

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Transportsimulation für eine nachhaltige, resiliente und qualitätserhaltende Holzlogistik

Transport Simulation for Sustainable, Resilient, and Quality-preserving Wood Logistics

Christoph Kogler und Peter Rauch, Universität für Bodenkultur Wien (Austria),
christoph.kogler@boku.ac.at, peter.rauch@boku.ac.at

Abstract: Wood is the renewable raw material of the future contributing strongly to a sustainable development. Climate crisis induced forest calamities such as windstorms followed by insect infestations challenge wood supply chain management. To fulfil increasing production amounts sustainable, resilient, and quality-preserving wood logistics is needed. Discrete event simulation provides an excellent methodology for a digital representation of wood supply chains focusing on straightforward business processes. Further strengths in facilitating stakeholder participation and establishing credibility through visualization and animation enable the implementation of quantitative decision support for researchers, students, and stakeholders of wood supply chains. Consequently, unique models for unimodal, multimodal, and multi-echelon unimodal wood transport are presented, which enable multicriteria-based strategy development, optimal fleet configurations, and wood quality preservation in challenging scenarios. The presented models were applied in scientific, educational, and managerial settings and set the stage for knowledge transfer in serious-game-based workshops, advanced risk management, and contingency planning.

1 Motivation, Forschungsfragen und Simulationsbezug

Welt-, europa- bzw. österreichweit sind 31%, 43% bzw. 48% der Landfläche mit Wäldern bedeckt, deren Bäume und Ökosysteme entscheidende Beiträge zur Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals), dem Pariser Klimaschutzübereinkommen sowie den Aichi-Biodiversitätszielen ermöglichen (FAO 2018). Die österreichische Holzwertschöpfungskette beschäftigt in 172.000 Unternehmen 300.000 Menschen und erzielt eine positive Handelsbilanz von mehr als drei Mrd. USD (FHP 2019). Die große Bedeutung und starke Exportorientierung zeigen sich u.a. in weltweiten Top-3-Platzierungen bei Holzexportwert pro Landesfläche bzw. pro Kopf (FMA 2022, ITC 2023). Aktuelle Herausforderungen entlang dieser und internationaler Holzlieferketten beinhalten

immer häufigere und schwerwiegendere Forstkalamitäten wie Stürme, Brände, Schneedruck, Eisbruch und Insektenbefall. Zudem bestehen gravierende Engpässe an forstlichen Kran-LKW-Fahrerinnen und Fahrern sowie Ineffizienzen aufgrund geringer Kooperationsbereitschaft beim Datenaustausch und fehlender datenbasierter Entscheidungsunterstützung der konservativ agierenden Akteure dieser Branche.

Um die Nachfrage nach diesem erneuerbaren Rohstoff in Zeiten von Klimakrise, Versorgungsengpässen und Lieferkettenunterbrechungen decken zu können, bedarf es innovativer Weiterentwicklungen des traditionellen Holzlieferkettenmanagements. Entscheidend ist hierfür eine nachhaltige, resiliente und qualitätserhaltende Holzlogistik, die durch Beantwortung der folgenden Forschungsfragen vorangetrieben wird:

1. Wie können unimodale und multimodale Transportstrategien für eine grünere und widerstandsfähigere Holzversorgung in Risikoszenarien virtuell getestet werden und welche Möglichkeiten ergeben sich dadurch für die Notfallplanung?
2. Welche Potentiale ergeben sich durch den Holzumschlag von Kran-LKWs auf Sattel-LKWs und wie sieht eine die optimale Flottenkonfiguration für diesen zweistufigen unimodalen Holztransport aus?
3. Wie beeinflusst die Beschaffungsdurchlaufzeit (Leadtime vom Zeitpunkt der Holzernte bis zum Eintreffen des Holzes im Werk) den Qualitätsverlust von Holz und mit welchen Logistikstrategien kann durch proaktives Risikomanagement ein drohender Wertverlust vermieden werden?

