_{i \in I} f_{ij} s_i + \sum_{t \in T} x_{tj} + y_j = d_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$f_{ij} + f_{it} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4)$$

Die Lagerplätze unterliegen Einschränkungen hinsichtlich ihrer Kapazität. Je nach Anforderungen muss ein Mindestumschlag erfolgen. Dieser ergibt sich aus der Summe an Materialflüssen von einem errichteten Lagerplatz zu den Werken und darf eine definierte Mindestmenge  $v_{min}$  nicht unterschreiten (5).

$$\sum_{j \in J} x_{tj} \geq v_t^{min} b_t \quad \forall t \in T \quad (5)$$

Jede Kategorie von Lagerplatz hat auch eine maximal sinnvolle Kapazität bzw. Umschlagmenge pro Jahr. Wiederum darf die Summe der Materialflüsse von einem errichteten Lager zu den Werken ein definiertes maximales Umschlagsvolumen  $v_{max}$  nicht übersteigen (6).

$$\sum_{j \in J} x_{tj} \leq v_t^{max} b_t \quad \forall t \in T \quad (6)$$

Der Materialfluss von den Lagerplätzen zu den Heizwerken kann in Summe von

einem Lagerplatz nicht größer sein als die aus dem Wald gelieferte Menge. Dazu wird eine Fließgleichgewichtsbedingung eingeführt, die für einen ausgeglichenen Materialfluss sorgt (7).

$$\sum_{i \in I} f_{it} s_i - \sum_{j \in J} f_{tj} x_{tj} = 0 \quad (7)$$

Aus Sicht der Versorgungssicherheit kann es gewünscht sein, dass ein Mindestumschlag über Lagerplätze abgewickelt wird. Dies wird durch eine zusätzliche Nebenbedingung realisiert, welche sicherstellt, dass ein fixer Prozentsatz  $p$  des Mengenstromes über Lagerplätze erfolgt. Die Summe aller Materialflüsse  $f_{tj}$  muss dabei mindestens die Summe des Potenzials der Quellen  $i$  multipliziert mit dem Prozentsatz  $p$  erreichen (8). Neben dem Mindestumschlag kann es gewünscht sein eine bestimmte Anzahl an Lagerplätzen zu eröffnen (9). Nebenbedingung (10) setzt die Entscheidungsvariablen binär und (11) beinhaltet die obligatorische Nichtnegativitätsbedingung.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{tj} \geq \left( \sum_{i \in I} s_i \right) p \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} b_i \geq n \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$f_{ij}, f_{it}, b_i = \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (10)$$

$$x_{tj}, y_j \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (11)$$

Für die Implementierung des MIP-Modells eignen sich Programme für lineare Optimierung. In diesem Fall wurde Xpress-MP mit der Programmiersprache Mosel verwendet. Für die Verarbeitung geografischer Informationen, die Routensuche und Kartenerstellung kam das geografische Informationssystem ArcGIS zum Einsatz. Die Optimierungsergebnisse wurden mit dem Statistikpaket R (R Development Core Team 2011) analysiert. Die Speicherung und Verwaltung der Daten erfolgte in Datenbanken (MS-Access) für effizienten Datenaustausch zwischen den Anwendungen (Abb. 4).

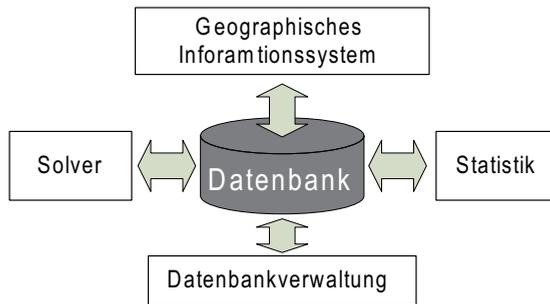


Abbildung 4: Softwaretechnische Umsetzung des Optimierungskonzeptes.

### 3 Ergebnisse

Insgesamt wurden 59 Szenarien für das Netzwerk generiert und mit dem MIP-Modell gelöst. Alle Analysen wurden auf einem PC unter dem Betriebssystem WindowsXP 32-bit mit einer Pentium D 3,4 GHz CPU und einem Arbeitsspeicher von 3,12 GB ausgeführt. Die Herstellung der Ganzzahligkeit benötigt je nach Szenario die meiste Laufzeit mit bis zu 2.177 s pro Szenario.

