

# Schlussbericht

zum Vorhaben

## „Nachhaltige Nutzungspotenziale für Kiefernstarkholz – eine ganzheitliche Betrachtung ihres Aufkommens, Waldbaus, der Holzernte und ihrer Verwertung“

Akronym:

**KiefernStolz**

Zuwendungsempfänger und Bearbeiter:

**Teilvorhaben 1:**

**Fraunhofer Gesellschaft,**

**Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung (WKI), T. Krenn, D. Berthold**

**Teilvorhaben 2:**

**Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt,**

**Abteilung Waldwachstum (NW-FVA), H. Knocke, M. Axer, R.-V. Nagel**

**Teilvorhaben 3:**

**Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie,  
bis 09/2023 Abteilung Forstökonomie, ab 10/2023 Abteilung Forstökonomie und nachhaltige  
Landnutzungsplanung, H. Dirks, C. Paul, B. Möhring**

**Teilvorhaben 4:**

**Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie,  
Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie,  
M. Kopetzky, D. Jaeger**

**Teilvorhaben 5:**

**Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie,  
Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte,  
M. Gurnik, C. Mai, H. Stolze, H. Militz**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 2220WK01A3**

**Teilvorhaben 4: 2220WK01D3**

**Teilvorhaben 2: 2220WK01B3**

**Teilvorhaben 5: 2220WK01E3**

**Teilvorhaben 3: 2220WK01C3**

Laufzeit: **01.11.2021 bis 31.03.2025**

Veröffentlicht: **25.08.2025**

Zitervorschlag:

Krenn T, Berthold D, Knocke HC, Axer M, Nagel RV, Dirks H, Paul C, Möhring B, Kopetzky M, Jaeger D, Gurnik M, Mai C, Stolze H, Militz H (2025) Schlussbericht zum Vorhaben „Nachhaltige Nutzungspotenziale für Kiefernstarkholz – eine ganzheitliche Betrachtung ihres Aufkommens, Waldbaus, der Holzernte und ihrer Verwertung“ (FKZ: 2220WK01). WKI, Braunschweig.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

Aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) und des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) und über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurzbericht .....</b>	<b>1</b>
1. Aufgabenstellung .....	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	2
<b>II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>8</b>
Arbeitspaket 1: Furnierbasierte 2d- und 3d-Verbundwerkstoffe für lasttragende Anwendungen .....	8
Arbeitspaket 2: KiefernStolz Waldbau.....	23
Arbeitspaket 3: Analyse der Wertschöpfungspotentiale in Nordwestdeutschland.....	41
Arbeitspaket 4: Sichere sowie umwelt- und bestandesschonende Starkholzernte / Abbildung der gesamten Prozesskette .....	52
Arbeitspaket 5.1: Identifizierung und Entwicklung von Produkten (Stolze und Miltz) .....	76
Arbeitspaket 5.2: Verklebbarkeit von furnierbasierten Verbundwerkstoffen auf Basis von Kiefernstarkholz .....	100
Verwertung 119	
Erkenntnisse von Dritten .....	120
Veröffentlichungen .....	120
<b>ANHANG .....</b>	<b>123</b>
Teilvorhaben 1: Furnierbasierte 2d- und 3d-Verbundwerkstoffe für lasttragende Anwendungen .....	123
Teilvorhaben 2: KiefernStolz Waldbau.....	126
Teilvorhaben 3: Analyse der Wertschöpfungspotentiale von Kiefernstarkholz in Nordwestdeutschland	131
Teilvorhaben 4: Sichere sowie umwelt- und bestandesschonende Starkholzernte / Abbildung der gesamten Prozesskette .....	135
Teilvorhaben 5.1: Identifizierung und Entwicklung von Produkten (Stolze und Miltz) .....	142
Teilvorhaben 5.2: Verklebbarkeit von furnierbasierten Verbundwerkstoffen auf Basis von Kiefernstarkholz .....	145