Wir definieren den für die Holzwertschöpfungsketten- bzw. Holzlogistikforschung neuen Begriff der Widerstandsfähigkeit bzw. Resilienz von Holzlieferketten:

„Resilienz ist die Anpassungsfähigkeit der kooperativ handelnden Akteure der Holzwertschöpfungskette, um Krisen durch Risikomanagement (analysieren und vorbereiten), Notfallplanung (entscheiden und handeln) und Wissensmanagement (reflektieren und lernen) zu überstehen, mit dem Ziel, nach der Krise einen wirtschaftlich, ökologisch und sozial nachhaltigeren Zustand zu erreichen.“

Die diskrete ereignisbasierte Simulation (DES) ermöglicht die realitätsnahe, digitale Abbildung von Holzlieferketten und deren quantitative Analyse in Szenarien auf Basis von Kennzahlen. Durch ihre Stärken bei der Integration von stochastischen Elementen, komplexen Wechselwirkungen, Zeitdynamiken und engpassbedingter Warteschlangenbildung sowie insbesondere bei der Einbindung von Expertinnen und Experten aus der Praxis (u.a. durch intuitive auf Geschäftsprozessen basierende Strukturen, Visualisierung, Animation und Was-Wäre-Wenn-Analysen) ist die DES eine ideale Methode zur Beantwortung der aufgeworfenen Forschungsfragen. Daher bietet die Vorstellung aktueller Veröffentlichungen zusammen mit neuesten Erkenntnissen laufender Forschungstätigkeiten aus dem Bereich der Holztransportsimulation einen engen Bezug zur Nachhaltigkeit in Produktion und Logistik sowie zu nachhaltigen Mobilitätskonzepten, Transport und Lieferketten.

Der klassischen Struktur folgend führt der zweite Abschnitt in das Anwendungsfeld ein und verweist auf relevante wissenschaftliche Literatur zur weiteren Vertiefung. Im dritten Abschnitt werden drei Holztransportsimulationsmodelle vorgestellt und deren Eignung für *serious game-based workshops* beschrieben. Der abschließende Abschnitt zieht ein Fazit der Einsatzpotentiale der präsentierten Modelle für die Strategieentwicklung, Notfallplanung und das Risikomanagement und weist auf zukünftige Weiterentwicklungsmöglichkeiten hin.

2 Stand der Forschung im Anwendungsfeld

Die Holzlogistikette ist ein komplexes, dynamisches Netzwerk von Material-, Dienstleistungs-, Informations- und Finanzierungsströmen zwischen und innerhalb zahlreicher Akteure. Zu diesen zählen Waldbesitzende, Behörden, Interessensvertretungen, Forsternte-, Holzfracht- und Holzhandelsunternehmen sowie Holzverarbeitende und weiterverarbeitende Industrien. Holzverarbeitende Säge-, Zellstoff- und Papierindustrien erzeugen Massenprodukte wie Sägerundholz, Pellets, Zellstoff, Papier oder Holzwerkstoffe. Weiterverarbeitende Industrien umfassen etwa den Holz- und Möbelbau, die wiederum eine Vielzahl von Produkten mit hohem Mehrwert (z.B. Brettsperrholz, Einrichtungsgegenstände, Holzfertigteilhäuser) herstellen. Das Management von Holzlieferketten umfasst Entscheidungen zu Planung, Entwurf, Betrieb, Steuerung und Überwachung für Kultivierung, Ernte, Rückung, Transport, Lagerung, (Vor-)Verarbeitung, (Wieder-)Verwendung und das Recycling von Holz. Der Holztransport ist das Bindeglied zwischen den Systemkomponenten von Holzlieferketten. Dabei sind Kran-LKWs das grundlegende Rückgrat für den unerlässlichen Transport aus dem Forst. (Kogler 2020)

Relevante Transportarten sind in Abbildung 1 dargestellt und umfassen direkten Transport mit Kran-LKWs, zweistufigen Transport (Umschlag auf Sattelschlepper mit Rungen) und multimodalen Transport (Umschlag auf Zugwaggons mit Rungen).

