



THEKLA

EVIDENZBASIERTE RICHTLINIEN FÜR DIE RUNDHOLZVERARBEITENDE INDUSTRIE
DURCH **T**RANSPORTSIMULATION UND - OPTIMIERUNG DER **H**OLZLIEFERKETTE
FÜR EINE **E**FFIZIENTE UND **K**OOPERATIVE **L**OGISTIK UND DEREN **A**NALYSE

COLLECTIVE RESEARCH
FFG PROJEKTNUMMER: 868013

UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN, INSTITUT FÜR PRODUKTIONSWIRTSCHAFT UND LOGISTIK
PETER RAUCH, CHRISTOPH KOGLER, ALEXANDER STENITZER

KARL FRANZENS UNIVERSITÄT GRAZ, INSTITUT FÜR PRODUKTION UND LOGISTIK
MARC REIMANN, SOPHIE SCHIMPFHUBER, CLEMENS EICHBERGER

AUSTROPAPIER
HANS GRIESHOFFER

IM AUFTRAG VON:
FACHVERBAND DER PAPIERINDUSTRIE

IN ZUSAMMENARBEIT MIT:
FORST-HOLZ-PAPIER (FHP)

WIEN UND GRAZ, MAI 2020

VORWORT

Holz ist der einzige natürliche und nachhaltig zur Verfügung stehende Rohstoff in Österreich (BMNT 2018). Holzbasierte Unternehmen erzielen hohe Exportraten, über 87% für Papierindustrie bzw. über 70% für Holzindustrie (Austropapier 2019, Fachverband der Holzindustrie 2019) und bieten 300.000 Arbeitsplätze in der Kategorie Green-Jobs (FHP 2019).

Die österreichische Forst- und Holzindustrie benötigt Innovationen für eine nachhaltige und effiziente Holzversorgung, um international wettbewerbsfähig zu bleiben. Zusätzlich führt der Klimawandel zu immer häufiger auftretenden, drastischen Wetterkapriolen (Stürme, Eisbruch, Nassschnee, Trockenperioden), die gemeinsam mit nachfolgenden Schäden durch Forst-Kalamitäten (v.a. Borkenkäfer) immer höhere Schadholzmengen verursachen. Im Jahr 2018 betrug der Schadholzanteil aufgrund von Borkenkäfer- und Sturmschäden bereits mehr als 50% des Gesamteinschlags in Österreich (BMNT 2019). Neben den Kalamitätsereignissen führen Lieferkettenrisiken wie fehlende Transportkapazität (Verfügbarkeit von Waggonen bei Rail Cargo Austria, Engpass Kran-LKW Fahrer), technische- und natürliche Risiken zu langen Liefer- (lead times) sowie Wartezeiten (queuing times) der LKWs bei der Industrie und stellen komplexe Logistikherausforderungen dar, die zu hohen Kosten führen.

Darum werden vor dem Hintergrund des Erhalts der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit der Branche der rundholzverarbeitenden Industrie in Österreich im vorliegenden Projekt innovative Logistik- und Supply-Chain Strategien evidenzbasiert evaluiert. Zur Untersuchung der Ausgangssituation wurden Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) in der Holzlieferkette erhoben. Darauf aufbauend wurden im Zuge einer partizipativen Strategieentwicklung gemeinsam mit Praktikern folgende, innovative Strategien für weitergehende Analysen ausgewählt: (1) Multimodalität durch Umschlag von Rundholz von Straße auf Schiene, (2) Umladen von Kran-LKW auf Sattelaufleger, (3) Steuerung der Transportmengen vom Forst über Lager zur Industrie und (4) Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen, wobei auch der Einfluss einer Tonnageerhöhung auf die jeweiligen Strategien evaluiert wurde.

Um diese Strategien evidenzbasiert zu evaluieren, wurden Szenarien mithilfe von computergestützten Modellrechnungen quantitativ analysiert und anschließend partizipativ mit Branchenvertretern umfassend bewertet. Neben dem Einsatz der wissenschaftlichen Methoden Simulation und Optimierung zur evidenzbasierten Entscheidungsunterstützung stand vor allem die intensivierte Vernetzung der Branchenvertreter durch Workshops, Diskussionen und Interviews im Fokus. Die in diesem Projekt gewonnene Expertise wurde in Form einer „Richtlinie zur Verbesserung der Versorgungssicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit der Wood Supply Chain“ anwendungsfreundlich aufbereitet, um eine breite praktische Umsetzung in der Branche zu erreichen.

Für die wertvolle Unterstützung des Projektes sei an dieser Stelle den Mitgliedern der FHP Arbeitskreise „Holzfluss und Logistik“ sowie „Forschung und Normung“, der Steering Group THEKLA und allen weiteren Praktikern der Holzlieferkette, die zu Interviews zur Verfügung standen, herzlich gedankt. Weiters gilt der Branchenplattform FHP sowie der FFG ein besonderer Dank für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

INHALT

1. ANALYSE DER STRATEGISCHEN AUSGANGSSITUATION UND RAHMENBEDINGUNGEN	4
AGGREGIERTE ERGEBNISSE	6
ERGEBNISSE IM DETAIL	7
2. PARTIZIPATIVE STRATEGIEENTWICKLUNG	9
ERGEBNISSE DER FRAGEBÖGEN	10
ABGELEITETE STRATEGIEN	11
3. SIMULATIONSMODELL BAHN-TERMINAL.....	15
DISKRETES EVENT-SIMULATIONSMODELL.....	15
FALLSTUDIE GROBREIFLING	20
SZENARIENDESIGN	21
TRANSPORTPLANUNGSTABELLEN.....	22
EINSPARUNG VON LKW-FAHRTEN UND CO ₂ EMISSIONEN DURCH TONNAGEERHÖHUNG	35
ZUSAMMENGEFASSTE ERGEBNISSE	36
4. SIMULATIONSMODELL LKW-TERMINAL	37
DISKRETES EVENT-SIMULATIONSMODELL.....	37
SZENARIENDESIGN	41
SIMULATIONSEXPERIMENTE MITTELS HEURISTIK.....	42
SIMULATIONSEXPERIMENTE MITTELS VOLLSTÄNDIGER ENUMERATION	46
EINSPARUNGSPOTENTIALS	52
ZUSAMMENGEFASSTE ERGEBNISSE	58
5. OPTIMIERUNGSMODELLE ZUR LIEFERKETTENKOORDINATION (KFU GRAZ)	59
PLANUNGSMODELL DER HOLZLIEFERKETTE	59
FALLSTUDIE MODELLREGION KÄRNTEN/STEIERMARK	62
ERGEBNISSE: BASISMODELL – STATUS QUO	63
ZUSAMMENGEFASSTE ERGEBNISSE	68
6. RICHTLINIE ZUR VERBESSERUNG DER VERSORGUNGSSICHERHEIT, EFFIZIENZ UND NACHHALTIGKEIT	69
LOGISTIKEMPFEHLUNGEN FÜR DEN UMSCHLAG VON HOLZ MITTELS BAHN-TERMINAL (BOKU WIEN)	70
LOGISTIKEMPFEHLUNGEN FÜR DEN HOLZUMSCHLAG MITTELS LKW-TERMINAL (BOKU WIEN)	80
HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUR LIEFERKETTENKOORDINATION (KFU GRAZ)	88
7. VERZEICHNISSE UND QUELLEN.....	90
TABELLENVERZEICHNIS	90
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	91
QUELLEN.....	92

1. ANALYSE DER STRATEGISCHEN AUSGANGSSITUATION UND RAHMENBEDINGUNGEN

Zur Untersuchung der Rahmenbedingungen, Problemdarstellung und Umfeldanalyse wurde eine Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) durchgeführt. Als Vergleichsgrößen wurden einerseits die Lieferketten anderer inländischer Branchen und andererseits Holzlieferketten anderer Länder (Skandinavien, Kanada) herangezogen. Die Ergebnisse der SWOT-Analyse beruhen auf 17 speziell für diesen Zweck durchgeführten, strukturierten Interviews mit verschiedenen Akteuren der Holzlieferkette sowie ergänzende (Interview-) Ergebnisse anderer Studien und Literaturrecherchen.

Zur Durchführung der Befragung wurde ein strukturierter Interviewleitfaden entwickelt, der (1) über die Zielsetzung des Projektes aufklärt und allgemeine Informationen zur Kategorisierung der Interviewpartner einholt, (2) die jeweilige Lieferkette betrachtet, (3) die eigentliche SWOT-Analyse und (4) Möglichkeiten der Lieferkettenkoordination und anderer Verbesserungspotentiale evaluiert (siehe Tabelle 1). Zur Analyse der Lieferkette (2) wurden Fragen zu Kunden- und Lieferanten (Struktur, Kommunikation, Anforderungen) und dem Einfluss in der Lieferkette (Macht, Verhandlungsstärke, Netzwerk, Veränderungen im Zeitverlauf) gestellt. Die internen Stärken bzw. Schwächen bzw. externen Chancen und Risiken (3) wurden frei von den Interviewpartnern genannt, wobei vom Interviewer gegebenen Falls nachgefragt oder durch folgende Fragen weitere Ausführungen angeregt wurden:

- Stärken (intern): Worin liegen die besonderen Stärken des Gesamtprozesses (vom Vertrag bis zur Verbuchung der Zahlung)? Was sind die Vorteile der aktuellen Holzlieferkette? Was wird gut gemacht? Was sehen andere als Vorteile?
- Schwächen (intern): Worin liegen die besonderen Schwächen (Probleme) des Gesamtprozesses (vom Vertrag bis zur Verbuchung der Zahlung)? Was sind die Nachteile der Holzlieferkette? Was läuft schief? Was sehen andere als Nachteile? Welche wesentlichen Informationen fehlen Ihnen zur optimalen Aufgabenerfüllung? Kommen Informationen zu spät (warum)? Gibt es Probleme aufgrund des Bullwhip-Effektes?
- Chancen (extern): Welche Trends beeinflussen die Holzlieferkette? Welche Chancen ergeben sich daraus? Welche technischen (sozi-kulturellen, politisch-rechtlichen, makroökonomischen) Veränderungen stehen bevor? Gibt es Möglichkeiten für eine Reduktion von Prozessen? Wo gibt es noch ein Potential für die Verbesserung der Prozesse?
- Risiken (extern): Steigt der (international) Wettbewerbsdruck? Welche Barrieren stehen Veränderungen im Weg? In welche Richtung entwickeln sich Gesetzesanpassungen? Welche Veränderungen der Arbeitswelt, der Produkte oder Services bergen Gefahr?

Lieferkettenkoordination: Beurteilen Sie die nachfolgenden Themen anhand Ihrer aktuellen Lieferkette:	Lieferanten					Kunden				
	Hoch Viel		Gering Wenig			Hoch Viel		Gering Wenig		
1 Zugriff auf Planungsinformationen	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2 Informationen zu Lagerbestand/-mix	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3 Weitergabe von Informationen zu Störgrößen/Risiken	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4 Automatisierter Datenaustausch (ERP System)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5 Prozesskenntnis/Transparenz (gut / prekär)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
6 Gemeinsame Kennzahlen (Ziele, Leistungsanreize)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7 Gemeinsame Standards/Richtlinien	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
8 Gemeinsame Projekte	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9 Interaktionshäufigkeit	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
10 Vertrauen	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
11 Flexibilität (Anpassungs-/Reaktionsgeschwindigkeit, Individuell)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
12 Resilienz (Robust gegen Störeinflüssen, Risikomanagement)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
13 Geschäftsklima (gut / prekär)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
14 Konfliktmanagement (gut / prekär)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Achtung: Tausch der Bewertungskategorien, um Schulnotensystem beibehalten zu können	Gering Wenig		Hoch Viel			Gering Wenig		Hoch Viel		
15 Abhängigkeit	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
16 Lagerbestand	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17 Verbesserungspotentiale	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
18 Preisänderungen	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Verbesserungspotentiale: Schätzen Sie die Eignung folgender Konzepte und Maßnahmen zur Verbesserung der Lieferkettenkoordination ein:						Hoch Viel		Gering Wenig		
19 Zusammenarbeit in Verbänden (Richtlinien, Workshops, Standards, Projekte)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
20 Zusammenschluss von Unternehmen entlang der Lieferkette (Vorwärts-/Rückwärtsintegr.)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
21 Langfristige Verträge	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
22 Lernen (imitieren) von Erfolgsbeispielen (Skandinavien, Kanada)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
23 Intensivierter Datenaustausch (Digitalisierung)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
24 Einsatz von Optimierungs- und Simulationsmodellen	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
25 Gesetzliche Regelungen (Nachhaltigkeit, Preise, Transporttonnage)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
26 Computergestützte Steuerung der Transportmengen vom Forst über Lager zur Industrie	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
27 Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
28 Multimodalität durch Umladen des Rundholzes von Straße auf Schiene	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
29 Umladen von Kran-LKW auf Sattelzug	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
30 Rückladekonzepte (z.B. standardisierte faltbare Container)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
31 Gemeinsames Lieferkettenmanagement	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Tabelle 1: Fragebogen.

Es wurde eine Kategorisierung in 9 Akteursgruppen vorgenommen: Forst Kleinwald, Forst Großwald, Holzhandel, Transport (LKW und Bahn), Säge, Platte, Papier, Energie und Andere (Interessenvertretung, Behörden). Dies ermöglichte es, die anschließenden Analysen auf eine möglichst breite und diverse Meinungsbasis zu stützen, in der alle beteiligten Interessensgruppen vertreten sind. In den letzten Interviews wurde deutlich, dass sich die überwiegende Mehrheit der gesammelten Argumente bereits wiederholten, was als Indiz für eine ausreichende Stichprobengröße für den qualitativen Teil der SWOT-Analyse gewertet werden kann.

Aggregierte Ergebnisse

Vielfach wurde (I1) die Zentrale Lage von Österreich in Europa bzw. die traditionell guten Handelsbeziehungen zu Nachbarstaaten eines Transitlandes aber auch (I2) die Rechtsicherheit und (I3) die Topologie von Österreich angesprochen. Diese Argumente wurden als Ausgangslage (Initial Situation = I1-I3) dokumentiert. Die Ergebnisse der SWOT-Analyse sind nach Wichtigkeit gereiht in einer verdichteten Form in Tabelle 2 dargestellt. Detaillierte Argumente für die internen Stärken und Schwächen finden sich in Tabelle 3 bzw. für externe Chancen und Risiken in Tabelle 4.

Interne Stärken (Internal Strengths = S)	Interne Schwächen (Internal Weaknesses = W)
S1. Hohes Holzpotential S2. Gute Infrastruktur S3. Kurze Transportdistanzen S4. Partnerschaften und Netzwerke S5. Erfahrenes Logistikpersonal S6. Hohe Lagerkapazität bei Forst und Industrie S7. Innovationen in einzelnen Bereichen	W1. Mangelndes Risikomanagement W2. Mangelnde Abstimmung W3. Insellösungen EDV-Bereich W4. Unattraktiver Bahntransport W5. Fachkräftemangel W6. Innovationsresistenz W7. Auslastungsspitzen Transport W8. Kleinstrukturierte Branche
Externe Chancen (External Opportunities = O)	Externe Risiken (External Threats = T)
O1. Digitalisierung O2. Innovative Logistikkonzepte O3. Technische Entwicklung O4. Wirtschaftsfreundliche politische Rahmenbedingungen O5. Reform und Marktöffnung des Bahnwesens in der EU	T1. Sinkende Versorgungssicherheit T2. Frächtersterben T3. Standortnachteile im LKW-Transport T4. Strategie Rail Cargo T5. Hohe Barrieren für Logistiktools T6. Feindbild LKW

Tabelle 2: Aggregierte SWOT Matrix.

Ergebnisse im Detail

Interne Stärken (Internal Strengths = S)	Interne Schwächen (Internal Weaknesses = W)
S1. Hohes Holzpotential: • Hohe Bewaldungsdichte • Holzmobilisierung im Kleinwald (Vereine, Gemeinschaften) • Effizienter Großwald (prozessoptimiert, effiziente Ernte) • Flexibler Rohstoff (Ausformung, Qualität veränderbar) • Ganzjährige Produktion in Österreich möglich (Regionen wechseln)	W1. Mangelndes Risikomanagement • Fehlende Resilienz • Keine Weitergabe von Risiken und Störgrößen • Reaktives Supply Chain Management: wenig Planung, viele operative Not-/Sonder-/Einzelmaßnahmen dadurch viele Interaktionen (Telefonanrufe) • Mengenschwankungen aufgrund kalamitätsbedingter Über- bzw. wetterbedingter Unterversorgung
S2. Gute Infrastruktur • Waldgebiete mit gut gewarteten Forststraßen erschlossen • Bahnnetz dichter als im Ausland	W2. Mangelnde Abstimmung • Innerhalb der Branche (durch weit verteiltes Netzwerk) • Hoher Leerfahrtenanteil LKW (durch Forst-LKWs, Tourenplanung) / Waggon Synergien werden nicht genutzt • Selbstoptimierung: Konkurrenz Forst/Säge • Kein gemeinsames Lagermanagement, Werksabmaß, Planung, wenig gemeinsamen Kennzahlen, Ziele, Leistungsanreize, Projekte zur Weiterentwicklung • (Automatisierte) Informations-/Datenweitergabe fehlt • Langsamer Informationsfluss: Entscheidungen werden vom falschen Akteur getroffen, ineffizienter Transport
S3. Kurze Transportdistanzen • Überwiegend regionale Transporte bedingt durch kleinstrukturierte Branche • Regionale Transporte generieren Arbeitsplätze in strukturschwachen Regionen	W3. Insellösungen im EDV-Bereich • FHP Datenformat muss weiterentwickelt werden • Lieferschein, Abrechnung, digitale Prozessbrüche • Vorhandene Informationssysteme werden nicht angenommen/verwendet/verknüpft • Analoge Flüsse werden digital nachgebildet und nicht überarbeitet, Re-engineering wäre notwendig
S4. Partnerschaften und Netzwerke • Verbände, Branchennetzwerke (FHP, Austropapier) und (strategische) Partnerschaften • Kooperation mit Frächtern • Joint Ventures z.B. bei Mondi • Konzentration im Einkauf mit Papierholz Austria • Tradition und verlässliche Strukturen	W4. Unattraktiver Bahntransport • Holztransport für Bahn aufgrund geringem Transportwert unrentabel daher Priorität gering/aufwändig • geringe Waggonverfügbarkeit • Reduktion der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit von Holzverladebahnhöfen • Probleme bei Waggonverladung, Überladung, Ladungssicherung, Gleisreinigung • EDV-Schnittstellen fehlen
S5. Erfahrenes Logistikpersonal • Gutes (Aus-)Bildungssystem für noch vorhandenes Personal (wird jedoch weniger) aber nicht im Bereich SCM • Hohe Prozesskenntnis aller Beteiligten (vor allem Disponenten kennen Betriebe, Fahrer kennen Holzarten) • Tradition, verlässliche Strukturen	W5. Fachkräftemangel • Forstarbeiter • Holz-LKW-Fahrer, sehr wenig Fahrerinnen • Supply Chain Experten/Manager
S6. Hohe Lagerkapazität bei Forst und Industrie • Schaffen Flexibilität (bislang notwendig, da Abstimmung verbesserungsfähig)	W6. Innovationsresistenz • Im Vergleich zu anderen Branchen und ausländischen Holzlieferketten sehr konservativ und altmodisch • Ablehnung von Neuen/Innovationen
S7. Innovationen in einzelnen Bereichen • Teilweise bereits vorhanden, Not macht erfinderisch: hohe Rohstoffpreise müssen ausgeglichen werden • Digitalisierung von Teilprozessen als nicht verknüpfte Einzelkämpfer/Leuchtturmprojekte: z.B. Schiff Fundermax, App Smurfit, PHA Computersystem, App Waldverband Tirol • Konzept Umladung auf Sattelzug ist praxiserprobt, wird aber erst vereinzelt eingesetzt	W7. Auslastungsspitzen Transport • LKW: Wartezeiten Terminal/Industrie • Bahn: Beladung durch LKW bzw. Entladung Industrie • Multimodaler Transport wird nicht ausgenutzt
	W8. Kleinstrukturierte Branche • Eigentümergeführte Unternehmen (Emotion, Generation) • Hoher Koordinationsaufwand und erschwerte Planbarkeit durch kleine/unprofessionelle Unternehmen (Kleinwald) • Ineffizienz durch Disbalance der Partner in Verhandlungen

Tabelle 3: Interne Stärken und Schwächen im Detail.

Externe Chancen (External Opportunities = O)	Externe Risiken (External Threats = T)
O1. Digitalisierung - Planung - Lieferschein - Mengenerfassung im Forst - GIS Systeme - Automatisieren Rundholzübernahme - Neue Software - Lagerhaltung	T1. Sinkende Versorgungssicherheit - Waldschäden durch Klimawandel - Holzmengen fallen geballter und kurzfristiger an (extremere Umwelteinflüsse) - Außernutzungsstellungen - Zunahme hofferter Waldbesitzer - Erhöhte Transportkilometer, zuerst muss Holz raus aus der Region, dann infolge Unterversorgung wieder rein - Fichtensterben - Zertifizierung/Nachhaltigkeit - Wald als Freizeitpark und nicht als Wirtschaftsplatz - Abnahme Nebenerwerbslandwirte (weniger Arbeitskräfte im Forst)
O2. Innovative Logistikkonzepte - Mobiles Holzlager mit Kran - Terminals als Lager und zur Umladung - Kooperation - Software- und Modellunterstützung	T2. Frächtersterben - Lohndumping ausländischer Speditionen - Etablierte Frächter finden keine Fahrer oder keine Nachfolger - Sinkende Anzahl an CE-Führerscheinabsolventen
O3. Technische Entwicklung - Höhere Tonnage für LKW durch leichtere Bauweise und abnehmbare Kräne (Gewichtseinsparung) - Kran von Fahrerkabine aus steuerbar - Neuer Waggontyp - Neue (faltbare) Container - Neue Sattelaufliedertypen - Längenadaptierbare, flexible Hängerkupplung - Automatische Gurte zur Ladungssicherung	T3. Standortnachteile im LKW-Transport - Strenge Auflagen - Teure Autobahnmaut LKW - Tonnagebeschränkungen - Fahrzeiten - Strenge Kontrollen (vor allem für österreichische Unternehmen) - Fracht im Ausland günstiger - Wettbewerbsrecht - Viele Schulungen
O4. Wirtschaftsfreundliche politische Rahmenbedingungen - Umdenken in der Politik - Bürokratieabbau - Wirtschafts-Lobbying erfolgversprechend	T4. Strategie Rail Cargo - Rückzug aus Fläche (weite Strecken lukrativer als Fläche) - Reduktion Holzverladebahnhöfe
O5. Reform und Markttöffnung des Bahnwesens in der EU - Zunahme privater Bahnfrachtunternehmen: verlässlicher als Rail Cargo - Neue Nischen-Geschäftsfelder/-modelle - Aufbau von Transportkapazitäten (Waggons) bei Forsten/Industrie/Handel - Neue Seidenstraße	T5. Hohe Barrieren für Logistiktools - Lange Anlaufzeiten und große Mengen notwendig bis Investitionen sich rentieren - Technische Barrieren: Entwicklung von Softwaretools abhängig von GPS-Verfügbarkeit am Berg und Internetgeschwindigkeit
	T6. Feindbild LKW - LKW-Verkehr im Ortsgebiet sehr unbeliebt - Widerstand der Bevölkerung bei Liberalisierung

Tabelle 4: Externe Chancen und Risiken im Detail.

2. PARTIZIPATIVE STRATEGIEENTWICKLUNG

Die Ergebnisse der SWOT Analyse wurden in einem zweiten Schritt in drei Expertenworkshops mit dem FHP Arbeitskreis Holzfluss und Logistik (20.3.2019), der Steering Group THEKLA (30.04.2019) sowie dem FHP Arbeitskreis Forschung und Normung (6.5.2019) diskutiert, interpretiert, überprüft, ergänzt und gereiht. Hierbei wurden auch die Ergebnisse der Fragebogenuntersuchung als erster Anhaltspunkt berücksichtigt. Vor allem die am höchsten gereihten Verbesserungspotentiale wurden intensiv diskutiert (Tabelle 5), bzw. besonders hohe und niedrige Bewertungen der Kennzahlen zur Lieferkettenkoordination (Tabelle 6) miteinbezogen. Zusätzlich zu den bereits dokumentierten Argumenten wurde von der Steering Group noch die Problemstellungen der Mengenschwankungen aufgrund kalamitätsbedingter Über- bzw. wetterbedingter Unterversorgung, das Fehlen von Logistikexperten sowie einer konkreten Jobbeschreibung für Holz-Supply-Chain-Manager, die Einschränkungen von LKW-Fahrzeit, LKW-Tonnage und Entladezeiten bei der Industrie sowie die Festlegung einer Reihung für die zu untersuchenden KPIs ergänzt.

Diese intensive Diskussion zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ermöglichte die partizipative Entwicklung bzw. Ableitung von Strategien sowie deren Selektion, um erfolgsversprechende Konzepte zur evidenzbasierten Evaluierung freizugeben. Diese Strategien werden im Folgenden zusammen mit den jeweiligen Argumenten/Fakten der SWOT Analyse überblicksartig aufgezählt und später im Detail besprochen. Außerdem wurde festgelegt, dass Bahn- und LKW-Terminals (Strategie 1+2) von Seiten der BOKU mittels Adaptierung und Neuentwicklung von Simulationsmodellen untersucht werden wird. Die KFU konzentrierte sich auf die Entwicklung und Lösung eines Optimierungsmodelles zur Steuerung der Transportmengen zwischen Forst, Lager und Industrie, bzw. der Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen (Strategie 3+4). Die Erhöhung der LKW-Tonnage (Strategie 5) sollte in alle Strategien einfließen und von beiden Universitäten berücksichtigt werden.

- (1)** Multimodalität Straße – Schiene: S2, O2, O5, W1, W4, W5, W7, T1, T4
- (2)** Umladung von Kran-LKW auf Sattelaufleger: S2, S5, S6, O2, T3, T4, T6, W4, W5, W7
- (3)** Steuerung der Transportmengen: Forst – Lager – Industrie: S6, O1, O2, T2, T5, W1, W2, W6, W8
- (4)** Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen: S4, O1, O2, T2, T5, W2, W3, W6, W7
- (5)** *Erhöhung der LKW-Tonnage: S2, S3, O3, O4, T2, T3, T6, W5, W7*

Ergebnisse der Fragebögen

Verbesserungspotentiale (1 = hoch/viel, 5 = gering/wenig)	AVG
Zusammenarbeit in Verbänden (Richtlinien, Workshops, Standards, Projekte)	2,18
Zusammenschluss von Unternehmen entlang der Lieferkette (Vorwärts/Rückwärtsintegr.)	2,29
Langfristige Verträge	2,47
Lernen (imitieren) von Erfolgsbeispielen (Skandinavien, Kanada)	1,88
Intensivierter Datenaustausch (Digitalisierung)	1,24
Einsatz von Optimierungs- und Simulationsmodellen	2,12
Gesetzliche Regelungen (Nachhaltigkeit, Preise, Transporttonnagen)	1,88
Computergestützte Steuerung der Transportmengen vom Forst über Lager zur Industrie	2,18
Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen	2,24
Multimodalität durch Umladen des Rundholzes von Straße auf Schiene	2,18
Umladen von Kran-LKW auf Sattelschlepper/Auflieger	2,18
Rückladekonzepte (z.B. standardisierte faltbare Container)	2,47
Gemeinsames Lieferkettenmanagement	1,94

Tabelle 5: Bewertung der Verbesserungspotentiale.

Lieferkettenkoordination (1 = hoch/viel, 5 = gering/wenig)	AVG
Zugriff auf Planungsinformationen	2,70
Informationen zu Lagerbestand/-mix	2,78
Weitergabe von Informationen zu Störgrößen/Risiken	2,85
Automatisierter Datenaustausch (ERP System)	2,78
Prozesskenntnis/Transparenz (gut / schlecht)	2,54
Gemeinsame Kennzahlen (Ziele, Leistungsanreize)	3,54
Gemeinsame Standards/Richtlinien	1,96
Gemeinsame Projekte	3,15
Interaktionshäufigkeit	2,07
Vertrauen	2,15
Flexibilität (Anpassungs-/Reaktionsgeschwindigkeit, Individuell)	3,18
Resilienz (Robust gegen Störeinflüssen, Risikomanagement)	3,07
Geschäftsklima (gut / prekär)	1,75
Konfliktmanagement (gut / prekär)	2,22

Tabelle 6: Bewertung der Lieferkettenkoordination.

Abgeleitete Strategien

Die österreichische Holzlieferkette basiert hauptsächlich auf unimodalen (nur ein verwendeter Transportmodus) LKW-Transport, um eine komplexere, unimodale (Umladung von Kran-LKW auf Sattel-LKW) oder multimodale (Umladung von Kran-LKW auf Bahn) Transportplanung zu vermeiden und die kurzfristigen Kosten möglichst niedrig zu halten. Dieses Konzept funktioniert aufgrund über Jahre abgestimmter Arbeitsprozesse und gewonnener Erfahrung im Normalbetrieb, versagt jedoch zunehmend bei Veränderung des Geschäftsumfeldes (z.B. weniger Kran-LKW Fahrer verfügbar, fehlende Supply-Chain-Experten, strenge Beschränkungen der LKW-Lenkzeit und Tonnage) sowie insbesondere bei Auftreten unerwarteter Ereignisse (z.B. Mengenschwankungen aufgrund kalamitätsbedingter Über- bzw. wetterbedingter Unterversorgung, Zufuhrsperren Industrie), wodurch aufgrund der fehlenden Resilienz höhere Kosten entstehen.

Das vermehrte Auftreten von Naturkatastrophen und Lieferkettenrisiken führen zu erheblichen Schwierigkeiten bei Holzernte und -transport. Relevante Natureinflüsse in Österreich sind insbesondere Stürme, Borkenkäferbefall, Lawinen sowie starker Regen- und Schneefall. Zu den abiotischen Risiken in der Lieferkette gehören Maschinenausfälle, Kapazitätsänderungen oder Lieferstopps der Industrie sowie Unsicherheiten in Bezug auf Wartezeiten, Lieferzeit, Kapazitätsengpässe, Lagerbestände und Verfügbarkeit von Waggons bzw. LKWs. Diese und andere Störungen (z.B. sprunghaft wechselnde Marktpreise, kurzfristige Verträge, ungleiche Verhandlungsstärke) sowie eingeschränkte Kooperation (z.B. fehlender Zugriff auf Planungs-, Lagerstand-, Störinformationen; fehlende gemeinsame Kennzahlen, Projekte, Prozesskenntnis) führen zu ineffizienten Lieferketten sowie zu hohen zusätzlichen Holzbeschaffungskosten.

Um diese Herausforderungen zu meistern, werden fünf Strategien beschrieben, die durch Argumente der SWOT-Analyse gestützt werden und sich zu einer quantitativen Evaluierung mit Methoden des Operations Research (Simulation und Optimierung) eignen. Eine Übersicht der Literatur zu Operations-Research in der Holzlieferkette mit dem Schwerpunkt Optimierung findet sich bei D'Amours et al. (2008). Opacic und Sowlati (2017) konzentrieren sich auf Literatur zur diskreten Event-Simulation und Shashi und Pulkki (2013) umfassen beide Methoden. Darüber hinaus ordnen Kogler und Rauch (2018) die Literatur zu diskreten Event-Simulationsmodellen in Holzlieferketten ein und betonen die Rolle des Transportes als Bindeglied abhängiger Systemkomponenten. Erste, vergleichende Arbeiten zu spezifischen Logistikprozessen in multimodalen Holztransportketten (d.h. es werden zumindest zwei verschiedene Transportmodi eingesetzt, hier LKW und Zug für Schweden/Österreich bzw. LKW und Schiff für Norwegen) mit besonderer Berücksichtigung von Schadereignissen bieten Westlund et al. (2018). Eine Darstellung saisonaler Effekte, aber auch die Abschätzung der Auswirkungen von Witterungsextremen auf die Holzbereitstellung liefern Fjeld et al. (2017) und Fjeld et al. (2018), wobei Gemeinsamkeiten und regionale Unterschiede für unterschiedliche Klimazonen in Zentral- und Nordeuropa untersucht wurden.

Multimodalität (Straße – Schiene)

Multimodale Strategien bieten Potenzial für umweltfreundlichere und resilientere Lieferketten. Der Bahntransport ermöglicht zusätzliche Transportkapazität und verursacht weitaus geringere Emissionen als LKW-Transport. Bahn-Terminals bieten Puffermöglichkeiten, um Lieferengpässe zu überwinden und die Resilienz der gesamten Holzlieferkette zu verbessern. Im Katastrophenfall wird, einerseits aufgrund der sich ergebenden, längeren Transportdistanzen und andererseits infolge des sich meist rasch einstellenden Engpasses bei der Holz-LKW-Kapazität, Holz zunehmend mit der Bahn transportiert. Hierfür wird das Holz an Holz-Terminals (aktuell gibt es 153 aktive Verladebahnhöfe in Österreich, RCA 2019) von LKWs auf Zug-Waggons umgeschlagen. Neben der im Vergleich zum reinen LKW-Transport erzielten CO₂ Ersparnis, bieten Terminals auch noch die Möglichkeit, ein Lager anzulegen und so mittels Pufferkapazität eine

stabile Holzversorgung sicherzustellen. Der Engpass der Holz-LKW-Kapazitäten wird durch den verstärkten Einsatz auf kurzen Distanzen (Forst-Terminal) weitgehend behoben, weil lange Transportfahrten zur Industrie vermieden werden können. Diese Potentiale werden bis dato erst wenig genützt, da es Supply Chain Managern insbesondere beim komplexeren multimodalen Transport schwerfällt, optimale Entscheidungen (z.B. Verhältnis LKW zu Waggons, Arbeitszeiten LKWs) zu treffen, da eine Verbesserung in einem Teil der Lieferkette zu Verschlechterungen an anderer Stelle führen kann. Darüber hinaus sind Umschlagkapazitäten, LKW Wartezeiten im Terminal, Auslastung der LKWs und Waggons sowie notwendige Lagergrößen nur schwer abschätzbar. Daher ist ein integriertes Framework zur Modellierung und Erprobung multimodaler Strategien hilfreich, um Managern eine robuste Entscheidungshilfe zu bieten und Systemkapazitäten sowie Engpässe aufzuzeigen. Ziel der Strategieevaluierung war es, ein diskretes Event-Simulations-Modell zu adaptieren, um anhand von realitätsnahen Distanz-, Verschiebungsfrequenz- und Tonnageszenarios robuste und umweltfreundliche, multimodale Transportstrategien für Terminals in Österreich ableiten zu können.

Die multimodale Strategie baut die Stärke einer guten Infrastruktur (S2: dichtes Netz an Forststraßen und Gleisen), sowie der Chancen innovativer Logistikkonzepte (O2: Terminals als Lager zur Umladung) und der Reform der Marktöffnung des Bahnwesens in der EU (O5: Zusätzliche Bahn-Transportkapazitäten) auf. Darüber hinaus reduziert sie die Schwächen eines mangelnden Risikomanagements (W1: Fehlende Resilienz, Mengenschwankungen), unattraktivem Bahntransport (W4: Waggonverfügbarkeit, Software und Schnittstellen fehlen), Fachkräftemangel (W5: fehlende Holz-LKW Fahrer, fehlende Supply Chain Experten) und Auslastungsspitzen im Transport (W7: Wartezeiten bei Terminal und Industrie, multimodaler Transport wird nicht ausgenutzt) und tritt dem Risiko der aktuellen Rail Cargo Strategie (T4: weniger Verladebahnhöfe, Rückzug aus der Fläche) sowie der sinkenden Versorgungssicherheit (T1: Holzmengen fallen geballter und kurzfristiger an, erhöhte Transportkilometer) entschieden entgegen.

Umladung von Kran-LKW auf Sattelaufleger

Einen vielversprechenden Ansatzpunkt zur effizienteren Holzbeschaffung stellen Umladungskonzepte dar. Dabei wird Rundholz per Kran-LKWs aus dem Forst abtransportiert und anschließend auf Sattelaufleger verladen, die von einem Zugfahrzeug abgeholt werden, um das Holz zu den Kunden zu transportieren. Im Vergleich zum Gesamttransport mit Kran-LKWs (ohne Umladung) besteht ein Vorteil darin, dass die vorhandenen Kran-LKWs vorrangig für kurze Transportdistanzen eingesetzt werden und die wenigen noch verfügbaren, ortskundigen Kran-LKW Fahrer (kritischer Mangelberuf) zum Holztransport im Wald eingesetzt werden. Der Transport vom Terminal zur Industrie kann anschließend durch Fahrer erfolgen, die über keine Kenntnis des Forststraßennetzes oder der Kranverladung verfügen müssen und kann daher unter einer Vielzahl an Unternehmen ausgeschrieben werden. Durch das geringere Eigengewicht eines Sattelauflegers kann mehr Holz geladen und somit effizienter und kostengünstiger transportiert werden. Auf der anderen Seite entstehen Kosten für die Umladung, für den Betrieb des Terminals und gegebenenfalls durch Koordinationsprobleme (z.B. Sattelaufleger ist nicht rechtzeitig zur Verladung am Terminal bereitgestellt). Dieses Konzept wirft eine Vielzahl an wichtigen Fragestellungen auf, die mithilfe eines Simulationsmodells analysiert wurden.

Es wird bislang in Österreich vereinzelt, in zwei verschiedenen Varianten eingesetzt: (1) direkter Umschlag über ein Terminal und (2) indirekter Umschlag (mit Lager) über ein Terminal. Jede der zwei Varianten besticht durch individuelle Vorteile, die zur Effizienz- und/oder Resilienzsteigerung im Holztransport führen können. Bei (1) wird das Holz bei einem Terminal direkt vom Kran des Kran-LKWs auf einen Sattelaufleger verladen, womit geringere Umladungskosten und keine Lagerkosten entstehen. Das Zwischenlagern des Holzes im Terminal (2) hingegen erhöht die Flexibilität, Resilienz und somit Versorgungssicherheit der gesamten Holzlieferkette. Da die Holzernte und somit auch der Transport

großen Mengenschwankungen unterliegen (Übersorgung durch Kalamität wie Windsturm bzw. Unterversorgung durch witterungsbedingte Einflüsse wie Schneefall), ermöglicht ein Zwischenlager eine kontinuierlichere Versorgung der Kunden. Darüber hinaus kann bei Variante 2 der Kran-LKW bei Koordinationsproblemen das Holz am Terminal gegebenenfalls abladen und muss nicht auf das Eintreffen eines Sattelauflegers warten. Aufgrund der Relevanz in der Praxis wird im Rahmen dieses Projektes die erste Variante (ohne Lager) untersucht und die zweite Option bleibt für eine mögliche Erweiterung im Rahmen von zukünftigen Projekten vorbehalten.