# **I. Kurzbericht**

## **1. Aufgabenstellung**

Ziel des Verbundvorhabens KiefernStolz war es, die Auswirkungen der Verschiebung in der Altersstruktur der Kiefer hin zu ihrem Endnutzungsstadium zu analysieren. Zur Entwicklung möglicher Nutzungsstrategien mussten Chancen und Risiken der Nutzung von Kiefer in Starkholzdimension identifiziert und charakterisiert werden. Die Analyse forstlicher Entwicklungsszenarien zur langfristigen Risikoabschätzung und Integration der besonderen Altersstruktur in waldbauliche Konzepte zur Konzeption nachhaltiger Nutzungsmöglichkeiten stellten die Basis für eine ökonomische Einschätzung der Kiefernstarkholznutzung. Untersuchungen zur Prozesskette, die die speziellen Erfordernisse der Starkholzwirtschaft im Einklang mit Verjüngungskonzepten berücksichtigen, sollten ein optimales Ernteverfahren identifizieren. Im Zusammenhang mit der ökonomischen Betrachtung muss der Anreiz längerer Umtriebszeiten gerechtfertigt sein und anfallendes Starkholz entsprechend seiner Eignung einer effizienten Nutzung zugeführt werden, damit entsprechende Vermarktungsanreize geschaffen werden können. Hierfür sollten innovative Möglichkeiten im Bereich der Furnierwerkstoffe durch Optimierung und Erweiterung um modifizierte und hybridisierte Produkte untersucht werden. Potentiale der Verwertung von Kiefernstarkholz im Nutzungspfad als Vollholz, sollten durch Einschnitt- und Sortieroptimierung qualitätsgerecht aufgezeigt und weiterentwickelt werden.

## **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Durch intensiven Austausch innerhalb der forstlich-orientierten und der holztechnologisch-orientierten Teilvorhaben wurden zunächst die nötigen Definitionen zum Starkholz der Kiefer diskutiert und typische Bestandesmerkmale identifiziert, sowie die typischen Holzmerkmale, und Rundholzqualitäten der Kiefer auf ihre verwertungstechnische relevanten Holzmerkmalen hin untersucht. Kernholzanteil, Harzgehalt und Jahrringbreite wurden hierbei auf der Wertholzsubmission Oerrel besonders intensiv betrachtet. In den Teilvorhaben 2, 3 und 4 stand zunächst eine umfassende Datenzusammenführung und -verschnidung aus unterschiedlichen Bundesländern und Kommunen im Fokus. Insbesondere das Netzwerk der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt ist hierbei hervorzuheben, doch auch Brandenburg wurde mit in das Betrachtungsgebiet mit aufgenommen, da hier die Kiefer als Hauptbaumart dominiert. Zur Untersuchung der Verwertungsmöglichkeiten wurde in Zusammenarbeit mit der Stiftung Braunschweiger Kulturbesitz eine Reihe typischer Bestände mit Kiefern in Starkholzdimension identifiziert. Gemeinsam mit allen Teilvorhaben wurde eine Begehung der Flächen durchgeführt, um das zur Verfügung gestellte Versuchsholz noch vor dem Einschlag zu besichtigen und eine Einschätzung von forstlicher Seite zur Repräsentativität der Bestände im Kontext des waldbaulichen Bestandesbildes, möglicher Ernteszenarien und Verjüngungsstrategie zu erhalten. Ein Kontingent von Versuchsstämmen wurde zwischen den Teilvorhaben 1 und 5 aufgeteilt und als Schnittholz, bzw. Furnier aufgearbeitet. Das Furnier wurde vom Teilvorhaben 1 zwecks Verklebungsversuchen und Modifizierung Teilvorhaben 5 zur Verfügung gestellt. Qualitative Untersuchungen zu visuellen Eigenschaften von Furnier und Schnittholz und den mechanischen Eigenschaften daraus hergestellter Werkstoffe wurden ermittelt. In Teilvorhaben 5 wurden hierauf aufbauend Anstrengungen unternommen relevante Verwerter für spezialisierte Sortimente an Splint- und Kernholz zu identifizieren und verarbeitende Betriebe mit der nötigen Zuschnitttechnik mit diesen zu vernetzen. Die Dimensionsbedingten Möglichkeiten einer getrennten Verwertung wurden als aussichtsreiche Nutzungsmöglichkeit der speziellen Starkholzeigenschaften eingestuft. In den Teilvorhaben 2, 3 und 4 wurden intensive Analysen der gesammelten Datensets vorgenommen und zur Modellierung waldbaulicher, ökonomischer und holzerntetechnischer Szenarien genutzt. Für die ergonomische Gestaltung der Kiefernstarkholzernte wurden Praxisversuche geplant und durchgeführt, um bestandesschonende und zeitlich ökonomische Verfahren bewerten zu können. In Diskussionen zu potentiellen Verarbeitungsparametern wurden zwischen den Teilvorhaben 1 und 5 für Verklebungsversuche geeignete Klebstoffsysteme identifiziert und sowohl in furnierbasierten Plattenwerkstoffen als auch zur Formteilverklebung eingesetzt, während in TV 5 in tiefergehenden Versuchen auch die Verklebungseigenschaften in einer Hybridisierung mit unterschiedlichen Modifizierungsgeweben sowie Metall bewertet wurden.