Ergebnisse des Modells werden anhand gewählter Szenarien vorgestellt. Zuerst erfolgt eine Analyse der Auswirkungen von Verfügbarkeit der festgelegten Potenziale bzw. des Aufkommens auf die durchschnittlich entstehenden Kosten.

Szenario P1, welches aus der Holzeinschlagsmeldung abgeleitet wurde, wird mit den Schritten 50, 75 und 100% gerechnet. Mit sinkender Verfügbarkeit nehmen die durchschnittlichen Kosten um 10% zu von 7,10 auf 7,81 €/Srm, weil die Transportkosten steigen. Das Potenzial P2 beruht auf Angaben des WVB. Da angenommen wird das sich die Menge von P2, welche nur einen Anteil von 17% an P1 hat (Tab. 1), ebenfalls auf die gesamte Fläche verteilt, entstehen höhere Kosten mit 8,07 €/Srm. Aufgrund der ungünstigen Verteilung von P2, dürften die Kosten bei einer Steigerung des Aufkommens um 50% leicht ansteigen von 8,07 auf 8,35 €/Srm (Tab. 3). Der WVB ist eher in Regionen mit geringem Bedarf in höherem Maß tätig. Die Annahme derselben prozentualen Steigerung für alle Bezirke führt gerade in Regionen mit geringerem Bedarf zu höheren Mengen. Diese müssen dann über größere Distanzen in Nachbarregionen mit höherem Bedarf transportiert werden.

Tabelle 3: Einfluss der Potenzialszenarien und Verfügbarkeit auf die durchschnittlichen Kosten wenn kein Mindestumschlag über und keine Mindestanzahl von Lagerplätze(n) festgelegt wird.

Potenzialszenario	Verfügbarkeit (%)	Kosten (EUR/Srm)
P1	50	7,81
	75	7,31
	100	7,10
P2	100	8,07
	110	8,11
	120	8,16
	130	8,22
	140	8,27
	150	8,35

Ausgehend vom Wunsch des Projektpartners eine Infrastruktur von Lagern aufzubauen, ergibt sich bei der Vorgabe Potenzial P2 und mindestens sieben Standorte zu eröffnen folgendes Bild (Abb. 5): Die sieben Standorte 32, 90, 98, 101, 109, WVB\_10 und WVB\_19 sollen eröffnet werden, wobei sich die optimalen Versorgungsgebiete im Wesentlichen um die Standorte erstrecken. Die Lager sollten im optimalen Fall die eingezeichneten Heizwerke mit der festgelegten Jahresmenge beliefern. So wäre dies vom Standort 32 aus: 600 Srm/a nach Birkfeld 1, 1.700 Srm/a nach Kapfenberg, 4.400 Srm/a nach Langenwang 2 und 3.400 Srm/a nach Vorau. Auffällig ist, dass nahezu alle Lager nur den Mindestumschlag von 10.000 Srm/a abwickeln sollten. Das heißt, jeder zusätzliche Umschlag würde die resultierenden durchschnittlichen Kosten von 9,30 €/Srm beim Werk weiter erhöhen.

An den Lagern entstehen Kosten von 3,70 bis 4,60 €/Srm für die Zulieferung aus dem Wald und von 3,10 bis 4,60 €/Srm für die Auslieferung an die Werke. Der Umschlag über ein Lager verursacht im Schnitt Kosten von 11,50 €/Srm vom Wald bis zum Werk, wobei die Transportkosten 68% ausmachen (Abb. 6).

Dies zeigt, wie transportkostenintensiv die Bereitstellung von Waldhackgut sein kann. Die Grenzkosten für die Belieferung bleiben bis zu einer kumulierten Menge von 33.000 Srm/a unter der Marke von 4,00 €/Srm (Abb. 7). Die Menge von 33.000 Srm/a müsste in einem Umkreis von rund 15 bis 17 km verfügbar sein (Abb. 8).