Die multi-echelon unimodale Strategie unterstützt die Stärken der guten Infrastruktur (S2: dichtes Netz an Forststraßen und Gleisen), von erfahrenem Logistikpersonal (S5: gute Ausbildung, hohe Prozesskenntnis, verlässliche Strukturen) sowie hoher Lagerkapazität bei Forst und Industrie (S6: Flexibilität, Abstimmung) und nützt die Chance innovativer Logistikkonzepte (O2: Terminal zur Umladung). Weiters werden Schwächen wie unattraktiver Bahntransport (W4: Probleme bei Waggonverladung, geringe Priorität Holztransport auf Schiene), Fachkräftemangel (W5: fehlende Holz-LKW Fahrer, fehlende Supply Chain Experten) und Auslastungsspitzen des Transportes (W7: Bahn Beladung durch LKW bzw. Entladung Industrie, Wartezeiten bei Terminal und Industrie) reduziert und Risiken wie Standortnachteile im LKW-Transport (T3: Tonnagebeschränkung, Fahrzeitbeschränkung), die Strategie der Rail Cargo (T4: weniger Verladebahnhöfe, Rückzug aus der Fläche) abgeschwächt.

Steuerung der Transportmengen von Forst über Lager zur Industrie

Ein wesentlicher Grund für zahlreiche Ineffizienzen und Probleme im Rundholztransport besteht in der fehlenden Koordination der einzelnen Akteure der Holzlieferkette. Diese agieren meist unabhängig voneinander, haben unterschiedliche Interessen und verfolgen teilweise konträre Ziele. Starkes Konkurrenzdenken, Insellösungen, Wettbewerb und mangelhafte Informationsflüsse zwischen den Akteuren sind Charakteristika der Branche und mindern die Effizienz des Logistiknetzwerks. Typische Folgen sind starke Variabilität der Nachfrage, Preisschwankungen, Über- und Unterauslastungen der vorhandenen Kapazitäten, unkoordinierte Transportflüsse sowie Liefer- und Produktionsstopps bei den einzelnen Akteuren. Ein vielversprechender Ansatzpunkt zur Effizienzsteigerung besteht darin, die Interessen und Aktivitäten der unterschiedlichen Akteure der Lieferkette besser zu koordinieren. Transport, Ernte und Liefermengen sowie Bestell- und Anlieferungszyklen für Rundholz können unter der Berücksichtigung der Interessen, Flexibilität und des vorgegebenen Handlungsspielraums aller Akteure gemeinsam optimiert werden.

Infolgedessen wurde der Fokus der quantitativen Analyse der Universität Graz auf die Herausarbeitung der Potenziale, die durch eine koordinierte Holzlieferkette erzielt werden können, gesetzt. Mittels eines Optimierungsmodells, das die Interessen und Ziele der Akteure abbildet, wurde ein objektiver Vergleich zwischen der derzeitigen Planungssituation und der Situation eines zentralen Supply Chain Management Systems erstellt. Im Mittelpunkt der Bewertung steht die Steuerung der Transportmengen sowie die Analyse der Bedarfs- und Lieferschwankungen.

Diese Strategie integriert die Stärke hoher Lagerkapazität bei Forst und Industrie (S6: Flexibilität, Abstimmung) mit den Chancen der Digitalisierung (O1: Planung, Lagerhaltung) sowie innovativer Logistikkonzepte (O2: Kooperation, Software- und Modellunterstützung). Die Schwächen des mangelnden Risikomanagements (W1: keine Weitergabe von Risiken und Störgrößen, Reaktives SCM), mangelnder Abstimmung (W2: hoher Leerfahrtenanteil, kein gemeinsames Lagermanagement, langsamer Informationsfluss), Innovationsresistenz (W6: konservativ, altmodisch) und der kleinstrukturierten Branche (W8: Eigentümergeführte Unternehmen, erschwerte Planbarkeit) werden ebenso reduziert wie

die Risiken des Frächtersterbens (T2: Lohndumping, sinkende Zahl von Führerscheinabsolventen) und der hohen Barrieren für Logistiktools (T5: Lange Anlaufzeiten, technische Barrieren).

Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen

Ein weiteres Problem, das durch die fehlende Abstimmung und Koordination der Akteure der Supply Chain Holz entsteht, stellen stark schwankende Anlieferzyklen dar. Häufig wird Transportunternehmen kein konkretes Lieferdatum, sondern lediglich ein Zeitraum für die Erfüllung der Transportaufträge vorgegeben. Durch den Versuch der Transportunternehmen, ihre Auftragsauslastung zu glätten, kann dies zu Lieferschwankungen bei der Industrie führen. Zusätzlich ergeben sich Abweichungen von Lieferzyklen aufgrund individueller Entscheidungen sowie angebotsseitiger Variabilität im Forst. Folgen dieser starken Schwankungen sind Über- und Unterauslastung der Läger, Liefer- und Produktionsstopps und damit einhergehende hohe Kosten.

Deshalb wurde der Fokus der zweiten Strategie der Universität Graz auf die Optimierung der Bestell- und Anlieferungszyklen für Rundholz gelegt. Ein geeignetes Lagermanagement kann einen wesentlichen Beitrag für die Effizienz der Lieferkette leisten. Durch optimierte Lieferzyklen würden nicht nur Industrie, sondern auch Transportunternehmen durch geringere Wartezeiten und weniger Lieferstopps profitieren. Zusätzlich würde sich die nachfrageseitige Variabilität für den Forst verringern.

Diese Strategie baut auf die Stärke der Partnerschaften und Netzwerke (S4: Kooperation mit Frächter, Verbände) und nützt die Chancen der Digitalisierung (O1: Planung, Lieferschein) sowie innovativer Logistikkonzepte (O2: Software- und Modellunterstützung, Kooperation). Die Schwächen mangelnder Abstimmung (W2: Selbstoptimierung, Automatisierte Datenweitergabe), Innovationsresistenz (W6: konservativ, Ablehnung von Neuem) sowie von Auslastungsspitzen des Transportes (W7: Wartezeiten Terminal/Industrie, Bahn Beladung durch LKW bzw. Entladung Industrie) werden abgebaut und dem Risiko hoher Barrieren für Logistiktools (T5: Lange Anlaufzeiten, große Mengen und Investitionen) entgegengewirkt.

Erhöhung der LKW-Tonnage

Diese Strategie wurde nicht direkt mit einem eigenen Modell, sondern anhand der anderen Modelle evaluiert. Für nähere Betrachtungen wird auf die branchenspezifischen Studien von Kummer und Frank (2011) zum Thema volks-, betriebswirtschaftliche und ökologische Auswirkungen der Preiserhöhungen sowie der Einschränkung der Flächenbedienung der ÖBB-Transporte für die Forstwirtschaft, Holz- und Papierindustrie, bzw. Kretzer et al. (2009) zu Supply Chain Forst-Logistik Säge verwiesen.

Die Strategie baut die Stärken der guten Infrastruktur (S2: gut gewartete Forststraßen) und kurzen Transportdistanzen (S3: regionale Transporte, Arbeitsplätze in strukturell schwachen Regionen) weiter aus und nützt die Chancen technischer Entwicklung (O3: Gewichtseinsparungen durch leichtere Bauweise und abnehmbare Kräne) sowie die wirtschaftsfreundlichen politischen Rahmenbedingungen (O4: Umdenken in Politik, Bürokratieabbau). Darüber hinaus werden Schwächen wie Fachkräftemangel (W5: fehlende Holz-LKW Fahrer, fehlende Supply Chain Experten) sowie der Auslastungsspitzen im Transport (W7: Wartezeiten Terminal / Industrie, Bahn Beladung durch LKW bzw. Entladung Industrie) abgebaut und die Risiken des Frächtersterbens (T2: Sinken Anzahl Führerscheinabsolventen, Lohndumping), Standortnachteile im LKW-Transport (T3: Strenge Auflagen, Wettbewerbsrecht) und das Feindbild LKW (T6: Verkehr im Ortsgebiet, Widerstand der Bevölkerung bei Liberalisierung) abgeschwächt.

3. SIMULATIONSMODELL BAHN-TERMINAL

Erste Modelle zur Simulation der Prozesse in einem Bahnterminal und zur Bestimmung verschiedener Leistungsparameter beim Umschlag von Holz wurden für österreichische Rahmenbedingungen bereits erstellt (Etlinger et al. 2014, Wolfsmayr et al. 2016, Gronalt & Rauch 2018), behandeln aber reguläre Lieferverhältnisse ohne Risikoeinflüssen und ohne Ableitung von Risikobewältigungsstrategien. Andere Simulationsmodelle wurden speziell für ausländische Biomasselieferketten entwickelt (Karttunen et al. 2012, Karttunen et al. 2013, Mobini et al. 2013, Laitila et al. 2016, Eriksson et al. 2017) und berücksichtigen insbesondere die für die Brennstoffqualität maßgeblichen Parameter (z.B. Holzfeuchte), aber liefern wiederum keine konkreten Logistikstrategien zur Risikobewältigung. Einen ausführlichen Überblick über den Einsatz von Simulationsmodellen für den unimodalen bzw. multimodalen Holztransport bietet das Reviewpaper von Kogler & Rauch (2018). Zur Entwicklung generischer Strategien zur logistischen Bewältigung hoher Schadholzmengen wurden für unterschiedliche Terminalkonfigurationen bereits Simulationsmodelle entwickelt (vgl. Kogler et al. 2018, Kogler & Rauch 2019). Die bisher zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Simulationsmodelle und Studien erlaubten aber lediglich allgemeine Aussagen auf einem hohen bis mittleren Abstraktionsniveau. Damit bestand eine kritische Forschungslücke hinsichtlich der Unterstützung einer praxisreifen Notfallplanung für Regionen mit Holzverladebahnhöfen, die von Unternehmen der österreichischen Holzlieferkette aktuell dringend benötigt wird.

Diskretes Event-Simulationsmodell

Daher wurde zur evidenzbasierten Evaluierung von multimodalen Strategien ein wissenschaftliches Modell, basierend auf der Methode der diskreten Event-Simulation (DES) weiterentwickelt und für die geforderten Versuchsdesigns adaptiert (Kogler & Rauch 2020). Anschließend wurde es anhand von Praxisdaten für einen repräsentativ ausgewählten Terminal (Großreifling) sowohl mittels Output Analysen als auch mittels Stakeholder- und Expertenfeedbacks erfolgreich validiert. Mit entsprechenden Parameteranpassungen können auch robuste Aussagen für andere Terminals abgeleitet werden. Um eine praxisnahe Einbindung der Stakeholder zu forcieren, wurde eine intuitiv bedienbare, grafische Benutzeroberfläche entwickelt, damit das Modell in weiterer Folge in speziell designten Stakeholder-Workshops eingesetzt werden kann, um wissenschaftliche Berechnungen mit praktischer Erfahrung zu koppeln und relevante Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit abzuleiten (HINWEIS: Infolge der SARS-CoV-2-Krise mussten ein geplanter, seitens der Stakeholder gut gebuchter Workshop leider abgesagt werden, der während der Projektlaufzeit nicht mehr nachgeholt werden konnte).

Module des Simulationsmodells

Das stochastische Simulationsmodell besteht aus fünf Modulen: (A) Wald, (B) LKW-Transport, (C) Terminal, (D) Bahn-Transport und (E) Industrie. Diese können in sechs verschiedenen Ansichten betrachtet werden: (1) Animation, (2) Szenarien, (3) Statistiken, (4) Lieferkette, (5) Terminal und (6) Code. Wie Abbildung 1 zeigt, fließen die im Wald-Modul generierten Agenten zum LKW-Transport-Modul, wo sie entweder direkt zum Industrie-Modul (unimodal) oder erst zum Terminal-Modul und dann zum Bahn-Transport-Modul (multimodal) gelangen, bevor sie im Industrie-Modul ankommen. Die Logikmodule des Simulationsmodells bestehen aus 305 Elementen der AnyLogic-Prozessmodellierungsbibliothek, die mit einer detaillierten, mit Java codierten Steuerlogik angereichert sind, um die Funktionalität dieser

Grundelemente zu verbessern. Zusätzlich steuern 35 Funktionen, 80 globale Variablen und statistische Zähler, 9 Variablensammlungen, 5 Zeitpläne und 6 Ereignisse das Simulationsmodell basierend auf 39 Eingabeparametern, um verschiedenste Parameter der Simulationsergebnisse in 33 Datensätzen abzuspeichern. Eine detaillierte Beschreibung des ursprünglichen Simulationsmodells findet sich in der Publikation von Kogler & Rauch 2019.

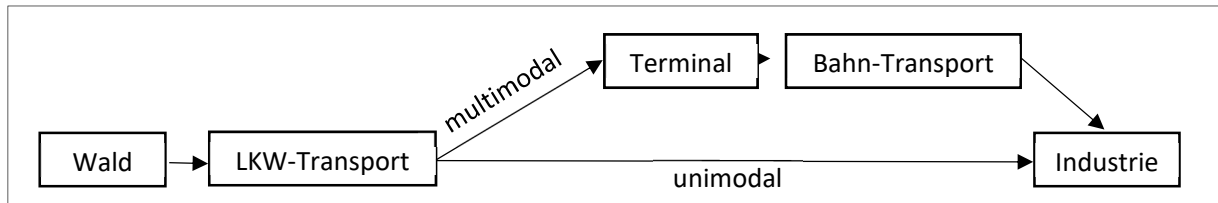


Abbildung 1: Module des Simulationsmodells.

Das Wald-Modul (A) erzeugt Holz-Agenten ($= 1 \text{ m}^3$ Holz) in vier verschiedenen Quellen (Anzahl je nach Szenario parametrisierbar), die jene Forstgebiete bzw. -reviere repräsentieren, die den jeweiligen Zugterminal beliefern. Nachdem das Holz geerntet und gerückt wurde, wird es zu einer LKW-Ladung (Tonnage je nach Szenario parametrisierbar) zusammengefasst und liegt zum Abtransport bereit (Abbildung 2). Im LKW-Transport-Modul (B) werden Lastwagen generiert, gereiht und mittels Transportaufträgen gesteuert (Abbildung 3). Innerhalb ihrer Arbeitszeit werden unbeladene LKWs entweder zu Lagerplätzen im Wald geschickt (je nach vorab getroffener Auswahl: ältestes Holz oder größtes Lager zuerst), um eine Holzladung abzuholen oder sie erhalten einen Auftrag zum Umschlag von gelagertem Holz auf bereitgestellte Waggons am Terminal. Um einen multimodalen (unimodalen) Transport abzuschließen, müssen die Lastwagen die Lagerplätze vor einer parametrisierbaren Beladedeadline (im Beispiel in Abbildung 3: 12:00 bzw. 13:00 Uhr) passieren. Andernfalls werden sie als vorbeladene Lastwagen zu ihren Abstellplätzen zurückgeschickt und beenden ihre Tour. Wenn die LKWs das Terminal nicht vor einer parametrisierbaren Abladedeadline erreichen (im Beispiel in Abbildung 3: 17:00 Uhr), um rechtzeitig mit dem Umschlag oder der Entladung zu beginnen, kehren sie ebenfalls zu ihren Abstellplätzen zurück. Wenn ein LKW seine Tour rechtzeitig abschließt, nimmt er einen weiteren Abhol- oder Umladeauftrag an, andernfalls kehrt er in die LKW-Garage zurück.

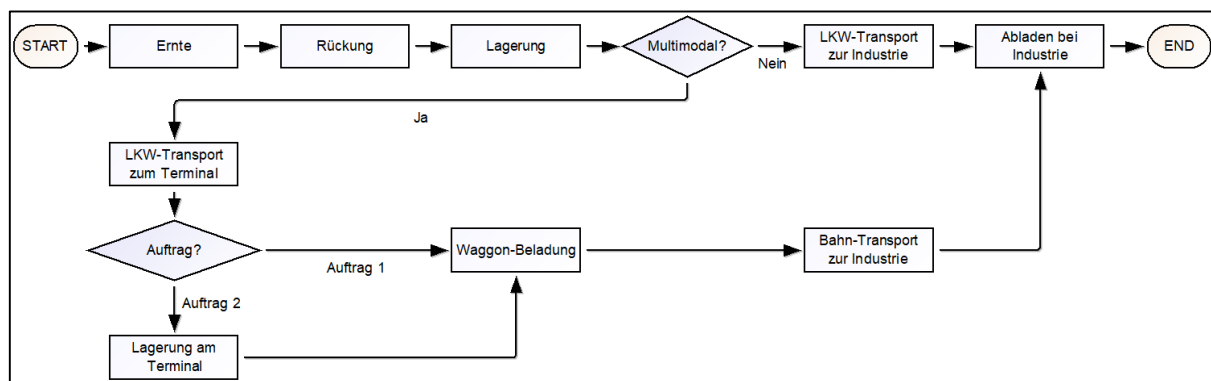


Abbildung 2: Holzfluss.

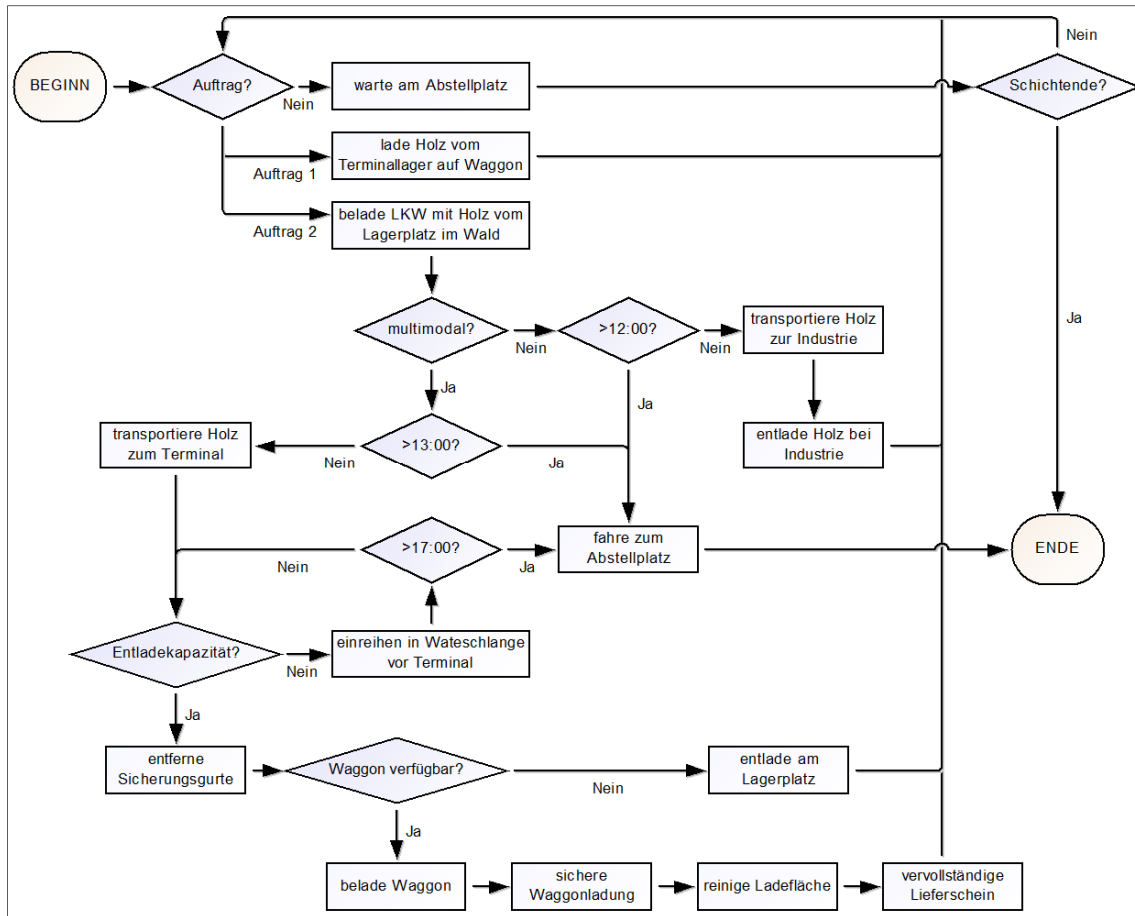


Abbildung 3: Ablaufplan für LKW-Transport.

Das Terminalmodul (C) enthält eine komplexe Logik zur Steuerung des genauen Ablaufes am Terminal. Die LKWs durchlaufen hierbei mehrere Warteschlangen und Prozesse zur direkten Entladung von der LKW-Ladefläche bzw. indirekten Umladung vom Terminal-Lagerplatz auf Zugwaggons (Ladekapazität zwei LKW-Ladungen). Maximal neun LKWs können sich gleichzeitig im Terminalareal befinden (Terminalkapazität je nach Szenario parametrisierbar). Zusätzliche LKWs müssen an einem Parkplatz vor dem Terminal anstehen. Das Terminal ist in zwei Verladegleise unterteilt. Verladegleis 1 bietet Platz für bis zu sieben Waggons und hat einen eigenen Lagerplatz, wohingegen Verladegleis 2 nur Platz für bis zu zwei Waggons bietet. Werden also mehr als sieben Waggons bestellt, dann werden der achte und neunte Waggon auf dem zweiten Verladegleis bereitgestellt. Nachdem ein LKW am Terminal eingetroffen ist, wird er zu dem ihm zugewiesenen Waggon auf das jeweilige Verladegleis weitergeleitet und durchläuft eine Reihe von Prozessschritten: Ladung entsichern, Waggon beladen, Waggonladung sichern, Ladefläche reinigen, Lieferschein vervollständigen. Da ein Waggon immer nur von einem LKW beladen werden kann und es aus Platzgründen nicht möglich ist, dass LKWs aneinander vorbeifahren, treten am Terminal Warteschlangen auf, die sich mit der Anzahl der LKWs verlängern. Nachdem ein LKW den Terminal verlassen hat, kehrt er entweder zum Abstellplatz zurück, steht für den nächsten Umschlagauftrag am Terminal an oder fährt direkt zum Lagerplatz im Wald, um erneut Holz zu laden. Das Modul Bahn-Transport (D) generiert Zug-Agenten, um voll beladene Waggons am Terminal abzuholen und zur Industrie zu transportieren, leere Waggons am Terminal laut Bestellung bereit zu stellen und Waggons nach ihrem Beladungsstatus am Terminal zu sortieren. Da ein Waggon eine Ladekapazität von zwei LKW-Ladungen hat, kann ein Waggon

entweder voll beladen, halb beladen oder leer sein. Je nach Szenario erreicht ein Zug null bis zweimal täglich das Terminal (Verladezeiten je nach Szenarien parametrisierbar), jedoch nur, wenn voll beladene Waggons verfügbar sind oder leere Waggons bestellt wurden. Der Zug nimmt voll beladene Waggons auf, verschiebt halb beladene Waggons nach vorne und stellt leere Waggons zum Beladen ab. Nach Abschluss des Bahntransports werden die Ladungen in der Industrie entladen. Das Industriemodul (E) steuert den Entladevorgang in den holzbasierten Industrieanlagen und gibt die LKW- und Zug-Agenten frei, sodass sie das Industriemodul verlassen und zum LKW-Transport- oder Bahn-Modul zurückkehren können.

Ansichten des Simulationsmodells

Die gesamte simulierte Holzlieferkette kann in sechs verschiedenen Ansichten betrachtet werden. Die Animationsansicht (Abbildung 4) zeigt grafisch den Holzfluss durch die Holzlieferkette. Holz (grüne Dreiecke) wird in den Wäldern geerntet und an die Lagerplätze des jeweiligen Forstreviers gerückt. LKWs starten am Abstellplatz (Truck Garage) und transportieren das zu LKW-Ladungen zusammengefasste Holz (braune Rechtecke) entweder zum Terminal oder direkt zur Industrie. Am Terminal wird das Holz auf den Lagerplatz oder in Waggons (graue Rechtecke) umgeladen und von einem Zug weiter zur Industrie transportiert. Die Statistikansicht bietet das Management-Cockpit, das aus automatisch aktualisierten KPIs besteht (Abbildung 5). Die Präsentation von Tabellen, Zahlen und Diagrammen für Produktion, Lager, Transport und Laufzeit aktualisiert sich während der Laufzeit und gibt einen interaktiven Überblick über die aktuelle und vergangene Leistung der gesamten Holzlieferkette. Die Szenarien- bzw. Parametrisierungsansicht ermöglicht es, das Simulationsmodell an verschiedene Fallstudieneinstellungen anzupassen und Szenarien durch Ändern von Eingabeparametern (z. B. Prozessdauer, Produktionsmengen pro Revier) oder Einschränkungen für Entscheidungsvariablen (Waggonanzahl, LKW Anzahl, Anzahl Verschub) zu definieren. In der Lieferketten- sowie in der Terminalansicht kann der Fluss der Agenten durch die Systemelemente der Holzlieferkette beobachtet werden. Die Codeansicht bietet eine strukturierte Übersicht aller implementierter Funktionen, Variablen, Datenbanken, Parameter, Zeitpläne und Ereignisse. Einen tieferen Einblick in den Simulationsablauf geben drei eigens angefertigt Videos (Präsentiert beim Steering Group Meeting am 15.1.2020) sowie die eigens entwickelte Workshop-Edition des Simulationsmodells, die in den Stakeholder Workshops direkt von Arbeitsgruppen bedient werden kann.

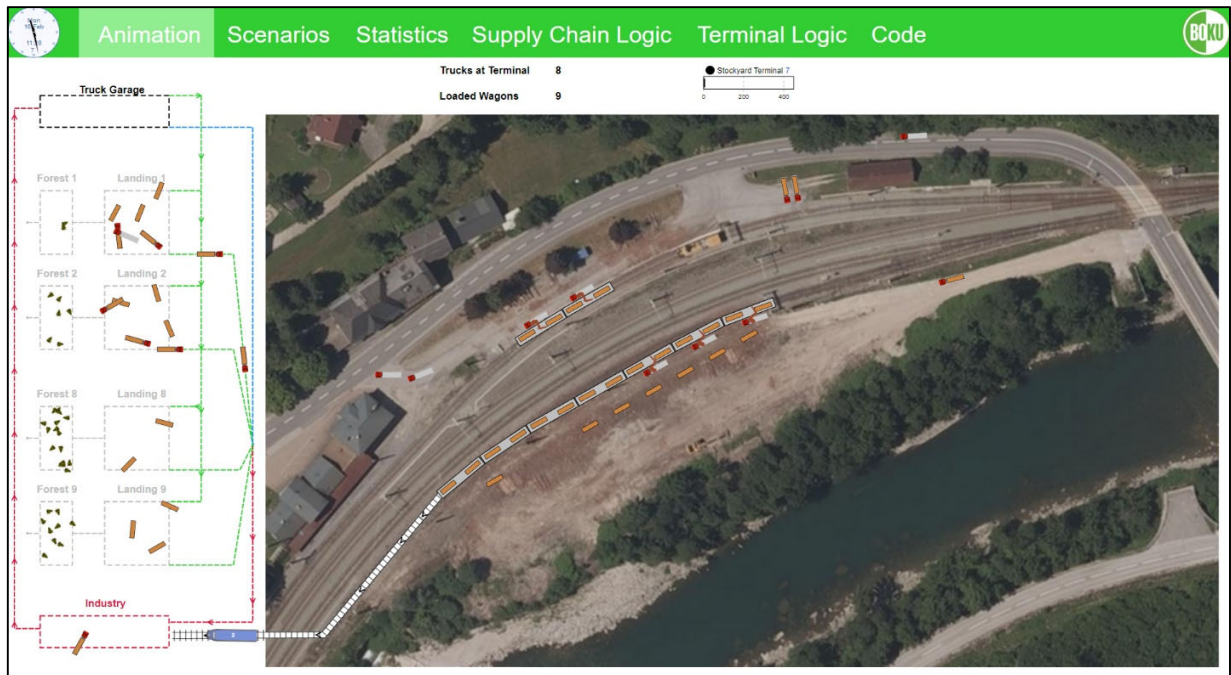


Abbildung 4: Animationsansicht.

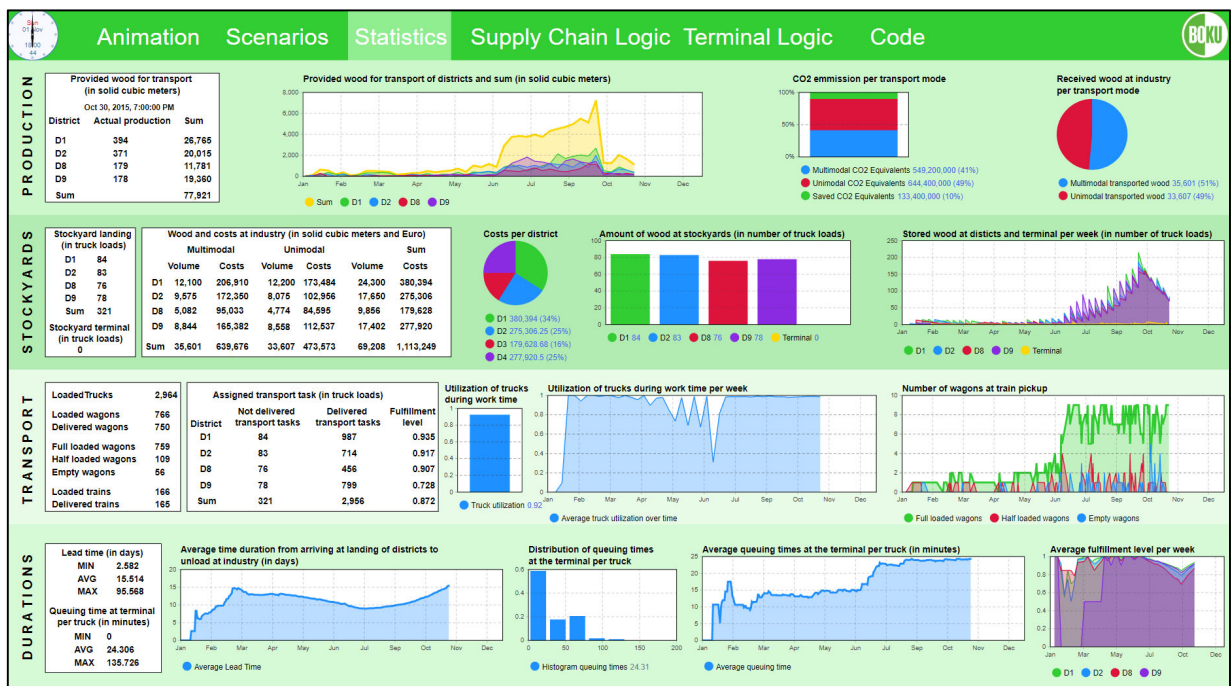


Abbildung 5: Management Cockpit.

Fallstudie Großreifling

Die Fallstudie konzentrierte sich auf die Region um den Verladebahnhof Großreifling. Dieses Terminal wurde aus rund 150 österreichischen Holzterminals gewählt, da es einen Standard-Bahnterminal repräsentiert, der sich insbesondere für die Untersuchung von Nachhaltigkeits- und Resilienzziele eignet. In der Vergangenheit war dieser Terminal speziell für die Bewältigung von Schadholz nach Stürmen von großer Bedeutung, da hier große Mengen an Holz umgeschlagen bzw. gelagert werden können. Die Kapazitätsparameter des Terminallayouts (maximale Anzahl von Waggons und LKWs, Lagerplatzkapazität, zwei Verladegleise) und sein Standort (vier Versorgungsreviere, maximale Anzahl von Verschüben pro Tag) definieren eine adäquate Obergrenze für viele andere Holzterminals in Österreich. Die detaillierte Modellierung dieses Terminals ermöglicht die Anpassung an ähnliche und kleinere Terminals. Das Terminal Großreifling besteht aus vier 200 Meter langen Gleisen (Abbildung 6). Das untere Verladegleis gehört den ÖBF und das obere ist in Privatbesitz, kann jedoch bei erhöhtem Bedarf angemietet werden. Der 175 Meter lange und 30 Meter breite Lagerplatz bietet Platz für Rundholz und Biomasse. Nachdem ein LKW zum Lagerplatz im Wald gefahren ist, Holz geladen und zum Terminal transportiert hat, erreicht er das Terminal in Punkt 1. In Punkt 2 entsichert der Fahrer die Ladung und lädt den Waggon in Punkt 3, bevor er die Waggonladung in Punkt 4 sichert. In Punkt 5 wird die Ladefläche des LKWs gesäubert und in Punkt 6 der Lieferschein ausgefüllt. Warteschlangen- und Planungsprobleme treten hauptsächlich nach Stürmen auf, wenn viele LKWs gleichzeitig auf Waggons verladen möchten.



Abbildung 6: Betriebsablauf am Terminal: (1) Einfahrt Terminal, (2) Ladung entsichern, (3) Waggon beladen, (4) Waggonladung sichern, (5) LKW-Ladefläche reinigen, (6) Lieferschein ausfüllen.

Die Eingabedaten für die Modellvalidierung basieren auf Produktions- und LKW-Transportdaten der ÖBF (Datensätze für 2015 und 2016), Bahntransportdaten der Rail Cargo Austria (Datensätze 2007–2016) sowie Expertenschätzungen und Beobachtungen aus Interviews mit Managern, Förstern und Spediteuren. Dreiecks-Verteilungen wurden verwendet, um Expertenschätzungen zur Kompensation von fehlenden oder fehlerhaften Prozessdaten zu integrieren. Für die einzelnen Szenarien wurden der Prozessfluss, die Arbeitszeiten und die Prozessdauer sowie andere logische Abläufe entweder direkt beobachtet oder in Interviewberichten dokumentiert und in Geschäftsprozessdiagrammen visualisiert, um die Implementierung des Agentenflusses durch die Lieferkette zu ermöglichen.

Szenariendesign

Zielsetzung der Simulationsexperimente

Das beschriebene Simulationsmodell bietet ein breites Anwendungsspektrum. Daher wurden in einem ersten Schritt in Diskussionen und Workshops mit der Steuerungsgruppe und Industriepartnern die Zielsetzung einer Simulation der multimodalen Holzlieferkette zur Generierung von robusten Transportstrategien für Zugterminals in Österreich definiert.

Die Transportstrategien setzen sich dabei aus der Anzahl der täglich im Einsatz befindlichen LKWs (1-25) und Zugwaggons (1-7), sowie der Arbeitszeit der LKWs und Verschubzeit(-en) der Zugwaggons zusammen. Diese wurden in Szenarien mit unterschiedlichen Zufuhrzeiten (repräsentieren die Distanz von Forst zu Terminal), Verschubfrequenz (einmalige oder zweimalige Abholung von vollen und Bereitstellung von leeren Waggons) und Tonnage (maximal erlaubtes Gesamtgewicht der LKWs) verglichen. Dies ermöglicht es, für unterschiedliche Terminals mit ähnlichem Layout (ein Verladegleis, eine Verladestraße, Platz für bis zu 7 Waggons) robuste Handlungsempfehlungen für den maximalen Terminalumschlag, nötige Lagergröße, durchschnittliche Wartezeit, maximale Wartezeit, halb beladene Waggons und reduzierte Fahrten der LKWs je Transportstrategie ableiten zu können (vgl. Kogler & Rauch 2020).

Szenarien

Die Zufuhrzeiten werden in kurze (3-4 Fahrten zum Terminal pro Tag), mittlere (2-3 Fahrten zum Terminal pro Tag) und lange Fahrzeiten (1-2 Fahrten zum Terminal pro Tag) unterteilt, um die relevantesten Transportdistanzen zu Terminals in Österreich abzudecken. Um die Variabilität der Zufuhrzeiten aufgrund unterschiedlicher Verkehrssituationen und anderer Prozessverzögerungen zu berücksichtigen, wurden diese als Dreiecksverteilungen wie folgt abgebildet:

- Kurze Fahrzeiten vom Forst zum Terminal: MIN = 5 min / MODE = 10 min / MAX = 15 min
- Mittlere Fahrzeiten vom Forst zum Terminal: MIN = 35 min / MODE = 40 min / MAX = 45 min
- Lange Fahrzeiten vom Forst zum Terminal: MIN = 65 min / MODE = 70 min / MAX = 75 min

Der Verschub findet entweder einmal oder zweimal täglich statt. In umfangreichen Testläufen wurden die Arbeitszeiten im Rahmen der Transportstrategie auf den Verschub abgestimmt.

- Einmaliger Verschub um 09:00: Arbeitsbeginn LKWs: 07:00
- Zweimaliger Verschub um 09:00 und 15:00: Arbeitsbeginn LKWs: 05:00

Die gesetzlichen Höchstgrenzen für Arbeits- und Lenkzeit werden im Simulationsmodell penibel eingehalten. Darüber hinaus ermöglichen die Tonnageszenarien neben der Einhaltung der aktuellen gesetzlichen Höchstgrenzen (44 t, durchschnittliches Eigengewicht Kran-LKW 20 t) auch die Untersuchung des Einflusses einer moderaten bzw. umfangreichen Anpassung dieser Grenzen in Richtung der gesetzlichen Rahmenbedingungen anderer führender Holzindustrienationen der EU. Um auch hier die Schwankungsbreiten der Transportmengen möglichst realitätsgetreu nachzubilden, wurden ebenfalls Dreiecksverteilungen implementiert:

- Geringe Transporttonnage (bei 44 t Gesamtgewicht): MIN = 23 t / MODE = 24 t / MAX = 25 t
- Moderate Anpassung der Transporttonnage (47 t): MIN = 26 t / MODE = 27 t / MAX = 28 t
- Umfangreiche Anpassung der Transporttonnage (50 t): MIN = 29 t / MODE = 30 t / MAX = 31 t

Beurteilung der Lösungsqualität

Die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse wurde durch detaillierte Prozessstudien (siehe EU-Projekt MultiStrat 2016–2018) zu multimodalen Holzlieferketten sowie umfangreiche Simulationsläufe sichergestellt. Alle Lösungen der Ergebnistabellen enthalten eine realitätsnahe LKW-Auslastung von über 95%. Wie aus Interviews mit Logistikmanagern hervorgeht, sind vor allem jene Lösungen der Ergebnistabellen von hoher praktischer Relevanz, die eine geringe Anzahl von halb-geladenen Waggonen enthalten. Die Lösungsqualität der jeweiligen Transportstrategie wird durch die Zielsetzung der jeweiligen Logistikmanager vorgegeben. So können das Erreichen einer maximalen wöchentlichen Umschlagkapazität, eine möglichst geringe Lagergröße, Lageraufbau (nach Stürmen) aber auch möglichst geringe durchschnittlichen und maximalen Wartezeiten der LKWs am Terminal sowie deren Kombination/Reihung entsprechende Bewertungsvorgaben darstellen. Demgegenüber können Einschränkungen bzgl. der maximal bzw. minimal zu verwendenden LKW- bzw. Waggonanzahl Kompromisse in der Lösungsbeurteilung bedingen. Eine entsprechend der vorgegebenen Zielsetzung und vorhandenen Einschränkungen vorteilhafte Transportstrategie beinhaltet somit neben dem richtigen Verhältnis von LKW- zu Waggonanzahl insbesondere die Abstimmung der einzelnen Prozesszeiten (Arbeitsbeginn LKWs, Zeitpunkt und Anzahl Verschub) je Zufuhrzeiten-, Verschubfrequenz- und Tonnageszenario.