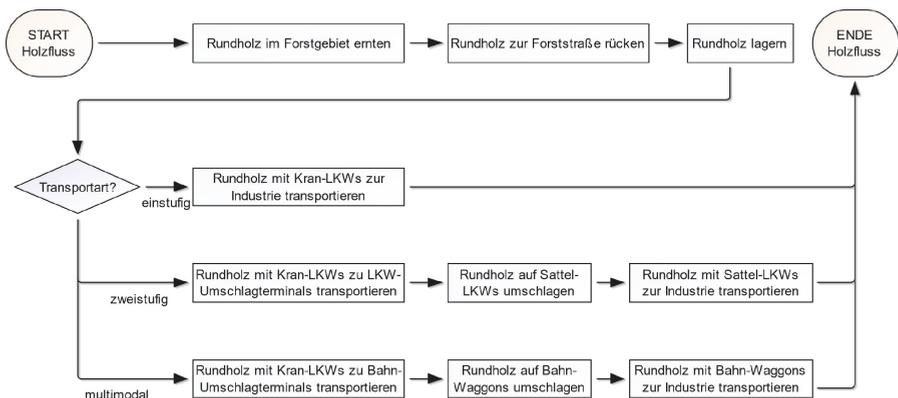


Abbildung 1: Ablauf der Holzbeschaffung

Die Methode der DES wurde in der Holzlieferkettenforschung vornehmlich von Forschungsteams aus Chile (Weintraub et al. 1996), Kanada (Mobini et al. 2013), Schweden (Eriksson et al. 2017), Finnland (Väättäin et al. 2020) und Österreich (Kogler und Rauch 2019, Kogler et al. 2020, Kogler und Rauch 2023) eingesetzt. Umfassende Überblicksarbeiten wurden von Kogler und Rauch (2018), Acuna et al. (2019) und Väättäin et al. (2021) publiziert. Dabei aufgezeigte Forschungslücken werden im Rahmen dieses Beitrags u.a. durch Vorstellung von Simulationsmodellen zur erstmaligen detailgetreuen Modellierung nachhaltigerer Transportmodi (multimodal, zweistufig) und Entwicklung resilienter Managementstrategien (Notfallplanung, Simulationsworkshops) sowie der erstmaligen Modellierung der

Holzqualitätsveränderung in Transportsimulationen und Ableitung von Logistikstrategien zum proaktiven Risikomanagement adressiert.

3 Holztransportsimulation

Die im Folgenden präsentierten Simulationsmodelle implementieren einstufige und zweistufige unimodale sowie multimodale und qualitätserhaltende Holztransportstrategien. Neben der Ableitung von wissenschaftlichen und praxisrelevanten Erkenntnissen, eignen sich die drei präsentierten DES-Modelle insbesondere für den Einsatz im Rahmen von *serious game-based workshops*, die es Akteuren der Holzlieferkette, Studierenden und Forschenden ermöglichen, neue Vorgehensweisen in Simulationsexperimenten zu erproben, ohne – aufgrund komplexer, kaum vorhersehbarer Wechselwirkungen – negative reale Auswirkungen (z.B. Kosten, Gefahren, Dauer) befürchten zu müssen (Kogler und Rauch 2020a). Dies kann u.a. in der Notfallplanung (Kogler und Rauch 2020b) und zum Benchmarking (Kogler et al. 2021) eingesetzt werden, um die Etablierung von kooperativem Lieferketten- und Risikomanagement voranzutreiben, die Resilienz zu erhöhen, die Nachhaltigkeit zu verbessern und Kosten zu sparen.

Abbildung 2 zeigt die Steuerungsansicht einer Simulation, die auf einem ursprünglich im wissenschaftlichen Kontext entwickeltem Simulationsmodell beruht. Die Simulationsapplikation wurde für die Verwendung in *serious game-based workshops* adaptiert, getestet und entsprechend des erhaltenen Feedbacks von Studierenden, Forschenden und Akteuren der Holzlieferkette mehrfach überarbeitet.