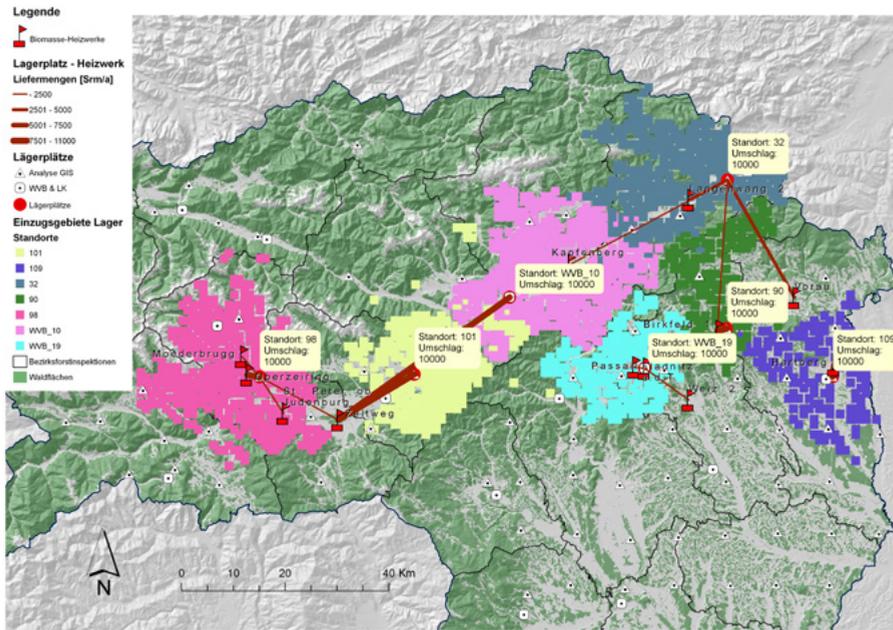


Abbildung 5: Einzugsgebiete für Lagerplätze wenn mindestens 7 eröffnet werden und als Potenzial P2 unterstellt wird. Der Umschlag je Standort ist in Srm/a angegeben.

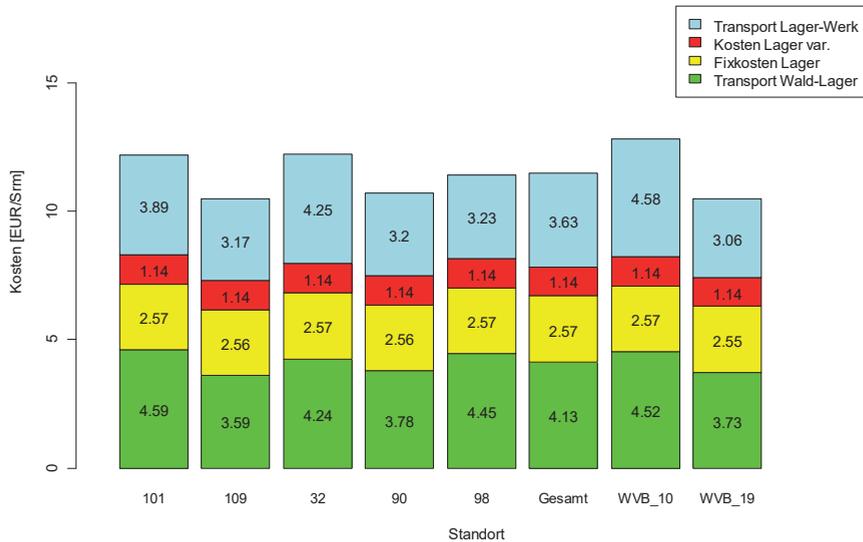


Abbildung 6: Kosten für Transport und Lagerung für die einzelnen Lagerplätze.

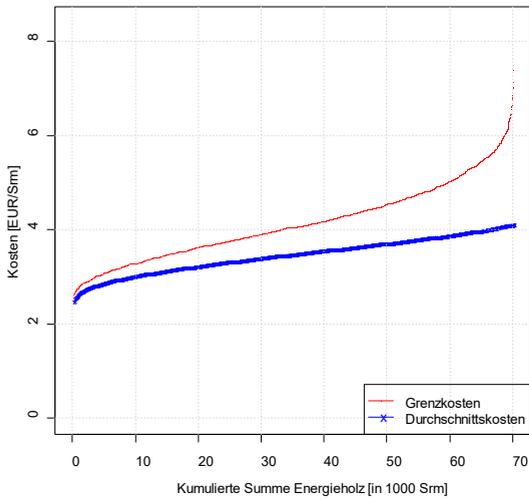


Abbildung 7: Grenz- und Durchschnittskosten für den Transport vom Wald zum Lager mit mindestens 7 Lagerplätzen und Potenzial P2.