Transportplanungstabellen

Zur übersichtlichen Darstellung und schnellen Auswahl, der für die jeweilige Planungssituation passenden Simulationslösung, wurden Tabellen für drei unterschiedliche Fahrzeiten (entsprechen auch Distanzen) mit jeweils einmaligen bzw. zweimaligen Verschub erstellt. Die Managementpraxis für die operative Holztransportplanung folgt einer rollierenden Wochenplanung, daher wurden alle Ergebnisse auf ein wöchentliches Niveau aggregiert und gerundet. Die Fahrzeiten gliedern sich in kurze (5/10/15 Minuten, ermöglichen 3-4 LKW Fahrten vom Forst zum Terminal pro Tag), mittlere (35/40/45 Minuten, 2-3 Fahrten) und lange (65/70/75, 1-2 Fahrten). Jede Tabelle enthält in den ersten beiden Spalten die gewählte Waggon/LKW Konfiguration, die mithilfe der in den folgenden sechs Spalten enthaltenen Kennzahlen (Umschlagkapazität pro Woche, Lagergröße pro Woche, Durchschnittliche Wartezeit in Minuten, Maximale Wartezeit in Minuten, Anzahl halb geladener Waggonen pro Woche und Anzahl reduzierter Fahrten pro Woche) auf Passgenauigkeit für die entsprechender Zielsetzung geprüft werden können. Die einzelnen Kennzahlen werden dabei jeweils in weitere Spalten untergliedert, die die Auswirkungen von möglichen Tonnageerhöhungen darstellen (T1 = 44t Gesamtgewicht, T2 = 47t Gesamtgewicht, T3 = 50t Gesamtgewicht) und wie der Vergleich verschiedener Fahrzeiten, einen Einblick in die Sensitivität bzw. Robustheit der Lösungskombinationen geben.

Kurze (5/10/15 min) Fahrzeit zum Terminal, einmaliger Verschub																		
Waggons	LKWs	Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	230	270	290	120	130	140	10	0	0	60	0	60	0	0	0	4	7
1	2	230	260	290	590	660	660	10	10	20	110	120	120	0	0	0	8	11
1	3	240	260	280	950	1060	1110	20	20	20	120	130	130	0	0	0	11	17
1	4	240	260	280	1310	1470	1560	20	20	30	130	140	130	0	0	0	15	24
1	5	240	260	290	1670	1870	2010	30	30	30	140	140	140	0	0	0	18	33
2	2	450	530	590	240	270	250	10	0	0	80	60	60	0	0	0	9	13
2	3	490	530	570	710	760	750	10	10	10	110	120	110	0	0	0	8	10
2	4	470	530	590	1190	1310	1290	10	10	20	110	120	130	0	0	0	15	18
2	5	470	530	590	1550	1710	1740	20	20	20	120	130	130	0	0	0	18	26
3	2	710	790	880	0	0	0	10	10	20	70	70	70	0	0	0	7	14
3	3	730	790	880	360	400	360	10	0	0	70	60	60	0	0	0	8	13
3	4	700	770	880	830	850	890	10	10	10	110	120	70	0	0	0	8	20
3	5	700	760	880	1300	1390	1380	10	10	20	110	120	120	0	0	0	13	22
3	6	730	790	880	1780	1940	1900	10	20	20	110	120	130	0	0	0	18	23
3	7	710	790	910	2140	2340	2360	20	20	20	120	130	130	0	0	0	23	35
3	8	700	790	880	2480	2740	2760	20	20	30	130	140	140	0	0	0	29	38
3	9	710	820	880	2780	3070	3210	30	30	30	130	140	130	0	0	0	33	50
3	10	700	820	880	3210	3500	3620	20	30	30	130	140	140	0	0	0	34	49
4	3	940	1060	1170	0	0	0	10	20	20	80	110	90	0	0	0	10	19
4	4	940	1060	1170	480	530	440	10	0	10	80	60	90	0	0	0	14	16
4	5	940	1020	1180	940	940	1000	10	10	10	110	110	70	0	0	0	7	25
4	6	940	1020	1180	1410	1430	1490	10	10	10	120	120	100	0	0	0	8	27
4	7	940	1060	1180	1900	2000	2000	10	20	20	120	120	120	0	0	0	18	28
4	8	940	1060	1170	2300	2480	2490	20	20	20	130	130	130	0	0	0	25	35
4	9	980	1060	1130	2610	2830	2920	20	20	20	130	140	130	0	0	0	25	38
4	10	940	1020	1180	2870	3160	3270	30	30	30	150	140	140	0	0	0	31	53
4	11	940	1090	1170	3350	3630	3730	20	20	30	130	150	150	0	0	0	36	51
5	4	1220	1320	1470	0	0	0	20	20	20	90	90	110	0	0	0	8	21
5	5	1130	1330	1470	600	660	540	10	0	10	80	60	70	0	0	0	22	23
5	6	1170	1370	1470	1060	1070	1090	10	10	10	120	70	70	0	0	0	18	28
5	7	1170	1320	1470	1540	1510	1630	10	10	10	110	110	80	0	0	0	10	33
5	8	1180	1320	1420	1880	2020	2070	20	20	20	120	120	120	0	0	0	23	36
5	9	1170	1320	1470	2320	2480	2550	20	20	20	120	130	130	0	0	0	26	44
5	10	1170	1320	1470	2670	2920	2960	30	30	30	130	140	140	0	0	0	33	49
5	11	1170	1320	1510	2920	3210	3300	30	30	30	140	130	150	0	0	0	37	60
5	12	1120	1320	1420	3340	3680	3850	30	30	30	130	150	140	0	0	0	45	68

6	4	1350	1620	1740	0	0	0	20	20	20	120	140	120	0	0	0	23	33
6	5	1410	1580	1700	20	0	0	20	20	30	160	130	130	0	0	0	13	23
6	6	1410	1580	1770	720	770	620	10	0	10	70	60	70	0	0	0	18	22
6	7	1410	1580	1830	1170	1200	1190	10	10	10	120	70	70	0	0	0	17	37
6	8	1410	1580	1760	1560	1590	1690	20	10	10	130	100	110	0	0	0	17	40
6	9	1410	1580	1820	1940	1990	2090	20	20	20	140	140	90	0	0	0	18	47
6	10	1350	1590	1690	2310	2450	2450	30	20	30	130	140	140	0	0	0	32	40
6	11	1410	1580	1760	2650	2890	2820	30	30	30	140	150	140	0	0	0	34	43
6	12	1470	1590	1750	3000	3300	3320	30	30	40	140	140	150	0	0	0	35	50
6	13	1410	1520	1700	3340	3730	3990	30	30	30	140	130	140	0	0	0	42	78
6	14	1350	1580	1760	3580	3890	4320	40	30	30	190	140	140	0	0	0	45	96
7	5	1630	1850	2120	0	0	0	20	20	30	130	160	150	0	0	0	18	41
7	6	1640	1850	2050	50	0	0	20	40	30	120	140	130	0	0	0	13	30
7	7	1710	1850	1990	830	890	680	10	0	10	80	60	110	0	0	0	17	11
7	8	1640	1910	2060	1230	1300	1270	10	10	10	130	100	110	0	0	0	28	38
7	9	1640	1910	2050	1680	1640	1740	20	10	10	130	120	130	0	0	0	19	39
7	10	1570	1850	2050	2060	2050	2200	20	20	20	140	130	130	0	0	0	23	52
7	11	1570	1850	2060	2430	2470	2560	20	20	20	150	140	140	0	0	0	27	52
7	12	1640	1850	2060	2760	2910	2900	30	30	30	140	140	140	0	0	0	30	47
7	13	1650	1850	1990	3080	3340	3400	30	30	30	140	140	150	0	0	0	38	55
7	14	1640	1850	2060	3400	3750	4160	30	30	20	150	140	130	0	0	0	47	98
7	15	1640	1850	2130	3510	3890	4320	40	40	30	200	140	140	0	0	0	49	108
7	16	1650	1850	2050	3640	4020	4460	50	50	40	210	150	140	0	0	0	48	102

Tabelle 7: Transportplanungstabelle für kurze Fahrzeit und einmaligen Vershub.

Kurze (5/10/15 min) Fahrzeit zum Terminal, zweimaliger Vershub																		
		Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
Waggons	LKWs	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	240	270	380	120	120	0	0	0	10	50	60	70	0	0	0	3	2
1	2	490	530	590	360	390	370	20	10	20	70	120	120	0	0	0	6	9
1	3	470	530	590	710	800	810	30	30	30	120	140	130	0	0	0	13	18
1	4	450	530	590	1070	1200	1260	40	40	40	130	130	140	0	0	0	18	28
1	5	450	530	590	1430	1600	1710	50	40	40	130	140	130	0	0	0	21	35
2	2	460	820	910	230	0	0	10	10	10	60	70	70	0	0	0	11	18
2	3	930	880	960	190	320	310	20	20	20	100	100	100	0	0	0	7	13
2	4	940	1060	1170	710	780	700	20	10	20	120	120	120	0	0	0	16	18
2	5	900	1060	1170	1070	1170	1140	30	20	30	120	130	130	0	0	0	22	28
3	2	830	860	890	0	0	0	10	20	30	80	120	120	0	0	0	3	5
3	3	810	1090	1310	230	20	0	10	10	10	70	70	70	0	10	10	6	23
3	4	1310	1260	1470	100	260	150	10	20	20	100	100	100	0	10	10	9	18
3	5	1330	1240	1470	610	790	660	20	20	20	110	120	120	0	10	10	8	16
3	6	1360	1530	1750	1070	1140	1000	20	10	30	120	120	130	0	0	0	20	27
3	7	1410	1580	1700	1430	1520	1470	20	20	30	120	130	130	0	0	0	22	28
3	8	1410	1590	1820	1770	1920	1880	30	30	30	130	130	130	0	0	0	28	43
3	9	1410	1530	1760	2070	2280	2320	30	30	40	130	130	140	0	0	0	28	50
3	10	1420	1590	1770	2500	2700	2720	30	30	40	130	140	130	0	0	0	31	48
4	3	1170	1230	1350	0	0	0	20	20	20	110	80	110	10	10	10	5	15
4	4	1030	1470	1760	420	20	0	10	10	10	70	70	80	0	10	10	3	26
4	5	1600	1620	1860	110	230	120	10	10	10	100	100	100	10	10	10	12	23
4	6	1770	1650	1820	430	760	650	20	20	20	110	110	110	0	10	10	18	23
4	7	1830	1690	1940	930	1110	1050	20	20	20	110	120	120	0	10	10	3	19
4	8	1810	2070	2310	1390	1450	1320	20	20	30	130	120	130	0	0	0	27	36
4	9	1830	2070	2340	1660	1790	1730	30	30	30	130	140	140	0	0	0	31	48
4	10	1820	2080	2430	1930	2100	2110	40	30	30	150	150	140	0	0	0	36	66
4	11	1880	2120	2350	2410	2570	2550	30	30	30	120	150	140	0	0	0	33	51
5	4	1530	1680	1790	0	0	0	10	20	20	80	80	100	10	10	10	13	22
5	5	1710	1930	2270	0	0	0	10	10	20	90	70	90	10	10	10	18	47
5	6	1970	2100	2260	30	20	10	10	20	10	100	100	100	10	10	10	10	23
5	7	2130	2080	2320	320	540	510	20	20	20	110	120	110	0	10	10	14	32
5	8	2180	2160	2400	690	870	870	20	20	20	110	120	120	0	10	10	13	33
5	9	2270	2520	2690	1160	1120	1130	30	20	30	120	120	120	0	0	0	18	33
5	10	2260	2560	2910	1540	1640	1470	30	30	30	130	130	150	0	0	0	33	48
5	11	2390	2700	2940	1750	1910	1810	40	30	40	140	140	150	0	0	0	39	51
5	12	2360	2640	2940	2160	2340	2370	30	30	30	130	140	130	0	0	0	38	66

6	4	1620	1750	1770	0	0	0	20	20	30	100	130	110	10	10	10	11	13
6	5	1850	2060	2220	0	0	0	20	20	20	130	170	130	10	10	10	18	31
6	6	2090	2400	2640	0	0	0	10	10	20	80	70	100	10	10	10	26	46
6	7	2460	2550	2920	0	0	0	20	20	20	110	100	150	10	10	10	8	38
6	8	2530	2620	2800	170	270	240	20	20	20	120	120	130	10	10	10	16	28
6	9	2650	2870	3090	500	450	540	20	20	20	120	130	130	0	10	10	14	40
6	10	2740	2980	3510	870	770	730	30	30	30	130	130	130	0	0	0	12	53
6	11	2640	3080	3440	1270	1240	1070	30	30	40	130	130	130	0	0	0	34	50
6	12	2780	3160	3400	1590	1720	1540	40	30	30	130	130	140	0	0	0	43	48
6	13	2830	3180	3540	1910	2110	2210	30	30	30	150	130	130	0	0	0	46	84
6	14	2820	3300	3530	2010	2150	2380	50	40	40	190	140	140	0	0	0	52	90
7	5	1980	2090	2220	0	0	0	20	20	30	120	120	130	10	10	10	9	20
7	6	1960	2220	2580	0	0	0	20	20	30	180	180	160	20	20	10	22	52
7	7	2420	2810	3060	0	0	0	10	10	20	70	160	160	10	10	10	33	53
7	8	2820	3120	3250	0	0	0	20	20	20	100	100	140	10	10	10	25	36
7	9	2820	3140	3510	130	80	10	20	20	20	110	110	130	10	10	10	23	48
7	10	2990	3160	3690	380	340	260	20	20	20	120	130	110	10	10	10	11	48
7	11	3130	3400	3840	690	650	600	30	30	30	120	120	130	0	10	0	19	52
7	12	3300	3510	3780	1100	1030	990	30	30	30	130	130	130	0	0	0	12	31
7	13	3200	3740	4010	1450	1460	1390	30	30	40	150	140	140	0	0	0	46	63
7	14	3300	3700	4250	1710	1880	2080	40	30	30	150	140	130	0	0	0	48	110
7	15	3300	3700	4110	1690	1880	2080	60	50	40	190	150	160	0	0	0	49	100
7	16	3280	3840	4110	1750	1880	2090	70	60	60	210	160	160	0	0	0	58	98

Tabelle 8: Transportplanungstabelle für kurze Fahrzeit und zweimaligen Vershub.

Mittlere (35/40/45 min) Fahrzeit zum Terminal, einmaliger Verschub																		
		Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
Waggons	LKWs	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	230	260	290	0	0	0	0	0	0	70	70	70	0	0	0	3	5
1	2	240	260	290	280	270	300	10	10	10	70	70	70	0	0	0	1	6
1	3	240	260	300	540	540	600	10	10	10	80	130	80	0	0	0	2	10
1	4	230	260	290	800	820	890	10	10	10	80	150	130	0	0	0	4	13
1	5	250	260	280	1070	1100	1190	10	10	10	120	80	130	0	0	0	3	13
2	1	240	260	300	0	0	0	0	0	0	70	0	70	0	0	0	2	5
2	2	470	530	570	0	0	0	0	0	0	70	70	70	0	0	0	5	8
2	3	470	530	590	270	270	240	10	10	10	70	70	70	0	0	0	5	8
2	4	470	530	590	530	540	600	10	10	10	70	70	70	0	0	0	6	16
2	5	450	530	590	770	810	890	10	10	10	70	80	80	0	0	0	10	22
3	1	250	260	300	0	0	0	0	0	0	70	70	70	0	0	0	1	4
3	2	480	530	590	0	0	0	10	10	10	70	70	70	0	0	0	4	9
3	3	680	790	880	0	0	0	0	0	0	70	70	80	0	0	0	9	17
3	4	710	790	910	240	230	140	10	0	0	70	70	70	0	0	0	6	8
3	5	710	790	880	530	530	550	10	10	10	70	70	80	0	0	0	7	16
3	6	700	790	880	770	810	890	10	10	10	80	80	80	0	0	0	11	25
3	7	710	790	880	1020	1080	1190	10	10	10	80	80	90	0	0	0	12	28
3	8	700	790	880	1270	1350	1490	10	10	10	80	150	150	0	0	0	14	33
3	9	700	790	880	1540	1630	1790	10	10	10	90	80	90	0	0	0	15	36
3	10	680	820	880	1830	1900	2090	10	20	20	90	140	150	0	0	0	18	38
4	2	500	530	590	0	0	0	0	0	0	70	70	70	10	10	10	3	8
4	3	750	760	910	0	0	0	10	10	10	80	80	80	0	0	0	1	13
4	4	940	1060	1210	0	0	0	0	0	0	70	70	80	0	0	0	10	23
4	5	940	1020	1180	220	210	20	10	0	0	80	70	70	0	0	0	6	3
4	6	940	1060	1170	510	510	440	10	0	10	70	80	80	0	0	0	10	13
4	7	940	1060	1170	780	800	850	10	10	10	80	90	80	0	0	0	12	25
4	8	940	1060	1170	1020	1070	1180	10	10	10	80	80	150	0	0	0	14	33
4	9	940	1060	1170	1280	1350	1470	10	10	10	140	150	150	0	0	0	16	35
4	10	940	1060	1140	1520	1630	1770	10	20	10	110	90	160	0	0	0	19	38
4	11	940	1060	1170	1770	1890	2070	20	20	20	140	140	160	0	0	0	20	44
5	3	740	800	880	0	0	0	10	0	0	80	70	70	10	10	10	5	12
5	4	950	1060	1170	0	0	0	10	10	10	80	80	80	0	0	0	9	18
5	5	1170	1270	1470	0	0	0	10	10	10	100	80	90	0	0	0	8	25
5	6	1180	1320	1470	190	130	0	0	0	0	70	80	100	0	0	0	7	8
5	7	1170	1270	1470	500	490	310	10	0	10	70	80	80	0	0	0	8	9
5	8	1220	1270	1460	770	780	730	10	10	10	80	100	90	0	0	0	5	17
5	9	1170	1320	1470	1020	1070	1090	10	10	10	80	140	90	0	0	0	17	31

5	10	1120	1320	1480	1270	1340	1410	10	10	10	100	100	100	0	0	0	23	42
5	11	1180	1320	1420	1510	1620	1660	20	20	20	110	140	100	0	0	0	21	33
5	12	1170	1320	1520	1760	1890	1970	20	20	20	100	140	160	0	0	0	23	47
6	4	950	1060	1170	0	0	0	10	0	0	80	80	80	10	10	10	9	18
6	5	1180	1330	1420	0	0	0	20	20	20	90	90	90	0	0	0	13	20
6	6	1350	1650	1760	0	0	0	20	20	20	90	90	90	0	0	0	25	34
6	7	1410	1640	1770	160	60	0	0	0	10	70	80	100	0	0	0	11	17
6	8	1410	1530	1760	500	430	150	10	10	10	100	90	90	0	0	0	4	0
6	9	1410	1580	1820	770	760	530	10	10	10	80	100	90	0	0	0	13	14
6	10	1350	1590	1750	1020	1050	900	10	10	10	120	100	100	0	0	0	23	23
6	11	1350	1580	1770	1250	1320	1250	20	10	20	110	110	110	0	0	0	25	35
6	12	1470	1520	1760	1500	1600	1540	20	20	20	110	170	180	0	0	0	13	28
6	13	1410	1590	1760	1750	1870	1810	20	20	20	160	160	180	0	0	0	25	34
6	14	1410	1590	1760	1980	2130	2080	30	20	30	160	170	170	0	0	0	28	38
7	5	1190	1320	1470	0	0	0	10	10	10	90	80	80	10	10	10	11	23
7	6	1420	1580	1760	0	0	0	20	20	10	90	90	90	0	0	0	13	28
7	7	1640	1850	2060	0	0	0	30	30	30	110	110	90	0	0	0	18	35
7	8	1650	1850	2040	160	20	0	10	10	10	80	120	100	0	0	0	5	19
7	9	1640	1850	2050	480	380	20	10	10	10	100	100	100	0	0	0	9	-4
7	10	1640	1910	1980	770	710	430	10	10	10	100	100	150	0	0	0	18	0
7	11	1650	1850	2060	1020	1010	760	10	10	10	110	100	170	0	0	0	16	13
7	12	1570	1850	2120	1260	1300	1100	20	10	20	110	120	100	0	0	0	27	33
7	13	1640	1780	2060	1490	1570	1430	20	20	20	170	170	170	0	0	0	18	30
7	14	1570	1850	1980	1740	1830	1690	20	20	30	160	170	190	0	0	0	31	30
7	15	1640	1850	2050	1970	2080	1960	30	30	30	170	180	180	0	0	0	27	33
7	16	1640	1850	2120	2200	2350	2220	30	30	40	180	170	190	0	0	0	30	42

Tabelle 9: Transportplanungstabelle für mittlere Fahrzeit und einmaligen Verschub.

Mittlere (35/40/45 min) Fahrzeit zum Terminal, zweimaliger Verschub																		
		Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
Waggons	LKWs	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	250	260	290	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	1	3
1	2	470	530	590	0	0	0	10	10	20	120	110	110	0	0	0	5	10
1	3	470	530	570	240	270	300	20	20	20	130	110	120	0	0	0	8	13
1	4	470	530	590	480	540	590	20	30	30	120	120	110	0	0	0	10	19
1	5	470	530	590	720	800	890	30	30	30	120	120	110	0	0	0	12	24
2	1	250	280	290	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	3	3
2	2	490	530	570	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	3	7
2	3	710	760	880	0	0	0	10	10	10	110	110	110	0	0	0	4	14
2	4	980	1060	1210	0	0	0	20	20	20	110	110	110	0	0	0	7	19
2	5	940	1060	1170	240	270	300	20	20	20	80	120	130	0	0	0	13	24
3	1	240	270	290	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	3	4
3	2	470	550	590	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	7	10
3	3	710	790	880	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	7	14
3	4	940	1060	1140	0	0	0	10	10	10	110	110	100	10	10	10	10	17
3	5	1180	1320	1470	0	0	0	10	10	10	110	110	110	0	0	0	12	24
3	6	1410	1590	1760	0	0	0	20	20	20	110	110	110	0	0	0	15	29
3	7	1410	1530	1770	250	270	300	20	20	20	120	120	120	0	0	0	12	34
3	8	1410	1590	1760	480	540	600	20	20	20	120	120	110	0	0	0	20	39
3	9	1410	1590	1770	720	800	890	20	30	30	120	130	130	0	0	0	22	44
3	10	1350	1590	1820	960	1070	1190	30	30	30	120	130	120	0	0	0	29	58
4	2	470	530	590	0	0	0	0	0	0	20	20	10	0	0	0	5	10
4	3	680	800	890	0	0	0	0	0	0	20	20	20	10	0	0	10	18
4	4	900	1060	1180	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	13	23
4	5	1170	1330	1470	0	0	0	10	10	10	110	110	110	10	10	10	13	25
4	6	1420	1590	1830	0	0	0	10	10	10	120	110	110	10	10	10	14	34
4	7	1640	1860	2060	0	0	0	20	20	20	110	120	100	0	0	0	18	35
4	8	1880	2120	2350	0	0	0	20	20	20	120	120	110	0	0	0	20	39
4	9	1800	2110	2270	240	270	300	20	20	20	130	130	130	0	0	0	28	44
4	10	1880	2190	2270	480	540	600	20	20	30	130	130	140	0	0	0	31	43
4	11	1880	2110	2280	720	800	890	30	30	30	130	130	130	0	0	0	26	48
5	3	740	790	910	0	0	0	0	0	0	20	20	20	10	0	0	4	14
5	4	950	1020	1180	0	0	0	0	0	0	20	20	20	10	0	0	6	19
5	5	1170	1370	1470	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	17	25
5	6	1420	1590	1710	0	0	0	10	10	10	110	110	100	20	20	20	14	24
5	7	1650	1860	2060	0	0	0	10	10	10	120	110	110	10	10	10	18	34
5	8	1890	2120	2350	0	0	0	10	20	20	120	120	120	10	10	10	19	38
5	9	2120	2380	2560	0	0	0	20	20	20	130	120	120	0	0	0	22	37

5	10	2350	2650	2850	0	0	0	20	20	20	120	120	120	0	0	0	25	42
5	11	2350	2650	2940	250	270	300	20	20	20	130	130	130	0	0	0	27	53
5	12	2350	2550	2940	490	540	600	20	30	30	130	130	130	0	0	0	21	58
6	4	950	1060	1180	0	0	0	0	0	0	20	20	20	10	0	0	9	19
6	5	1230	1320	1470	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	0	0	8	20
6	6	1420	1590	1770	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	14	29
6	7	1650	1850	2070	0	0	0	10	10	10	110	100	100	20	20	20	17	35
6	8	1960	2120	2350	0	0	0	10	10	10	110	120	110	20	20	20	13	33
6	9	2040	2390	2650	0	0	0	10	10	20	120	120	110	10	10	10	29	51
6	10	2360	2650	2940	0	0	0	20	20	20	130	120	120	10	10	10	24	48
6	11	2590	3020	3220	0	0	0	20	20	20	120	120	120	0	0	0	36	53
6	12	2820	3180	3650	0	0	0	20	20	20	130	120	130	0	0	0	30	69
6	13	2820	3300	3520	250	270	300	20	20	30	140	130	120	0	0	0	42	63
6	14	2820	3170	3520	370	400	450	30	30	30	190	190	190	0	0	0	32	65
7	5	1190	1320	1470	0	0	0	0	0	0	40	20	20	10	0	0	11	23
7	6	1480	1590	1770	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	0	0	9	24
7	7	1650	1930	2060	0	0	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	23	34
7	8	1890	2120	2350	0	0	0	10	10	10	100	100	100	30	30	30	19	38
7	9	2110	2380	2560	0	0	0	10	10	10	110	100	110	20	20	20	23	38
7	10	2260	2650	2940	0	0	0	10	10	20	110	110	100	20	20	20	33	57
7	11	2600	2910	3240	0	0	0	20	20	20	110	110	100	10	10	10	26	53
7	12	2820	3170	3530	0	0	0	20	20	20	110	110	110	10	10	10	29	59
7	13	3060	3310	3830	0	0	0	20	20	20	120	110	110	0	0	0	21	64
7	14	3300	3840	4130	0	0	0	20	20	20	120	110	110	0	0	0	45	69
7	15	3430	3560	4110	130	140	150	30	30	30	190	190	190	0	0	0	12	58
7	16	3150	3700	4110	260	270	300	40	40	40	200	200	210	0	0	0	47	83

Tabelle 10: Transportplanungstabelle für mittlere Fahrzeit und zweimaligen Verschub.

Lange (65/70/75 min) Fahrzeit zum Terminal, einmaliger Verschub																		
		Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
Waggons	LKWs	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	190	160	150	0	0	0	20	30	40	50	50	50	0	0	0	0	0
1	2	230	260	300	80	30	10	50	60	70	110	110	110	0	0	0	0	0
1	3	230	260	290	190	160	150	70	80	80	120	130	130	0	0	0	0	2
1	4	240	260	290	320	310	300	70	80	90	120	130	130	0	0	0	1	3
1	5	230	260	290	440	430	450	80	90	90	120	130	130	0	0	0	2	6
2	1	200	170	150	0	0	0	20	30	40	50	50	50	0	0	0	0	0
2	2	340	310	300	0	0	0	30	30	40	60	60	60	0	0	0	0	0
2	3	440	430	450	0	0	0	40	50	60	110	110	110	0	0	0	0	1
2	4	470	530	590	130	50	0	60	70	70	110	120	120	0	0	0	0	0
2	5	470	530	590	260	170	160	60	80	80	120	130	130	0	0	0	0	2
3	1	190	170	150	0	0	0	20	30	40	50	50	50	0	0	0	0	0
3	2	360	320	290	0	0	0	30	40	40	60	60	60	0	0	0	0	0
3	3	500	460	440	0	0	0	30	40	40	60	60	60	0	0	10	0	0
3	4	600	570	590	0	0	0	40	50	60	100	110	110	0	0	0	0	0
3	5	660	700	740	0	0	0	50	60	70	110	120	120	0	0	0	3	7
3	6	730	790	880	170	50	10	60	70	70	120	120	120	0	0	0	0	0
3	7	700	760	880	290	180	150	70	80	80	130	130	130	0	0	0	0	3
3	8	700	790	850	400	310	300	70	80	90	130	130	140	0	0	0	0	4
3	9	730	790	880	510	440	450	80	90	90	130	140	140	0	0	0	0	8
3	10	710	790	880	630	580	600	80	90	90	140	140	150	0	0	0	3	12
4	2	340	310	300	0	0	0	30	40	40	60	60	60	0	0	0	0	0
4	3	490	440	450	0	0	0	30	40	40	70	60	60	0	0	10	0	0
4	4	630	570	610	0	0	0	30	40	40	60	60	60	10	10	10	0	0
4	5	730	740	740	0	0	0	40	50	60	110	110	110	0	10	10	1	1
4	6	850	860	890	0	0	0	50	60	60	110	120	120	0	0	0	1	3
4	7	930	960	1040	0	0	0	60	70	70	120	130	130	0	0	0	3	9
4	8	940	1060	1170	180	60	10	60	70	80	120	130	130	0	0	0	0	5
4	9	980	1060	1170	290	190	150	70	80	80	140	150	150	0	0	0	0	4
4	10	980	1020	1210	420	320	300	70	80	90	140	150	150	0	0	0	0	9
4	11	940	1060	1130	540	440	450	80	90	90	150	150	150	0	0	0	2	8
5	3	520	450	460	0	0	0	30	40	40	60	60	60	0	0	0	0	0
5	4	640	560	590	0	0	0	30	40	40	100	60	60	10	10	10	0	0
5	5	780	710	760	0	0	0	30	40	40	120	60	60	10	10	10	0	0
5	6	910	830	910	0	0	0	40	50	50	110	110	110	10	10	10	0	0
5	7	980	1000	990	0	0	0	50	60	60	120	120	120	0	10	10	2	1
5	8	1100	1140	1180	0	0	0	50	70	70	120	130	130	0	0	0	3	7
5	9	1170	1230	1320	0	0	0	60	70	80	130	140	140	0	0	0	5	13

5	10	1170	1270	1470	180	40	10	70	80	80	140	140	140	0	0	0	0	11
5	11	1170	1370	1470	330	180	150	70	80	90	140	150	150	0	0	0	4	10
5	12	1180	1310	1470	430	320	300	80	90	90	150	150	160	0	0	0	2	13
6	4	650	550	590	0	0	0	30	40	40	100	60	60	10	10	0	0	0
6	5	740	710	740	0	0	0	30	40	40	110	60	60	10	10	10	0	0
6	6	870	830	880	0	0	0	40	40	50	140	60	60	10	10	10	0	1
6	7	980	980	1030	0	0	0	40	50	50	130	110	110	10	10	10	0	4
6	8	1100	1090	1190	0	0	0	50	60	60	120	130	130	10	10	10	0	8
6	9	1210	1230	1320	0	0	0	60	70	70	140	140	140	0	10	10	2	9
6	10	1320	1360	1470	0	0	0	60	70	80	140	140	150	0	0	0	3	13
6	11	1400	1490	1620	0	0	0	70	80	80	150	140	140	0	0	0	8	18
6	12	1410	1580	1760	180	40	0	70	80	90	140	140	140	0	0	0	3	14
6	13	1410	1580	1760	330	170	150	80	90	90	150	150	150	0	0	0	1	14
6	14	1410	1640	1770	420	320	300	80	90	100	190	200	200	0	0	0	11	20
7	5	770	720	740	0	0	0	30	40	40	60	60	60	10	10	10	0	0
7	6	910	850	890	0	0	0	40	40	50	120	60	60	10	10	10	0	0
7	7	990	970	1030	0	0	0	40	40	50	140	130	70	10	20	10	0	3
7	8	1160	1100	1130	0	0	0	40	50	60	130	130	130	10	10	10	0	0
7	9	1230	1240	1330	0	0	0	50	60	60	130	140	140	10	10	10	1	8
7	10	1340	1370	1470	0	0	0	60	70	70	140	140	140	10	10	10	3	11
7	11	1490	1450	1620	0	0	0	60	70	80	140	140	150	0	10	10	0	11
7	12	1560	1620	1760	0	0	0	70	80	80	140	140	140	0	0	0	5	17
7	13	1640	1760	1910	0	0	0	70	80	80	140	150	150	0	0	0	10	23
7	14	1640	1850	2050	220	50	10	80	80	90	150	150	150	0	0	0	3	17
7	15	1640	1850	1990	300	180	150	80	90	100	210	210	220	0	0	0	8	17
7	16	1640	1850	2060	430	320	300	90	100	100	220	220	230	0	0	0	8	24

Tabelle 11: Transportplanungstabelle für lange Fahrzeit und einmaligen Vershub.

Lange (65/70/75 min) Fahrzeit zum Terminal, zweimaliger Vershub																		
		Umschlag- kapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min			Maximale Wartezeit in Min			Halb geladene Waggons pro Woche			Reduzierte Fahrten pro Woche	
Waggons	LKWs	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T2	T3
1	1	230	230	230	0	0	0	0	0	10	60	60	60	0	0	0	0	0
1	2	360	370	410	0	0	0	20	20	20	70	70	70	0	0	0	1	4
1	3	460	480	530	20	50	50	20	20	20	80	90	90	0	0	0	4	8
1	4	470	510	540	160	170	240	30	30	30	120	110	120	0	0	0	4	13
1	5	470	490	550	280	350	380	30	30	40	120	120	130	0	0	0	8	15
2	1	230	220	230	0	0	0	0	0	10	60	60	60	0	0	0	0	0
2	2	470	430	450	0	0	0	0	10	10	60	60	60	0	0	0	0	0
2	3	580	640	630	0	0	0	10	20	10	70	70	70	0	0	0	5	4
2	4	710	780	820	0	0	0	20	20	20	80	80	80	0	0	0	6	9
2	5	820	920	1000	0	0	0	20	20	30	80	80	90	0	0	0	8	15
2	6	940	1030	1160	10	30	20	30	30	30	80	80	90	0	0	0	9	19
2	7	930	990	1160	140	170	170	30	30	30	80	110	110	0	0	0	8	22
3	6	1010	1210	1210	0	0	0	20	20	20	80	80	110	10	10	10	17	17
3	7	1180	1350	1390	0	0	0	20	30	20	80	90	80	0	0	10	14	18
3	8	1300	1450	1590	0	0	0	30	30	30	90	120	110	0	0	0	13	24
3	9	1470	1580	1760	10	10	0	30	30	30	90	90	90	0	0	0	9	23
3	10	1410	1560	1760	130	170	150	30	30	30	110	120	120	0	0	0	16	31
4	9	1510	1620	1810	0	0	0	30	30	30	160	160	100	10	10	10	9	25
4	10	1650	1830	2000	0	0	0	30	30	30	160	160	110	0	10	10	15	29
4	11	1760	1980	2180	0	0	0	30	30	30	160	160	100	0	0	0	18	35
4	12	1880	2190	2430	0	0	0	30	30	30	160	160	160	0	0	0	26	46
4	13	1880	2040	2360	120	140	150	40	40	40	170	160	160	0	0	0	15	43
5	12	2000	2230	2390	0	0	0	30	30	30	180	170	120	10	10	10	19	33
5	13	2030	2370	2590	0	0	0	40	30	30	170	170	160	0	10	10	28	47
5	14	2240	2520	2690	0	0	0	40	30	30	170	160	170	0	0	0	23	38
5	15	2360	2650	2940	0	0	0	40	40	40	170	170	160	0	0	0	24	48
5	16	2360	2550	2930	120	140	150	50	40	40	180	180	170	0	0	0	18	50
6	15	2480	2760	2880	0	0	0	40	30	30	240	170	160	10	10	10	23	33
6	16	2590	2810	3270	0	0	0	40	30	30	180	180	180	0	10	10	18	57
6	17	2710	3050	3360	0	0	0	50	40	30	260	180	170	0	0	0	28	54
6	18	2820	3050	3510	0	0	0	50	40	40	180	180	180	0	0	0	19	58
6	19	2700	3290	3410	120	130	90	60	50	50	230	180	230	0	0	0	50	57
7	18	3060	3290	3570	0	0	0	50	40	40	190	190	180	10	10	10	19	43
7	19	3050	3420	3740	0	0	0	50	40	40	250	190	190	0	10	10	31	58
7	20	3170	3580	3930	0	0	0	50	40	40	190	190	190	0	0	0	34	63
7	21	3300	3830	4040	0	0	0	60	50	50	250	180	220	0	0	0	44	62
7	22	3290	3690	4050	120	100	0	60	60	60	270	250	220	0	0	0	32	53

7	23	3300	3690	4050	240	260	150	70	70	60	260	220	220	0	0	0	34	55
7	24	3290	3700	4080	360	410	370	70	70	70	250	260	240	0	0	0	38	67
7	25	3290	3690	4200	480	540	600	80	80	70	250	250	220	0	0	0	38	86

Tabelle 12: Transportplanungstabelle für lange Fahrzeit und zweimaligen Vershub.

Einsparung von LKW-Fahrten und CO₂ Emissionen durch Tonnageerhöhung

Die Auswirkungen einer möglichen Tonnageerhöhung auf die Anzahl der LKW-Fahrten ist in der Spalte „Reduzierte Fahrten pro Woche“ der Transportplanungstabellen ersichtlich. Dabei gibt die Spalte T2 die Anzahl von LKW-Fahrten an, die bei einer Tonnageerhöhung von 44t auf 47t eingespart werden kann und die Spalte T3 die Anzahl eingesparter LKW-Fahrten bei einer Tonnageerhöhung von 44t auf 50t.

Diese Anzahl errechnet sich aus der Differenz des jeweiligen Umschlags auf Waggons und der Lagergrößen pro Woche dividiert durch die zulässige Transporttonnage und multipliziert mit zwei, da für jede Fahrt zum Terminal auch eine Rückfahrt zum Forst berücksichtigt werden muss: $((\text{Umschlag T2} + \text{Lagergröße T2}) - (\text{Umschlag T1} + \text{Lagergröße T1})) / 24 \cdot 2$. Ein Beispiel: kurze Fahrzeit zum Terminal, möglichst hoher Umschlag ohne Lager aufzubauen, 7 Waggons und 5 LKWs werden für einen Verschub pro Tag eingesetzt. Bei einer Tonnageerhöhung auf 50 Tonnen können somit 81,83 Fahrten $((2.120+0) - (1.630+0)) / 24 \cdot 2$ pro Woche eingespart werden. Hochgerechnet auf ein Jahr (mit 52 Wochen) ergibt dies 2.123 eingesparte Fahrten.

Folgende Tabelle enthält beispielhaft weitere auf diesen Berechnungen beruhende jährliche Einsparungspotentiale, die für realitätsnahe Lösungskombinationen der Transportplanungstabellen (hohe Umschlagkapazität, kein Lageraufbau) ausgewählt wurden:

Fahrzeit zum Terminal	Anzahl Verschub	LKWs	Waggons	Eingesparte Fahrten bei Tonnageerhöhung auf 47t	Eingesparte Fahrten bei Tonnageerhöhung auf 50t
Kurz	1	5	7	953	2.123
Kurz	2	8	7	1.300	1.863
Mittel	1	7	7	910	1.820
Mittel	2	14	7	2.340	3.597
Lang	1	13	7	520	1.170
Lang	2	21	7	2.297	3.207

Tabelle 13: Jährliche Einsparungspotentiale von LKW-Fahrten infolge einer Tonnageerhöhung.