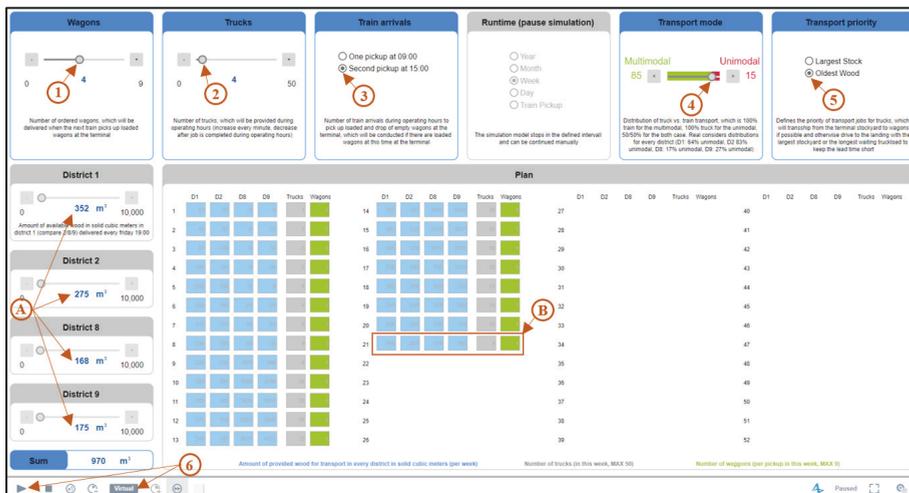


Abbildung 2: Steuerungsansicht der Simulation für *serious game-based workshops*

Die Steuerungsansicht enthält die Erntemengen für jede Region für die kommende Woche (A) sowie die Erntemengen der vergangenen Wochen (B). Darüber hinaus kann der Transportplan für die kommende Woche festgelegt werden, indem die Anzahl der Zugwaggons (1), die Anzahl der LKWs (2), die Anzahl der Verschübe pro Tag (3), die Aufteilung der Transportarten (4) und die Transportpriorität (5) definiert

werden. Nachdem die Teilnehmenden des Workshops die aktuelle Situation der Lieferkette in den Statistik-, Animations- und den Logikansichten analysiert und sich auf eine Strategie verständigt haben, werden die Entscheidungen für die kommende Woche eingetragen und die Simulation für die nächste Woche gestartet (6). Am Ende der Simulationsdurchläufe werden die Kennzahlen exportiert, mit den Teilnehmenden diskutiert und aus den Erkenntnissen Transportstrategien für die Praxis entwickelt.

3.1 Multimodaler Holztransport

Multimodale Holztransportstrategien reduzieren durch kurze Kran-LKW Transporte zu Zugterminals und anschließenden Bahntransport von Holz LKW-bedingte Umweltbelastungen (u.a. Emissionen, Lärm, Gefahren) und erhöhen die Resilienz (zusätzliche Transportkapazitäten nach Kalamitäten, Lagerkapazität am Terminal). Das multimodale Lieferkettenmanagement ist im Vergleich zu unimodalen Transporten jedoch wesentlich herausfordernder, womit das entwickelte DES-Modell ein hilfreiches Entscheidungsunterstützungswerkzeug darstellt. Die Simulation umfasst dabei einen bisher einzigartigen Detaillierungsgrad in der Modellierung von multimodalen Holzlieferketten (Acuna et al. 2019) sowie die umfangreichste Darstellung (Abbildung 3) von Kennzahlen für Kosten, Emissionen, Kapazitäten, Auslastungen, Warte- und Durchlaufzeiten in DES-Modellen für Holzlieferketten.