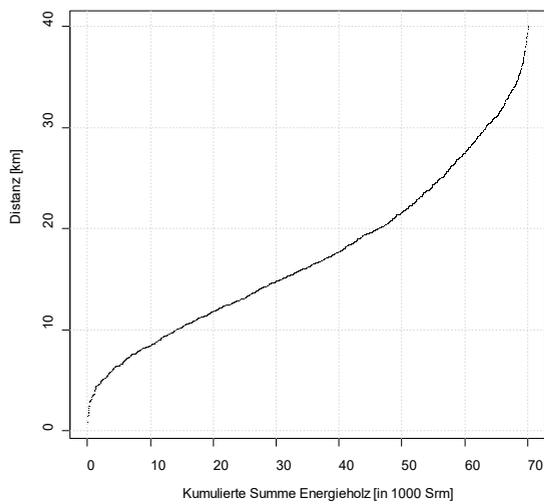


Abbildung 8: Energieholzpotenzial in Abhängigkeit von der Transportdistanz vom Wald zum Lager.

Die Vorgabe das 30% des jährlichen Umschlages über Lager abgewickelt werden sollen, führt zur Eröffnung von vier Lagerstandorten im Osten der Region welche einen Umschlag von 15.000 bis 24.000 Srm/a je Standort haben sollten (Abb. 9). Die mengengewichteten mittleren Belieferungsdistanzen der Lager liegen zwischen 19 und 23 km, wobei 95% des Energieholzes innerhalb von maximal 34 bis 39 km erreichbar sind. Die mengengewichteten Distributionsdistanzen fallen mit 7 bis 29 km sehr unterschiedlich aus. Für jeden Lagerplatz werden die entsprechenden Kosten berechnet. So muss für den Transport zum Lager mit Kosten zwischen 4,40 und 4,90 €/Srm gerechnet werden. Die Belieferung der Werke von den Lagerplätzen aus kostet zwischen 3,20 und 4,00 €/Srm. Die Fixkosten, geteilt durch den Umschlag, liegen bei 1,10 bis 1,70 €/Srm (Abb. 10).

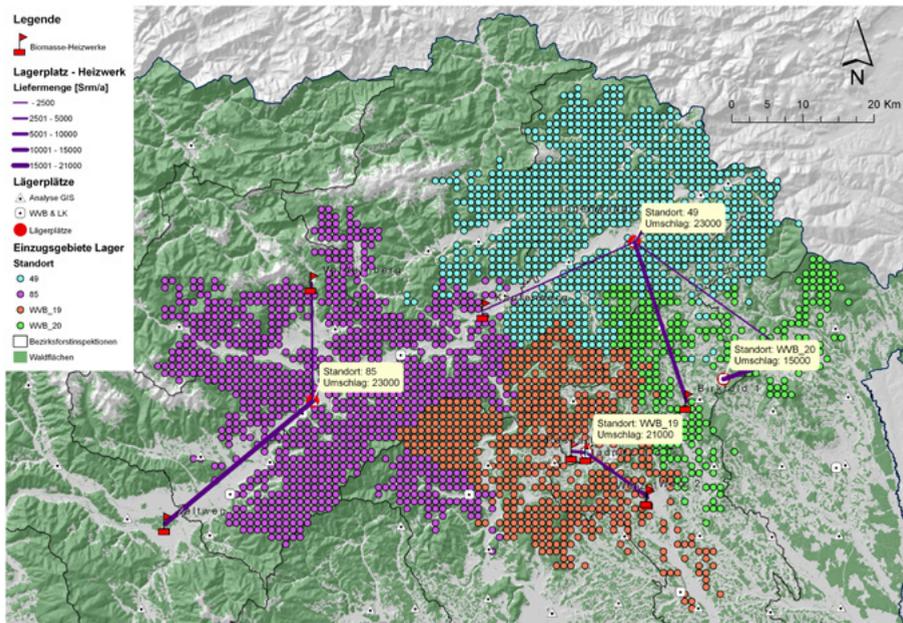


Abbildung 9: Visualisierung der kostenoptimalen Einzugsgebiete für Lagerplätze wenn mindestens 30% des jährlichen Umschlages über Lager erfolgen sollen. Der Umschlag je Standort ist in Srm/a angegeben.