Bei einer moderaten Tonnageerhöhung von 44t auf 47t ergibt der Durchschnitt über alle 936 Simulationsläufe eine 6% Ersparnis bei der Anzahl der LKW-Fahrten bei einem Verschub (kurze Fahrzeiten 9%, mittlere 8%, lange 2%) bzw. 10% Ersparnis bei zwei Verschüben (kurze Fahrzeiten 8%, mittlere 11%, lange 9%). Im Falle einer Tonnageerhöhung von 44t auf 50t reduzieren sich die benötigten LKW-Fahrten um 10% bei einmaligem Verschub (kurze Fahrzeiten 14%, mittlere 14%, lange 7%) bzw. um 17% für zweimaligen Verschub (kurze Fahrzeit 14%, mittlere 19%, lange 16%).

Erste Untersuchungen für forstliche Holztransporte zeigen, dass sich durch die Reduktion der LKW-Fahrten auch eine CO₂ Ersparnis ergibt, da eine Tonnageerhöhung der Nutzlast um 10% lediglich in einer Erhöhung des CO₂ Ausstoßes um 1% resultiert (Klvac et al. 2013), die durch die zahlreichen eingesparten Fahrten mehr als kompensiert wird.

Zusammengefasste Ergebnisse

- Verladebahnhöfe (Zugterminals) stellen wesentliche, zusätzliche Transportkapazitäten durch Zugwaggons bereit, die entscheidend zum verlässlichen, effizienten und nachhaltigen Management von Holzlieferketten beitragen.
- Forst-LKW-Fahrer stellen einen zukünftig kritisch werdenden Engpass dar und sind daher vorrangig für unverzichtbare Aufgaben einzusetzen, also den Holztransport vom Forst zu möglichst nahegelegenen Zug- oder LKW-Terminals und nicht für lange Transportfahrten zur Industrie.
- Eine Erhöhung der LKW Tonnage führt bei gut abgestimmten Prozessen (bedingen längere Be-/Entladezeiten) zu einer Reduktion der benötigten LKW Anzahl bzw. Einsparung von LKW Fahrten und damit zu einer CO₂ Einsparung.
- Die Leadtime (Lieferzeit vom Forst zur Industrie) ist eine wesentliche Kennzahl, die nach Kalamitäten oft erheblich zunimmt und zu Holzqualitätsverlusten führt.
- Simulationsmodelle bieten durch Szenarioanalysen wertvolle Entscheidungsunterstützung für Manager multimodaler Holzlieferketten. KPIs verschiedener Lieferkettenkonfigurationen können berechnet und anhand von Was-Wäre-Wenn Analysen verglichen werden, ohne dass bei komplexen Entscheidungen reale Umstellungszeiten, Kosten, Gefahren oder Emissionen entstehen.
- Gute Abstimmung ist oft wichtiger als zusätzliche Ressourcen. Mehr LKWs können nicht automatisch mehr Waggons befüllen, wenn die einzelnen Prozesse nicht gut aufeinander abgestimmt sind.
- Die Transportplanungstabellen (siehe Tabelle 7-12) sind vielseitig einsetzbar und helfen bei der Erstellung von Notfallplänen, weisen auf CO₂ Einsparpotentiale hin und unterstützen das Design von Holzlieferketten.

Workshop

Zur intensiven Auseinandersetzung mit dem Transportmodell und den Transportplanungstabellen wurde ein anwendungsorientierter Workshop (inkl. Evaluierungsfragebögen) entwickelt und für den 12.3.2020 für die Mitglieder der FHP Steuerungsgruppe und für Brancheninteressierten angeboten, leider musste der Workshop aufgrund der SARS-CoV-2-Krise abgesagt werden.

4. SIMULATIONSMODELL LKW-TERMINAL

Um die Strategie „Umladung von Kran-LKW auf Sattelaufleger“ zu evaluieren, wurde die Methode der diskreten Event-Simulation verwendet. Die Grundidee der Umladung auf Sattelaufleger besteht darin, neben einem raschen Abtransport von Rundholz aus dem Wald, einen effizienteren Einsatz der teureren und knappen Kran-LKWs zu ermöglichen. Entscheidend für die Effizienz gegenüber dem reinen Kran-LKW Transport sind die Umladungszeiten und Transportentfernungen sowie eine optimierte Abstimmung der Relationen eingesetzter Transportressourcen, d.h. der Anzahl der eingesetzten Kran-LKWs, Sattelaufleger und Zugfahrzeuge.

Diskretes Event-Simulationsmodell

Die in der Software AnyLogic modellierte Simulation wurde als diskrete Event-Simulation erstellt und umfasst dabei die drei Module (1) Forst, (2) Terminal und (3) Industrie (Abbildung 7). Der Großteil der Logik findet innerhalb des Terminals statt. Beim Simulationsstart können 31 Eingabeparameter verändert werden. Zudem gibt es 11 Funktionen, 9 Sammlungen, sowie 24 globale Variablen und 9 Zeitpläne, die für einen korrekten logischen Ablauf sorgen. Zum Speichern der Simulationsergebnisse wurden 19 Datensätze angelegt. Der Weg, den das Sägerundholz zurücklegt, ist in Abbildung 7 dargestellt. Abbildung 8 zeigt ein detailliertes Ablaufdiagramm, das die komplexe Terminallogik als theoretische Grundlage für die Erstellung des Simulationsmodells enthält.

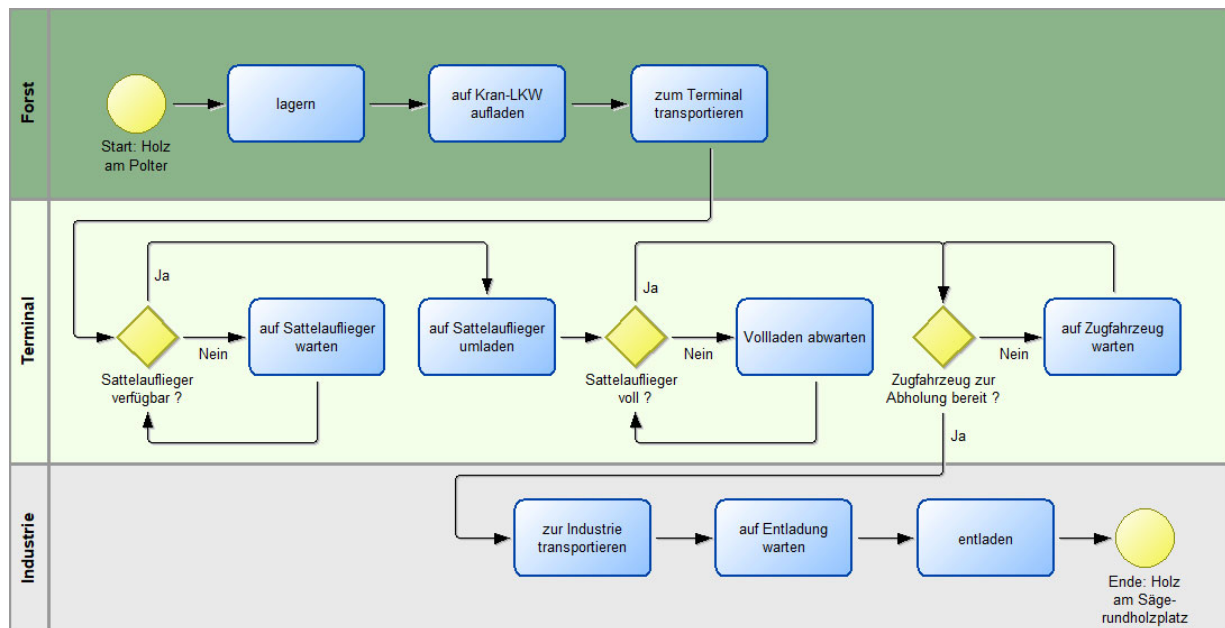


Abbildung 7: Transportweg des Sägerundholzes vom Forst zur Industrie.

Ein Kran-LKW transportiert Sägerundholz aus dem Forst und lädt das Rundholz am Terminal auf einen Sattelaufleger um. Dabei wird nicht zwischen unterschiedlichen Ausformungen unterschieden. Die in der Realität vorkommenden Schwankungen werden durch verschiedene Fahrzeiten zu Firmen abgebildet. Ein Kran-LKW belädt immer den Sattelaufleger mit der geringsten Restladekapazität. Ein Kran-LKW, der einen Sattelaufleger voll beladen hat, aber noch über Ladung verfügt, fährt entweder zum nächsten freien Sattelaufleger oder reiht sich in einer Warteschlange am Terminal ein. Ein Sattelaufleger kann immer nur

von einem Kran-LKW gleichzeitig beladen werden. Es besteht keine Möglichkeit der Zwischenlagerung von Rundholz am Terminal.

Sobald der Sattelaufleger voll beladen ist, wird dieser von einem Zugfahrzeug abgeholt und zur Industrie transportiert. Der Transport zur Industrie wird dabei ausschließlich mit der Fahrzeugkombination Zugfahrzeug und Sattelaufleger durchgeführt. Zugfahrzeuge sind immer entweder mit einem leeren Sattelaufleger zum Terminal oder mit einem vollen Sattelaufleger zur Industrie unterwegs. Das heißt, diese sattern bei Ankunft am Terminal einen leeren Sattelaufleger ab und verlassen den Terminal erst nach dem Aufsatteln eines vollen Sattelauflegers. Nach der Entladung bei der Industrie wird der leere Sattelaufleger wieder zurück zum Terminal transportiert.

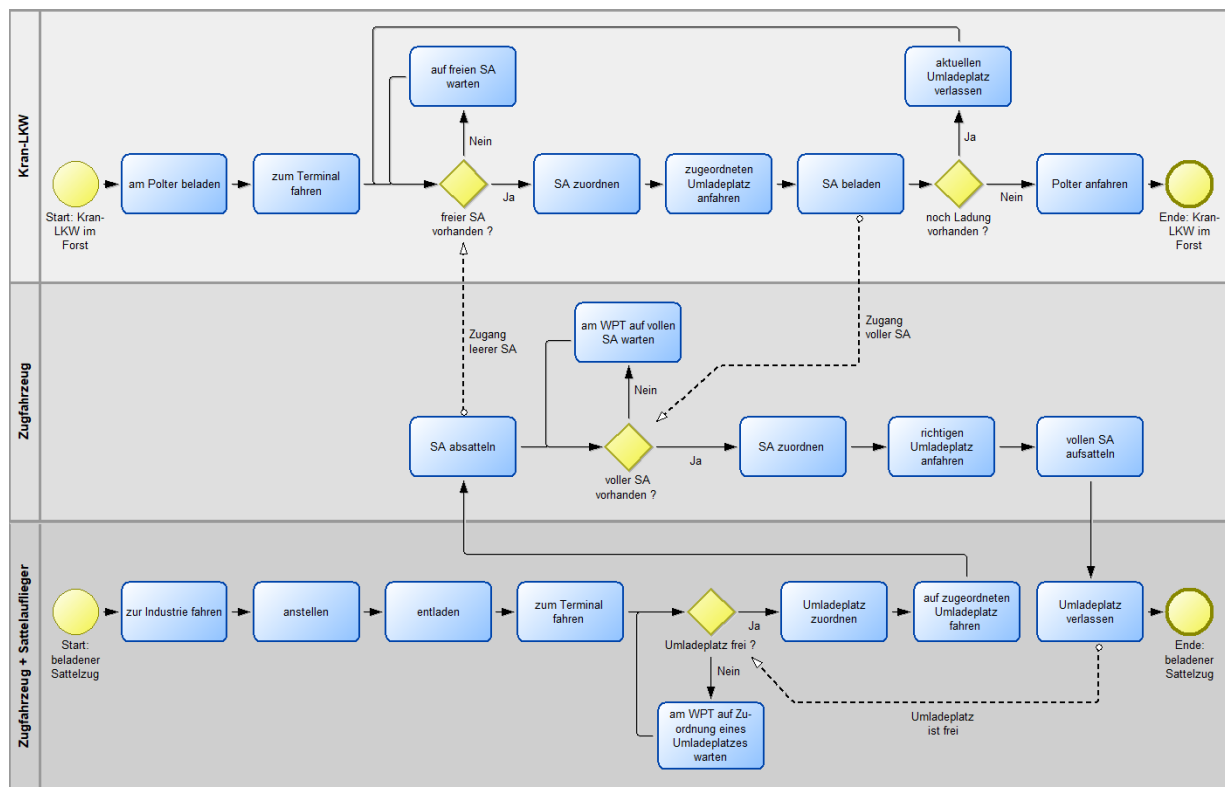


Abbildung 8: Transport- und Umladeprozesse bei Umschlag über einen LKW-Terminal. (WPT = Warteplatz Terminal, SA = Sattelaufleger)

Der tägliche Arbeitsbeginn für Zugfahrzeuge und Kran-LKWs ist um eine Stunde versetzt, sodass Kran-LKWs eine Stunde früher beginnen. Das Schichtende für jedes einzelne Fahrzeug kann entweder am Terminal direkt oder an einem dafür vorgesehenen Parkplatz zwischen Terminal und Forst (für Kran-LKWs) oder zwischen Terminal und Fabrik (für Zugfahrzeuge) stattfinden. Die gesetzlich fixierten Arbeits- und Lenkzeiten werden strikt eingehalten und nie überschritten (maximal 10,5 h statt mögliche 12 h), somit liefert das Modell in der Praxis umsetzbare Ergebnisse.

Ansichten des Simulationsmodells

Beim Simulationsablauf kann zwischen vier verschiedenen Ansichten gewechselt werden: Animation und Parameter, Statistics I, Statistics II und Logic (Flussdiagramme). Dabei sind die ersten beiden Ansichten für die Auswertung ausgewählter Parameter von Relevanz. Einerseits können durch die Beobachtung der Animation und der zugehörigen Parametereinstellungen (Abbildung 9) beispielsweise atypisch lange

Wartezeiten aufgezeigt werden. Andererseits kann die Veränderung der wichtigsten statistischen Kennzahlen (Abbildung 10) infolge von Parameteranpassungen beim Simulationsstart überwacht werden.

Im Modell ist am Terminal ein Parkplatz für Kran-LKWs und Zugfahrzeuge vorhanden, sodass diese bei hoher Auslastung der Stellplätze einen vorgegebenen Warteplatz haben. In der Realität wird ein solcher Platz nicht benötigt, es würde sich einfach eine Warteschlange in der Zufahrt zum LKW-Terminal bilden.

Um neben den Output-Kennzahlen auch die Entwicklung von variablen Input-Werte verfolgen und überprüfen zu können, werden in unter „Statistics II“ im Simulationsmodell u. a. die Arbeits-, Lenk- und Ladezeiten gespeichert.

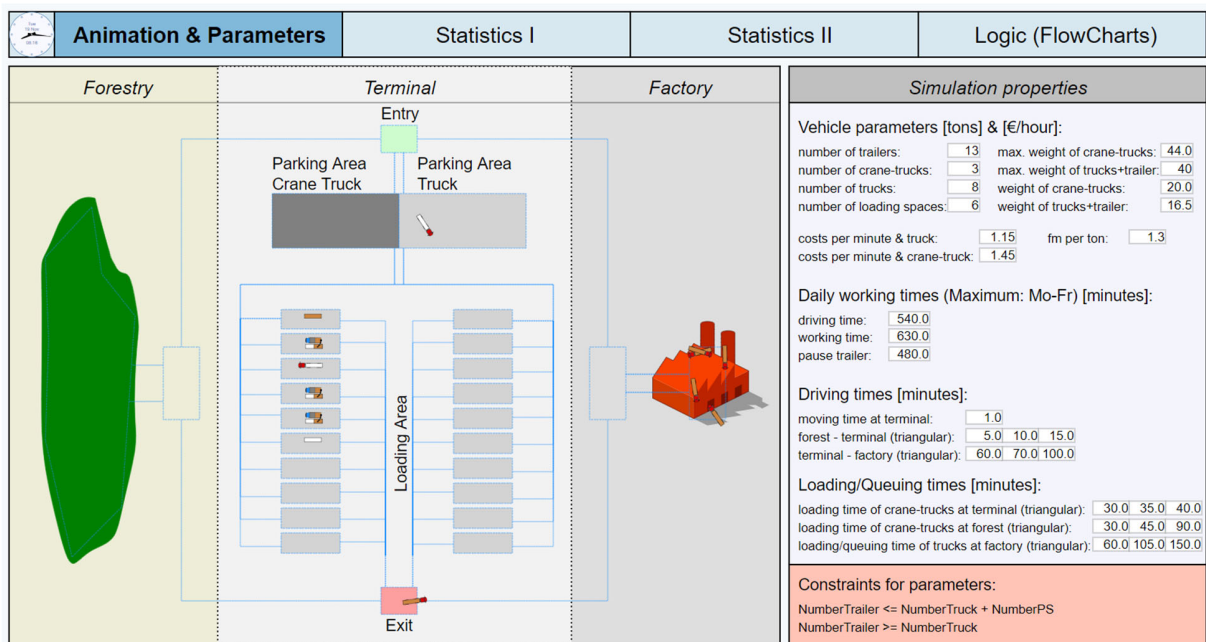


Abbildung 9: Animation- und Parameter-Ansicht zur Darstellung der Prozessabläufe.

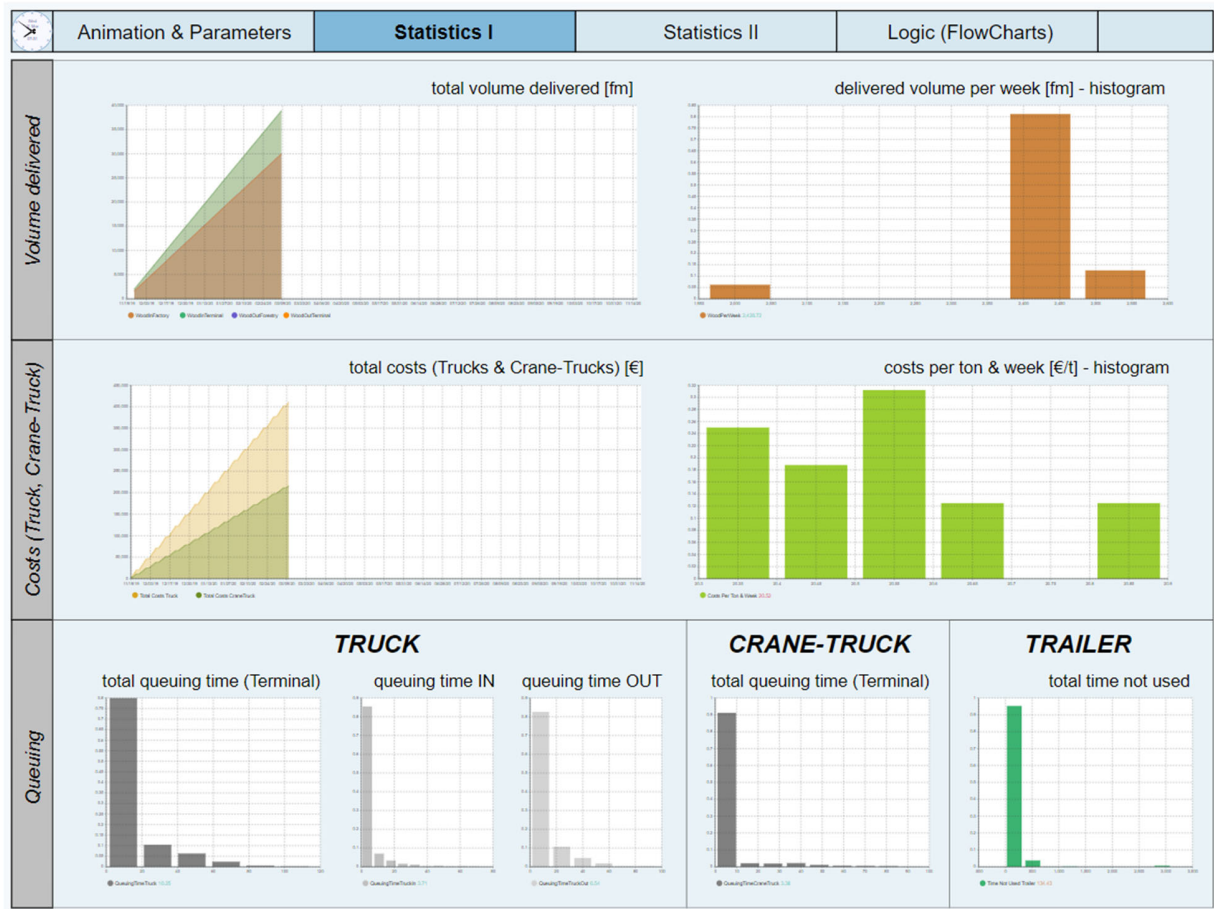


Abbildung 10: Statistik-Ansicht mit den wichtigsten Kennzahlen.

Parametrisierung

Für die Durchführung von Simulationsexperimenten kann eine Vielzahl von Parametern wie Fahrzeiten, Ladezeiten und Gewichte (Eigengewichte und zulässige Gesamtgewichte), Anzahl der Fahrzeuge im System, sowie die Terminalgröße (Anzahl an Umladeplätzen) variiert werden. Tabelle 14 enthält diese, inklusive der Voreinstellungen, die aufgrund von Expertenwissen, Erfahrungswerten und gesetzlichen Vorschriften getroffen wurden. Fett markierte Parameter wurden innerhalb der Simulationsexperimente variiert.

<i>Zielvariable</i>	
Anzahl Kran-LKW	?
Anzahl Zugfahrzeug	?
Anzahl Sattelaufleger	?
<i>Simulationsparameter</i>	
Terminalgröße (Anzahl Sattelauflegerstellplätze)	2–8 bzw. 12
<i>Systemkosten</i>	
Kran-LKW	87 [€/h]
Zugfahrzeug	69 [€/h]
Sattelaufleger	0,40 [(€/t]
<i>Ladezeiten</i>	
	[Minuten]
Kran-LKW (Forst)	Dreiecksverteilung: 30/45/90
Kran-LKW (Umladen auf Sattelaufleger)	Dreiecksverteilung: 30/35/40
Zugfahrzeug (inkl. Queuing/Wartezeit bei Industrie)	Dreiecksverteilung: 60/105/150
Zugfahrzeug (Auf-/Absatteln Sattelaufleger)	2
<i>Fahrzeiten</i>	
	[Minuten]
Kran-LKW: Terminal- Forst	KURZ – Dreiecksverteilung: 5/10/15 MITTEL – Dreiecksverteilung: 35/40/45 LANG – Dreiecksverteilung: 65/70/75
Zugfahrzeug: Terminal - Industrie	Dreiecksverteilung: 60/70/100
Fahrzeit am Terminal	1
<i>Gewichte</i>	
	[t]
Eigengewicht Kran-LKW	20
Eigengewicht Zugfahrzeug + Sattelaufleger	16,5
Maximalgewicht Kran-LKW	44 (<100 km Luftlinie) bzw. 50
Maximalgewicht Zugfahrzeug + Sattelaufleger	40
<i>Arbeitszeiten (Montag – Freitag)</i>	
	[h]
(maximale) Arbeitszeit	10,5
(maximale) Lenkzeit	9

Tabelle 14: Parametrisierung.

Szenariendesign

Zielsetzung der Simulationsexperimente

Mithilfe der Simulationsexperimente werden robuste Kombinationen von Kran-LKWs, Zugfahrzeuge und Sattelaufleger für verschiedene Terminalgrößen und Distanzscenarioen ermittelt. Dabei wurden für die Auswertung unterschiedliche Szenarien betrachtet und analysiert. Innerhalb der unterschiedlichen Szenarien konnten strategische Entscheidungen getroffen werden, um gezielt Kennzahlen je nach Anforderung zu optimieren

Szenarien

- **Mangel an Kran-LKW-Fahrern:** Der Altersdurchschnitt österreichischer Kran-LKW-Fahrer ist bereits sehr hoch und wird durch einen eklatanten Nachwuchsmangel in Zukunft noch weiter steigen. Um einem drohenden Engpass entgegenzuwirken, kann der Umschlag auf Sattelaufleger von zentraler Bedeutung sein. Dieses Szenario analysiert, in welchem Ausmaß der Umschlag über ein LKW-Terminal Kran-LKW Kapazitäten freispielen kann.
- **Schadholz:** Dieses Szenario befasst sich mit dem Auftreten von Kalamitäten, d. h. hohes Holzaufkommen in kurzer Zeit. Mit Hilfe des Simulationsmodells werden die Holzmenge, die mit

vorgegebenen Kapazitäten aus dem Wald abtransportiert werden kann, ermittelt sowie Effekte einer kurzfristigen Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts abgeschätzt.

- **Distanz zwischen Forst und Terminal:** Die Experimente wurden mit drei unterschiedlichen Distanzen durchgeführt: KURZ (Dreiecksverteilung: 5/10/15 min), MITTEL (Dreiecksverteilung: 35/40/45 min) und LANG (Dreiecksverteilung: 65/70/75 min).
- **Terminalgröße:** Entsprechend der Ergebnisse der partizipativen Entscheidungsfindung werden vier unterschiedliche Terminalgrößen in den Experimenten untersucht. Diese wird in der Anzahl der möglichen Stellplätze für Sattelaufleger angegeben und variiert in Zweierschritten von LKW-Terminals mit 2 bis 8 Stellplätzen.

Kennzahlen

Mithilfe ausgewählter Kennzahlen werden einzelne Simulationsexperimente, die sich durch die Flotten-Konstellationen unterscheiden, evaluiert. Um die mögliche Einsparung an Kran-LKWs durch die Umsetzung des LKW-Terminals sowie die Effekte einer Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen beobachten zu können, werden sowohl die Anzahl der gefahrenen Routen als auch die summierte Fahrzeit getrackt. Eine Route besteht abhängig vom Fahrzeugtyp aus einer Fahrt zum Terminal, sowie aus einer Fahrt zum Forst (Kran-LKW) bzw. zur Industrie (Sattelzug).

- **Relative Transportkosten [€/t]:** Diese summieren sich aus den beim Transport anfallenden Systemkosten für die eingesetzten Transportfahrzeuge. Nicht berücksichtigt sind die Terminalkosten wie Fixkosten für den Betrieb des Terminals oder laufende Instandhaltungskosten, da diese abhängig von den spezifischen örtlichen Gegebenheiten zu stark variieren (z.B. Grundstückspreise).
- **Umschlag pro Woche [t/W]:** Nachdem im Modell keine Fixkosten berücksichtigt werden, ist es wichtig, die Leistung in Form der umgeschlagenen Holzmenge in die Auswertung miteinfließen zu lassen. Somit kann eine Konstellation gewählt werden, die sowohl Kosten als auch Umschlagsmenge den jeweiligen Erfordernissen entsprechend optimiert.
- **Summierte Fahrzeiten der Kran-LKWs [Minuten]:** Um die Auswirkungen der Umladung auf Sattelaufleger bzw. einer Tonnageerhöhung auf das Verkehrsaufkommen von Kran-LKWs abschätzen zu können, wird die Summe an Fahrzeiten analysiert.

Simulationsexperimente mittels Heuristik

Effekte von Iterationen gesuchter Parameter

Um im ersten Schritt der Lösungsfindung mittels Heuristiken ein effizientes Verhältnis zwischen Sattelauflegern und Zugfahrzeugen zu finden, wird die Simulation mit einer theoretisch unbegrenzt großen Anzahl an allen Fahrzeugtypen durchlaufen. Einzige Bedingung ist, dass die minimale Anzahl an Sattelauflegern gleich der Anzahl an Zugfahrzeugen, sowie die maximale Anzahl an Sattelauflegern gleich der Anzahl an Zugfahrzeugen plus der Anzahl an Umladeplätzen minus Eins, entspricht.

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der maximal möglichen Umschlagsmengen mit steigender Terminalgröße in Abhängigkeit des Verhältnisses von Sattelauflegern zu Zugfahrzeugen. Dabei sollte jeweils die Terminalgröße die maximale Umschlagsmenge limitieren. Ab einer Terminalgröße von 8 ist das Verhältnis zwischen Sattelaufleger und Zugfahrzeuge entscheidend, die Umschlagsmenge unterscheidet sich hier um rund 17%. In Folge steigender Terminalgröße wird diese Differenz immer größer, da die Umschlagsmenge im Maximalverhältnis nur mehr geringfügig zunimmt. Dieser Effekt entsteht, weil bei Anwendung des Maximalverhältnisses jeweils nur ein Umladeplatz zu einem Zeitpunkt frei werden kann, da immer nur ein

Zugfahrzeug ohne aufgesattelten Sattelaufleger im System vorhanden ist. Im Unterschied dazu steht im Minimalverhältnis jedem Sattelaufleger ein Zugfahrzeug zur Verfügung, d. h., sobald ein Sattelaufleger voll ist, wird dieser abgeholt.

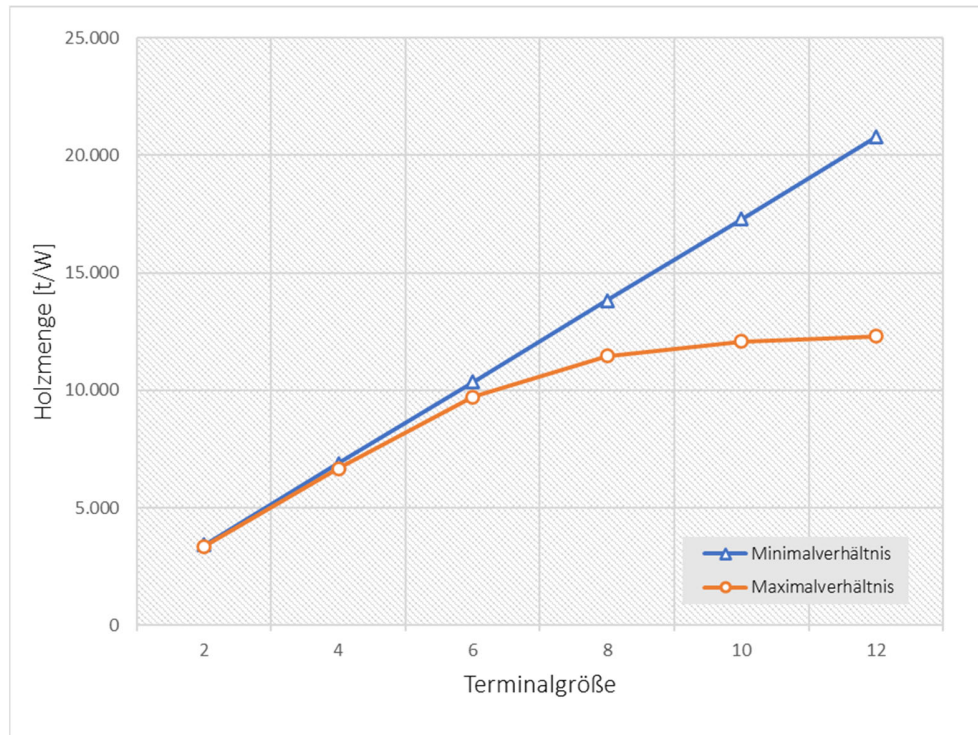


Abbildung 11: Maximale Umschlagsmengen in Tonnen pro Woche in Abhängigkeit eingesetzter Sattelaufleger.

Für die Lösungsfindung mittels Heuristik werden die Umschlagsmengen aus dem Minimalverhältnis als Ausgangsbedingung herangezogen, da diese mit steigender Terminalgröße einen linearen Anstieg aufweisen, d. h. die Terminalgröße stellt jeweils den Engpass dar.

Heuristik

Die Heuristik hat zum Ziel, je nach Terminalgröße und Distanz zwischen Forst und Terminal eine kostengünstige Fahrzeugkonstellation (Anzahl an Kran-LKWs, Zugfahrzeugen und Sattelauflegern) zu finden, die es ermöglicht, eine bestimmte Holzmenge umzuschlagen. Die Heuristik wurde dabei für 50% und 92,5% der maximal möglichen Umschlagsmenge durchgeführt. Des Weiteren wurden drei unterschiedliche Distanzscenarien für die Strecke zwischen Forst und Terminal (KURZ, MITTEL, LANG) angewandt und die Auswirkung einer Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen bestimmt.

Durchführung der Heuristik bei 44 Tonnen zulässiger Tonnage für Kran-LKWs

Im ersten Schritt wird das Verhältnis zwischen Zugfahrzeugen und Sattelauflegern untersucht. Resultierend aus den Erkenntnissen der Effekte von Iterationen gesuchter Parameter wurde die Anzahl an Sattelauflegern gleich der Anzahl an Zugfahrzeugen gesetzt. Weiters wurde bei einer theoretisch unbegrenzt hohen Anzahl an Zugfahrzeugen und Sattelauflegern (praktisch: 200) die Anzahl an Kran-LKWs variiert. Mit zunehmender Anzahl an Kran-LKWs steigt die am LKW-Terminal umgeschlagene Holzmenge zuerst linear an, um erst bei ausreichend hoher Anzahl an Kran-LKWs zu stagnieren. Sobald dieser Bereich erreicht ist, kann man, je nach gewünschter Umschlagsmenge (50% oder 92,5%), die erforderliche Anzahl

an Kran-LKWs ablesen. Nach Fixieren der Anzahl an Kran-LKWs, wird die benötigte Anzahl an Sattelauflegern mit Hilfe des relativen Minimums der Kosten pro Tonne bestimmt. Als letzter Schritt wird die Anzahl der Zugfahrzeuge variiert und wiederum entsprechend des Minimums der Kosten pro Tonne die erforderliche Anzahl bestimmt.

Durchführung der Heuristik bei 50 Tonnen zulässiger Tonnage für Kran-LKWs

Für die Tonnageerhöhung der Kran-LKWs von 44 auf 50 Tonnen wurde angenommen, dass der Gesamtumschlag über ein Terminal konstant gehalten wird und die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts für Kran-LKWs keinen Einfluss auf die Anzahl an Zugfahrzeugen und Sattelaufleger hat.

Folgende Grafiken zeigen die Umschlagsmengen in Tonnen pro Woche sowie die Kosten pro umgeschlagene Tonne bei einer Erhöhung der zulässigen Tonnage für Kran-LKW auf 50 t.

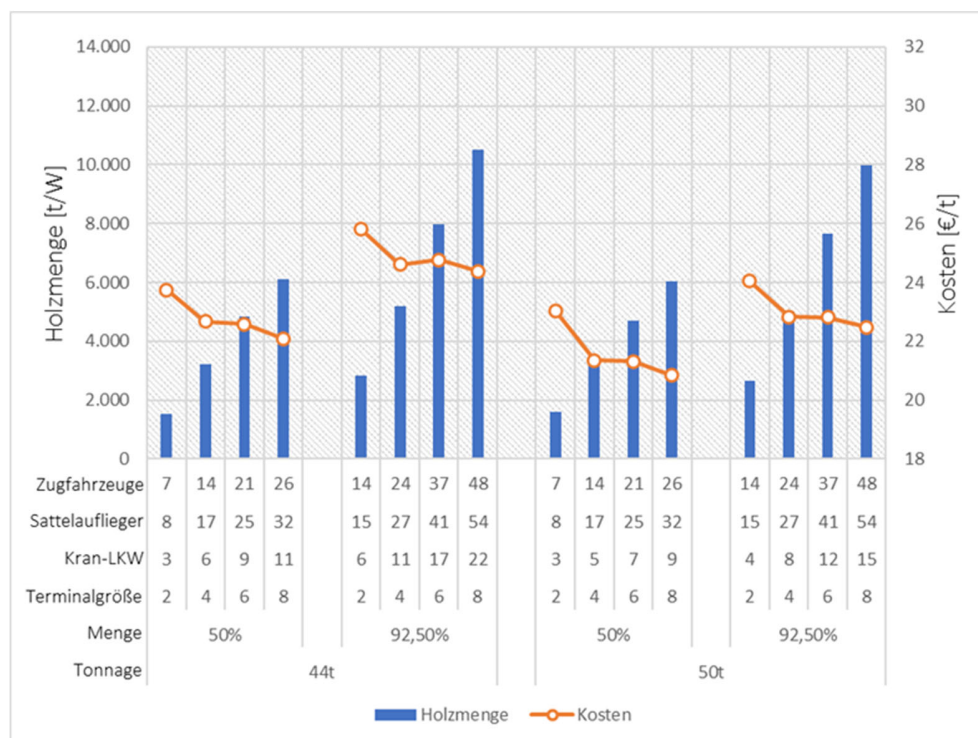


Abbildung 12: Lösungen der Heuristik bei kurzer Fahrzeit zum Terminal.

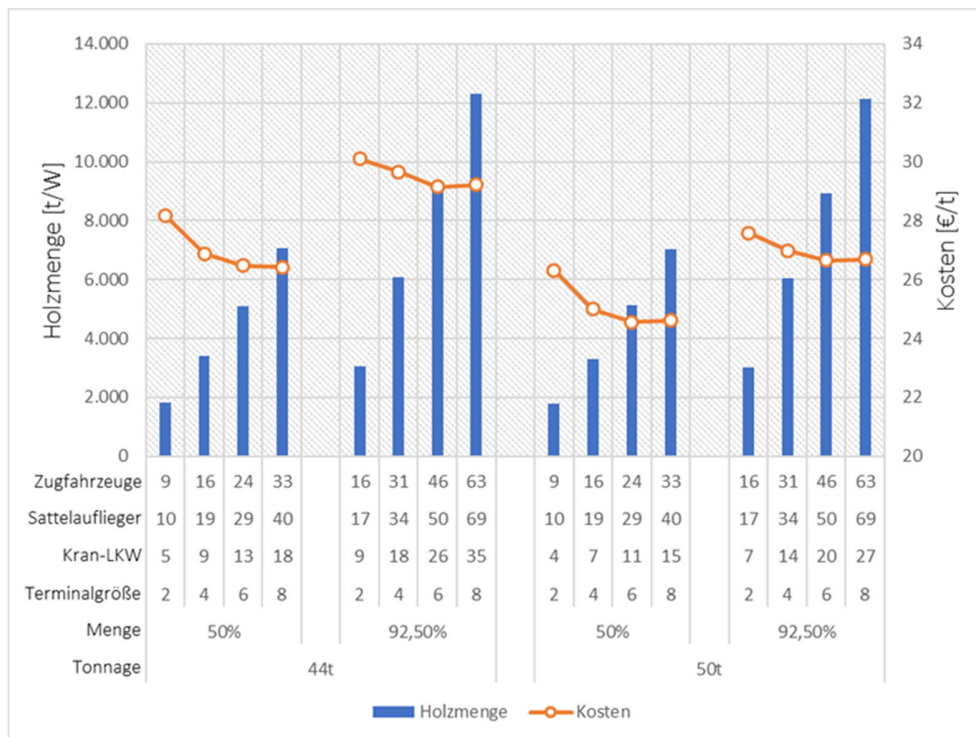


Abbildung 13: Lösungen der Heuristik bei mittlerer Fahrzeit zum Terminal.