Eine intensive Vernetzung der zur Verfügung stehenden forstbetrieblichen Daten aus Betriebswerken und der aktuellen Bundeswaldinventur stellte die Grundlage für weiterführende Modellierung, Simulation and Analyse dar. Verbundinterne Koordination und Kommunikation mit relevanten Partnern stellten die Sicherung der Relevanz und Forschungsqualität sicher.

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
<p>AP 1</p> <p>Furnierherstellung aus Kiefernstarkholz</p> <p>Herstellung plattenförmiger und geformter Referenzbauteile</p> <p>Untersuchung des Plastifizierungsverhaltens</p> <p>Überprüfung des Werkstoffverhaltens bei kraftfreier und kraftinduzierter Belastung</p>	<p>11/2021 bis 12/2024</p>	<p>Qualitätsbeurteilung von Furnier aus Kiefernstarkholz und Holzsortimenten, die mittelfristig in das Starkholzsegment hineinwachsen werden.</p> <p>Unter Variation des Prozessparameters der Stammvorbehandlungstemperatur und der eingesetzten Stammqualität werden Furnierschichtholzplatten mit unterschiedlichen Klebstoffen hergestellt und die mechanischen Eigenschaften ermittelt</p> <p>Das Verhalten von geformten Kiefern furnierwerkstoffen unter hygrischer Belastung wird ergänzend zu den kraftinduzierten Belastungen der mechanischen Qualitätsbewertung durchgeführt um Optimierungspotentiale im Herstellungsprozess aufzuzeigen</p>
<p>AP 2</p> <p>Potenzialabschätzung und Erstellung von Waldentwicklungsszenarien von Kiefernstarkholz für die Entwicklung waldbaulicher Konzepte unter Risikoberücksichtigung der klimatischen Veränderungen.</p>	<p>04/2022 bis 03/2025</p>	<p>Potenzialabschätzung gegliedert nach Stärkeklassen und Qualitäten. Das aktuelle Holzaufkommen für Kiefer wurde durch Verschneidung von Forsteinrichtungs- und Bundeswaldinventur-Daten hergeleitet.</p> <p>Fortschreibung und Schätzung des Kiefernstarkholzaufkommens für die nächsten 50 Jahre. Auf Basis einer realitätsgetreuen Abbildung des naturnahen Waldbaus der Länder wurde die Waldentwicklung bis 2062 in Szenarien fortgeschrieben.</p> <p>Waldbauliche Konzepte und deren Evaluierung. In einer Erweiterung der Datenbasis wurde das Störungsregime in Kiefernwäldern untersucht und in Verbindung zu den Waldbaukonzepten gebracht, indem die Waldentwicklung unter Störungseinfluss bis 2062 zur Evaluierung erneut simuliert wurde.</p> <p>Empfehlungen für Politik und Praxis. Auf Basis der Simulationen mit und ohne Störungseinfluss sowie der Analyse des Störungsregimes werden in diesem Bericht Empfehlungen gegeben.</p>
<p>AP 3</p> <p>Analyse des qualitätsabhängigen optimalen Erntezeitpunktes bzw. der optimalen Erntedimension unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten und Risikokosten sowie</p> <p>Analyse von Fallstudien in unterschiedlichen Teilregionen Nordwestdeutschlands inkl. der Analyse von Absatzmärkten und Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse</p>	<p>11/2021 bis 12/2024</p>	<p>Unter Nutzung des erweiterten Pressler'schen Weiserprozentes (Möhring und v. Bodelschwingh 2016) wurden optimale Umtriebszeiten und korrespondierende Erntedimensionen in Abhängigkeit der Qualität sowie variierender Opportunitäts- und Risikokosten ermittelt</p> <p>Auf Basis der „Betriebsinventur Niedersachsen“ (NFP 2023) wurden in Fallstudien naturale Kenngrößen aus Nordwestdeutschland analysiert, bioökonomisch bewertet (v. Bodelschwingh 2018; Fuchs u. a. 2023) und mit forstökonomischen Kalkülen eingeordnet. Zudem wurde auf Basis der Holzeinnahme des größten Kiefernrohholzbereitstellers Nordwestdeutschlands (NLF u. a. 2024) der Kiefern(stark-)holzabsatz analysiert</p> <p>Diese Ergebnisse wurden abschließend zusammengeführt und Bedeutung der Preisrelation von Starkholz zu den Massensortimenten verdeutlicht</p>
<p>AP 4</p> <p>Vorbereitung eines Vergleichs bestehender Verfahren für die</p>	<p>11/2021 bis 12/2024</p>	<p>Bewertungskriterien für Kiefern-Starkholz Ernteverfahren wurden auf Grundlage der allgemeinen KWF-Bewertungskriterien für</p>