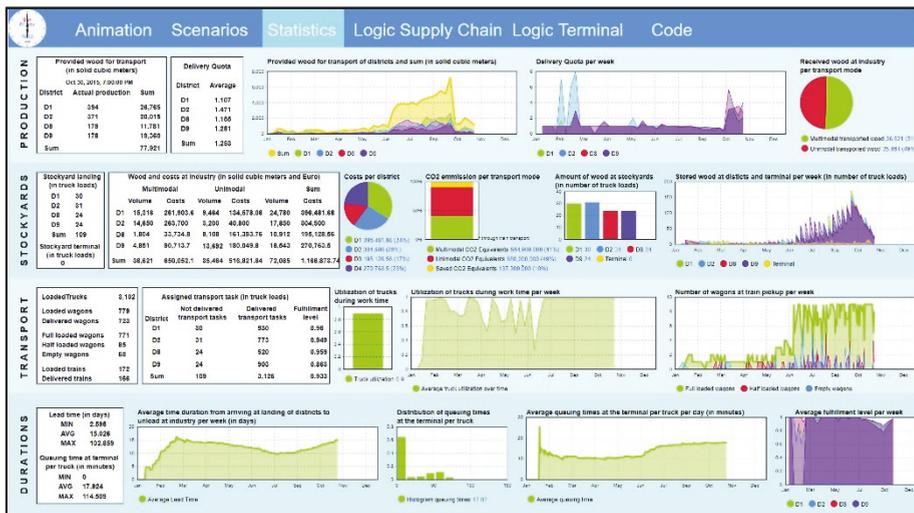


Abbildung 3: Kennzahlencockpit zur Entscheidungsunterstützung

Mit dem Simulationsmodell können Managerinnen und Manager von Holzlieferketten sowohl den Standardprozessablauf verbessern (z.B. Kapazitäts-, Auslastungs-, Zeit- und Ressourcenplanung zur Vermeidung von Engpässen) als auch neue Strategien als Reaktion auf geänderte Rahmenbedingungen (z.B. Potential zusätzlicher Bahnterminals, eingeschränkte Verfügbarkeit von Bahnwaggons) testen, bevor kostenintensive Veränderungen real implementiert werden. Zudem bietet das Simulationsmodell die Grundlage zur aktiven Notfallplanung im Schadh Holzfall (z.B. Stürme, Borkenkäfer) bzw. Vorbereitung auf Stötereignisse (z.B. Aufnahmestopps

der Industrie, Ausfall von Maschinen und LKWs) durch proaktives Risikomanagement. Um quantitative Entscheidungsunterstützung für die konkurrierenden Planungsziele zu ermöglichen, wurden zusammen mit Expertinnen und Experten aus der Praxis verschiedene Kennzahlen-Rankings entwickelt und für ein bzw. zwei Bahnverschiebe pro Tag bzw. kurze, mittlere und lange Transportdauern zum Bahnterminal analysiert. In Simulationsexperimenten wurden entscheidende Kennzahlen zur Lieferkettensteuerung wie das maximale Umschlagsvolumen, die Beschaffungsdurchlaufzeit, Wartezeiten sowie Auslastungen von Transport- und Lagerkapazitäten berechnet und übersichtlich in intuitiven Transportplanungstabellen für die in der Praxis relevanten Transportkapazitäten aufbereitet.

3.2 Zweistufiger Holztransport

Zweistufige Holztransportstrategien basieren auf kurzen Kran-LKW Transporten zu Umschlagterminals, wo in diesem Fall statt Bahnwaggons, Sattelanhänger bereitgestellt und nach Beladung durch die Kran-LKWs von Sattelschleppern abtransportiert werden. Durch das geringere Eigengewicht des Sattelzuges im Vergleich zum Kran-LKW kann Holz effizienter transportiert, sowie der drastische Engpass an Kran-LKW-Fahrerinnen und Fahrern (bedingt u.a. durch immer weniger LKW-Führerscheinschlüsse, hohe Arbeitsbelastung, Gefahr) entschärft werden.

Abbildung 4 stellt die Logik und die Interaktionen von Kran-LKWs, Sattelzügen und -aufliegern in einem Diagramm dar, das in der frei zugänglichen Softwareumgebung Bee-Up (verfügbar auf omilab.org) modelliert wurde und den Standards des Business Process Model and Notation (2.0) entspricht.

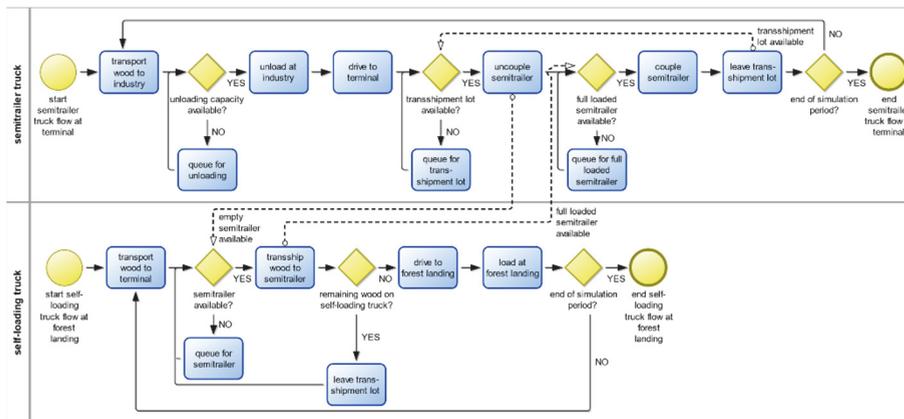


Abbildung 4: Transportprozesse von Kran-LKWs (self-loading trucks), Sattelzugmaschinen (semitrailer trucks) und -aufliegern (semitrailer)