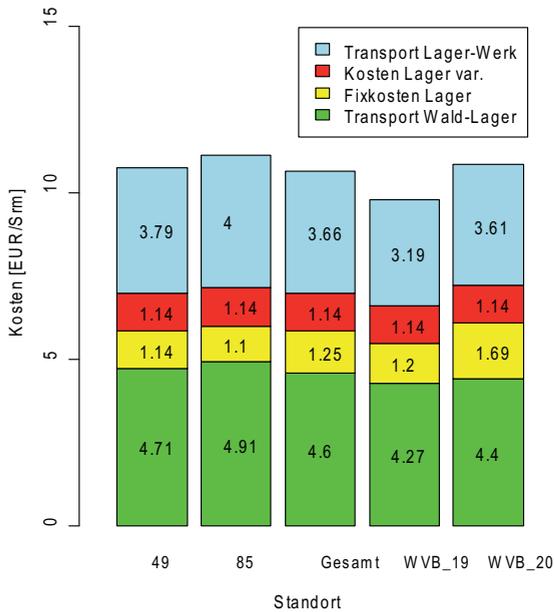


Abbildung 10: Kosten je Standort für die Be- und Auslieferung, den variablen und fixen Kosten für das Lager bezogen auf den umgeschlagenen Schüttraummeter.

Je nach Szenario belaufen sich die Transport- und Hackkosten auf 10,70 bis 11,50€/Srm. Den größten Kostenanteil nimmt der Transport mit 68% bis 78% ein. Die optimalen mittleren Belieferungsdistanzen der Lagerplätze vom Wald aus betragen zwischen 20 und 22 km und ändern sich kaum bei den analysierten Szenarien. Die Auslieferungsdistanzen von den Lagerplätzen zu den Werken reagieren sehr wohl in Abhängigkeit der Eingangsdaten. Hier ist die Bandbreite der optimalen Distanzen größer mit Werten von 18 bis 55 km.

Wie bereits Eriksson und Björheden (1989) zeigten, verursacht der Umschlag über Lager höhere Kosten. Erst wenn die direkten Transportkosten im Verhältnis zum Transport Lager Werk zunehmen, bringt der Umschlag Ersparnisse. Bei einem Anstieg um 20% sollten bereits 80.000 Srm/a über Lager geliefert werden (Abb. 11).

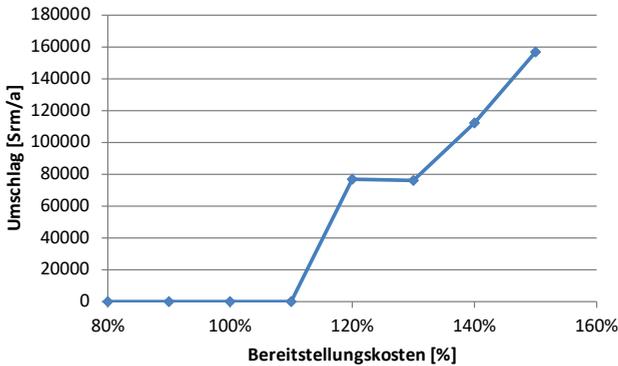


Abbildung 11: Sensitivitätsanalyse am Beispiel der direkten Transport-/Bereitstellungskosten und deren Auswirkungen auf den Umschlag über Lager. So sollten ab den 1,2 fachen Transportkosten vom Wald zum Werk oder Lager ca. 77000 Srm/a über Lagerplätze abgewickelt werden.

Über das MIP-Modell kann eindeutig gezeigt werden, dass steigende Verfügbarkeit Einsparungen bei den Distanzen bringen würde. Im Falle einer direkten Versorgung sinkt die mengengewichtete mittlere Distanz über alle Werke von 26,8 auf 14,7 km. Die 95%-Perzentile nimmt von 71,8 auf 40,5 km ab, das heißt vor allem für die Werke mit hohem Bedarf reduziert sich der Transportaufwand überproportional. Der Median liegt unter der mengengewichteten mittleren Distanz. Das würde bedeuten, dass das Potenzial mit dem Abstand zu den Werken überproportional zunimmt (Abb. 12).