<b>Arbeitspakete (AP)</b> <b>(lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Bearbeitungszeitraum</b> <b>(lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
Starkholzernte in der Kiefer; Modellierung, Analyse und Bewertung der identifizierten Prozessketten auf Grundlage von Literaturrecherchen; Fallstudien zu den vielversprechendsten Verfahrensketten für untersuchungsregionsspezifische Bestandes- und Eingriffsszenarien in unterschiedlichen Teilregionen Norddeutschlands in Abstimmung mit d Ableitung einer Entscheidungshilfe zur Identifizierung der optimalen Verfahrenskette nach ökologischen, ökonomischen und ergonomischen Aspekten unter Berücksichtigung der Kombinierbarkeit unterschiedlicher Verfahren und der Zielsortimente (in Abstimmung mit TV 1 und TV 6) en anderen TV;		<p>Holzernteverfahren entwickelt. Bekannte Holzernteverfahren mit Eignung für Starkholz wurden im Rahmen einer Literaturrecherche identifiziert und zusammengetragen. Anschließend erfolgte eine Prüfung vor den entwickelten Bewertungskriterien und unter Berücksichtigung der zu erwartenden Bestandes- und Eingriffscharakteristika. In der Folge wurden geeignete Holzernteverfahren für die Kiefern-Starkholzernte für Fallstudien ausgewählt. Eine Detailanalyse zur Rückenentlastung der im Kiefern-Starkholz stark beanspruchten Forstwirtinnen und Forstwirte, mittels eines passiven Exoskelettes wurde ebenfalls als Fallstudie durchgeführt.</p> <p>Drei Holzernteverfahren wurden vergleichend in Mecklenburg-Vorpommern untersucht und die erhobenen Daten mit Vergleichswerten für Fichten-Einschläge verglichen.</p> <p>Eine Entscheidungshilfe für optimale Holzernteverfahren wird somit in diesem Bericht bereitgestellt.</p>
AP 5.1 Festlegung von produktabhängigen Einschnittmustern, Schnittholzsortierung und Produktidentifizierung sowie Erprobung von Holzmodifizierungssystemen an Massivholz; Untersuchungen im Bereich der Furnier- und LVL-Modifizierung	11/2021 bis 12/2024	<p>Kiefernstarkholz von verschiedenen Herkünften wurde produktabhängig eingeschnitten, Schnittholz nach der Tragfähigkeit sortiert und Massivholzprodukte mit möglichst hoher Wertschöpfung aus Kiefernstarkholz identifiziert. Die Holzmodifizierung von Kiefernspiltholz wurde getestet und Eigenschaftsprofile von modifiziertem Kiefernspiltholz sowie Kiefern-Fensterkanteln aus Kiefern-Sortimenten wurden bestimmt</p> <p>Die Modifizierung von Furnieren aus Kiefernstarkholz wurde erprobt und das Eigenschaftsprofil des daraus hergestellten Furnierwerkstoffs LVL bestimmt</p>
AP 5.2 Untersuchung der Möglichkeit konventionelle Klebstoffe für den Außenbereich durch speziell entwickelte isocyanat-basierte Systeme zu ersetzen. Es werden der Einfluss von Splint- und Kernholz auf die Verklebungsfestigkeit und die Verklebbarkeit von Kiefernstarkholz mit anderen Materialien wie Metallen und Armierungsfasern untersucht. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die Ermittlung der optimalen Klebstoffmengen, Presszeiten und Pressbedingungen von Bedeutung.		<p>Die Verklebung von Kiefern-Starkholzfurnieren mit isocyanat-basierten Klebstoffen erfüllte die Festigkeitsanforderungen der DIN EN 314, auch nach hygrischer/thermischer Belastung. PUR und pMDI zeigten geringere Elastizitätsmodule als die Referenzklebstoffe. Bei Kernholzfurnieren führten hohe Harzgehalte zu Dampfplatzern im Heißpressprozess, die die Nutzung verhinderten. Scherversuche ergaben niedrigere Festigkeiten für PUR im Vergleich zu MUF, sofern Kernholz verklebt wurde. Die Holz-Metall-Verklebung gelang ohne Primen, die Klebfestigkeit lässt sich jedoch durch Primen erhöhen. Die Herstellerangaben zur offenen Zeit von PUR-Klebstoffen erwiesen sich als praxistauglich. Bei Buchenfurnieren erhöhten höhere Pressdrücke und Temperaturen die Festigkeit, wobei die Temperatur besonders einflussreich war.</p>