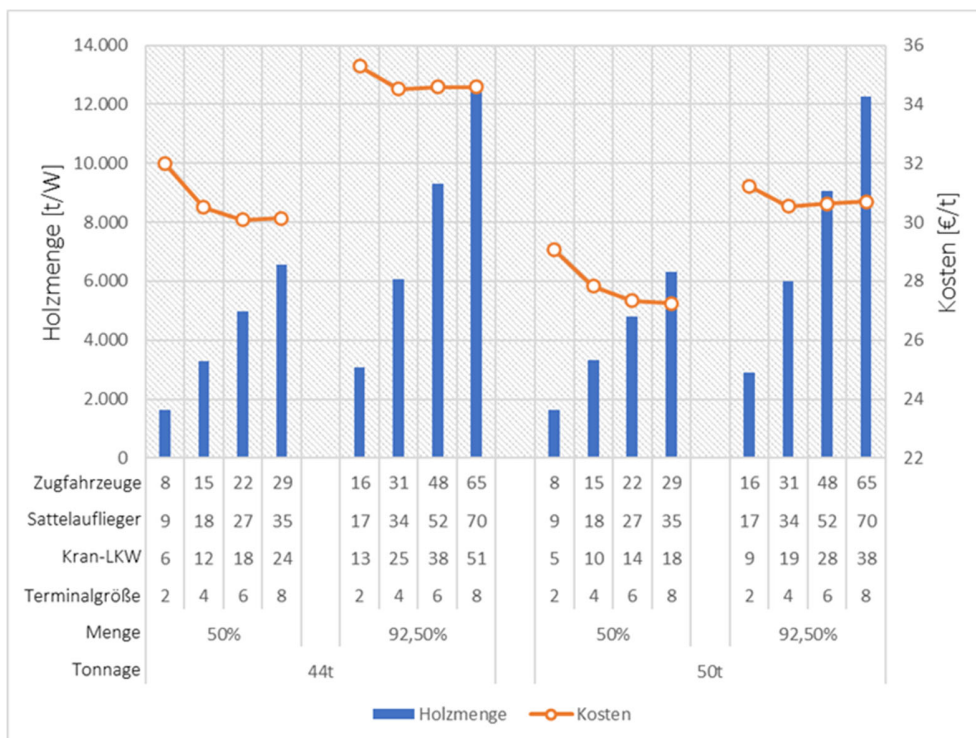


Abbildung 14: Lösungen der Heuristik bei langer Fahrzeit zum Terminal.

Unabhängig von der zulässigen Tonnage für Kran-LKWs und der Distanzen vom Forst zum Umschlagsterminal sind mit steigender Terminalgröße jeweils sinkende relative Kosten zu beobachten. Gleichzeitig steigt die Umschlagsmenge annähernd linear.

Weiters sind in den Grafiken sinkende relative Kosten bei höherer zulässiger Tonnage der Kran-LKWs (50 statt 44 Tonnen) und gleicher Umschlagsmenge zu erkennen. Dieses Ergebnis beruht u.a. auf der vereinfachenden Modellannahme, dass trotz höherer Tonnage der gleiche Stundensatz für den Einsatz eines Kran-LKWs verrechnet wird. In Realität könnte sich dieser Stundensatz aber geringfügig erhöhen, da eine 10% Erhöhung der Nutzlast bei einem Forst-LKW eine Steigerung des Treibstoffverbrauches um ca. 1% bewirkt (Klvac et al. 2013).

Zuletzt ist auch klar ersichtlich, dass bei einer Umschlagsmenge von 50% die Kosten jeweils kleiner sind als bei einer Umschlagsmenge von 92,5%. Grund hierfür ist, dass mit steigender Anzahl an Fahrzeugen im System, welche für eine höhere Umschlagsmenge notwendig sind, die Wartezeiten am Terminal sukzessiv ansteigen.

Simulationsexperimente mittels vollständiger Enumeration

Durchführung der vollständigen Enumeration

Anhand der Erfahrungswerte aus den Lösungen der Heuristik wurde für die jeweilige Terminalgröße (2, 4, 6, oder 8) in Kombination mit einer bestimmten Distanz vom Forst zum Terminal (KURZ, MITTEL, LANG) eine Enumerationstabelle erstellt, die alle sinnvollen Fahrzeug-Konstellationen enthält. Dabei wird zur jeweiligen Kran-LKW Anzahl die Anzahl an Sattelaufleger und Zugfahrzeugen variiert. Beispielhaft wird ein Ausschnitt der Ergebnisse einer Iteration in Abbildung 15 dargestellt.

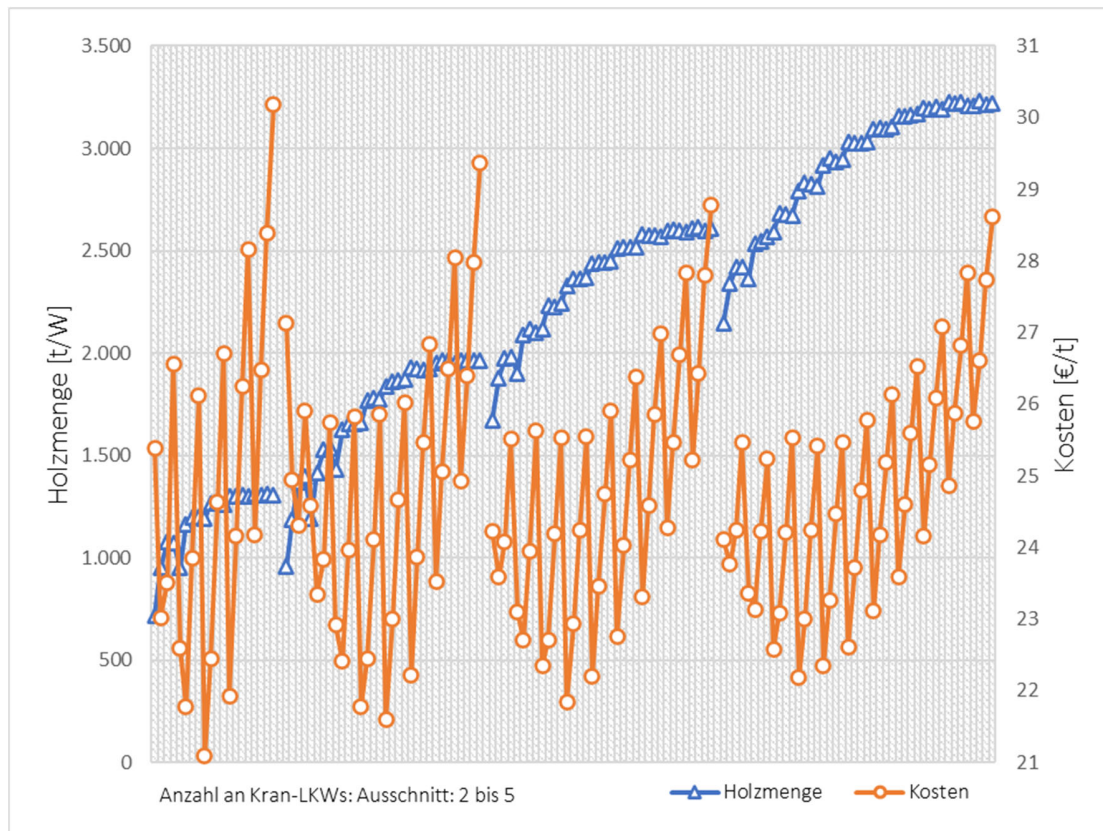


Abbildung 15: Vollständige Enumeration mit gesamter Information.

Für eine übersichtlichere Darstellung werden in nachfolgender Grafik nur noch die jeweils zwei, für eine bestimmte Anzahl an Sattelauflegern, kleinsten Kostenwerte der [€/t] abgebildet (Abbildung 16).

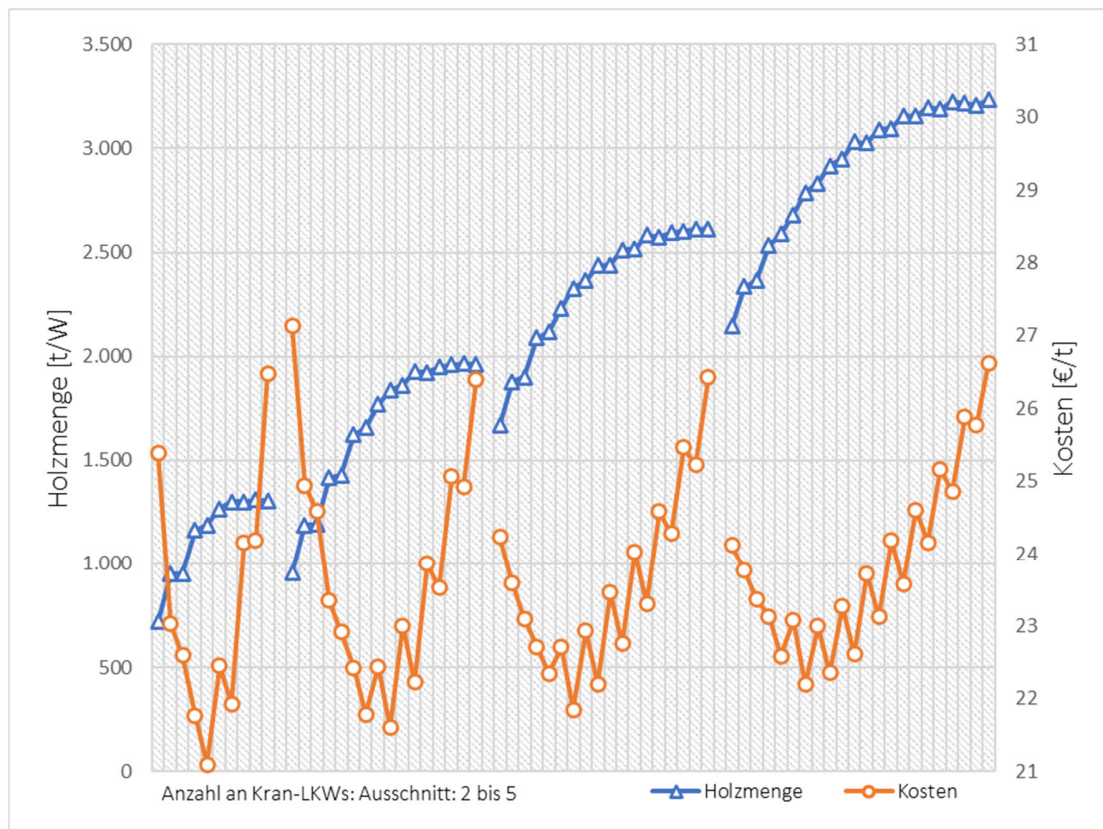


Abbildung 16: Vollständige Enumeration mit reduzierter Information.

Abbildung 17 zeigt die reduzierten Daten von jeder enumerierten Anzahl an Kran-LKWs. Es ist deutlich zu erkennen, dass es zu unterschiedlich großen Anzahlen an Kran-LKWs jeweils ein Minimum für die relativen Kosten gibt, das mit einer bestimmten Konstellation an Fahrzeugen erreicht wird. Mit steigender Kran-LKW-Anzahl ist zu beobachten, dass die Holzmenge stagniert, sobald die Terminalgröße den Engpass darstellt. Zudem entwickelt sich das Minimum der Kosten mit steigender Anzahl an Kran-LKWs allmählich zu einem ausgedehnten Bereich mit ähnlichen minimalen Kosten pro Tonne. Aufgrund dessen sind die Ergebnisse in den Transportplanungstabellen als Richtwerte zu verstehen, da es auch andere, ähnlich gute Lösungen gibt.

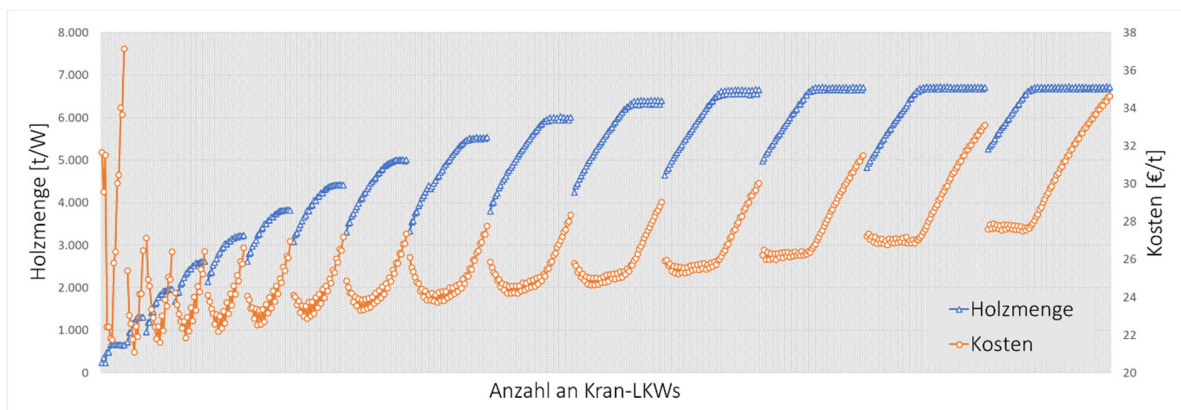


Abbildung 17: Vollständige Enumeration III; reduzierte Information.

Ergebnisse der vollständigen Enumeration

Folgende Diagramme zeigen die für bestimmte Terminalgrößen sowie Distanzen besten Fahrzeug-Konstellationen bezüglich der Kosten pro transportierte Tonne. Eine tabellarische Sammlung dieser Ergebnisse ist im Kapitel „Logistikempfehlungen für den Holzumschlag mittels LKW-Terminal (BOKU Wien: Alexander Stenitzer, Christoph Kogler und Peter Rauch)“ als Transportplanungstabellen zu finden.

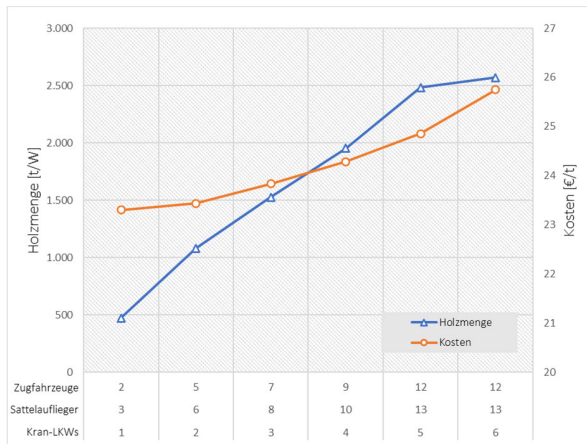


Abbildung 18: Terminalgröße 2; Distanz: kurz.

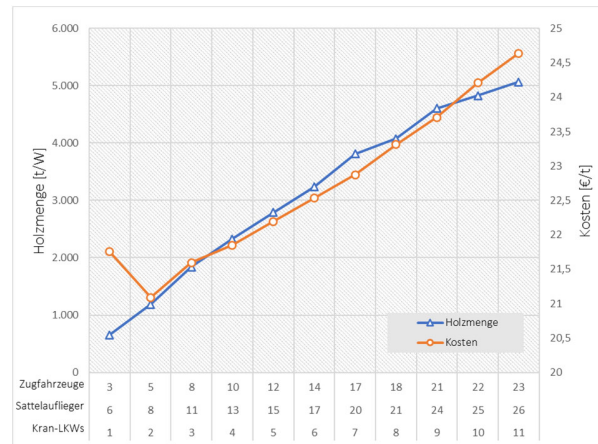


Abbildung 19: Terminalgröße 4; Distanz: kurz.

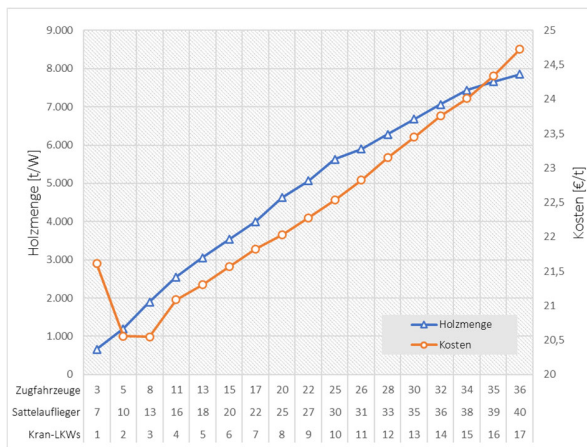


Abbildung 20: Terminalgröße 6; Distanz: kurz.

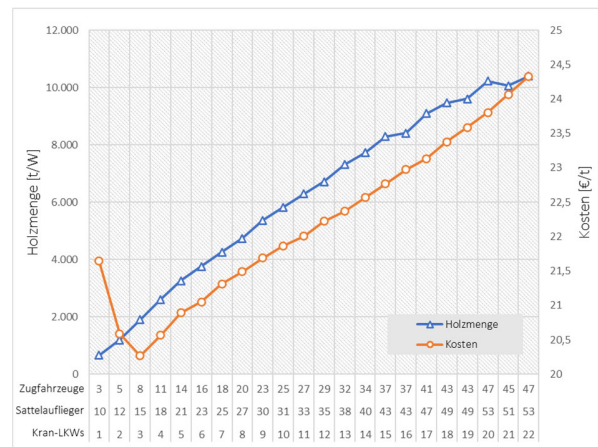


Abbildung 21: Terminalgröße 8; Distanz: kurz.

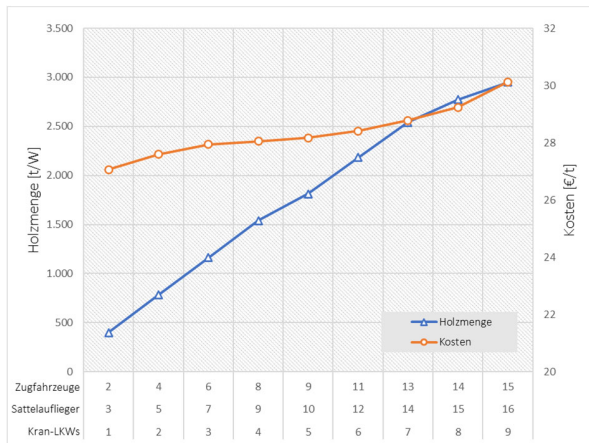


Abbildung 22: Terminalgröße 2; Distanz: mittel.

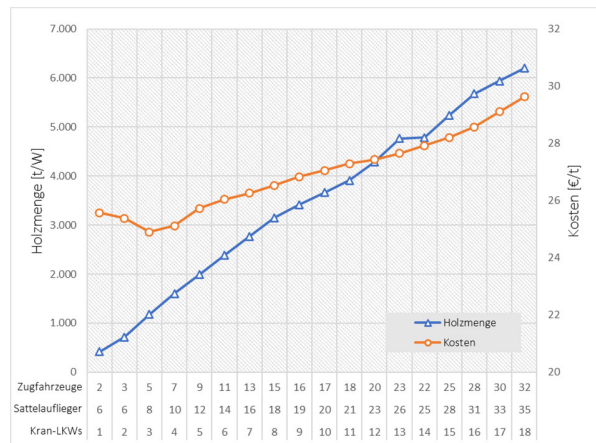


Abbildung 23: Terminalgröße 4; Distanz: mittel.

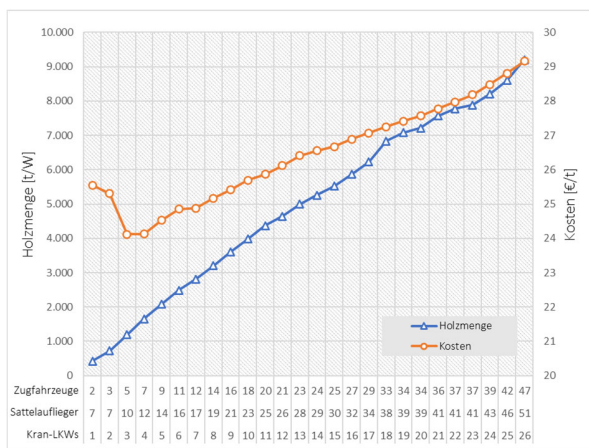


Abbildung 24: Terminalgröße 6; Distanz: mittel.

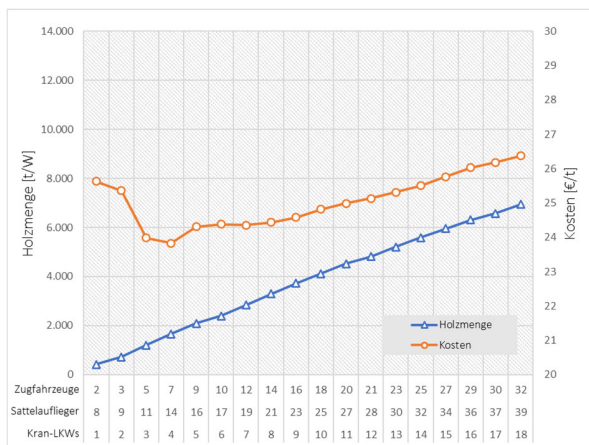


Abbildung 25: Terminalgröße 8; Distanz: mittel (1).

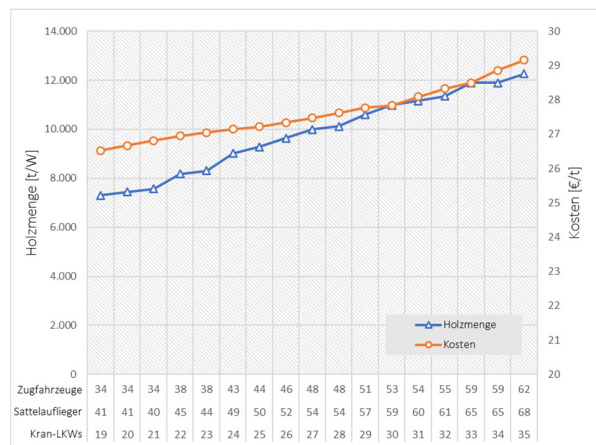


Abbildung 26: Terminalgröße 8; Distanz: mittel (2).

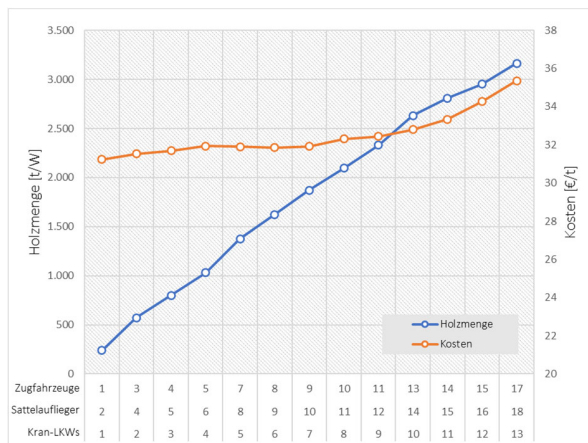


Abbildung 27: Terminalgröße 2; Distanz: lang.

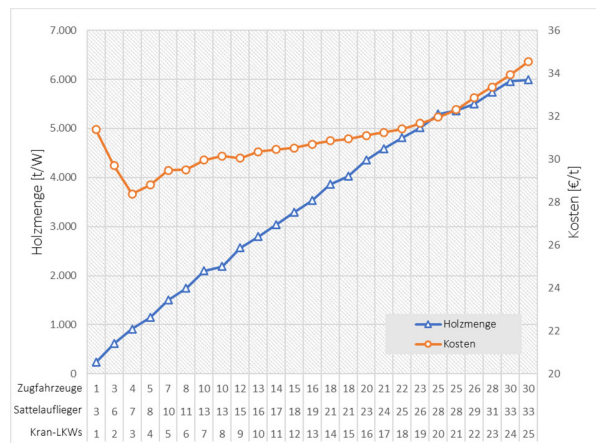


Abbildung 28: Terminalgröße 4; Distanz: lang.

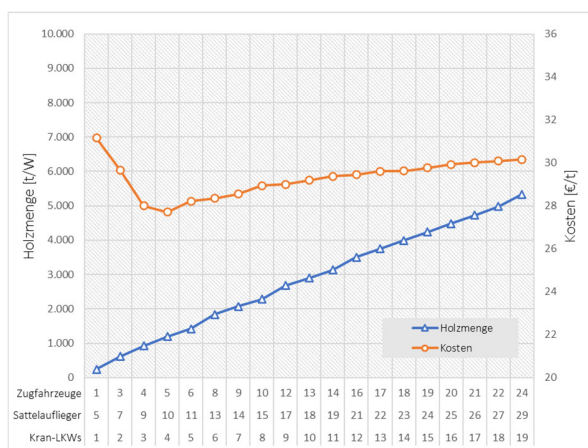


Abbildung 29: Terminalgröße 6; Distanz: lang (1).

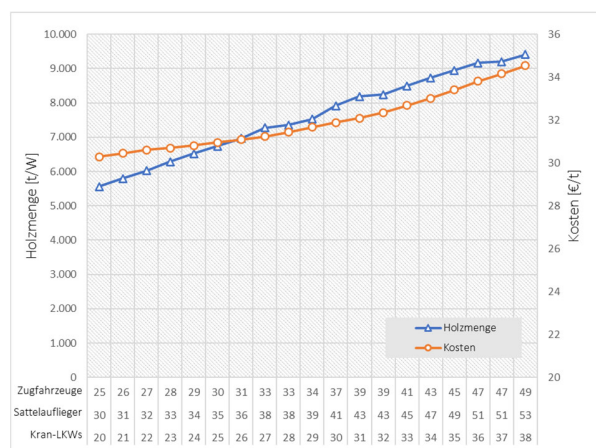


Abbildung 30: Terminalgröße 6; Distanz: lang (2).

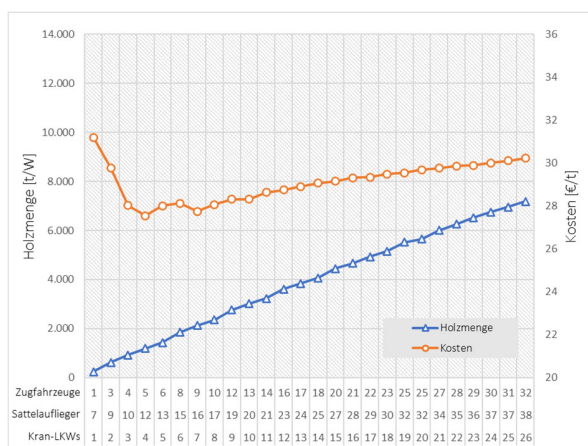


Abbildung 31: Terminalgröße 8; Distanz: lang (1).

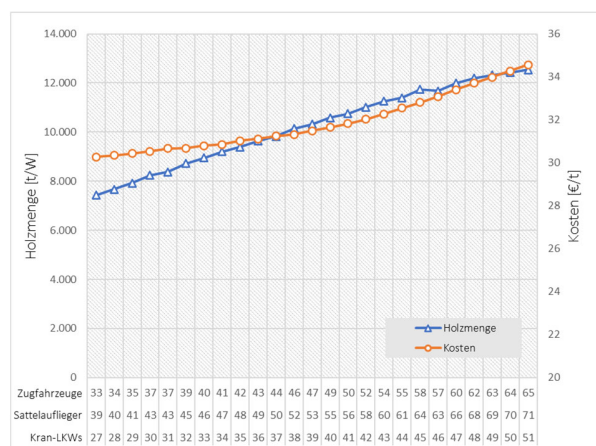


Abbildung 32: Terminalgröße 8; Distanz: lang (2).

Die Graphen der Kosten weisen bei einer Terminalgröße über 2 unabhängig vom Distanzscenario einen charakteristischen Verlauf auf. Dabei ist das Minimum der Kosten pro Tonne bei einer geringen Anzahl an Kran-LKWs zu finden. Anschließend steigen diese linear an, bis die Umschlagsmenge dem Maximum zusteuert und die Kosten dann überdurchschnittlich stark ansteigen. Die Umschlagsmengen weisen in

allen Szenarien einen stetigen Anstieg auf, wobei die Terminalgröße ab einer gewissen Umschlagsmenge den Engpass darstellt und diese daraufhin stagniert.

Einsparungspotentiale

Einsparungen an Kran-LKWs durch LKW-Terminals

Folgende Balkendiagramme veranschaulichen, inwieweit sich der Holzumschlag in LKW-Terminals auf Sattelzüge auf die Arbeits- und Fahrzeit von Kran-LKWs auswirkt. „Gesamt“ zeigt die kumulierte Arbeits- bzw. Fahrzeit aller Fahrzeuge beim Umladen auf Sattelaufleger, während „Direkttransport“ die Arbeits- und Fahrzeit der Kran-LKWs beim direkten Transport ohne Umschlag zur Industrie wiedergibt. Tabelle 15 enthält die durch den Holzumschlag auf Sattelaufleger in einem LKW-Terminal eingesparte Arbeitszeit für Kran-LKWs, sowie die eingesparte Anzahl an Kran-LKWs.

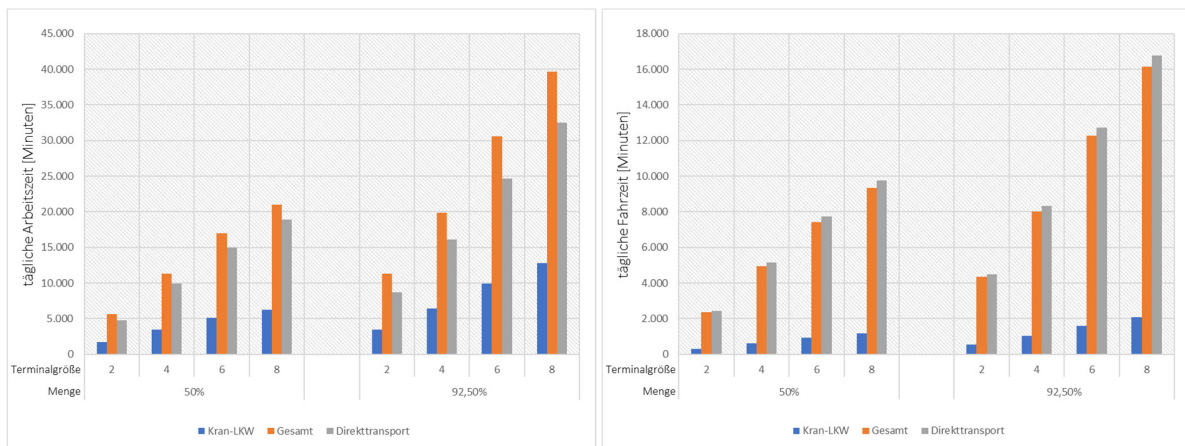


Abbildung 33: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei kurzer Distanz zum Terminal.

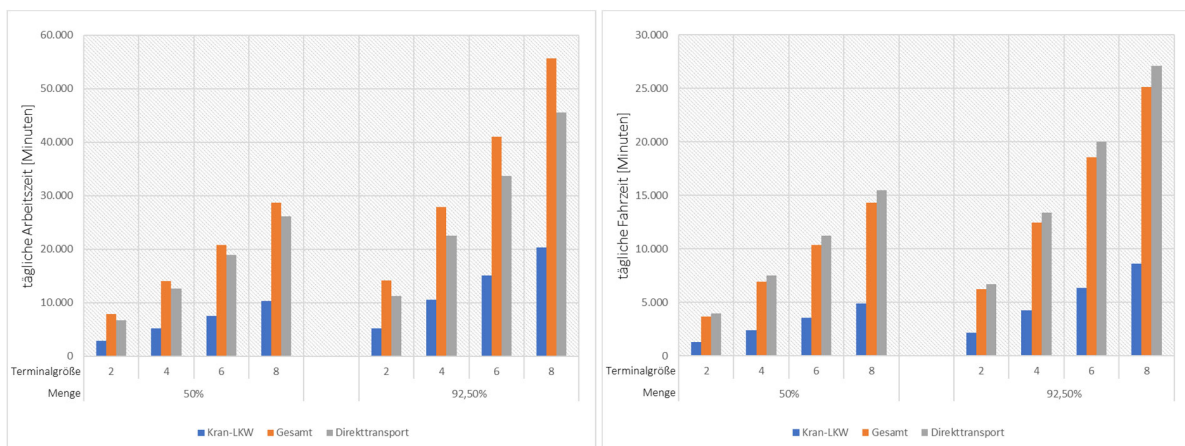


Abbildung 34: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei mittlerer Distanz zum Terminal.

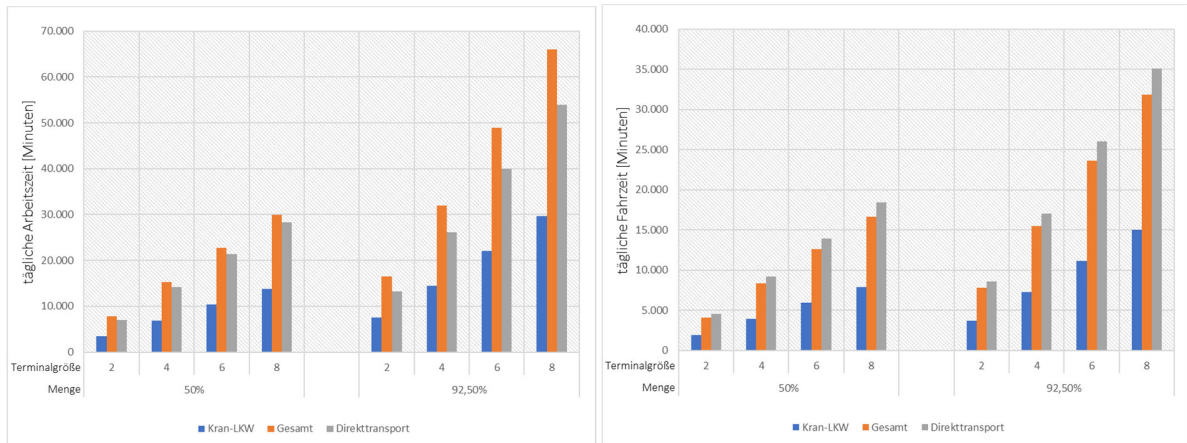


Abbildung 35: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei langer Distanz zum Terminal.

Aus den Graphen kann geschlossen werden, dass in allen drei Distanzszenarien eine Einsparung an Kran-LKWs möglich ist. Während die summierte Fahrzeit beim Konzept des Terminalumschlags kleiner ist als beim Direkttransport, was eine verringerte Umweltbelastung bedeutet, steht im Gegensatz dazu eine vor allem im 92,5 % Mengenszenario höhere Gesamtarbeitszeit, die sich aus den im Direkttransport nicht vorkommenden Wartezeiten am Terminal ergeben.

Effekte des Umschlags auf Sattelzüge									
Fahrzeit zum Terminal	Relativer Umschlag [%]	Flottenkonstellation				Kennzahlen		Einsparungen bei Kran- LKWs	
		Terminal- größe	Kran- LKWs	Sattel- auflieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Arbeitszeit pro Woche [Minuten]	Ein- gesparte Kran- LKWs
Kurz (5/10/15 Minuten)	50	2	3	8	7	1530	24,15	15110	4
	50	4	6	17	14	3210	23,08	32610	10
	50	6	9	25	21	4840	22,98	49300	15
	50	8	11	32	26	6100	22,49	63060	20
	92,5	2	6	15	14	2810	26,22	26190	8
	92,5	4	11	27	24	5190	25,02	48520	15
	92,5	6	17	41	37	7950	25,18	73830	23
	92,5	8	22	54	48	10480	24,79	98560	31
Mittel (35/40/45 Minuten)	50	2	5	10	9	1810	28,59	19070	6
	50	4	9	19	16	3400	27,29	36930	11
	50	6	13	29	24	5100	26,88	56870	18
	50	8	18	40	33	7040	26,83	78610	24
	92,5	2	9	17	16	3050	30,50	30330	9
	92,5	4	18	34	31	6090	30,07	60160	19
	92,5	6	26	50	46	9100	29,55	92820	29
	92,5	8	35	69	63	12320	29,62	126190	40
Lang (65/70/75 Minuten)	50	2	6	9	8	1610	32,4	17520	5
	50	4	12	18	15	3290	30,91	36300	11
	50	6	18	27	22	4970	30,49	55090	17
	50	8	24	35	29	6570	30,54	72130	22
	92,5	2	13	17	16	3080	35,7	28500	9
	92,5	4	25	34	31	6080	34,92	58130	18
	92,5	6	38	52	48	9290	35,00	89610	28
	92,5	8	51	70	65	12530	34,99	121630	38

Tabelle 15: Eingesparte Arbeitszeit und Kran-LKWs durch den Umschlag auf Sattelzug.

Einsparungen durch Tonnageerhöhung

Folgend werden die absoluten Fahr- und Arbeitszeiten bei einer Tonnage von 44 und 50 Tonnen für Kran-LKWs grafisch dargestellt. Zudem kann die tatsächliche Anzahl an eingesparten Kran-LKWs, die sich aus den Simulationsexperimenten ergeben, in Tabelle 16 abgelesen werden.

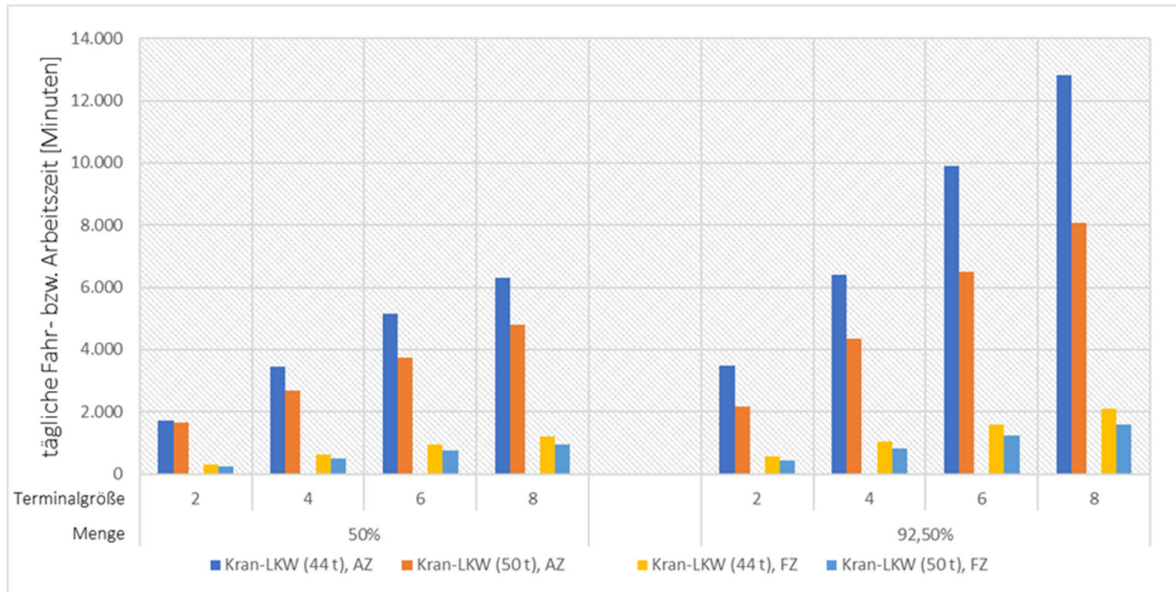


Abbildung 36: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ bzw. AZ) bei kurzer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.