Das zweite DES-Modell ermöglicht erstmals die simultane Optimierung der Konfiguration der Flotte (Anzahl Kran-LKWs, Anzahl Sattelaufleger, Anzahl Sattelschlepper) sowie der Umschlaginfrastruktur (Anzahl Abstellplätze für Sattelaufleger) für individuell parametrisierbare Ausgangssituationen (u.a. Distanzen, Kosten, Mengen). Dafür wurde der Lösungsraum auf die den jeweiligen Transportkapazitäten entsprechenden, sinnvollen Faktorenkombinationen

eingeschränkt (Entscheidungsbaum-Verfahren), sodass im verbleibenden Lösungsraum mittels eines exakten Verfahrens der kombinatorischen Optimierung (vollständiger Enumeration) die bestmöglichen Faktorenkombinationen aus den Simulationsergebnissen ermittelt werden konnten. Neben der wissenschaftlichen Aufarbeitung der Ergebnisse wurden optimale Faktorenkombinationen in Transportplanungstabellen für den zweistufigen Holztransport verdichtet. Diese ermöglichen es Managerinnen und Manager der Holzlieferkette, die für ihre jeweils gegebenen Situationen in der Praxis optimale Faktorenkombination unmittelbar abzulesen. So können diese etwa für die regional verfügbare Kran-LKW Anzahl, das optimale Verhältnis von Zugfahrzeugen und Sattelaufleger für die zur Verfügung stehende Terminalgröße oder aber für eine von Seiten der Industrie vorgegebene Abnahmemenge, das dafür benötigte Lieferkettennetzwerk (Transportdauer, Flottenkonstellation, Terminalgröße) ableiten.

3.3 Qualitätserhaltender Holztransport

Qualitätserhaltene Holztransportstrategien basieren auf dem signifikanten Zusammenhang von Beschaffungsdurchlaufzeit und Qualitätsverlust von frischem Rundholz während Lagerung und Transport (v.a. bedingt durch Pilz- und Insektenbefall). Das dritte DES-Modell beinhaltet auf lokalen Wetterdaten basierende Modelle, die die Entwicklung von Holzbläue bzw. der Borkenkäferpopulation sowie deren Auswirkung auf die Qualität und damit den Wert von im Wald gelagerten Holz abbilden. Die Animationsansicht (Abbildung 5) visualisiert die Qualitätsentwicklung von Holz entlang von einstufigen und multimodalen Lieferketten. Hierbei wird das Holzaufkommensgebiet abstrahiert in drei verschiedenen Höhen- bzw. Vegetationsstufen (links) mit den aktuellen Holzpoltern abgebildet, wobei Polter mit unverminderter Holzqualität in grün, von Abwertung Gefährdete gelb und Polter mit bereits abgewertetem Holz in rot dargestellt werden. Das Luftbild zeigt den Holzverladeterminal mit Waggonen (grau) und Kran-LKWs (rot-grau).



Abbildung 5: Animationsansicht zur virtuellen Abbildung der Holzlieferkette

Aktuell in der Praxis eingesetzte Holztransportstrategien basieren nicht auf expliziten Informationen zu konkret drohenden Holzwertverlusten und dienen daher als Benchmark-Strategien. Diese wurden anhand ausgewählter Kennzahlen (u.a., Beschaffungsdurchlaufzeit, Holzmenge mit Qualitätsverlust während der Beschaffungsdurchlaufzeit, Holzwertverlust durch Qualitätsverlust) mit den neu entwickelten Strategien, die gezielt die Prognose der Holzqualitätsentwicklung aufgrund der zu erwartenden Witterung nutzen, verglichen. Das Wissen um die Qualitätsentwicklung und die Prognose der voraussichtlichen Entwertungswoche erwies sich im Besonderen bei Transportkapazitätsengpässen von Bedeutung, da Holzwertverluste vor allem durch strategische Transportallokation entscheidend reduziert werden können. Dabei hat sich die Regel risikobehaftetes Holz vor Holz mit unverminderter Holzqualität vor abgewertetem Holz als zielführend erwiesen. Die Ergebnisse der umfangreichen Szenarien quantifizieren erstmals die Wichtigkeit der Einbeziehung zu erwartender Holzwertverluste in das Management der Holzlieferkette (statistisch signifikanter und in Regressionen modellierter Zusammenhang zwischen Beschaffungsdurchlaufzeit und Holzqualitätsverlust) und zeigen entsprechende strategische und taktische Transportoptionen zum proaktiven Risikomanagement auf.