<b>Meilensteine (M)</b> <b>(lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit</b> <b>(lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
M 1.1	12/2022	Erste Referenzplatten und umgeformte Werkteile sind hergestellt worden und relevante Verarbeitungskriterien und Optimierungsmöglichkeiten wurden identifiziert.
M 1.2	12/2023	Die visuellen Qualitätseigenschaften unterschiedlicher Herkünfte von Kiefernholz wurden analysiert und die Starkholzspezifischen Verarbeitungsvorteile wurden

<b>Meilensteine (M)</b> <b>(lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit</b> <b>(lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
		herausgestellt.
M 1.3	06/2024	Die Analyse zu den Auswirkungen der Variation der Vorbehandlungsparameter und des Einsatzes unterschiedlicher Klebstoffsysteme auf die mechanischen Eigenschaften von Kiefern furnier-LVL wurde abgeschlossen.
M 1.4	12/2024	Eine umfassende Versuchsreihe zum Verformungsverhalten von furnierbasierten Kiefernlagenwerkstoffen bei hygri scher Belastung unter besonderer Berücksichtigung der Herstellungsparameter wurde durchgeführt und anhand bildverarbeitender und digitaler Verfahren analysiert.
M 2.1	03/2023	Eine Potentialabschätzung nach Standorten, Besitzarten, Stärkeklassen und Qualitäten ist erfolgt.
M 2.2	09/2023	Das Holzaufkommen wurde auf Basis einer Waldentwicklungssimulation bis 2062 realitätsgetreu fortgeschrieben.
M 2.3	06/2024	Die Waldbaukonzepte wurden im WaldPlaner emuliert und in ihrer Auswirkung auf die Waldentwicklung evaluiert.
M 2.4	03/2025	Empfehlungen für Politik und Praxis wurden in diesem Bericht und zahlreichen Veröffentlichungen formuliert.
M 2.5	03/2025	Schlussauswertungen und Abschlussbericht wurden erstellt.
M 3.1 Erstellung Analyseschema	07/2022	Die dem erweiterten Pressler'schen Weiserprozent zugrundeliegende Marginalanalyse erweist sich auf Bestandes- und Einzelbaumebene als zweckdienliches Analyseschema
M 3.2 Definition des optimalen Erntezeitpunkts	04/2023	Mittels Marginalanalyse sind optimale Erntezeitpunkte bestimmt sowie einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Zentrales Ergebnis: Unter statischen Bedingungen ergeben sich für norddeutsche Kiefern optimale Erntedimensionen von 45 bis 50 cm BHD für die stärksten Bäume (Starkholzproduktion ökonomisch nicht rechtfertigbar). Diese Variiert in Abhängigkeit dynamischer Annahmen
M 3.3 Durchführung Fallstudien	01/2024	Durch Nutzung der „Betriebsinventur Niedersachsen“ (NFP 2023) wurde der Landeswald von Niedersachsen und Schleswig-Holstein untersucht. Zentrales Ergebnis: Die naturalen Analyseergebnisse lassen einen Überhaltbetrieb mit Zielstärken $\geq 50$ cm BHD ökonomisch rechtfertigbar erscheinen  Durch Nutzung der Holzeinnahme des größten Kiefernrohholzbereitstellers Nordwestdeutschlands (NLF u. a. 2024) wird der Absatzmarkt für Kiefern(stark-)holz analysiert
M 3.4 Vorliegen der Endergebnisse	10/2024	Zentrale Endergebnisse: Die Starkholzproduktion ist bei Kapital- und Flächenknappheit statisch ökonomisch nicht rechtfertigbar, wobei der dynamische Vergleich von aktueller und zukünftiger betrieblicher Situation diese rechtfertigbar erscheinen lassen kann. So ermöglicht ein Überhaltbetrieb ohne Flächenknappheit erhöhte Umtriebszeiten und somit ein Einwachsen in Starkholzdimensionen. Die nordwestdeutschen Kiefern leisten hierbei die für den Überhalt erforderlichen Wertzuwachsprozente, wobei die Bewirtschaftung bessere Qualitäten gezielt erhält. Der Markt für Kiefernwertstarkholz ist fragmentiert und niedrigvolumig. Dies Stärkeklasse dominiert ihn. Hohe Stärkeklassen werden überproportional von Kleinabnehmern abgenommen
M 3.5	10/2024	Diese liegen mit diesem Schriftstück vor