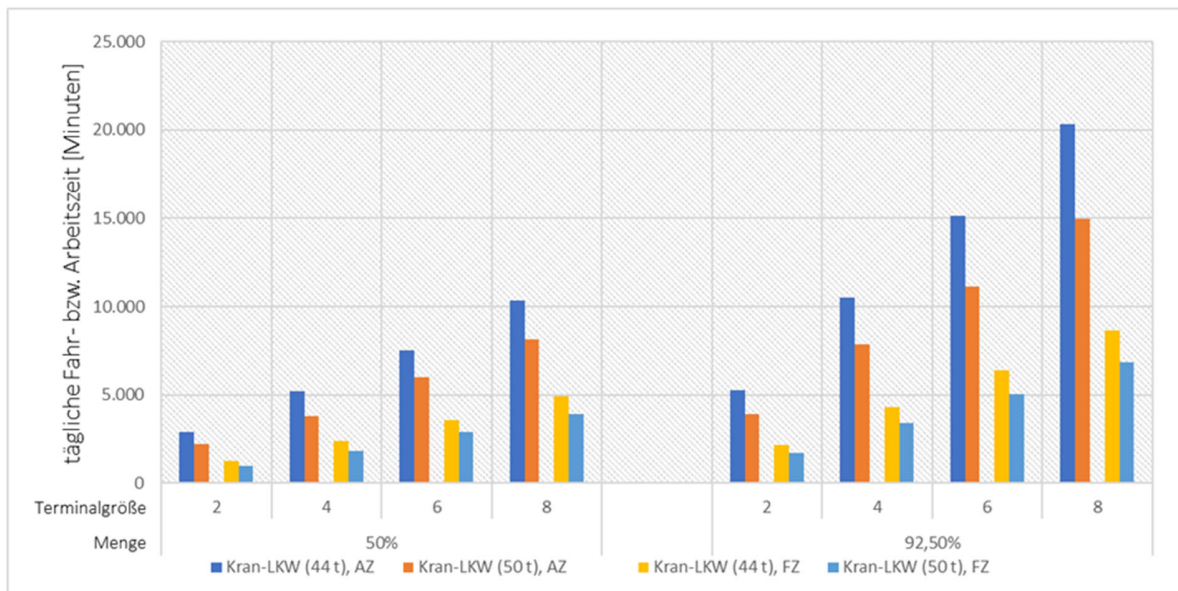


Abbildung 37: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ & AZ) bei mittlerer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.

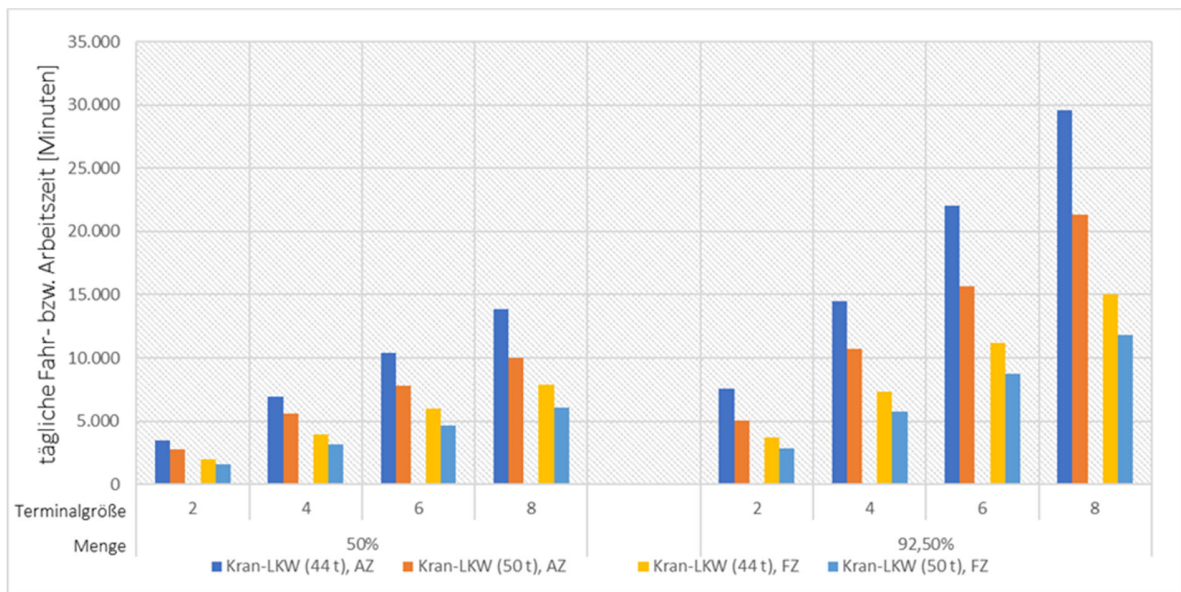


Abbildung 38: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ & AZ) bei langer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.

Es kommt sowohl bei der Arbeitszeit als auch bei der Fahrzeit zu Einsparungen. Die größere Einsparung erfolgt bei der Arbeitszeit und ist auf die verkürzten Wartezeiten am Terminal, die nicht zur Fahrzeit, sondern zur Arbeitszeit gezählt werden, zurückzuführen. Hauptgrund für die kürzeren Wartezeiten der Kran-LKWs ist die vergleichsweise geringere Anzahl an Kran-LKWs. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass mit einer Tonnageerhöhung in jedem Fall die benötigte Kran-LKW-Fahrzeit reduziert werden kann. Weiters ergibt sich durch die Reduktion von Kran-LKW-Fahrten auch eine CO₂ Ersparnis, da eine Tonnageerhöhung der Nutzlast um 10% in einer Erhöhung des CO₂ Ausstoßes um lediglich 1% resultiert (Klvac et al. 2013).

Effekte einer Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen									
Fahrzeit zum Terminal	Relativer Umschlag [%]	Flottenkonstellation				Kennzahlen		Einsparungen bei Kran- LKW's	
		Terminal- größe	Kran- LKW's	Sattel- auflieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Arbeitszeit pro Woche [Minuten]	Anzahl Kran-LKW's
Kurz (5/10/15 Minuten)	50,00%	2	3	8	7	1580	23,45	310	0
	50,00%	4	5	17	14	3190	21,75	3760	1
	50,00%	6	7	25	21	4690	21,72	7120	2
	50,00%	8	9	32	26	6020	21,25	7440	2
	92,50%	2	4	15	14	2640	24,45	6660	2
	92,50%	4	8	27	24	5010	23,24	10250	3
	92,50%	6	12	41	37	7660	23,21	16960	5
	92,50%	8	15	54	48	9960	22,89	23730	7
Mittel (35/40/45 Minuten)	50,00%	2	4	10	9	1760	26,72	3440	1
	50,00%	4	7	19	16	3270	25,4	7060	2
	50,00%	6	11	29	24	5110	24,96	7490	2
	50,00%	8	15	40	33	7010	25,01	11070	3
	92,50%	2	7	17	16	3000	27,99	6560	2
	92,50%	4	14	34	31	6030	27,4	13390	4
	92,50%	6	20	50	46	8940	27,05	19980	6
	92,50%	8	27	69	63	12140	27,09	26780	8
Lang (65/70/75 Minuten)	50,00%	2	5	9	8	1630	29,47	3300	1
	50,00%	4	10	18	15	3300	28,23	6450	2
	50,00%	6	14	27	22	4800	27,74	13100	4
	50,00%	8	18	35	29	6290	27,66	19220	6
	92,50%	2	9	17	16	2910	31,63	12480	4
	92,50%	4	19	34	31	6000	30,94	19200	6
	92,50%	6	28	52	48	9070	31,03	31850	10
	92,50%	8	38	70	65	12270	31,11	41290	13

Tabelle 16: Eingesparte Arbeitszeit und Anzahl an Kran-LKW's durch die Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen.

Zusammengefasste Ergebnisse

Erkenntnisse der Simulationsexperimente

Aus den Simulationsexperimenten (sowohl Heuristik als auch vollständige Enumeration) ergeben sich für das LKW-Terminal Modell folgende zentralen Erkenntnisse:

- **Sinkende Kosten mit steigender Terminalgröße:** Mit steigender Terminalgröße sind die relativen Kosten bei gleicher Umschlagsmenge deutlich geringer. Insbesondere die Wartezeiten am Terminal, welche für das Steigen der Kosten verantwortlich sind, sinken mit steigender Terminalgröße aufgrund zunehmender Flexibilität.
- **Ersparnis an Kran-LKWs durch den Umschlag auf Sattelzug:** Insgesamt bringt die Umsetzung der Terminalumladung aufgrund der Wartezeiten am Terminal keine Arbeitszeiterparnis, jedoch wird die Gesamtfahrzeit, v. a. jene der Kran-LKWs, deutlich reduziert. Einerseits bedeutet das ein geringeres Verkehrsaufkommen, andererseits können dadurch Kran-LKWs eingespart werden.
- **Ersparnis an Arbeitszeit durch Tonnageerhöhung:** Eine Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen innerhalb des Umladekonzeptes führt neben einer Einsparung an Fahrzeit der Kran-LKWs auch zu weiteren Einsparungen an Arbeitszeit, da durch die reduzierte Anzahl an benötigten Kran-LKWs die Wartezeiten reduziert werden und die Effizienz der Lieferkette steigt. Weiters ergibt sich durch die Reduktion von Kran-LKW-Fahrten auch eine CO₂ Ersparnis.

5. OPTIMIERUNGSMODELLE ZUR LIEFERKETTENKOORDINATION (KFU GRAZ)

Der Fokus der quantitativen Analyse der Universität Graz lag vorwiegend auf der Herausarbeitung und Abschätzung der Potenziale, welche durch eine koordinierte Supply Chain Holz erzielt werden können. Dazu wurde der Status quo der derzeitigen Planungssituation beim Rundholztransport zunächst mittels eines Modells dargestellt. In anschließenden Szenarien wurde das Modell erweitert, um mit Hilfe von numerischen Analysen den Einfluss der Interaktionsstruktur zwischen den Akteuren, die Potenziale einer koordinierten Vorgehensweise, den Einfluss eines zentralen Zwischenlagers, sowie unterschiedliche, den Transport betreffende Szenarien genauer zu analysieren.

Planungsmodell der Holzlieferkette

Im Allgemeinen stehen sich im Rundholztransport drei Akteure gegenüber: der Forst, die Industrie sowie der Transport. Diese agieren unabhängig voneinander, haben unterschiedliche Interessen und verfolgen dadurch teilweise konträre Ziele. Typische Folgen davon sind Einbußen der Effektivität, sowie das Auftreten von Ineffizienzen. Um diese Situation zu analysieren und deren Konsequenzen und Auswirkungen zu evaluieren, werden die einzelnen Akteure samt ihren Interessen, in je einem Untermodell abgebildet. Die Bezeichnungen der Akteure Forst, Industrie, Transport stellen lediglich Überbegriffe dar. Konkret werden im Modell Großforste und Kleinformen, die Säge-, Papier- und Energieindustrie sowie die Rungen- und Sattel LKW-Fahrer abgebildet. Durch die Abbildung der Akteure und ihrer Interessen in je einem Untermodell wird nicht nur die derzeitige Struktur der Supply Chain Holz im Detail beschrieben, sondern auch die Interaktion der Akteure in der Entscheidungsfindung herausgearbeitet. Dabei bildet das Modell die Lieferkette Holz auf einem relativ hohen Granularitätsniveau ab, um eine realistische Abschätzung der Auswirkungen und Kosten unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Entscheidungsszenarien auf die Lieferkette und ihre einzelnen Akteure zu evaluieren.

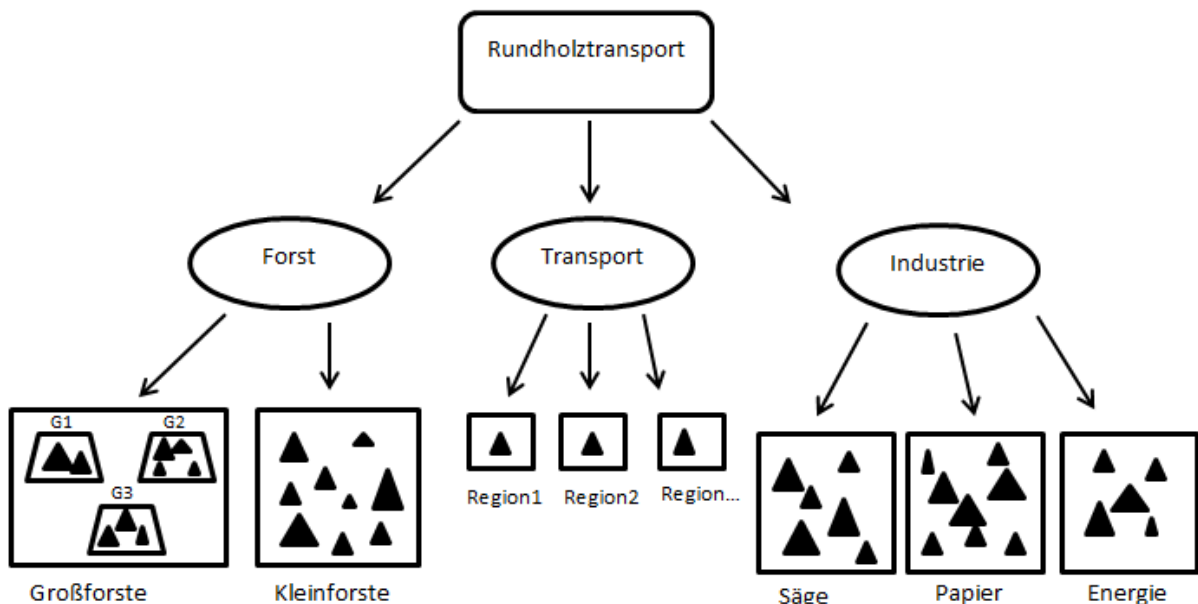


Abbildung 39: Akteure der Holzlieferkette

Industriemodell

Im Zusammenhang mit der Vernetzung in der Lieferkette verfolgen Industrieunternehmen das vorrangige Ziel eine optimale Bestellmengenpolitik über den Planungshorizont zu bestimmen. Dabei werden sie mit der Herausforderung begrenzter Lagerkapazität, hohen Kosten bei Spitzenauslastung und Einbußen im Fall der Nichterfüllung ihrer Nachfrage, konfrontiert. Stark schwankende Lieferzyklen, sowie Lieferspitzen, und -engpässe sind unerwünscht und sollen möglichst vermieden werden. Das Modell bildet dies in Form von Lagerhaltungs-, Fehlmengen- und bestellfixen Kosten ab. Anhand dieser Kostenstruktur und ihrer eigenen Bedarfsmenge bestimmen die Industrieunternehmen ihre gewünschte Liefermenge pro Forst und Periode. Durch Batchbildung und zeitlicher Synchronisation der Industriebestellungen können dabei Synergieeffekte auftreten. Bei bestimmten Transporten obliegt den Industrieunternehmen zusätzlich die Aufgabe die Organisation der Transporte durchzuführen. Dies wird im Modell über die Festlegung der Zeitfenster, innerhalb derer bestimmte Transporte durchzuführen sind, abgebildet.

Forstmodell

Forstbetriebe erhalten die gewünschte Liefermenge aller Industrieunternehmen über den Planungshorizont hinweg und stehen der Herausforderung gegenüber, den für sie optimalen Erntezeitpunkt, sowie die für sie optimale Erntemenge, zu bestimmen. Die Batchbildung bei Industriebestellungen kann zu großer Variabilität der Nachfrage im Forst führen. Bei der Bestimmung der Erntemenge kommt die Schwierigkeit der Kuppelproduktion und der teilweisen Substituierbarkeit der Holzsortimente hinzu. Bei der Ernte eines Baumstammes werden immer mehrere „Produkte“ zugleich geerntet. So wird beispielsweise bei der Ernte von Papier- und Sägeholz automatisch Energieholz (Rinde, Äste, Späne, Reste) mitgeerntet. Zusätzlich muss über die optimale Nutzung des Baumstammes entschieden werden. Es wäre beispielsweise möglich einen Stamm mit potenziellem Anteil an Sägeholz zur Gänze für die Papierindustrie zu verarbeiten. Diese teilweise Substituierbarkeit der Sortimente eröffnet den Forstbetrieben zahlreiche Möglichkeiten eine bestimmte Menge Holz zu ernten und anschließend zu verarbeiten. Zusätzlich wird im Modell der Aspekt der stark restriktiven räumlichen Kapazitätsbeschränkungen der Polter und auch das Interesse der Forstbesitzer eines möglichst zeitnahen Abtransports des geernteten Holzes berücksichtigt. Letzteres besteht aufgrund eines drohenden Qualitätsverfalls geernteter Bäume (Austrocknung, Borkenkäferbefall) bei zu langer Lagerung. Häufig wird auch die Organisation der Transporte von Forsten übernommen. Dies ist speziell bei Großforsten der Fall. Im Modell werden diese Aspekte in der Zielfunktion der Forste über variable Ernte-, Lagerhaltungs-, Fehlmengen-, sowie Wertverfallskosten abgebildet. Das Ergebnis des Forstmodells ist ein Ernteplan für jeden Forst, der auch die Lager-, Fehl- und Verfallsmengen pro Periode beinhaltet.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Industrie- und Forstmodells ergeben sich für jedes Industrie-Forst Paar die mengenmäßigen und zeitlichen Anforderungen an Transportvorgaben.

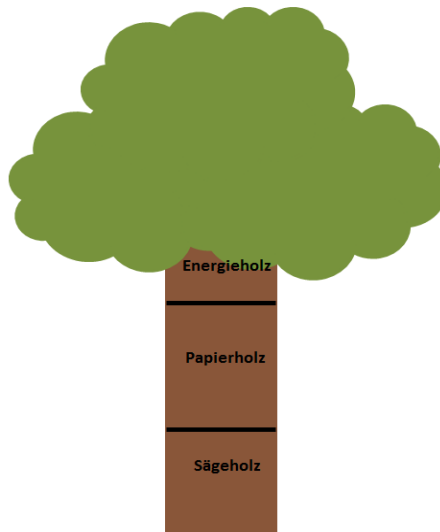


Abbildung 40: Kuppelproduktion

Transportmodell

Transportunternehmen können als Schnittstelle zwischen Industrieunternehmen und Forsten betrachtet werden. Sie werden entweder von Industrieunternehmen oder Forsten mit der Auslieferung des geernteten Holzes beauftragt. Ihre Aufgabe besteht darin, sämtliche Aufträge von den einzelnen Forstbetrieben zu den gewünschten Industrieunternehmen zu transportieren. In der Erbringung der Transportdienstleistung verfügen Transportunternehmen teilweise über große zeitliche Flexibilität. Häufig wird nur ein Zeitraum für die Auftragserfüllung seitens der Auftraggeber vorgegeben und das Transportunternehmen terminiert die Aufträge seiner Fahrzeuge selbstständig. Durch monetäre Anreize seitens der Forst- und Industrieunternehmen wird versucht diese Flexibilität bei Bedarf zu beeinflussen und es werden Preisaufschläge für Eiltransporte berechnet. Aufgrund auslastungsunabhängiger Fixkosten oder überproportionaler Mehrkosten in Spitzenzeiten besteht ein Hauptinteresse der Transportunternehmen in der Glättung der Auftragsauslastung. Im Modell wird dieses durch entstehende Zusatzkosten bei Unter- oder Überauslastung modelliert. Aufgrund der vielen Spezifika beim Holztransport, wie z.B. der Notwendigkeit spezielle Fahrzeuge (Rungen LKW) einzusetzen oder der Befahrbarkeit des Forststraßennetzwerks, werden im Modell zusätzlich Transportbeschränkungen im Forst, zeitlich und die Fahrzeugart und -kapazität betreffend abgebildet. Durch zeitliche Synchronisation der Industriebestellung in den Regionen können Synergieeffekte in der Routenplanung auftreten. Ferner werden das Potenzial sowie die Effekte regionaler Zuteilung von Transportaufträgen zu Transportunternehmen hinsichtlich der Reduktion von Leerfahrten und einer optimierten Routenplanung herausgearbeitet.

Szenarien

Im Mittelpunkt der Analyse der Universität Graz stehen die Untersuchung der Flexibilität und Verhandlungsstärke der einzelnen Akteure bzw. deren Koordination, sowie die Struktur der Lieferkette per se. Der Fokus der Bewertung liegt dabei auf der Analyse der Bedarfs- und Lieferschwankungen, sowie der Transportflüsse vom Forst über Lager zur Industrie. Um diesen Zweck zu erfüllen werden mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Zielen in der numerischen Analyse durchgeführt.

Als Erstes soll der Einfluss der Interaktionsstruktur zwischen den Akteuren, sowie deren Einfluss auf die Lieferkette untersucht werden. Dazu wird neben den Ergebnissen des Status quo Modells, auch ein

integriertes Planungsmodell betrachtet, um die Potenziale einer zentral gesteuerten und koordinierten Supply Chain herauszuarbeiten. In diesem trifft eine zentrale Stelle alle Entscheidungen gemeinsam und simultan. Die Interessen der einzelnen Akteure werden gleichermaßen berücksichtigt und aufeinander abgestimmt. In einer Erweiterung wird auf Situationen abgezielt in denen die Interessen eines Akteurs (Forst, Industrie oder Transport) allein berücksichtigt werden, um die Auswirkung der Verhandlungsstärke unterschiedlicher Akteure zu ermitteln. Als letzter Unterpunkt in dieser Analyse wird die forstseitige, proaktive Strategieveränderung zur Abfederung von unvorhergesehenen Problemen (wie starke Regenfälle, langanhaltende Tauperioden oder Borkenkäferbefall) evaluiert.

Als Zweites soll der Einfluss der Organisation der Transportregionen, unterschiedlicher Gewichtszulassungen der Fahrzeuge, sowie einer heterogenen Fahrzeugflotte auf die Lieferkette mit Hilfe von unterschiedlichen Szenarien analysiert werden. Dies ermöglicht unter anderem das Potenzial einer optimierten Transportplanung sowie höherer gesetzlich erlaubter Gewichtszulassungen der Fahrzeuge besser abschätzen zu können.

Um das Design des Logistiknetzwerks genauer zu evaluieren, soll als Drittes mittels Modellmodifikationen der Einfluss eines zentralen Zwischenlagers auf Transportflüsse, Transporteffizienz und die Glättung der Produktflüsse zwischen Forst und Industrie untersucht werden. Den Kosten für Errichtung und Betrieb eines Lagers stehen dabei die Vorteile der erhöhten Pufferkapazität im Lager gegenüber. Angebot und Nachfrage könnten partiell entkoppelt werden, was sich positiv auf angebots- und nachfrageseitige Variabilität auswirken könnte. Aufgrund der dadurch entstehenden Möglichkeit zur Umladung von Transportmengen von Rungen auf Sattel LKWs im zentralen Zwischenlager, würden sich auch für den Transport in Bezug auf seine Disposition neue Möglichkeiten und mehr Flexibilität ergeben.

Fallstudie Modellregion Kärnten/Steiermark

Zur Validierung des Modells und zur Evaluierung der unterschiedlichen Szenarien wurde nach Rücksprache mit der Steering-Group und in Zusammenarbeit mit Herrn Seebacher eine Beispielsregion im Grenzgebiet von Kärnten und der Steiermark gewählt. Für diese Region wurden Daten für vier Industriebetriebe (einmal Säge-, dreimal Papierindustrie), 11 Transportunternehmen (mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen – Rungen-LKW und Sattelzug) und 35 Forstbetriebe (13 Klein- und 22 Großforste) exemplarisch gesammelt. Zur Vereinfachung wurde nur eine Holzart betrachtet, die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Holzqualitäten eines Baumes und der Wertverfall wurden hingegen explizit berücksichtigt. Auch stellen die Extrakosten z.B. für Eiltransporte einen wichtigen Treiber der Modellergebnisse dar, ebenso wie die Lagerkapazitätsbeschränkungen sowohl in den Forsten als auch bei den Industrien. Dies wird insbesondere bei der Analyse des Zwischenlagers schlagend.

Konsistent mit den generellen Modellannahmen und dem Fokus der Analyse werden nur Kosten berücksichtigt, die innerhalb der Lieferkette planerisch verändert werden können. Das heißt, dass insbesondere variable Beschaffungskosten des Holzes nicht inkludiert sind, da diese nur einen Transfer zwischen Forst und Industrie darstellen.

Der Status Quo der dezentralen Planung bestimmen zuerst die Industrieunternehmen ihre gewünschten Liefermengen und -zeitpunkte. Darauf aufbauend optimieren die Forstbetriebe ihre Erntemengen und -zeitpunkte. Innerhalb der daraus resultierenden zeitlichen Beschränkungen legen schließlich die Transportunternehmen die tatsächlichen Transportzeitpunkte, -mengen und -routen fest. Daraus ergeben sich dann schlussendlich die tatsächlichen Kosten für alle Teilnehmer der Lieferkette.

Für das gewählte Setup des Status Quo Modells ergeben sich für die Optimierung in Summe fast 5 Millionen Entscheidungsvariablen und etwa 170.000 einzuhaltende Nebenbedingungen. Die Komplexität dieses Optimierungsproblems führt zu Berechnungszeiten von mehreren Stunden. Dieser Tatsache

Rechnung tragend wird eine Genauigkeitstoleranz von maximal 10% Prozent angewendet, unter deren Anwendung der Rechenaufwand deutlich reduziert werden kann.

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Berechnungen präsentiert und beschrieben, wobei wiederum auf wenige strukturelle Variablen Bezug genommen wird, um auf die Kerneinsichten zu fokussieren.

Ergebnisse: Basismodell – Status Quo

Die erste Erkenntnis ist in der folgenden Abbildung ersichtlich und zeigt das als Bullwhip-Effekt bekannte Phänomen. Ausgehend von einer konstanten Nachfrage entsteht in der dezentralen Lieferkette durch Batchbildung bereits in der Industrie eine gewisse Fluktuation der Bestellmengen. Diese verstärkt sich bei den Erntemengen noch weiter.

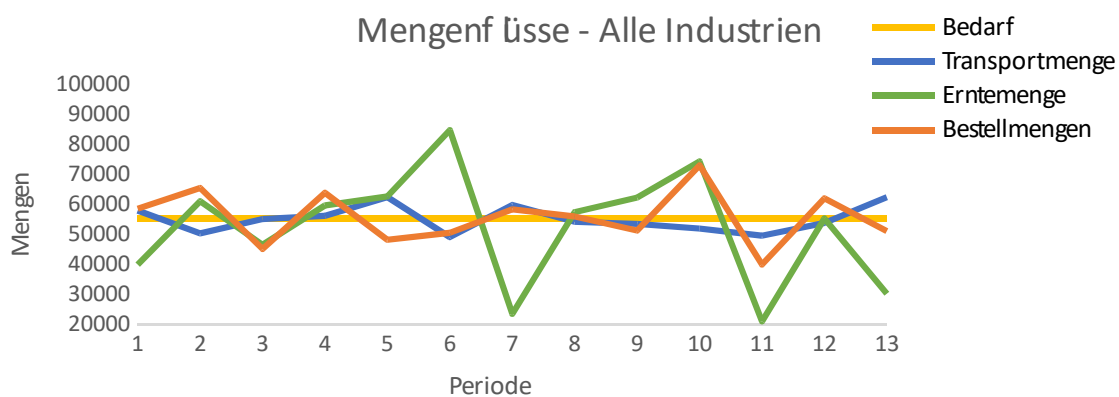


Abbildung 41: Mengenflüsse.

Wichtig ist es allerdings, dass diese Fluktuationen nicht per se schlecht sind, sondern dass deren Abstimmung zwischen den Lieferkettenpartnern wichtiger ist. Diesen Aspekt wird weiter unten nochmals aufgegriffen, wenn die Effekte der Lieferkettenkoordination thematisiert werden. An dieser Stelle soll noch auf einige andere Auffälligkeiten hingewiesen werden, die eine genauere Analyse anstoßen und Ansatzpunkte für erste Verbesserungsmaßnahmen liefern könnten. Dabei handelt es sich erstens um die Auswirkung der Größe (und Art) eines Industriebetriebes auf die Variation der Bestellmengen. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

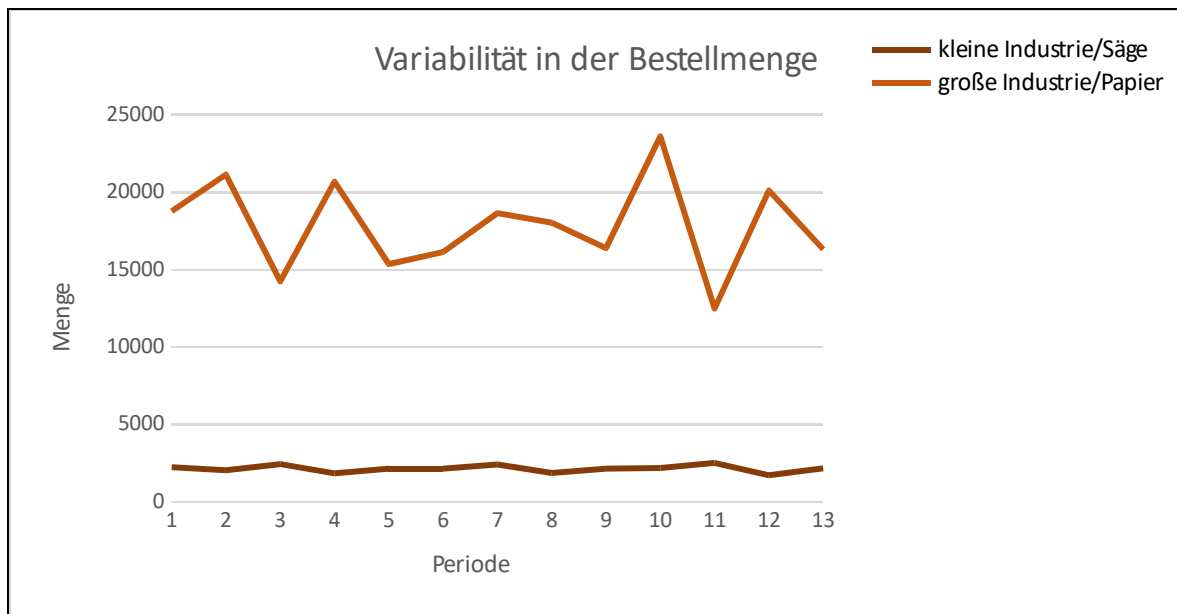


Abbildung 42 Variabilität der Bestellmenge.

Offensichtlich besteht bei großen Unternehmen der Papierindustrie ein wesentlich stärkerer Anreiz Bestellmengen zusammenzufassen. Da es sich hierbei auch um größere Mengen handelt, sind insbesondere die Auswirkungen auf den Transport kritisch, da hier unregelmäßige Kapazitätseffekte entstehen können. Ein erster Ansatzpunkt wäre hier also, bei den Bestellungen vorab eine enge Absprache mit den Transporteuren zu halten, um diese Risiken zu minimieren. Ein ähnliches Phänomen zeigt sich auf der Seite der Forstbetriebe wie die nächste Abbildung verdeutlicht.

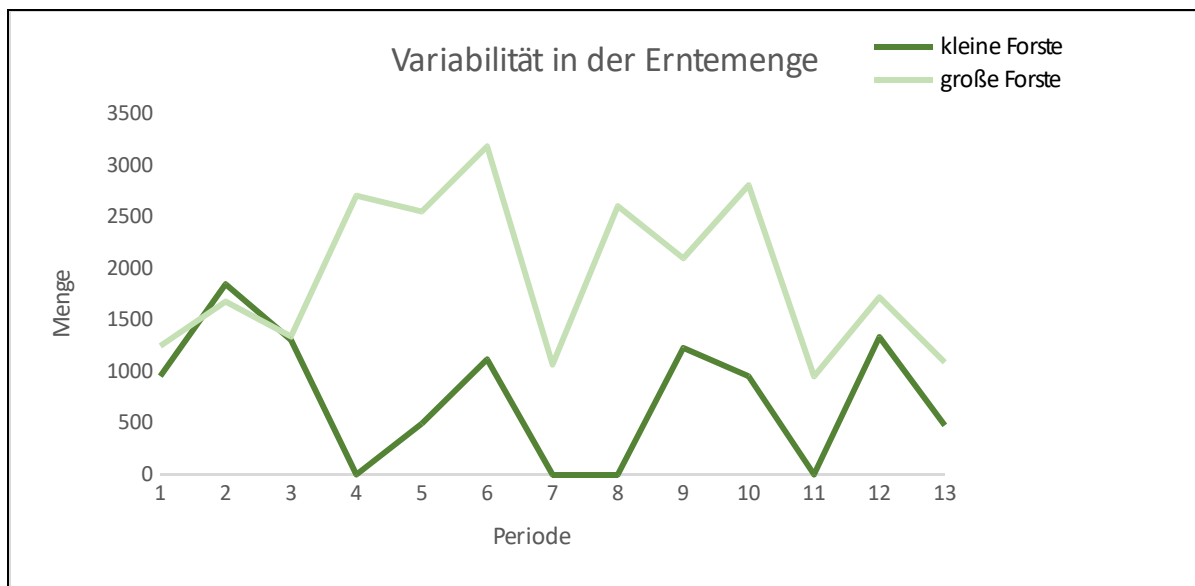


Abbildung 43: Variabilität der Erntemenge.

Auch hier ist es so, dass größere Forstbetriebe stärkere Schwankungen in den Erntemengen aufweisen, sodass wiederum Spitzen mit Perioden schwacher Auslastung für die Transporteure einander abwechseln können. Es ist daher ähnlich wie oben über die Kommunikationsprozesse zwischen Forstbetrieben und Transporteuren großes Potential für die Eindämmung negativer Kosteneffekte vorhanden.

Aufbauend auf diesen Einsichten wird nun die erste zentrale Frage betrachtet: Welches Kosteneinsparungspotential kann durch eine Koordination der gesamten Lieferkette Rundholz maximal erzielt werden?

Die folgende Tabelle fasst die erhobenen KPIs für den Status Quo, die perfekt koordinierte Lieferkette und einen dritten Fall einer teilweisen Koordination der Lieferkette zusammen. Konkret handelt es sich bei dem dritten Fall, um eine ausschließliche zentrale Planung der Transporte, bei unveränderter dezentraler Vorgehensweise der Industrien und Forstbetriebe. Es wird also die Frage gestellt, welcher Kostenvorteil durch eine zentrale Vergabe und Planung der Transportaufträge allein erreicht werden könnte.

	Kosten	Bullwhip-Effekt - Variationskoeffizient			relative Mengenvariabilität		
		Bestellmenge	Transportmenge	Erntemenge	EM/BM	EM/TM	BM/TM
Basismodell	1	16%	8%	37%	2.23	4.49	2.01
koord. Transport	0.97	16%	22%	37%	2.23	1.65	0.74
Supply-Chain	0.76	9%	9%	38%	4.46	4.46	1

Tabelle 17: KPIs Status Quo, perfekt koordinierte Lieferkette und teilweise Koordination der Lieferkette.

Da lediglich die prozentuellen Unterschiede in den Kosten der verschiedenen Strategien relevant sind, wurden die Gesamtkosten aller Lieferkettenteilnehmer im Status Quo auf 1 normiert. Dies stellt auch die Anonymität der Daten sicher. Die Tabelle zeigt, dass mit perfekter Koordination der Lieferkette ein maximales Potential von etwa einem Viertel der Gesamtkosten erzielt werden kann. Im Vergleich dazu führt eine zentrale Planung der Transporte zu einer geschätzten Einsparung von rund 3 Prozent. Das Gros der möglichen Verbesserung liegt also an den Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Lieferkettenteilnehmern, und hier insbesondere an der Schnittstelle zwischen Industrie und Transport. Wie die Zahlen zu den Variationskoeffizienten und der relativen Mengenvariabilität zeigen, besteht der zentrale Vorteil der Lieferkettenkoordination in der engen Abstimmung zwischen Bestell- und Transportmengen. Hier ist noch ein weiterer wichtiger Aspekt zu beachten. Die erwähnte Einsparung wird durch eine Abstimmung der Bestell- und Transportmengen unter gleichberechtigten Partnern erzielt. Die Vorgabe einer abgestimmten Planung durch einen der Lieferkettenpartner allein würde im Extremfall zu deutlich höheren Kosten führen (z.B. im Fall der Vorgabe durch die Industrie zu einer etwa 30% Erhöhung gegenüber dem Status Quo).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen, wurden in zwei weiteren Szenarien der Einfluss der Forstsituation analysiert. Dazu wurde einerseits untersucht, welche Auswirkung die Steuerung der gesamten Lieferkette durch die Forstbetriebe hätte. Alternativ zu diesem geplanten Eingriff in die Entscheidungsstrukturen der Lieferkette, wurde andererseits untersucht, welche Effekte eine forstseitig präventive Absicherung gegenüber unerwartet auftretenden Problemen (wie z.B. Borkenkäferbefall) auf die Lieferkette hat. Im ersten Fall wurde dazu die gesamte Lieferkette so koordiniert, dass die Kosten der Forstbetriebe minimiert werden, während im zweiten Fall lediglich die Zeitfenster für die Abholung geernteter Mengen verkürzt wurden. Die Ergebnisse belegen, dass eine forstseitige Steuerung der Lieferkette – wenn die Machtstrukturen zwischen den Beteiligten nicht ausgleichbar sind – das (zweit-)beste Ergebnis erzielen würde, nämlich eine Einsparung der Kosten um etwa 7% (zu vergleichen mit der maximalen Ersparnis von rund 24% wenn die Lieferkette unter gleichberechtigten Partnern optimiert würde). Die Verkürzung der Abholzeitfenster im Forst führt demgegenüber zu einer rund 4% Erhöhung der Gesamtkosten. Der

Haupttreiber dabei ist, wie in der folgenden Abbildung ersichtlich, die aus den engeren Zeitfenstern resultierende stärkere Variabilität der Transportmengen.

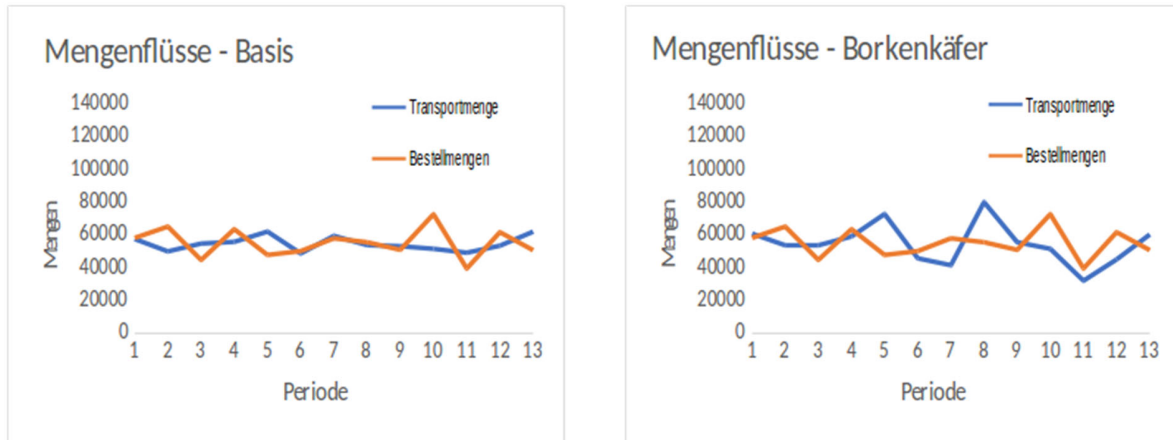


Abbildung 44: Mengenflüsse.