4 Fazit

Aktuelle und zukünftige Herausforderungen verlangen nach innovativen, digitalen, quantitativen Entscheidungsunterstützungswerkzeugen für die traditionell konservativ eingestellten Akteure der Holzlieferkette. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten diskreten ereignisbasierten Simulationsmodelle belegen die hohe Eignung und intuitive Einsatzbarkeit dieser Methode für die kooperative Notfallplanung (konkrete Transportplanungstabellen), das proaktive Risikomanagement (klimakrisenbedingte Extremszenarien, Holzqualitätsentwicklung) und die Strategieentwicklung (*serious game-based simulation workshops*) in der Holztransportlogistik. Damit werden entscheidende Beiträge zur Nachhaltigkeit, zum Qualitätserhalt und – entsprechend der präsentierten Definition – zur Resilienz der Holzwertschöpfungskette geleistet.

Der wissenschaftliche Innovationsgehalt der drei präsentierten Modelle für die Holztransportsimulation umfasst unter anderem:

1. einen bisher einzigartigen Detaillierungsgrad in der Modellierung von multimodalen Holzlieferketten sowie die umfangreichste Kennzahlendarstellung in DES-Modellen für Holzlieferketten,
2. die erstmalige simultane Optimierung der Flottenkonfiguration sowie der Umschlaginfrastruktur für individuell parametrisierbare Ausgangssituationen und intuitive Aufbereitung der Ergebnisse in übersichtlichen Transportplanungstabellen und
3. erstmalige Quantifizierung der durch die Beschaffungsdurchlaufzeit bedingten Holzwertverluste und Vermeidung dieser durch die Entwicklung von Logistikstrategien zum proaktiven Riskmanagement.

Innovation umfasst neben der Entwicklung neuer Methoden, Techniken und Modelle auch deren Anwendung sowie Umsetzung von neuen Ideen und Wissen in die wirtschaftliche Praxis. Die Akteure der Holzwertschöpfungskette profitieren von den vorgestellten Erkenntnissen durch Wissenstransfer und -management im Rahmen von

etablierten (u.a. Vorträgen, Beratung, Veröffentlichungen in populärwissenschaftlichen Magazinen) und modernen Vermittlungsformen (*serious game-based simulation workshops* zur Strategieentwicklung, Planspiele mit vielfältigen Szenarien zum praxisnahen Einsatz der Transportplanungsstabellen).

Entscheidende Weiterentwicklungsmöglichkeiten für die Simulationsforschung beinhalten die Integration von Echtzeitdaten (Van der Valk et al. 2022) und künstlicher Intelligenz (Fowler und Rose 2022) in umfassend verifizierten und validierten Simulationsmodellen (Rabe et al. 2008). Die notwendige Entwicklung von digitalen Zwillingen und Nutzung der Fähigkeiten künstlicher Intelligenz zur Holztransportsimulation eröffnen daher großes Forschungspotential für weitere Beiträge zu nachhaltiger, resilienter und qualitätserhaltender Holzlogistik. Damit die technologischen Entwicklungen entlang von traditionellen Holzwertschöpfungsketten und deren konservativ agierender Akteure implementiert werden können, gilt es organisatorische Maßnahmen zu setzen, um die interne Systembereitschaft sicherzustellen. Hierfür ist es zielführend, die technologie-bedingt neuen Abläufe durch Veränderungsmanagement und Prozess-Reengineering zu begleiten, um den notwendigen Organisationskulturwandel (u.a. Innovationsbereitschaft durch datenbasierte Entscheidungsunterstützung) und strukturellen Vertrauensaufbau (u.a. Kooperationsbereitschaft zum transparenten Datenaustausch) breit in der Forst- und Holzbranche zu etablieren.