<b>Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
Schlussauswertungen und Abschlussbericht		
M 4.1 Vorbereitungen des Verfahrensvergleiches sind abgeschlossen		Bewertungskriterien für Kiefern-Starkholzverfahren wurden definiert und eine Literaturrecherche der bekannten infrage kommenden Holzernteverfahren durchgeführt.
M 4.2 Identifizierte Verfahrensketten sind analysiert und bewertet		Die identifizierten Verfahrensketten wurden kategorisiert, ihr Ablauf beschrieben. Anschließend wurden sie gegen die Bewertungskriterien und vor dem Hintergrund der zu erwartenden Bestandes- und Eingriffscharakteristika geprüft und mittels eines Ampelsystems bewertet.
M 4.3 Fallstudien sind abgeschlossen und Verfahren bewertet		Fallstudien wurden durchgeführt. Einerseits wurde untersucht, ob sich die bei Starkholz-Ernteverfahren höhere Belastung des Rückens bei Forstwirtinnen und Forstwirten durch ein passives Exoskelett reduzieren lassen. Zum anderen wurden mehrere mögliche Holzernteverfahren für Starkholz in einem typischen Waldbestand mit Kiefern-Starkholz durchgeführt und analysiert. Abschließend fand eine Bewertung der Verfahren im Vergleich zu Literaturangaben anderer Starkholzernte-Untersuchungen statt.
M 4.4 Abschlussdokumentation ist erstellt		Schlussauswertungen und Abschlussbericht wurden erstellt.
M 5.1.1 Einschnitt und Schnittholzsortierung	11/2021 bis 11/2022	Produktabhängige Einschnittmuster wurden festgelegt, Einschnitt von Kiefernstarkholz und Schnittholzsortierung wurde durchgeführt, Schnittholz aus Kiefernstarkholz wurde charakterisiert
M 5.1.2 Identifizierung von Produkten	04/2022 bis 11/2023	Massivholzprodukte aus Kiefernstarkholz wurden identifiziert und Eigenschaftsuntersuchungen durchgeführt, Eigenschaftsprofil von Kiefern-Sortimenten für den Fensterbau wurde erstellt
M 5.1.3 Holzmodifizierungssysteme	04/2022 bis 11/2023	Holzmodifizierung von KiefernSplint mit Kondensationsharzen wurde durchgeführt, Eigenschaftsprofil von modifiziertem Kiefern-Splintholz in Gebrauchsdimensionen wurde erstellt
M 5.1.4 Furniermodifizierung mit Kondensationsharzen	02/2022 bis 09/2024	Modifizierbarkeit von Furnieren aus Kiefernstarkholz wurde untersucht
M 5.1.5 Eigenschaften von modifiziertem LVL	02/2022 bis 09/2024	Eigenschaftsprofil von modifizierten LVL wurde erstellt
M 5.1.6 Schlussauswertungen, Abschlussbericht	10/2024 bis 12/2024	Liegen mit diesem Schriftstück vor
M 5.2.1		
Verklebbarkeit von Furnieren, Einfluss von Splint- und Kernholz	01/2022 bis 12/2022	Verleimung von Furnieren und Prüfung von Probekörpern aus dem Kern- und Splintholz wurde untersucht
Verklebung von Holz auf metallische Substrate	06/2022 bis 06/2023	Verklebung von Holz mit metallischen Oberflächen wurde durchgeführt
Einfluss von Primern zur Oberflächenmodifizierung auf die Holz-Metall- Verklebung	01/2022 bis 09/2023	Bei der Verklebung von Holz mit metallischen Oberflächen wurden Primer erprobt