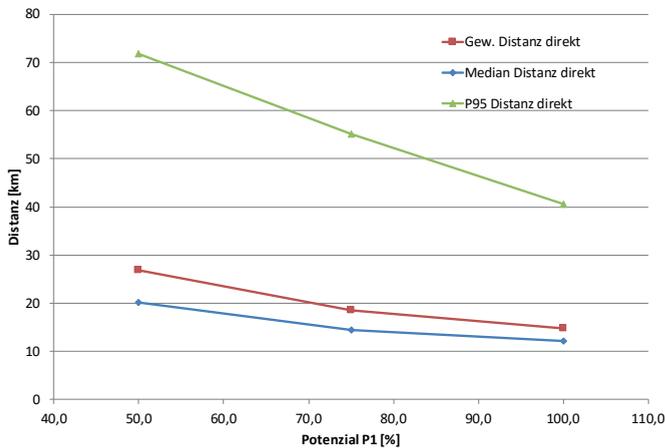


Abb. 12: Sensitivitätsanalyse – Auswirkungen der Potenzialverfügbarkeit in Prozent auf die Transportdistanz vom Wald zum Werk

## 4. Schlussfolgerungen

Der Aufbau von Versorgungsnetzwerken und vor allem die Frage der optimalen Allokation von Energieholzlagern ist komplex, da viele Faktoren und Parameter eine Rolle spielen. Im Gegensatz zur Betrachtung von Bereitstellungsketten, welche linear verlaufen, handelt es sich um ein Netzwerk aus Wald-, Lager- und Heizwerk-Standorten. Als Basis für die Standortentscheidung wurde ein mathematisches (MIP-) Optimierungsmodell aufgestellt und in Kombination mit einem GIS eingesetzt. Anhand einer Projektregion konnte die Funktionsfähigkeit des präsentierten Modells auf regionaler Ebene mit einem großen Datenpool demonstriert werden.

Die Einbeziehung von Lagern ins Liefernetzwerk führt gegenüber einer Direktversorgung zu höheren Kosten, erhöht aber die Versorgungssicherheit wenn Witterung oder andere Einschränkungen die Holzbereitstellung beeinträchtigt. Wenn diese Zusatzkosten in Kauf genommen werden, hängt die optimale Lage vom verfügbaren Potenzial, Bedarf in den Regionen und von den Transportkosten ab.

Die Anwendung von Optimierungsmodellen bietet eine wesentliche Unterstützung bei der Planung von Versorgungsnetzwerken. Im Hinblick auf die Umsetzung sollten die Eingangsdaten und -parameter so konkret als möglich ausgearbeitet werden. So sind für jeden Standort die individuell entstehenden Kosten zu kalkulieren und die möglichen Lieferanten und Kunden mit den Angebots- und Bedarfsdaten zu erfassen. Regionale Unternehmer und deren Maschinenausstattung sowie Kostensätze müssen ebenfalls bei der Kalkulation der Bereitstellungskosten beachtet werden.

Die Planung eines Versorgungsnetzwerkes gestaltet sich komplex, da es viele Interaktionen gibt. So gibt es ein theoretisch verfügbares und daraus abgeleitet ein wirtschaftlich nutzbares Energieholzpotenzial. Um das wirtschaftlich nutzbare Potenzial zu schätzen, müssen die Kosten und Erlöse bekannt sein. Die Kosten wiederum hängen von den eingesetzten Bereitstellungsketten und Transportdistanzen ab. Umgekehrt hat die Dichte und Verteilung des verfügbaren Potenzials in Kombination mit dem Bedarf einen Einfluss auf die Transportdistanzen. Je größer ein Kraftwerk desto größer wird das Einzugsgebiet und damit die Transportdistanz. Zunehmende Distanz bedeutet auch höhere Transport- bzw. Versorgungskosten (Asikainen u. a. 2001).

Generell ist das Modell sehr einfach gehalten, zeigt aber großes Potenzial. Für eine Weiterentwicklung stehen viele Möglichkeiten offen. Ein Schwachpunkt des vorgestellten Modells stellt die Abbildung der Versorgungssicherheit dar. Zwar wurde bei diversen Szenarien die Eröffnung von Lagerplätzen über Nebenbedingungen (8) oder (9) erzwungen, aber es ergab sich eine ungleichmäßig Verteilung der Plätze. Damit wären die Auslieferungsdistanzen für einen Teil der Heizwerke zu hoch ausgefallen. Eine Weiterentwicklung unter Berücksichtigung von Perioden (Monate) mit eingeschränkter Verfügbarkeit bzw. Zugänglichkeit der Potenzialpunkte in Abhängigkeit von Schneelage wäre denkbar. Bedarfsspitzen im Winter könnten abgebildet

und die erforderlichen Lagerstände für die Lagerplätze simuliert werden.