Dieses Ergebnis hat noch eine weitere Implikation für die Lieferkettenkoordination. Neben der zu erwartenden Reduktion der Kosten ist auch aktiv auf die Resilienz der koordinierten Kette gegenüber unvorhersehbaren Ereignissen zu achten. Die vorliegenden Ergebnisse stellen eine solide Basis für weiterführende Analysen zu diesem Thema dar.

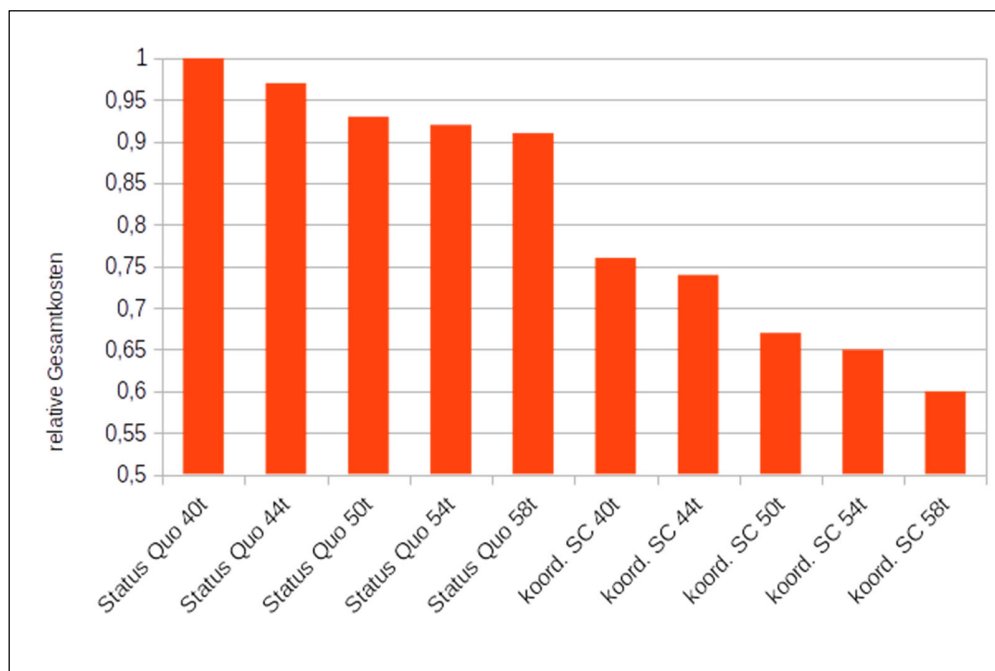


Abbildung 45: Relative Gesamtkosten.

Zur Einordnung der Ergebnisse wurden im nächsten Schritt auch ein alternativer Lösungsansatz zur Verbesserung der Effizienz der Lieferkette untersucht, nämlich die Erhöhung der Fahrzeugkapazität. Die konkrete Frage lautete: Welche Kostenersparnis in der Rundholzlieferkette ist durch eine Ausweitung des Tonnagelimits für Straßenfahrzeuge auf 44t, 50t, 54t oder 58t möglich?

Aus den Ergebnissen lassen sich die folgenden zentralen Einsichten hervorheben. Die Ausweitung der Tonnagelimits kann bis zu 9% Kostenersparnis bringen, wenn eine neue Grenze von 58t festgelegt wird. Der Großteil der Ersparnis wird aber bereits durch eine Erhöhung der Tonnagelimits auf 50t erreicht werden können. Dieser Ersparnis steht aber die operative Gefahr einer Abnahme der Liefertreue bei den Industrien gegenüber wie

Abbildung 46 zeigt. Bei einer Erhöhung des Tonnagelimits von 40t auf 58t würde sich die absolute Differenz zwischen gewünschter und gelieferter Menge je Periode um rund 50% erhöhen.

Diesem Problem könnte man durch eine Koordination der Lieferkette begegnen, wodurch einerseits ein individuell deutlich stärkerer Hebel entsteht und andererseits die potentiellen Benefits einer Tonnageerhöhung noch verstärkt werden. Auch hier führt eine Erhöhung des Tonnagelimits auf 50t bereits zu einer 10% Verbesserung. Eine weitere Erhöhung der Tonnagelimits auf 58t ließe aber sogar eine Kostenersparnis um bis zu 20% zu.

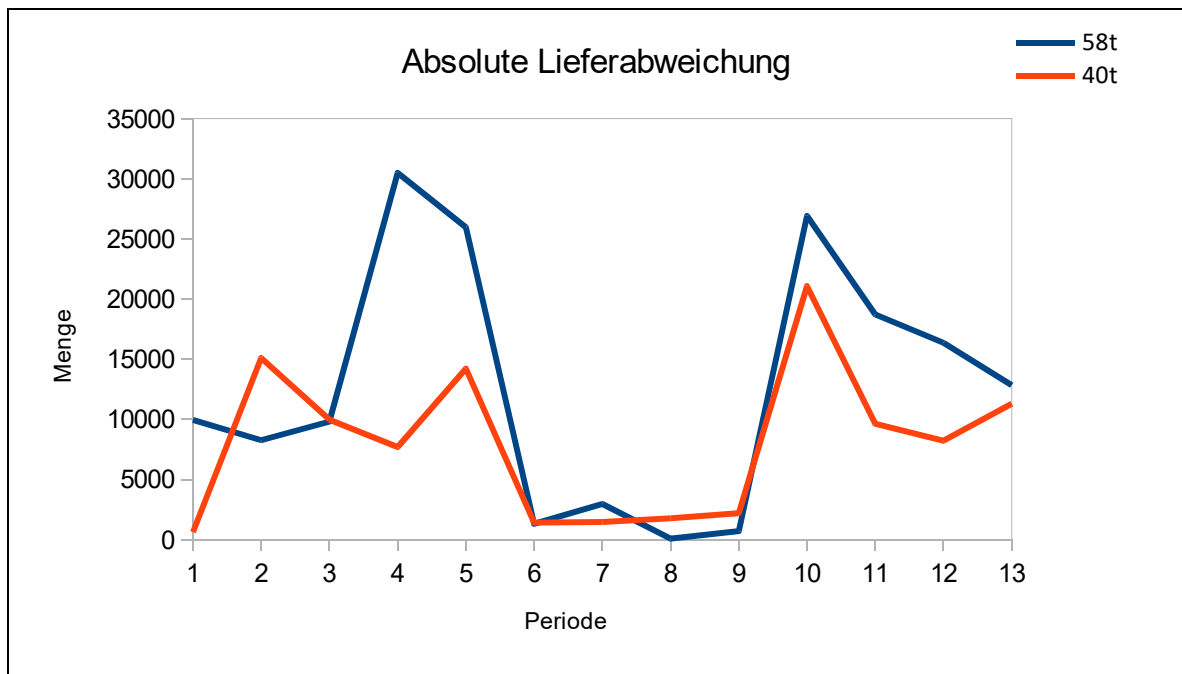


Abbildung 46: Absolute Lieferabweichung.

Im letzten Schritt wurde das Modell um die Option eines Zwischenlagers erweitert. Die dezentrale und beschränkte Vor-Ort Lagerung in den Forsten und bei den Industrien verursacht hohe zeitliche und örtliche Transportkomplexität und potenziell hohe Lagerbestände. Dem soll mit einem Zwischenlager entgegnet werden und die Frage lautet: Welches Kosteneinsparungspotential kann durch die Errichtung eines Zwischenlagers erzielt werden? Explizit nicht behandelt das Modell die Frage der optimalen Standortwahl für dieses Zwischenlager, da hier völlig andere Aspekte abgebildet werden müssten. Die folgende Tabelle zeigt deutlich, dass der Kosteneffekt des Zwischenlagers relative gering ist (insbesondere verglichen mit einigen der anderen oben besprochenen Alternativen). Deutlich wird aber, dass operativ gesprochen, die Diskrepanz zwischen Bestell- und Transportmengen noch weiter verstärkt wird. Industrien bestellen einerseits gleichmäßiger, da das Zwischenlager risikomindernd wirkt, was die Verfügbarkeit der gewünschten Menge betrifft. Transporteure sind andererseits flexibler, da wiederum im zentralen Lager besser auf die heterogenen Anforderungen seitens der Forstbetriebe und Industrien eingegangen werden kann. Transportseitig spiegelt sich diese Tatsache auch in der Flottenzusammensetzung wider. Während

das Zwischenlager die Anzahl der Transporte und damit die Gesamtflottengröße leicht erhöht, sinkt die Anzahl der eingesetzten Rungen-LKW deutlich, da diese nur noch den Transport zwischen Forst und Zwischenlager abwickeln.

	Kosten	Bullwhip-Effekt - Variationskoeffizient			relative Mengenvariabilität			Fahrzeuge	
		Bestell- menge	Transport- menge	Ernte- menge	EM/BM	EM/TM	BM/TM	Rungen-LKW	Sattelzug
ohne Zwischenlager	1	16%	24%	39%	2.45	1.64	0.67	52	0
mit Zwischenlager	0.97	14%	58%	33%	2.34	0.57	0.24	30	25

Tabelle 18: Kosteneffekte.

Zusammengefasste Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich folgende Haupterkenntnisse formulieren:

- Die Variation der Bestell-, Liefer-, und Erntemengen an sich ist nicht unmittelbar problematisch. Insbesondere ist die Variation der Erntemenge eher unkritisch. Durch die Koordination der Lieferkette können aber insbesondere Transport und Industriebedarf besser abgestimmt werden.
- Ohne adäquater Anpassung der Bestell- und Erntestrategien hat jegliche Veränderung im Transportbereich – wie Koordination der Transportplanung, engere Transportzeitfenster, erhöhte Tonnage, Einführung eines Zwischenlagers -- eine vergleichsweise kleine positive und ggf. sogar negative Auswirkung auf die Gesamteffizienz der Lieferkette.
- Der durch die bessere Koordination entlang der Lieferkette erreichbare Hebel ist wesentlich stärker als die mit Tonnageerhöhung verbundenen Einsparungen. Die beiden Strategien verstärken sich aber gegenseitig.
- Das Zwischenlager entkoppelt Ernte- und Bestellmengen noch weiter, erhöht aber die Flexibilität im Transport und kann damit zu Kosteneinsparungen führen. Es besteht aber die Notwendigkeit engere Regeln für den Transport festzulegen, da sonst Mengen im Forst liegenbleiben können.

Als die zwei wirkungsvollsten kurzfristigen Strategieanpassungen können die folgenden Ansätze hervorgehoben werden:

- Bessere Koordination zwischen Transportunternehmen und Industrie mit dem Ziel die Termintreue bei Lieferungen zu erhöhen.
- Analyse und Anpassung der Transportregionen sowie der Auftragsvergabe im Transport zur Hebung von Poolingpotentialen.

6. RICHTLINIE ZUR VERBESSERUNG DER VERSORGUNGSSICHERHEIT, EFFIZIENZ UND NACHHALTIGKEIT

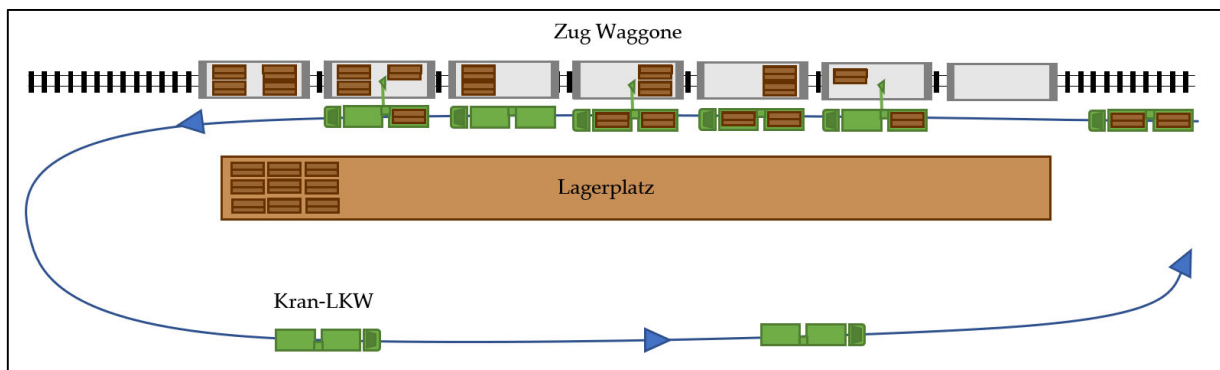
Vor dem Hintergrund des Erhalts der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit der Branche der rundholzverarbeitenden Industrie in Österreich wurden im Projekt THEKLA unter Federführung der Universität für Bodenkultur Wien (wissenschaftlicher Projektleiter Dr. Peter Rauch) innovative Logistik- und Supply-Chain Strategien evidenzbasiert evaluiert. Zur Untersuchung der Ausgangssituation wurden Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) in der Holzlieferkette erhoben. Darauf aufbauend wurden im Zuge einer partizipativen Strategieentwicklung gemeinsam mit Praktikern folgende, innovative Strategien für weitergehende Analysen ausgewählt: (1) Multimodalität durch Umschlag von Rundholz von Straße auf Schiene, (2) Umladen von Kran-LKW auf Sattelaufleger, (3) Steuerung der Transportmengen vom Forst über Lager zur Industrie und (4) Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen, wobei auch der Einfluss einer Tonnageerhöhung auf die jeweiligen Strategien evaluiert wurde.

Um diese Strategien evidenzbasiert zu evaluieren, wurden Szenarien mithilfe von computergestützten Modellrechnungen quantitativ analysiert und anschließend partizipativ mit Branchenvertretern umfassend bewertet. Neben dem Einsatz der wissenschaftlichen Methoden Simulation und Optimierung zur evidenzbasierten Entscheidungsunterstützung stand vor allem die intensivierte Vernetzung der Branchenvertreter durch Workshops, Diskussionen und Interviews im Fokus. Die gewonnene Expertise wurde in Form der „Richtlinie zur Verbesserung der Versorgungssicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit der Wood Supply Chain“ anwendungsfreundlich aufbereitet, um eine breite praktische Umsetzung in der Branche zu erreichen.

Die nachfolgend präsentierten Richtlinien bieten eine praktische Hilfe bei der Umsetzung einer modernen Holzlogistik unter Einbeziehung des Bahntransportes bzw. des Holzumschlages von Kran-LKW auf Sattelaufleger. Für unterschiedliche Einsatz-Szenarien und Logistikkonfigurationen kann der/die PraktikerIn, unterstützt durch Anwendungsbeispiele, anhand der entwickelten Transportplanungstabellen robuste Startlösungen finden, die im Laufe der Umsetzung entsprechend der konkreten Gegebenheiten noch weiter adaptiert bzw. optimiert werden können. Weiters beinhalten die Richtlinien Empfehlungen zur Lieferkettenkoordination, die die Steuerung der Transportmengen von Forst über Lager zur Industrie (inkl. Einführung eines Zwischenlagers) sowie die Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen umfassen.

Logistikempfehlungen für den Umschlag von Holz mittels Bahn-Terminal (BOKU Wien: Christoph Kogler und Peter Rauch)

Die Logistikempfehlungen bieten für Holzverladebahnhöfe (=Terminals, siehe Abbildung) mit einem Verladegleis für 1-7 Waggons und einer schmalen Verladestraße (auf der LKWs nicht aneinander vorbeifahren können) robuste Logistiklösungen in Form von LKW-Anzahl, Waggon Anzahl, Umschlagkapazität, Lagergröße und Wartezeiten zur (Notfall-) Planung. Diese Logistiklösungen bestehen aus sechs verdichten Transportplanungstabellen, deren vielfältige Einsatzmöglichkeiten anhand von konkreten Business Cases näher erklärt werden.



Die Transportplanungstabellen:

- ✓ ...helfen nach Risikoereignissen wie Stürmen, Borkenkäfern, Ernte- bzw. Lieferstopps sowie eingeschränkter Waggon- bzw. LKW-Verfügbarkeit bei der schnellen Erstellung von Notfallplänen: z.B. Abschätzungen der möglichen Maximalauslastung verschiedener Terminalgrößen, optimierte Verhältnisse von Transportmengen, Waggons, LKWs, Lagergrößen, Anzahl der Zugankünfte pro Tag, Distanzen zum Terminal und Tonnage
- ✓ ...zeigen CO₂ Einsparmöglichkeiten durch multimodale Terminals und erhöhte Tonnage: z.B. Vergleich der benötigten LKW-Anzahl zum Transport einer geforderten Menge über verschiedene Distanzen bei unterschiedlicher Tonnage
- ✓ ...unterstützen das Design von komplexen Holzlieferketten: z.B. Standortwahl im Hinblick auf Transportdistanzen zwischen Forst und Terminal, Terminallayout, Lagergröße, benötigte Waggons bzw. LKWs, Umschlagkapazität pro Woche
- ✓ ...eignen sich zur Verbesserung des aktuellen Arbeitsablaufes: z.B. Verhältnis Waggons zu LKWs, Wartezeitenabschätzung, gezielter Lageraufbau bzw. Lagerabbau

Um verschiedene Planungssituationen abzubilden, wurden Transportplanungstabellen für drei unterschiedliche Fahrzeiten (entsprechen auch Distanzen) mit jeweils zwei Varianten für einmaligen und zweimaligen Verschub erstellt. Die Fahrzeiten gliedern sich in kurze (5/10/15 Minuten, ermöglichen 3-4 LKW Fahrten vom Forst zum Terminal pro Tag), mittlere (35/40/45 Minuten, 2-3 Fahrten) und lange (65/70/75, 1-2 Fahrten). Jede Tabelle enthält in den ersten beiden Spalten ausgewählte Waggon/LKW Konfigurationen, die mithilfe der in den folgenden drei Spalten enthaltenen Kennzahlen (Umschlagkapazität pro Woche, Lagergröße pro Woche, Durchschnittliche Wartezeit in Minuten) auf Passgenauigkeit für die entsprechende Zielsetzung geprüft werden können. Die einzelnen Kennzahlen werden dabei jeweils in weitere Spalten untergliedert, die Auswirkungen möglicher Tonnageerhöhungen darstellen (T1 = 44t LKW Gesamtgewicht, T2 = 47t, T3 = 50t).

Business Cases als Leitfaden für den Einsatz der Transportplanungstabellen

Eine typische Zielsetzung für die Transportplanung beinhaltet das Erreichen einer möglichst großen Umschlagkapazität unter Berücksichtigung einer möglichst kleinen Lagergröße, möglichst vieler zeitgerecht, vollständig geladener Waggons, möglichst kurzer Wartezeiten der LKWs sowie möglichst hoher LKW Auslastung wobei die eingesetzte LKW- bzw. Waggon-Anzahl möglichst robust auf Fahrzeit- und Tonnageschwankungen reagieren soll. Hierbei können die entwickelten Transportplanungstabellen eine gute Startlösung bieten, die dann in der Praxis durch Optimierung von Prozessabläufen, Überstunden oder vorhandene Erfahrungswerte noch weiter verbessert werden können. Zur Verdeutlichung des vielfältigen Einsatzpotentials der Transportplanungstabellen werden im Folgenden drei Business Cases erläutert, die auf häufige Einschränkungen im Hinblick auf die (A) Waggon-Anzahl, (B) LKW-Anzahl sowie (C) Umschlagmenge eingehen und mithilfe von Standardstrategien schnell und robust gelöst werden.

(A) Waggon-Anzahl fix vorgegeben

Die Größe eines bestimmten Terminals gibt die Anzahl der maximal verladbaren Waggons vor, die mitunter durch die maximale Menge zur Verfügung stehender Waggons (z.B. Engpass für Rundholzwaggons bei Rail Cargo) noch weiter eingeschränkt sein kann. Darüber hinaus gibt die Rail Cargo vor, ob am jeweiligen Terminal ein einmaliger oder zweimaliger Verschub möglich ist. Soll nun eine passende LKW-Anzahl zu einer vorgegebenen Waggon-Anzahl bestimmt werden, sind in der entsprechenden Transportplanungstabelle (Distanz-Tabelle: kurz/mittel/lang, bzw. Verschub-Variante: einmalig/zweimalig) die Zeilen mit der entsprechenden Waggon-Anzahl zu betrachten und jene Zeile mit der für die jeweilige Praxissituation passenden LKW-Anzahl auszuwählen.

Beispiel A: Die Rail Cargo kann für einen Bahnhof mit ca. 40 Minuten Fahrzeit vom Forst zum Terminal maximal fünf Waggons zur Verfügung stellen und zweimal täglich verschieben.

Vorgehensweise:

- (1)** Tabelle „Mittlere Fahrzeit zum Terminal, 2x Verschub“ verwenden
- (2)** Abschnitt für 5 Waggons suchen
- (3)** Passende LKW-Anzahl je Zielsetzung/Strategie auswählen

Strategie 1 - Kein Lager vorhanden: Beim Einsatz von **10 LKWs** und **zweimaligen Verschub** ergibt dies eine Umschlagkapazität von **2350 FM** (bei T1 = aktueller Tonnage) wobei kein Lagerplatz zur Verfügung stehen muss und mit einer durchschnittlichen Wartezeit von **20 min** zu rechnen ist. (Zusatz: Können z.B. nur 5 LKWs zum Einsatz kommen, so wäre es sinnvoller nur einen einfachen Verschub durchzuführen, wobei sich eine Umschlagkapazität von 1170 FM pro Woche ergäbe)

Strategie 2 - Lageraufbau erwünscht: Bei **zweimaligen Verschub** können durch einen zusätzlichen (**11ten**) LKW **250 FM**, bei zwei zusätzlichen (**11ten und 12ten**) LKWs **490 FM** durchschnittlich pro Woche auf Lager gelegt werden, wobei die Umschlagkapazität sowie die durchschnittliche Wartezeit konstant bleiben. (Zusatz: Bei weniger zur Verfügung stehenden LKWs, kann nun verglichen werden, wie viel bei einem einmaligen Verschub auf Lager gelegt werden kann.)

Strategie 3 - Wartezeiten für LKWs verkürzen: Beim Einsatz von **8 LKWs** und **zweimaligem Verschub** kann die durchschnittliche Wartezeit auf **10 min** gesenkt werden, wobei natürlich auch die Umschlagkapazität auf **1890 FM** sinkt. (Zusatz: Muss die Wartezeit noch weiter gesenkt werden, dann kann durch einmaligen Verschub und den Einsatz von 5 und weniger LKW eine Wartezeit gänzlich vermieden werden.)

(B) LKW-Anzahl fix vorgegeben:

Die lokal zur Verfügung stehenden LKWs bzw. die Anzahl der ortskundigen Forst-LKW-Fahrer gibt oft die maximal zur Verfügung stehende LKW-Anzahl vor. Soll nun eine passende Waggon-Anzahl zu einer vorgegebenen LKW-Anzahl bestimmt werden, sind in der passenden Transportplanungstabelle (Fahrzeit: kurz/mittel/lang bzw. Verschub-Variante einmalig/zweimalig) die Zeilen mit der entsprechenden vorhandenen LKW-Anzahl zu betrachten. Nun kann aufgrund der Kennzahlen verglichen werden, welche für die jeweilige Praxissituation passende Waggon-Anzahl und Verschub-Variante ausgewählt werden soll.

Beispiel B: Lokale Frächter können für die kurze Distanz von etwa 10 Minuten Fahrzeit zwischen Forst und Terminal fünf LKWs zur Verfügung stellen. Die Rail Cargo kann einmal täglich verschieben.

Vorgehensweise:

- (1)** Tabellen für kurze Fahrzeiten verwenden
- (2)** Zeilen für 5 LKWs vergleichen (je Verschub-Variante jeweils eine Zeile pro Waggon-Anzahl 1-7)
- (3)** Passende Waggon-Anzahl je Zielsetzung/Strategie auswählen

Strategie 1 - Kein Lager möglich: Beim Einsatz von **7 Waggon**s und **einmaligen Verschub** können **1630 FM** (bei T1 = aktueller Tonnage) pro Woche umgeschlagen werden, wobei kein Lagerplatz zur Verfügung stehen muss und mit einer durchschnittlichen Wartezeit von **20 min** zu rechnen ist.

Strategie 2 – Aufbau eines strategischen Zwischenlagers gewünscht: Um beim Einsatz von **5 LKWs** Lager aufzubauen, gilt es, die Waggonanzahl zu reduzieren. So kann bei **einmaligen Verschub** bis zu **1670 FM** bzw. bei **zweimaligen Verschub** bis zu **1430 FM** bei Einsatz von jeweils nur **einem Waggon** aufgebaut werden.

Strategie 3 - Wartezeiten für LKWs verkürzen: Beim Einsatz von **5 Waggon**s und **einmaligen Verschub** kann die durchschnittliche Wartezeit auf **10 min** gesenkt werden, wobei natürlich auch die Umschlagkapazität auf **1130 FM** sinkt und **600 FM** auf Lager gelegt werden.

(C) Umschlagmenge fix vorgegeben:

Zur Erfüllung von Lieferquoten der Industrie bzw. um eine ungehinderte Holzernte sicherzustellen, wird häufig eine Umschlagmenge pro Woche vereinbart. Soll nun eine optimierte Waggon- zu LKW-Anzahl für die bestimmte Umschlagmenge eruiert werden, sind in der jeweiligen Transportplanungstabelle (Fahrzeit kurz/mittel/lang bzw. Verschub-Variante einmalig/zweimalig) die Zeilen mit der gewünschten Umschlagkapazität zu vergleichen. Dabei muss beachtet werden, dass die Umschlagkapazität mitunter durch verschiedene Kombinationen erreicht werden kann (also mehrfach in der jeweiligen Tabelle vorkommt), wobei für die jeweilige Praxissituation passende LKW- bzw. Waggonkombinationen anhand der Kennzahlen verglichen werden können.

Beispiel C: Es wurde mit der Industrie vereinbart, pro Woche 3300 FM Holz umzuschlagen. Eine derartig große Menge kann nur bei zweimaligen Verschub und ausreichender LKW-Ausstattung erreicht werden. Welcher Terminal ist dafür geeignet?

Vorgehensweise:

(1) Die Transportplanungstabellen mit kurzen/mittleren/langen Fahrzeiten für zwei Verschübe verwenden

(2) Zeilen mit Umschlagkapazität von 3300 FM suchen

(3) Jene Kombination auswählen, die die kleinste LKW- bzw. Waggonanzahl benötigt

Strategie 1 – Auswahl Terminal anhand der Zulieferentfernung: Bei der Auswahl eines Terminals mit **kurzer Fahrzeit** kann bei **zweimaligen Verschub** mit **7 Waggon**s und **12 LKW**s der geforderte Umschlag erreicht werden, wobei eine Lagergröße von **1100 FM** berücksichtigt werden muss. Bei der Auswahl eines Terminals mit **mittlerer Fahrzeit** werden **7 Waggon**s und **14 LKW**s bzw. bei **langer Fahrzeit** **7 Waggon**s und **21 LKW**s benötigt, wobei bei beiden Varianten kein Lager am Terminal aufgebaut wird.

Strategie 2 – kalamitätsbedingte, befristete Tonnageerhöhung: Bei Erhöhung der LKW-Tonnage auf ein Gesamtgewicht von 47 Tonnen (=T2), werden bei Terminals mit **kurzer** (7 Waggon, 11 LKW, 3400 FM Umschlag, 650 FM Lagergröße) und **mittlerer** (7 Waggon, 13 LKW, 3.310 FM Umschlag, 0 FM Lagergröße) **Fahrzeit** bereits **ein LKW**, bei Terminals mit **langer Fahrzeit** (7 Waggon, 19 LKW, 3420 FM Umschlag, 0 FM Lagergröße) **2 LKW**s eingespart. Bei einer Tonnageerhöhung auf ein Gesamtgewicht von 50 Tonnen (=T3) werden bei Terminals mit **kurzer Fahrzeit** (7 Waggon, 9 LKW, 3510 FM Umschlag, 130 FM Lagergröße) **3 LKW**s, bei **mittlerer Fahrzeit** (7 Waggon, 12 LKW, 3530 FM Umschlag, 0 FM Lagergröße) **2 LKW**s und bei Terminals mit **langer Fahrzeit** (6 Waggon, 17 LKW, 3360 FM Umschlag, 0 FM Lagergröße) **4 LKW**s eingespart.

Vergleich mit unimodaler Transport zur vereinfachten Transportorganisation (basiert auf Berechnungen des Simulationsmodells, nicht aus Tabellen ableitbar): Bei direktem Transport vom Forst zur Industrie (Annahme einer Tour pro Tag, um vergleichbar hohe LKW Auslastung wie oben zu garantieren: Fahrzeit zum Forst 35/40/45 Min, Fahrzeit zur Industrie 145/150/155 Min, Ablade- und Wartezeit bei Industrie 85/90/95 Min) werden bei einer Tonnage von 24 FM (=T1, 44t Gesamtgewicht) 28 LKW, bei einer Tonnage von 27 FM (=T2, 47t Gesamtgewicht) 25 LKW und bei einer Tonnage von 30 FM (=T3, 50t Gesamtgewicht) 22 LKW zum Transport von 3.300 FM pro Woche benötigt.

Kurze (5/10/15 min) Fahrzeit zum Terminal, 1x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	1	230	270	290	120	130	140	10	0	0
1	2	230	260	290	590	660	660	10	10	20
1	3	240	260	280	950	1060	1110	20	20	20
1	4	240	260	280	1310	1470	1560	20	20	30
1	5	240	260	290	1670	1870	2010	30	30	30
2	2	450	530	590	240	270	250	10	0	0
2	3	490	530	570	710	760	750	10	10	10
2	4	470	530	590	1190	1310	1290	10	10	20
2	5	470	530	590	1550	1710	1740	20	20	20
3	2	710	790	880	0	0	0	10	10	20
3	3	730	790	880	360	400	360	10	0	0
3	4	700	770	880	830	850	890	10	10	10
3	5	700	760	880	1300	1390	1380	10	10	20
3	6	730	790	880	1780	1940	1900	10	20	20
4	3	940	1060	1170	0	0	0	10	20	20
4	4	940	1060	1170	480	530	440	10	0	10
4	5	940	1020	1180	940	940	1000	10	10	10
4	6	940	1020	1180	1410	1430	1490	10	10	10
4	7	940	1060	1180	1900	2000	2000	10	20	20
4	8	940	1060	1170	2300	2480	2490	20	20	20
5	4	1220	1320	1470	0	0	0	20	20	20
5	5	1130	1330	1470	600	660	540	10	0	10
5	6	1170	1370	1470	1060	1070	1090	10	10	10
5	7	1170	1320	1470	1540	1510	1630	10	10	10
5	8	1180	1320	1420	1880	2020	2070	20	20	20
5	9	1170	1320	1470	2320	2480	2550	20	20	20
6	4	1350	1620	1740	0	0	0	20	20	20
6	5	1410	1580	1700	20	0	0	20	20	30
6	6	1410	1580	1770	720	770	620	10	0	10
6	7	1410	1580	1830	1170	1200	1190	10	10	10
6	8	1410	1580	1760	1560	1590	1690	20	10	10
6	9	1410	1580	1820	1940	1990	2090	20	20	20
7	5	1630	1850	2120	0	0	0	20	20	30
7	6	1640	1850	2050	50	0	0	20	40	30
7	7	1710	1850	1990	830	890	680	10	0	10
7	8	1640	1910	2060	1230	1300	1270	10	10	10
7	9	1640	1910	2050	1680	1640	1740	20	10	10

Kurze (5/10/15 min) Fahrzeit zum Terminal, 2x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	2	490	530	590	360	390	370	20	10	20
1	3	470	530	590	710	800	810	30	30	30
1	4	450	530	590	1070	1200	1260	40	40	40
1	5	450	530	590	1430	1600	1710	50	40	40
2	3	930	880	960	190	320	310	20	20	20
2	4	940	1060	1170	710	780	700	20	10	20
2	5	900	1060	1170	1070	1170	1140	30	20	30
3	4	1310	1260	1470	100	260	150	10	20	20
3	5	1330	1240	1470	610	790	660	20	20	20
3	6	1360	1530	1750	1070	1140	1000	20	10	30
3	7	1410	1580	1700	1430	1520	1470	20	20	30
3	8	1410	1590	1820	1770	1920	1880	30	30	30
3	9	1410	1530	1760	2070	2280	2320	30	30	40
4	6	1770	1650	1820	430	760	650	20	20	20
4	7	1830	1690	1940	930	1110	1050	20	20	20
4	8	1810	2070	2310	1390	1450	1320	20	20	30
4	9	1830	2070	2340	1660	1790	1730	30	30	30
4	10	1820	2080	2430	1930	2100	2110	40	30	30
4	11	1880	2120	2350	2410	2570	2550	30	30	30
5	7	2130	2080	2320	320	540	510	20	20	20
5	8	2180	2160	2400	690	870	870	20	20	20
5	9	2270	2520	2690	1160	1120	1130	30	20	30
5	10	2260	2560	2910	1540	1640	1470	30	30	30
5	11	2390	2700	2940	1750	1910	1810	40	30	40
5	12	2360	2640	2940	2160	2340	2370	30	30	30
6	9	2650	2870	3090	500	450	540	20	20	20
6	10	2740	2980	3510	870	770	730	30	30	30
6	11	2640	3080	3440	1270	1240	1070	30	30	40
6	12	2780	3160	3400	1590	1720	1540	40	30	30
6	13	2830	3180	3540	1910	2110	2210	30	30	30
6	14	2820	3300	3530	2010	2150	2380	50	40	40
7	9	2820	3140	3510	130	80	10	20	20	20
7	10	2990	3160	3690	380	340	260	20	20	20
7	11	3130	3400	3840	690	650	600	30	30	30
7	12	3300	3510	3780	1100	1030	990	30	30	30
7	13	3200	3740	4010	1450	1460	1390	30	30	40
7	14	3300	3700	4250	1710	1880	2080	40	30	30
7	15	3300	3700	4110	1690	1880	2080	60	50	40
7	16	3280	3840	4110	1750	1880	2090	70	60	60

Mittlere (35/40/45 min) Fahrzeit zum Terminal, 1x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	1	230	260	290	0	0	0	0	0	0
1	2	240	260	290	280	270	300	10	10	10
1	3	240	260	300	540	540	600	10	10	10
1	4	230	260	290	800	820	890	10	10	10
1	5	250	260	280	1070	1100	1190	10	10	10
2	2	470	530	570	0	0	0	0	0	0
2	3	470	530	590	270	270	240	10	10	10
2	4	470	530	590	530	540	600	10	10	10
2	5	450	530	590	770	810	890	10	10	10
3	3	680	790	880	0	0	0	0	0	0
3	4	710	790	910	240	230	140	10	0	0
3	5	710	790	880	530	530	550	10	10	10
3	6	700	790	880	770	810	890	10	10	10
3	7	710	790	880	1020	1080	1190	10	10	10
3	8	700	790	880	1270	1350	1490	10	10	10
4	4	940	1060	1210	0	0	0	0	0	0
4	5	940	1020	1180	220	210	20	10	0	0
4	6	940	1060	1170	510	510	440	10	0	10
4	7	940	1060	1170	780	800	850	10	10	10
4	8	940	1060	1170	1020	1070	1180	10	10	10
4	9	940	1060	1170	1280	1350	1470	10	10	10
5	5	1170	1270	1470	0	0	0	10	10	10
5	6	1180	1320	1470	190	130	0	0	0	0
5	7	1170	1270	1470	500	490	310	10	0	10
5	8	1220	1270	1460	770	780	730	10	10	10
5	9	1170	1320	1470	1020	1070	1090	10	10	10
5	10	1120	1320	1480	1270	1340	1410	10	10	10
5	11	1180	1320	1420	1510	1620	1660	20	20	20
6	6	1350	1650	1760	0	0	0	20	20	20
6	7	1410	1640	1770	160	60	0	0	0	10
6	8	1410	1530	1760	500	430	150	10	10	10
6	9	1410	1580	1820	770	760	530	10	10	10
6	10	1350	1590	1750	1020	1050	900	10	10	10
6	11	1350	1580	1770	1250	1320	1250	20	10	20
6	12	1470	1520	1760	1500	1600	1540	20	20	20
7	7	1640	1850	2060	0	0	0	30	30	30
7	8	1650	1850	2040	160	20	0	10	10	10
7	9	1640	1850	2050	480	380	20	10	10	10
7	10	1640	1910	1980	770	710	430	10	10	10
7	11	1650	1850	2060	1020	1010	760	10	10	10
7	12	1570	1850	2120	1260	1300	1100	20	10	20
7	13	1640	1780	2060	1490	1570	1430	20	20	20

Mittlere (35/40/45 min) Fahrzeit zum Terminal, 2x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	2	470	530	590	0	0	0	10	10	20
1	3	470	530	570	240	270	300	20	20	20
1	4	470	530	590	480	540	590	20	30	30
1	5	470	530	590	720	800	890	30	30	30
2	3	710	760	880	0	0	0	10	10	10
2	4	980	1060	1210	0	0	0	20	20	20
2	5	940	1060	1170	240	270	300	20	20	20
3	5	1180	1320	1470	0	0	0	10	10	10
3	6	1410	1590	1760	0	0	0	20	20	20
3	7	1410	1530	1770	250	270	300	20	20	20
3	8	1410	1590	1760	480	540	600	20	20	20
3	9	1410	1590	1770	720	800	890	20	30	30
3	10	1350	1590	1820	960	1070	1190	30	30	30
4	7	1640	1860	2060	0	0	0	20	20	20
4	8	1880	2120	2350	0	0	0	20	20	20
4	9	1800	2110	2270	240	270	300	20	20	20
4	10	1880	2190	2270	480	540	600	20	20	30
4	11	1880	2110	2280	720	800	890	30	30	30
5	8	1890	2120	2350	0	0	0	10	20	20
5	9	2120	2380	2560	0	0	0	20	20	20
5	10	2350	2650	2850	0	0	0	20	20	20
5	11	2350	2650	2940	250	270	300	20	20	20
5	12	2350	2550	2940	490	540	600	20	30	30
6	11	2590	3020	3220	0	0	0	20	20	20
6	12	2820	3180	3650	0	0	0	20	20	20
6	13	2820	3300	3520	250	270	300	20	20	30
6	14	2820	3170	3520	370	400	450	30	30	30
7	12	2820	3170	3530	0	0	0	20	20	20
7	13	3060	3310	3830	0	0	0	20	20	20
7	14	3300	3840	4130	0	0	0	20	20	20
7	15	3430	3560	4110	130	140	150	30	30	30
7	16	3150	3700	4110	260	270	300	40	40	40

Lange (65/70/75 min) Fahrzeit zum Terminal, 1x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	1	190	160	150	0	0	0	20	30	40
1	2	230	260	300	80	30	10	50	60	70
1	3	230	260	290	190	160	150	70	80	80
1	4	240	260	290	320	310	300	70	80	90
1	5	230	260	290	440	430	450	80	90	90
2	3	440	430	450	0	0	0	40	50	60
2	4	470	530	590	130	50	0	60	70	70
2	5	470	530	590	260	170	160	60	80	80
3	5	660	700	740	0	0	0	50	60	70
3	6	730	790	880	170	50	10	60	70	70
3	7	700	760	880	290	180	150	70	80	80
3	8	700	790	850	400	310	300	70	80	90
3	9	730	790	880	510	440	450	80	90	90
4	7	930	960	1040	0	0	0	60	70	70
4	8	940	1060	1170	180	60	10	60	70	80
4	9	980	1060	1170	290	190	150	70	80	80
4	10	980	1020	1210	420	320	300	70	80	90
4	11	940	1060	1130	540	440	450	80	90	90
5	8	1100	1140	1180	0	0	0	50	70	70
5	9	1170	1230	1320	0	0	0	60	70	80
5	10	1170	1270	1470	180	40	10	70	80	80
5	11	1170	1370	1470	330	180	150	70	80	90
5	12	1180	1310	1470	430	320	300	80	90	90
6	10	1320	1360	1470	0	0	0	60	70	80
6	11	1400	1490	1620	0	0	0	70	80	80
6	12	1410	1580	1760	180	40	0	70	80	90
6	13	1410	1580	1760	330	170	150	80	90	90
6	14	1410	1640	1770	420	320	300	80	90	100
7	12	1560	1620	1760	0	0	0	70	80	80
7	13	1640	1760	1910	0	0	0	70	80	80
7	14	1640	1850	2050	220	50	10	80	80	90
7	15	1640	1850	1990	300	180	150	80	90	100
7	16	1640	1850	2060	430	320	300	90	100	100

Lange (65/70/75 min) Fahrzeit zum Terminal, 2x Vershub										
Waggons	LKWs	Umschlagkapazität pro Woche in FM			Lagergröße pro Woche in FM			Durchschnittliche Wartezeit in Min		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	3	460	480	530	20	50	50	20	20	20
1	4	470	510	540	160	170	240	30	30	30
1	5	470	490	550	280	350	380	30	30	40
2	5	820	920	1000	0	0	0	20	20	30
2	6	940	1030	1160	10	30	20	30	30	30
2	7	930	990	1160	140	170	170	30	30	30
3	8	1300	1450	1590	0	0	0	30	30	30
3	9	1470	1580	1760	10	10	0	30	30	30
3	10	1410	1560	1760	130	170	150	30	30	30
4	11	1760	1980	2180	0	0	0	30	30	30
4	12	1880	2190	2430	0	0	0	30	30	30
4	13	1880	2040	2360	120	140	150	40	40	40
5	14	2240	2520	2690	0	0	0	40	30	30
5	15	2360	2650	2940	0	0	0	40	40	40
5	16	2360	2550	2930	120	140	150	50	40	40
6	17	2710	3050	3360	0	0	0	50	40	30
6	18	2820	3050	3510	0	0	0	50	40	40
6	19	2700	3290	3410	120	130	90	60	50	50
7	19	3050	3420	3740	0	0	0	50	40	40
7	20	3170	3580	3930	0	0	0	50	40	40
7	21	3300	3830	4040	0	0	0	60	50	50
7	22	3290	3690	4050	120	100	0	60	60	60
7	23	3300	3690	4050	240	260	150	70	70	60
7	24	3290	3700	4080	360	410	370	70	70	70
7	25	3290	3690	4200	480	540	600	80	80	70

Logistikempfehlungen für den Holzumschlag mittels LKW-Terminal (BOKU Wien: Alexander Stenitzer, Christoph Kogler und Peter Rauch)

Folgende Transportplanungstabellen zeigen robuste, optimale Lösungen für den direkten Holzumschlag von Kran-LKWs auf Sattelaufleger an eigens dafür vorgesehen LKW-Terminals ohne Lagermöglichkeit für Holz. Die Transportplanungstabellen beruhen auf Simulationsergebnissen mit folgenden Parametern:

Kosten	
Kran-LKW	87 [€/h]
Zugfahrzeug	69 [€/h]
Sattelaufleger	0,40 [€/t]
Ladezeiten (Dreiecksverteilung)	Minimum/Modus/Maximum [Minuten]
Kran-LKW (Forst)	30/45/90
Kran-LKW (Umladen auf Sattelaufleger)	30/35/40
Zugfahrzeug (inkl. Queuing/Wartezeit bei Industrie)	60/105/150
Fahrzeiten (Dreiecksverteilung)	Minimum/Modus/Maximum [Minuten]
Zugfahrzeug zur Industrie	60/70/100
Gewichte	[Tonnen]
Maximalgewicht Kran-LKW	44
Maximalgewicht Zugfahrzeug + Sattelaufleger	40
Arbeitszeiten (Montag – Freitag)	[h]
(maximale) Arbeitszeit	10,5
(maximale) Lenkzeit	9

Terminalgröße und die Fahrzeit des Kran-LKWs zum Terminal werden in den Transportplanungstabellen variiert. Die Transportplanungstabellen ...