<b>Meilensteine (M)</b> <b>(lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit</b> <b>(lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
Verwendung verschiedener Armierungsfasern	06/2023 bis 06/2024	Unterschiedliche Armierungsmaterialien wurden vor den äußeren Furnierlagen in den Verbund eingebaut und deren Wirkung auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften wurde geprüft
Einfluss von Primern zur Oberflächenmodifizierung auf Armierungsmaterialien	03/2024 bis 09/2024	Der Einfluss von Primern wurde aufgrund von Zwischenergebnissen an metallischen Oberflächen erprobt.

## **b) Zusammenfassung**

Die Modellierung der Waldentwicklung der BWI<sup>3</sup> 2012 bis zum Jahr 2062 zeigt eine starke Zunahme der Starkholzvorräte >50 cm BHD. Während sich die Alters- und Stärkeklassenverteilung nach rechts verschiebt, bleibt die Struktur unausgeglichen. In den sechs Norddeutschen Flächenländern (BB, HE, MV, NI, SH, ST) nimmt der Gesamtvorrat der Kiefer unter Risiko zwischen 20 und 26 % ab; und zwar auch wenn Kiefernwälder, wo empfohlen, wieder in Kiefer verjüngt werden. Der Vorratsabbau ist bei einer Verjüngung hin zu Schattbaumarten geringer, weil hier längere Überschirmungszeiträume praktiziert würden.

Die Umwandlung von Reinbeständen schreitet unterschiedlich voran: Kiefernflächen werden 2062 zu etwa 50 – 70 % umgebaut sein, während Laubholzreinbestände langsamer und Fichtenbestände schneller in andere Bestockungstypen wechseln. Die Modelle zeigen, dass eine verstärkte Durchforstung und rechtzeitige Ernte die Umbaurate um 20 % steigern könnte.

Unter Klimaveränderungen könnte sich die Wahrscheinlichkeit für Kiefern, das Alter 100 zu erreichen, von derzeit etwa 70 % auf zukünftig nur noch 50 % verringern. Dennoch verfünffachen sich die Starkholzanteile auch unter Risiko, während der Kiefern-Schwachholzvorrat fast halbiert wird. Ein Drittel der Holznutzung könnte künftig auf Kalamitätsereignisse zurückzuführen sein. Bestandesweise Störungen fördern den Bestockungswechsel, während baumweise Mortalität dazu tendiert, den Waldumbau zu hemmen.

Ein modifizierter Waldumbau muss standortspezifisch erfolgen. Eine differenzierte Nutzung mit Zielstärken von 40–60 cm BHD kann zum Ausgleich von Alters- und Stärkeklassen beitragen und Wälder klimafest machen. Bei einer diversifizierten Bewirtschaftung mit früherem Fokus auf die Ernte und längeren Verjüngungsfenstern, kann für die Forstbetriebe eine nachhaltige Ertragsperspektive eröffnet, Holz für die Industrie kontinuierlich angeboten, Risiken vermindert, und die ökologische Resilienz der Wälder erhöht werden.

Mit dem erweiterten Pressler'schen Weiserprozents wurden für nordwestdeutsche Kiefern optimale Umtriebszeiten und Erntedimensionen ermittelt. Die ideale Erntedimension für die stärksten Bäume liegt unter statischen Bedingungen zwischen 45 und 50 cm BHD, wobei dynamische Faktoren wie Marktveränderungen und standörtliche Entwicklungen zu anderen Ergebnissen führen können. Die wirtschaftliche Analyse berücksichtigte neben den natürlichen Wachstumsprozessen auch Opportunitäts- und Risikokosten, und es stellte sich heraus, dass die Produktion von Starkholz, insbesondere im Überhaltbetrieb, ökonomisch sinnvoll sein kann. In diesen Fällen sind Zielstärken von etwa 65 cm BHD für die stärksten Stämme möglich, vorausgesetzt, dass ausreichende Wertzuwächse erzielt werden. Die Untersuchung der „Betriebsinventur Niedersachsen“ zeigte, dass dimensionsstarke Kiefern auf geeigneten Standorten wirtschaftlich tragfähige Wertzuwächse generieren können. Obwohl Starkholz derzeit nur einen geringen Anteil am Gesamtabsatz der Niedersächsischen Landesforsten hat, ist es für spezialisierte Abnehmer von großer Bedeutung, da die Nachfrage auf wenige Marktsegmente konzentriert ist und gezielte Absatzpotenziale erschlossen werden können.