## Danksagung

Diese Studie ist ein Teil des Projektes „Optimierung der regionalen Warenströme (Qualitäten, Transport, Aufkommen, etc.) über Biomasse-Logistikzentren“ (Nr.: 812780) welche durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft gefördert wurde. Besonderer Dank geht an Dr. Monika Kanzian für die Durchsicht des Manuskriptes und an die Gutachter für die konstruktiven Kommentare.

## Literatur

- Andersson, G., Asikainen, A., Björheden, R., Hall, P. W., Hudson, J. B., Jirjis, R., Mead, D. J., Nurmi, J. und Weetman, G. F. (2002). „Bioenergy from Sustainable Forestry - Guiding Principles and Practice“. In: Hrsg. von J. Richardson, R. Björheden, P. Hakkila, A. T. Lowe und C. T. Smith. Kluwer Acad. Publ. Kap. Production of Forest Energy, S. 49–123.
- Asikainen, A., Ranta, T. und Laitila, J. (2001). „Large-scale forest fuel procurement“. In: Woody Biomass as an Energy Source – Challenges in Europe. Hrsg. von P. Pelkonen, P. Hakkila, T. Karjalainen und B. Schlamadinger. Bd. 39. European Forest Institute, S. 73–78.
- De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J. und Orshoven, J. V. (2014). „Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review“. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 31, S. 657–670. ISSN: 1364-0321. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.036>.
- Eriksson, L. O. und Björheden, R. (1989). „Optimal storing, transport and processing for a forest-fuel supplier“. In: European Journal of Operational Research 43.1, S. 26–33.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M. und Lundgren, J. T. (2004). „Supply chain modelling of forest fuel“. In: European Journal of Operational Research 158.1, S. 103–123. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90406-2.
- Kanzian, C., Kühmaier, M., Zazgornik, J. und Stampfer, K. (2013). „Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization“. In: Biomass and Bioenergy 58, S. 294–302. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.10.009.
- Kanzian, C. (2008). „Mitteleuropas größtes Biomasse-Kraftwerk stellt sich vor“. In: Wald und Holz 10, S. 39–42.
- Kanzian, C., Holzleitner, F., Kindermann, G. und Stampfer, K. (2006). Regionale Ener-

- gieholzlogistik Mittelkärnten. Techn. Ber. Institut für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, S. 133.
- Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K. und Ashton, S. (2009). „Regional Energy Wood Logistics - Optimizing Local Fuel Supply“. In: *Silva Fennica* 43.1, S. 113–128. URL: [www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf431113.pdf](http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf431113.pdf).
- Kanzian, C. und Kindermann, G. (2013). „Abschätzung des Energieholzpotenzials über nationale Inventurdaten am Beispiel Niederösterreichs“. In: *Austrian Journal of Forest Science* 130, S. 3–24.
- Katzensteiner, K. und Nemestothy, K. P. (2006). „Energetische Nutzung von Biomasse aus dem Wald und Bodenschutz - ein Widerspruch?“ In: *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 74, S. 1–10.
- Kühmaier, M., Kanzian, C., Holzleitner, F. und Stampfer, K. (2007). Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Techn. Ber. Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, S. 283.
- R Development Core Team (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. ISBN 3-900051-07-0. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Ranta, T. (2005). „Logging residues from regeneration fellings for biofuel production - a GIS-based availability analysis in Finland“. In: *Biomass-and-Bioenergy* 28(2), S. 171–182. DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.08.010.
- Ranta, T. (2002). „Logging residues from regeneration fellings for biofuel production - A GIS-based availability and supply cost analysis“. Diss. Lappeenranta University of Technology, S. 180.
- Rauch, P. und Gronalt, M. (2010). „The Terminal Location Problem in the Forest Fuels Supply Network“. In: *International Journal of Forest Engineering* 21.2, S. 32–40.
- Strimitzer, L. (2015). *Holzströme in Österreich. Holz: Rohstoff - Lebensgrundlage - Erneuerbare Energie*. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency. URL: [http://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/energieholz/holzstr\\_oesterr.html](http://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/energieholz/holzstr_oesterr.html).
- Vahrenkamp, R. und Mattfeld, D. C. (2007). *Logistiknetzwerke : Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. 978-3-8349-0541-3 3-8349-0541-0. Gabler, S. 337.