Literatur

- Acuna, M.; Sessions, J.; Zamora, R.; Boston, K.; Brown, M.; Ghaffariyan, M. R.: Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. *Current Forestry Reports* 5 (2019) 3, S. 124–141.
- Eriksson, A.; Eliasson, L.; Sikanen, L.; Hansson, P.-A.; Jirjis, R.: Evaluation of Delivery Strategies for Forest Fuels Applying a Model for Weather-Driven Analysis of Forest Fuel Systems (WAFFS). *Applied Energy* 188 (2017), S. 420–430.
- Federal Ministry for Agriculture, Forestry, Regions and Water Management (FMA): Green Report, 2022. <https://gruenerbericht.at/cm4/jdownload/send/2-gr-bericht-terreich/2398-gb2022>, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): The State of the World's Forests 2018 - Forest Pathways to Sustainable Development, 2018. <https://doi.org/10.18356/18a7cf8d-en>, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Forst-Holz-Papier (FHP): Leistungsbericht Wertschöpfungskette Holz, 2019. https://www.forstholzpapier.at/images/Leistungsbericht_kompakt_2019_Ansicht_FINAL.pdf, letzter Zugriff 01.07.2023.
- Fowler, J. W.; Rose, O.: Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 11.–14. Dezember 2022.
- International Trade Center - joint agency of the World Trade Organization and the United Nations (ITC): Trade map, 2023. https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c

- letzter Zugriff 01.07.2023.
- Kogler, C.: Decision Support by Discrete Event Simulation for the Wood Supply Chain. Dissertation at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (2020), S. 1–123. <https://permalink.obvsg.at/bok/AC16139733>.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Discrete Event Simulation of Multimodal and Unimodal Transportation in the Wood Supply Chain: a Literature Review. *Silva Fennica* 52 (2018) 4, S. 1–29.
- Kogler, C.; Rauch, P.: A Discrete Event Simulation Model to Test Multimodal Strategies for a Greener and more Resilient Wood Supply. *Canadian Journal of Forest Research* 49 (2019) 10, S. 1298–1310.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Game-based Workshops for the Wood Supply Chain facilitate Knowledge Transfer. *International Journal of Simulation Modelling* 19 (2020a) 3, S. 446–457.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Contingency Plans for the Wood Supply Chain based on Bottleneck and Queuing Time Analyses of a Discrete Event Simulation. *Forests* 11 (2020b) 4, S. 1–23.
- Kogler, C.; Rauch, P.: Lead Time and Quality Driven Transport Strategies for Wood Supply Chains. *Research in Transportation Business & Management* 47 (2023), S. 1–13.
- Kogler, C.; Stenitzer, A.; Rauch, P.: Simulating Combined Self-loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests*, 11 (2020) 12, S. 1–15.
- Kogler, C.; Schimpfhuber, S.; Eichberger, C.; Rauch, P.: Benchmarking Procurement Cost Saving Strategies for Wood Supply Chains. *Forests* 12 (2021) 8, S. 1–18.
- Mobini, M.; Sowlati, T.; Sokhansanj, S.: A Simulation Model for the Design and Analysis of Wood Pellet Supply Chains. *Applied Energy* 111 (2013), S. 1239–1249.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new Procedure Model for Verification and Validation in Production and Logistics Simulation. In: Mason, S. J.; Hill, R. R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC)*, Miami, 7.–10. Dezember 2008.
- Van der Valk, H.; Winkelmann, S.; Ramge, F.; Hunker, J.; Langenbach, K.; Rabe, M.: Characteristics of Simulation: a Meta-review of Modern Simulation Applications. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC)*, Singapore, 11.–14. Dezember 2022.
- Väättäin, K.; Anttila, P.; Eliasson, L.; Enström, J.; Laitila, J.; Prinz, R.; Routa, J.: Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering* 42 (2021) 1, S. 39–61.
- Väättäin, K.; Laitila, J.; Anttila, P.; Kilpeläinen, A.; Asikainen, A.: The Influence of Gross Vehicle Weight (GVW) and Transport Distance on Timber Trucking Performance Indicators – Discrete Event Simulation Case Study in Central Finland. *International Journal of Forest Engineering* 31 (2020), S. 156–170.
- Weintraub, A.; Epstein, R.; Morales, R.; Serón, J.; Traverso, P.: A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forest Industries. *Interfaces* 26(1996) 4, S. 1–12.