- ✓ ... eignen sich, eine Flotten-Konstellation für den Umschlag einer bestimmten Holzmenge über LKW-Terminals auszuwählen. Diese soll als robuste Start-Konfiguration dienen, die je nach den individuellen Anforderungen und Gegebenheiten, entsprechend angepasst werden kann.
- ✓ ... helfen dabei, den effizienten Einsatz von Kran-LKWs zu forcieren.
- ✓ ... ermöglichen rasche Reaktionen bei Kalamitäten. Dabei kann die mögliche Umschlagsmenge der anfallenden Holzmenge angepasst und die optimale Flotten-Konstellation gewählt werden.

Jede Tabelle bezieht sich auf eine Fahrzeit zwischen Forst und Terminal (kurz, mittel, lang), während innerhalb einer Tabelle die Terminalgröße hinsichtlich der Stellplatzanzahl für Sattelaufleger (2, 4, 6, 8) variiert wird. Die Tabellen enthalten dabei als Kennzahlen die Umschlagsmenge in Tonnen pro Woche, sowie die relativen Transportkosten in Euro pro Tonne. Die Kosten setzen sich aus den Betriebskosten für die beiden Fahrzeugtypen „Kran-LKW“ und „Zugfahrzeug“, sowie für die jeweils benötigten Sattelaufleger zusammen, während Errichtungs- und Fixkosten für den Umschlagsterminal bzw. dessen Instandhaltungskosten nicht berücksichtigt sind. Zudem können die durchschnittlichen Wartezeiten der Fahrzeuge (für relative Kosten entscheidend) abgelesen werden, wobei jene der Zugfahrzeuge in „IN“ und „OUT“ getrennt sind, um die Wartezeit beim Ankommen am Terminal, und jene für das Verlassen mit einem vollen Sattelaufleger abzubilden.

Business Cases als Leitfaden für den Einsatz der Transportplanungstabellen

Das Ermitteln einer Flotten-Konstellation mit einer bestimmten Umschlagsmenge und gleichzeitig minimalen relativen Transportkosten ist in der Praxis häufig ein auf „Versuch und Irrtum“ basiertes Lernen und oft mit entsprechend hohem Lehrgeld verbunden. Durch die Methode der Simulation kann eine optimierte, robuste Fahrzeug-Konstellation, die mithilfe der Transportplanungstabellen für konkrete Fälle bestimmt werden kann, als Startlösung herangezogen werden. Die Business Cases „(A) Anzahl an Kran-LKWs vorgegeben“ sowie „(B) Umschlagsmenge vorgegeben“ verdeutlichen die korrekte Anwendung der Tabellen.

(A) Anzahl der Kran-LKWs vorgegeben

Für eine vorgegebene Anzahl an lokal zur Verfügung stehenden Kran-LKWs soll das passende Verhältnis von Kran-LKWs zu Zugfahrzeugen und Sattelaufleger für einen bestimmten Terminal bestimmt werden.

Beispiel A: Einem Spediteur stehen 5 lokale Kran-LKWs für den täglichen Einsatz zur Verfügung. Die Fahrzeit des ausgewählten Terminals zum Forstgebiet beträgt in etwa 40 Minuten. Am Terminal können gleichzeitig 8 Kran-LKWs auf 8 Sattelaufleger umladen (d.h. die Terminalgröße = 8).

Vorgehensweise: (1) Auswählen der Tabelle mit mittlerer Fahrzeit zum Terminal. (2) In dieser Tabelle in der ersten Spalte die Terminalgröße 8 betrachten. (3) Innerhalb dieser Terminalgröße kann nun in der zweiten Spalte „Kran-LKWs“ eine Anzahl von 5 gewählt werden und die dazu passende Anzahl an Sattelaufleger und Zugfahrzeugen gefunden werden.

Ergebnis: Das Verhältnis von Kran-LKWs : Sattelauflegern : Zugfahrzeuge ist in diesem Fall 5 : 16 : 9. Die umgeschlagene Holzmenge beträgt 2.090 t pro Woche.

(B) Umschlagsmenge vorgegeben

Oftmals beinhalten Kontrakte mit den zu beliefernden Industrien Umschlagsmengen, die pro Woche erfüllt werden müssen. Mithilfe der Transportplanungstabellen kann hierfür eine robuste Flotten-Konstellation für unterschiedliche Distanzscenarien (kurz, mittel, lang) und eine vorgegebene Terminalgröße gefunden werden.

Beispiel B: Ein Vertrag verpflichtet dazu, mindestens 3400 FM Rundholz pro Woche zu liefern. Die Fahrzeit zum Terminal beträgt dabei in etwa 10 Minuten. Am Terminal können gleichzeitig maximal 6 Kran-LKWs auf 6 weitere Sattelaufleger umladen (d.h. die Terminalgröße = 6).

Vorgehensweise: Zuerst muss die Mengeneinheit FM mithilfe eines zuverlässigen Umrechnungsfaktors in Tonnen umgerechnet werden. Bei einem Faktor von 1,3 FM/t ergibt dies beispielsweise rund 2.600 t. (1) Heranziehen der Tabelle mit kurzer Fahrzeit zum Terminal. (2) In dieser Tabelle in der ersten Spalte die Terminalgröße 6 betrachten. (3) Innerhalb dieser Terminalgröße in der Spalte „Umschlag pro Woche [t/W]“ die richtige Umschlagsmenge suchen und die dazu notwendige Anzahl an Fahrzeugen auswählen.

Ergebnis: Das Verhältnis von Kran-LKWs : Sattelauflegern : Zugfahrzeugen liegt bei 4 : 16 : 11 (bzw. bei 5 : 18 : 13), wobei eine Holzmenge von ca. 2550 (bzw. 3050) t umgeschlagen wird.

Kurze Fahrzeit (5/10/15 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal - Teil I								
Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKW	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
2	1	3	2	470	23,71	42	1	17
2	2	6	5	1080	23,84	24	15	29
2	3	8	7	1520	24,24	33	20	20
2	4	10	9	1950	24,69	38	26	17
2	5	13	12	2480	25,26	36	42	16
2	6	13	12	2570	26,15	60	34	13
4	1	6	3	650	22,16	0	2	37
4	2	8	5	1180	21,50	13	2	8
4	3	11	8	1830	22,00	9	11	15
4	4	13	10	2320	22,26	16	13	10
4	5	15	12	2780	22,60	20	16	8
4	6	17	14	3230	22,94	24	19	7
4	7	20	17	3810	23,28	23	27	7
4	8	21	18	4070	23,72	32	26	5
4	9	24	21	4600	24,11	32	34	5
4	10	25	22	4820	24,61	41	34	4
4	11	26	23	5060	25,05	48	35	4
4	12	27	24	5240	25,64	57	37	4
4	13	29	26	5510	26,38	62	45	4
4	14	30	27	5650	27,16	71	50	4
4	15	37	34	6450	27,91	59	79	4
6	1	7	3	650	22,02	0	0	36
6	2	10	5	1190	20,96	12	1	1
6	3	13	8	1900	20,95	4	4	7
6	4	16	11	2550	21,49	4	13	10
6	5	18	13	3050	21,71	9	12	7
6	6	20	15	3530	21,97	14	14	5
6	7	22	17	4000	22,23	17	16	4
6	8	25	20	4620	22,43	16	21	4
6	9	27	22	5060	22,68	19	23	4
6	10	30	25	5620	22,94	19	29	3
6	11	31	26	5890	23,23	25	28	3
6	12	33	28	6280	23,56	29	31	2
6	13	35	30	6670	23,85	32	33	2
6	14	36	32	7060	24,16	35	30	8
6	15	38	34	7440	24,42	37	33	8
6	16	39	35	7650	24,74	43	33	7
6	17	40	36	7850	25,13	48	34	7

Kurze Fahrzeit (5/10/15 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal - Teil II								
Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKW	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
8	1	10	3	650	22,05	0	2	36
8	2	12	5	1190	20,99	12	1	1
8	3	15	8	1900	20,67	4	3	2
8	4	18	11	2600	20,97	1	8	7
8	5	21	14	3250	21,30	1	14	7
8	6	23	16	3760	21,46	5	14	5
8	7	25	18	4250	21,72	10	15	4
8	8	27	20	4730	21,90	13	16	3
8	9	30	23	5360	22,09	13	21	3
8	10	31	25	5820	22,27	15	15	9
8	11	33	27	6290	22,41	17	16	8
8	12	35	29	6710	22,63	20	18	7
8	13	38	32	7310	22,77	19	21	7
8	14	40	34	7720	22,97	21	23	6
8	15	43	37	8290	23,17	22	27	6
8	16	43	37	8400	23,38	28	25	5
8	17	47	41	9090	23,54	26	30	6
8	18	49	43	9460	23,78	29	32	5
8	19	49	43	9590	23,99	34	30	4
8	20	53	47	10220	24,21	32	37	5
8	21	51	45	10060	24,47	42	30	4
8	22	53	47	10390	24,73	44	33	4

Mittlere Fahrzeit (35/40/45 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal – Teil I

Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKW	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
2	1	3	2	400	27,46	11	1	60
2	2	5	4	780	28,00	12	21	47
2	3	7	6	1160	28,35	15	36	37
2	4	9	8	1540	28,45	15	45	30
2	5	10	9	1810	28,57	27	38	24
2	6	12	11	2180	28,81	26	47	21
2	7	14	13	2530	29,18	27	56	18
4	1	6	2	410	25,98	0	1	41
4	2	6	3	710	25,78	31	1	2
4	3	8	5	1180	25,31	13	3	11
4	4	10	7	1600	25,52	8	10	14
4	5	12	9	1990	26,14	10	19	15
4	6	14	11	2380	26,44	10	25	14
4	7	16	13	2770	26,66	11	31	13
4	8	18	15	3150	26,94	12	37	12
4	9	19	16	3410	27,24	20	35	10
4	10	20	17	3660	27,46	26	33	9
4	11	21	18	3910	27,70	32	31	8
4	12	23	20	4280	27,84	31	36	7
4	13	26	23	4760	28,06	25	48	7
4	14	25	22	4780	28,33	41	36	6
4	15	28	25	5240	28,61	36	47	6
4	16	31	28	5670	28,98	32	59	5
4	17	33	30	5940	29,51	36	66	5
4	18	35	32	6200	30,03	39	73	5
6	1	7	2	420	25,96	0	1	42
6	2	7	3	710	25,71	30	1	1
6	3	10	5	1190	24,52	9	1	1
6	4	12	7	1650	24,53	3	5	7
6	5	14	9	2070	24,93	2	10	10
6	6	16	11	2480	25,26	2	16	11
6	7	17	12	2800	25,29	9	12	7
6	8	19	14	3200	25,57	9	17	8
6	9	21	16	3600	25,82	9	22	8
6	10	23	18	3980	26,10	10	26	7
6	11	25	20	4370	26,27	10	30	7
6	12	26	21	4640	26,53	16	29	6
6	13	28	23	4990	26,82	17	34	6
6	14	29	24	5250	26,96	22	32	5

Mittlere Fahrzeit (35/40/45 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal – Teil II

Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKW	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
6	15	30	25	5510	27,08	25	31	4
6	16	32	27	5860	27,29	25	36	4
6	17	34	29	6220	27,47	26	39	4
6	18	38	33	6830	27,66	18	52	3
6	19	39	34	7070	27,82	22	51	3
6	20	39	34	7210	27,97	29	46	3
6	21	41	36	7560	28,18	29	50	2
6	22	41	37	7770	28,38	33	42	10
6	23	41	37	7880	28,59	40	39	9
6	24	43	39	8190	28,89	41	43	9
8	1	8	2	420	26,03	0	0	44
8	2	9	3	710	25,76	30	1	0
8	3	11	5	1190	24,39	9	1	1
8	4	14	7	1660	24,23	1	3	4
8	5	16	9	2090	24,71	1	9	10
8	6	17	10	2380	24,79	10	5	3
8	7	19	12	2840	24,76	5	8	5
8	8	21	14	3290	24,84	3	11	5
8	9	23	16	3720	24,99	3	15	6
8	10	25	18	4110	25,22	3	19	6
8	11	27	20	4510	25,39	4	22	6
8	12	28	21	4810	25,54	8	21	5
8	13	30	23	5200	25,71	9	24	4
8	14	32	25	5580	25,91	9	27	4
8	15	34	27	5960	26,17	11	31	4
8	16	36	29	6310	26,44	12	35	4
8	17	37	30	6570	26,59	15	34	3
8	18	39	32	6940	26,78	16	37	3
8	19	41	34	7300	26,92	17	40	3
8	20	41	34	7430	27,07	22	36	2
8	21	40	34	7570	27,21	29	25	8
8	22	45	38	8170	27,35	23	42	2
8	23	44	38	8290	27,45	29	31	7
8	24	49	43	9010	27,55	20	43	8
8	25	50	44	9270	27,62	23	42	7
8	26	52	46	9630	27,74	23	44	7

Lange Fahrzeit (65/70/75 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal - Teil I								
Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKWs	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
2	1	2	1	230	31,64	69	0	2
2	2	4	3	570	31,93	16	6	65
2	3	5	4	790	32,09	33	9	45
2	4	6	5	1030	32,34	43	11	35
2	5	8	7	1370	32,30	26	32	34
2	6	9	8	1620	32,26	32	30	28
2	7	10	9	1860	32,32	37	29	24
2	8	11	10	2090	32,71	43	31	21
2	9	12	11	2330	32,85	47	33	19
2	10	14	13	2630	33,20	41	47	18
2	11	15	14	2800	33,75	49	51	17
2	12	16	15	2950	34,67	59	58	16
4	1	3	1	230	31,79	69	0	0
4	2	6	3	610	30,09	1	4	50
4	3	7	4	910	28,78	3	2	22
4	4	8	5	1140	29,20	14	2	16
4	5	10	7	1500	29,88	5	18	24
4	6	11	8	1740	29,90	11	17	21
4	7	13	10	2090	30,35	6	32	20
4	8	13	10	2180	30,54	25	16	16
4	9	15	12	2560	30,45	16	26	15
4	10	16	13	2790	30,75	22	26	14
4	11	17	14	3030	30,85	26	26	12
4	12	18	15	3280	30,93	28	25	11
4	13	19	16	3530	31,09	32	25	10
4	14	21	18	3860	31,26	27	34	10
4	15	21	18	4020	31,35	37	26	8
4	16	23	20	4350	31,50	32	34	8
4	17	24	21	4580	31,64	35	34	7
4	18	25	22	4810	31,81	38	35	7
6	1	5	1	240	31,56	65	0	0
6	2	7	3	610	30,06	0	1	53
6	3	9	4	920	28,41	1	2	18
6	4	10	5	1190	28,11	7	1	4
6	5	11	6	1420	28,61	15	2	5
6	6	13	8	1830	28,75	2	9	14
6	7	14	9	2070	28,95	7	9	12
6	8	15	10	2280	29,34	14	10	12
6	9	17	12	2670	29,40	7	19	12

Lange Fahrzeit (65/70/75 Minuten) zwischen Forstgebiet und Terminal – Teil II								
Flotten-Konstellation				Kennzahlen		Durchschnittliche Wartezeit [Minuten]		
Terminal- größe	Kran- LKWs	Sattelauf- lieger	Zugfahr- zeuge	Umschlag pro Woche [t/W]	Kosten pro Tonne [€/t]	Kran-LKW	Zugfahr- zeug IN	Zugfahr- zeug OUT
6	10	18	13	2890	29,59	11	19	11
6	11	19	14	3130	29,78	16	18	10
6	12	21	16	3500	29,85	10	27	10
6	13	22	17	3740	30,02	15	25	9
6	14	23	18	3990	30,03	16	24	8
6	15	24	19	4240	30,17	20	24	7
6	16	25	20	4470	30,33	23	24	7
6	17	26	21	4720	30,42	25	23	6
6	18	27	22	4980	30,49	27	23	5
6	19	29	24	5330	30,57	24	29	5
6	20	30	25	5560	30,69	26	29	5
6	21	31	26	5790	30,85	28	30	5
6	22	32	27	6020	31,01	31	30	4
8	1	7	1	240	31,60	66	0	0
8	2	9	3	610	30,19	0	1	55
8	3	10	4	920	28,42	0	1	19
8	4	12	5	1190	27,96	7	1	1
8	5	13	6	1430	28,42	14	2	1
8	6	15	8	1840	28,53	1	9	13
8	7	16	9	2130	28,15	3	5	7
8	8	17	10	2350	28,48	8	5	6
8	9	19	12	2760	28,71	2	14	10
8	10	20	13	3010	28,72	4	13	9
8	11	21	14	3220	29,04	9	13	8
8	12	23	16	3610	29,15	5	21	8
8	13	24	17	3830	29,31	8	20	8
8	14	25	18	4070	29,48	12	20	7
8	15	27	20	4440	29,55	8	26	7
8	16	28	21	4660	29,72	11	26	6
8	17	29	22	4920	29,75	14	25	6
8	18	30	23	5150	29,89	17	25	5
8	19	32	25	5520	29,95	13	30	5
8	20	32	25	5650	30,09	21	24	4
8	21	34	27	6000	30,17	18	30	4
8	22	35	28	6250	30,27	20	29	4
8	23	36	29	6520	30,29	21	28	4
8	24	37	30	6750	30,41	23	28	3
8	25	37	31	6950	30,51	26	21	10
8	26	38	32	7180	30,63	28	21	10

Handlungsempfehlungen zur Lieferkettenkoordination (KFU Graz: Sophie Schimpfhuber, Clemens Eichberger, Marc Reimann)

Ziel der an der KFU entwickelten Optimierungsmodelle war es strategische Einsichten in die Rundholz-Lieferkette zu erzeugen und daraus Handlungsempfehlungen zum Design und der Steuerung der Lieferkette abzuleiten, die dann durch ein Simulationsmodell evaluiert werden können.

Diese Handlungsempfehlungen werden im Folgenden für die drei genannten Strategien zunächst getrennt und im Detail präsentiert. Abschließend werden ein Resümee und eine bewertete Reihung der Strategien vorgenommen.

Strategie Steuerung der Transportmengen von Forst über Lager zur Industrie

Die Einführung eines Zwischenlagers...

- ✓ ...glättet die Beschaffungspolitik der Industrien und reduziert damit das aus ungleichmäßigen Bestellungen resultierende Risiko.
- ✓ ...erhöht die Flexibilität der Transporteure, da einerseits die speziellen Rungen-LKWs effizienter für die forstnahen Transporte eingesetzt werden können, während vom Zwischenlager aus Sattelzüge die Belieferung der Industrien vornehmen können. Andererseits führt die – durch das Lager ermöglichte – (teilweise) Entkopplung der Ernte- und Industrieproduktionsmengen zu verbesserter zeitlicher Planbarkeit der Transportaufträge.
- ✓ ...erfordert gleichzeitig eine Anpassung der Transportregeln von Seiten der Forste und Industrien, um der erhöhten Flexibilität der Transporteure Rechnung zu tragen und engere Vorgaben zu etablieren.

Demgegenüber stehen die Kosten für die Errichtung und den Betrieb des Lagers. Für die betrachtete Case-Study einer Teilregion Kärntens und der Steiermark ergeben die Berechnungen eine etwa 3% Kostenreduktion durch die Einführung des Zwischenlagers, die mit den Errichtungs- und Betriebskosten gegengerechnet werden müssen.

Strategie Glättung von tageweisen Liefer- und Bedarfsspitzen

Die Variation der Bestell-, Liefer-, und Erntemengen an sich ist nicht unmittelbar problematisch. Insbesondere ist die Variation der Erntemenge eher unkritisch.

Durch eine Koordination der Lieferkette können aber...

- ✓ ...insbesondere Transport und Industriebedarf besser aufeinander abgestimmt werden.
- ✓ ...eine erhöhte Transparenz zwischen den Lieferkettenpartnern erzielt werden, wodurch speziell die Variabilität in den Ernte- bzw. Bedarfsmengen der großen Forste und Industrien besser abgefangen werden können.
- ✓ ...eine Basis für resilientere Prozesse durch Informationsaustausch geschaffen werden.

Insgesamt ergeben die Berechnungen ein Einsparungspotential von bis zu einem Viertel der Lieferkettenkosten, wobei hier eine gleichberechtigte Entscheidungsfindung unabdingbar ist. Aus der Optimierung zeigt sich nämlich auch, dass ein Ungleichgewicht in der Berücksichtigung der Interessen der verschiedenen Lieferkettenteilnehmer sogar eine Verschlechterung der Gesamtsituation herbeiführen kann.

Ein interessanter Hebel, der jedoch mit relativ geringem Aufwand zu erreichen sein könnte ist eine zentrale Transportplanung und -auftragsvergabe. Hier könnten unmittelbar Kosteneinsparungen von rund 3% erzielt werden, indem bessere Bündelung bei gleichzeitig glatteren Transportkapazitätsbedarfen und besserer Koordination mit der Industrieanlieferung ermöglicht werden.

Strategie Erhöhung der LKW-Tonnage

Eine Erhöhung der LKW-Tonnage kann

- ✓ ...die Anzahl der eingesetzten LKWs deutlich reduzieren.
- ✓ ...eine verbesserte Bündelung von Transportaufträgen ermöglichen, da die Anzahl der benötigten Fahrten zwischen Forsten und Industrien reduziert wird.
- ✓ ...die Vorteile einer koordinierten Lieferkette noch weiter verstärken.
- ✓ ...ohne Koordination der Lieferkette eine Kosteneinsparung von bis zu 9% ermöglichen, während in einer koordinierten Lieferkette, die – ohnedies bereits um bis zu einem Viertel reduzierten – Kosten um weitere 20% gesenkt werden könnten.

Ähnlich wie die Errichtung eines Zwischenlagers erfordert aber auch die Tonnageerhöhung (ohne gleichzeitige Koordination der Lieferkette) strengere Regeln für den Transport, um die Liefertreue bei der Industrie sicherzustellen und gleichzeitig die Effekte der Tonnageerhöhung zu lukrieren.

Resümee und bewertete Reihung der Strategien

Für die abschließende Bewertung der Strategien und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen muss zwischen kurzfristigen und langfristigen Maßnahmen unterschieden werden. Die Fristigkeit ergibt sich dabei aus dem Umfang der nötigen Maßnahmen.

Als die drei wirkungsvollsten kurzfristigen Strategieanpassungen können die folgenden Ansätze – gereiht nach der auf Basis der Modellrechnungen ermittelten Verbesserungspotentiale – hervorgehoben werden:

- ✓ Analyse und Anpassung der Transportregionen sowie zentrale Auftragsvergabe im Transport zur Hebung von Poolingpotentialen
- ✓ Bessere Koordination zwischen Transportunternehmen und Industrie mit dem Ziel die Termintreue bei Lieferungen zu erhöhen
- ✓ Erhöhung des Tonnagelimits auf 50t

Längerfristig können die folgenden strategischen Maßnahmen – wiederum nach der auf Basis der Modellrechnungen ermittelten Verbesserungspotentiale gereiht – die Effizienz der Rundholzlieferrkette nachhaltig verbessern:

- ✓ Vollständige Koordination aller Lieferkettenprozesse durch Informationsaustausch und gemeinsame Planung aller Prozesse
- ✓ Erhöhung des Tonnagelimits auf 58t
- ✓ Errichtung eines zentralen Lagers

7. VERZEICHNISSE UND QUELLEN

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fragebogen.	5
Tabelle 2: Aggregierte SWOT Matrix.	6
Tabelle 3: Interne Stärken und Schwächen im Detail.....	7
Tabelle 4: Externe Chancen und Risiken im Detail.	8
Tabelle 5: Bewertung der Verbesserungspotentiale.	10
Tabelle 6: Bewertung der Lieferkettenkoordination.....	10
Tabelle 7: Transportplanungstabelle für kurze Fahrzeit und einmaligen Verschub.	24
Tabelle 8: Transportplanungstabelle für kurze Fahrzeit und zweimaligen Verschub.....	26
Tabelle 9: Transportplanungstabelle für mittlere Fahrzeit und einmaligen Verschub.....	28
Tabelle 10: Transportplanungstabelle für mittlere Fahrzeit und zweimaligen Verschub.....	30
Tabelle 11: Transportplanungstabelle für lange Fahrzeit und einmaligen Verschub.	32
Tabelle 12: Transportplanungstabelle für lange Fahrzeit und zweimaligen Verschub.....	34
Tabelle 13: Jährliche Einsparungspotentiale von LKW-Fahrten infolge einer Tonnageerhöhung.	35
Tabelle 14: Parametrisierung.	41
Tabelle 15: Eingesparte Arbeitszeit und Anzahl an Kran-LKWs durch den Umschlag auf Sattelzug.	54
Tabelle 16: Eingesparte Arbeitszeit und Anzahl an Kran-LKWs durch die Tonnageerhöhung von 44 auf 50 Tonnen.	57
Tabelle 17: KPIs Status Quo, perfekt koordinierte Lieferkette und teilweise Koordination der Lieferkette.	65
Tabelle 18: Kosteneffekte.	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Module des Simulationsmodells.....	16
Abbildung 2: Holzfluss.....	16
Abbildung 3: Ablaufplan für LKW-Transport.....	17
Abbildung 4: Animationsansicht.....	19
Abbildung 5: Management Cockpit.	19
Abbildung 6: Betriebsablauf am Terminal: (1) Einfahrt Terminal, (2) Ladung entsichern, (3) Waggon beladen, (4) Waggonladung sichern, (5) LKW-Ladefläche reinigen, (6) Lieferschein ausfüllen.	20
Abbildung 7: Transportweg des Sägerundholzes vom Forst zur Industrie.....	37
Abbildung 8: Transport- und Umladeprozesse beim Umschlag über einen LKW-Terminal. (WPT = Warteplatz Terminal, SA = Sattelauflieger).....	38
Abbildung 9: Animation- und Parameter-Ansicht zur Darstellung der Prozessabläufe.....	39
Abbildung 10: Statistik-Ansicht mit den wichtigsten Kennzahlen.	40
Abbildung 11: Maximale Umschlagsmengen in Tonnen pro Woche in Abhängigkeit eingesetzter Sattelauflieger.....	43
Abbildung 12: Lösungen der Heuristik bei kurzer Fahrzeit zum Terminal.	44
Abbildung 13: Lösungen der Heuristik bei mittlerer Fahrzeit zum Terminal.	45
Abbildung 14: Lösungen der Heuristik bei langer Fahrzeit zum Terminal.....	45
Abbildung 15: Vollständige Enumeration mit gesamter Information.....	47
Abbildung 16: Vollständige Enumeration mit reduzierter Information.....	48
Abbildung 17: Vollständige Enumeration III; reduzierte Information.	48
Abbildung 18: Terminalgröße 2; Distanz: Kurz. Abbildung 19: Terminalgröße 4; Distanz: Kurz.....	49
Abbildung 20: Terminalgröße 6; Distanz: Kurz. Abbildung 21: Terminalgröße 8; Distanz: Kurz.....	49
Abbildung 22: Terminalgröße 2; Distanz: Mittel. Abbildung 23: Terminalgröße 4; Distanz: Mittel.	50
Abbildung 24: Terminalgröße 6; Distanz: Mittel.	50
Abbildung 25: Terminalgröße 8; Distanz: Mittel (1). Abbildung 26: Terminalgröße 8; Distanz: Mittel (2).....	50
Abbildung 27: Terminalgröße 2; Distanz: Lang. Abbildung 28: Terminalgröße 4; Distanz: Lang.	51
Abbildung 29: Terminalgröße 6; Distanz: Lang (1). Abbildung 30: Terminalgröße 6; Distanz: Lang (2).....	51
Abbildung 31: Terminalgröße 8; Distanz: Lang (1). Abbildung 32: Terminalgröße 8; Distanz: Lang (2).....	51
Abbildung 33: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei kurzer Distanz zum Terminal.	52
Abbildung 34: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei mittlerer Distanz zum Terminal.	52
Abbildung 35: Vergleich der summierten täglichen Arbeits- und Fahrzeiten bei langer Distanz zum Terminal.	53
Abbildung 36: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ bzw. AZ) bei kurzer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.....	55
Abbildung 37: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ & AZ) bei mittlerer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.....	55
Abbildung 38: Tägliche Fahr- bzw. Arbeitszeiten (FZ & AZ) bei langer Fahrzeit zum Terminal und unterschiedlicher Tonnage.....	56
Abbildung 39: Akteure der Holzlieferkette	59
Abbildung 40: Kuppelproduktion	61
Abbildung 41: Mengenflüsse	63
Abbildung 42 Variabilität der Bestellmenge.	64
Abbildung 43: Variabilität der Erntemenge.	64
Abbildung 44: Mengenflüsse	66
Abbildung 45: Relative Gesamtkosten.....	66
Abbildung 46: Absolute Lieferabweichung.	67

Quellen

- Austropapier (2019): Branchenbericht 2018/19, PDF online (aufgerufen am 02. April 2020): https://www.austropapier.at/fileadmin/austropapier.at/dateiliste/Dokumente/Downloads/Jahresbericht_e/19.04.10__Gesamter_Bericht__9MB_.pdf.
- BMNT (2018): Österreichische Waldstrategie 2020+, PDF online (aufgerufen am 02. April 2020): https://www.bmlrt.gv.at/forst/oesterreich-wald/waldstrategie-2020/waldstrategie_paper.html.
- BMNT (2019): Grüner Bericht 2019. PDF online (aufgerufen am 02. April 2020): <https://gruenerbericht.at/cm4/jdownload/send/2-gr-bericht-terreich/2007-gb2019>.
- D'Amours S., Ronnqvist M., Weintraub A. (2008). Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *Infor* 46(4): 265–281. <https://doi.org/10.3138/infor.46.4.265>.
- Eriksson, A; Eliasson, L; Sikanen, L; Hansson, P-A; Jirjis, R; (2017): Evaluation of delivery strategies for forest fuels applying a model for weather-driven analysis of forest fuel systems (WAFFS). *Applied Energy* 188, 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.018>.
- Etlinger, K; Rauch, P; Gronalt, M; (2014): Improving rail road terminal operations in the forest wood supply chain - a simulation based approach. In: Bruzzone, Del Rio Vilas, Longo, Merkurjev, Piera (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S 2014*, 199-206; ISBN 978-88-97999-39-3.
- Fachverband der Holzindustrie (2019): Branchenbericht 2018/19. PDF online (aufgerufen am 02. April 2020): <https://www.wko.at/branchen/industrie/holzindustrie/branchenbericht-2018-2019.pdf>.
- FHP (2019): Leistungsbericht Wertschöpfungskette Holz. PDF online (aufgerufen am 02. April 2020): https://www.forstholzpapier.at/images/Leistungsbericht_kompakt_2019_Ansicht_FINAL.pdf.
- Fjeld, D; Kogler, C; Rauch, P; Westlund, K; Davidsson, A; (2017): A comparison of system risks and management processes in multimodal wood supply. *Finanziert von: ERA-NET Transport Flagship Call 2015*, 39 Seiten.
- Fjeld, D; Davidsson, A; Jönsson, P.; Kogler, C; Rauch, P; Westlund, K; (2018): Multimodal strategies for a greener and more resilient wood supply (final report). *ERA-NET Transport Flagship Call 2015*, 8 Seiten.
- Gronalt, M; Rauch, P; (2018): Analyzing railroad terminal performance in the timber industry supply chain - a simulation study. *Int. J. For. Eng.* 29(3), 162–170. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1488913>.
- Karttunen, K; Lättilä, L; Korpinen, O.-J; Ranta, T; (2013): Cost-efficiency of intermodal container supply chain for forest chips. *Silva Fennica* 47(4), 1–24. <https://doi.org/10.14214/sf.1047>
- Karttunen, K; Väättäinen, K; Asikainen, A; Ranta, T; (2012): The operational efficiency of waterway transport of forest chips on Finland's lake Saimaa. *Silva Fennica* 46(3), 395–413.
- Klvač R, Kolařík J, Volná M, Drápela K (2013): Fuel Consumption in Timber Haulage. *Croat. j. for. eng.* 34: 229-240.
- Kogler, C.; Rauch, P; (2020): Contingency Plans for the Wood Supply Chain Based on Bottleneck and Queuing Time Analyses of a Discrete Event Simulation. *Forests* (11):1–23. <https://doi.org/10.3390/f11040396>.

Kogler, C; Rauch, P; (2019): A discrete event simulation model to test multimodal strategies for a greener and more resilient wood supply. *Can. J. For. Res.* 49(10), 1298–1310. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0542>.

Kogler, C., Rauch, P. (2018). Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: a literature review. *Silva Fennica* 52(4): 29. doi: <https://doi.org/10.14214/sf.9984>.

Kogler, C; Rauch, P; Fjeld, D; Westlund, K; Jönsson, P; (2018): Developing supply chain simulation models for testing multimodal innovations to enable participatory evaluation of strategies with company managers to cope with supply chain risks. Finanziert von: ERA-NET Transport Flagship Call 2015, 50 Seiten.

Kummer, S., Frank, A. (2011). Volks-, betriebswirtschaftliche und ökologische Auswirkungen der Preiserhöhungen sowie der Einschränkung der Flächenbedienung der ÖBB-Transporte für die Forstwirtschaft, Holz- und Papierindustrie. 41. Seiten

Kretzer, J. et al. (2009). Supply Chain Forst-Logistik-Säge: Erstanwendungsplattform von IT/Telematikkonzepten zur ressourceneffizienten Holznutzung im Gebirgswald. Abteilung für Energie- und Umwelttechnologie. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 107 Seiten.

Laitila, J; Asikainen, A; Ranta, T; (2016): Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland. *Biomass & Bioenergy* 90, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.011>.

Mobini, M; Sowlati, T; Sokhansanj, S; (2013): A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied Energy* 111, 1239–1249. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.026>.

Opacic L., Sowlati T. (2017). Applications of discrete-event simulation in the forest products sector: a review. *Forest Products Journal* 67(3–4): 219–229. <https://doi.org/10.13073/fpj-d-16-00015>.

RCA (2019): Holzterminals in Österreich, Präsentation Rail Cargo Austria.

Shahi S., Pulkki R. (2013). Supply chain network optimization of the Canadian forest products industry: a critical review. *American Journal of Industrial and Business Management* 3: 631–643. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2013.37073>.

Westlund, K; Kogler, C; Rauch, P; Fjeld, D; Jönsson, P; (2018): A common framework for production, truck, rail and short-sea shipping transport analysis. Finanziert von: ERA-NET Transport Flagship Call 2015, 46 Seiten.

Wolfsmayr, UJ; Merenda, R; Rauch, P; Longo, F; Gronalt, M; (2016): Evaluating primary forest fuel rail terminals with discrete event simulation: A case study from Austria. *Ann. For. Res.* 59(1), 145–164. <https://doi.org/10.15287/afr.2015.428>.