Dokumentierte Holzernteverfahren, und insbesondere Verfahren zur Starkholzernte, sind in den meisten Fällen für Fichtenbestände ausgelegt und untersucht worden. Daher wurden in einem ersten Schritt Bewertungskriterien für Kiefern-Starkholz Ernteverfahren entwickelt, die dann vor dem Hintergrund der definierten Bestandes- und Eingriffscharakteristika auf die recherchierten Holzernteverfahren angewandt wurden. Die daraus entstandene Entscheidungsmatrix sorgt mit einem Ampelsystem für eine erleichterte Auswahl eines geeigneten Holzernteverfahrens.

Da Holzernteverfahren im Starkholz häufig unter Einsatz motormanuell arbeitender Forstwirinnen und Forstwirte durchgeführt werden und das mitgeführte Material eine höhere Belastung des Rückens bedeutet, wurde in einer detaillierten Fallstudie die mögliche Entlastung durch ein passives Exoskelett, welches für die Rückenentlastung im Industrie- und Logistikbereich entwickelt wurde, untersucht. Die Ergebnisse deuten jedoch nicht auf einen Effekt des Exoskelettes auf die Beanspruchung der Rückenmuskulatur hin. Andere

Exoskelett-Wirkmechanismen sollten dennoch zukünftig untersucht werden, weil sich daraus auch bessere Effekte ergeben könnten.

In einer weiteren Fallstudie wurden Holzernteverfahren, die bisher lediglich im Fichten-Starkholz untersucht wurden im Kiefern-Starkholz unter typischen Bedingungen angewandt, sodass eine Erfassung und Prüfung der Verfahrenskennwerte (Leistung, Kosten, Pflughaltbarkeit) erfolgen konnte. Hierbei stellte sich heraus, dass auch bei einem Rückegassenabstand von 20 m ein motormanuelles Zufällen der Bäume zum anschließenden vollmechanisierten Aufarbeiten sinnvoll sein kann, sollte der nachfolgende Bestand besonders geschont werden müssen. Die vergleichsweise hohen Kosten dieser Verfahrensvariante könnten durch den Erhalt der nächsten Bestandesgeneration gerechtfertigt werden.

Die Erhöhung der Vorbehandlungstemperatur von Kiefernstämmen im Furnierschälprozess von 70 °C auf 90 °C verbesserte die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die axiale Biegefestigkeit. Diese Verbesserung ermöglicht es, auch visuell geringwertigeres Furnier aus Stammabschnitten oberhalb der 6 m Ästungsgrenze auf ein Festigkeitsniveau zu bringen, das mit astfreierem Material vergleichbar ist. Tiefere Schälrisse durch eine stärkere Plastifizierung des Schälstammes, die die Klebstoffdurchdringung des Lagenwerkstoffs im Pressprozess beeinflussen, wurden bei 3,3 mm Furnierstärke erst bei 90 °C Vorbehandlungstemperatur festgestellt, was signifikante Auswirkungen auf die Biegeeigenschaften hat. In der Formteilherstellung zeigten Polyurethan-Varianten eine höhere Formstabilität und geringeres Schwindverhalten im Vergleich zu Phenolformaldehyd-Varianten. Die Kontrolle der Furnierfeuchte im Prozess ist entscheidend, da niedrige Holzfeuchten bei Polyurethan zu Quellungsbewegungen führen können, während Phenolformaldehyd zu Schwindbewegungen neigt.

Das Potenzial von Kiefernstarkholz (KSH) wird derzeit nicht ausreichend genutzt, obwohl es in großen Mengen verfügbar ist. Die Knappheit an Fichtenholz und hohe Transportkosten könnten die Nachfrage nach KSH in Zukunft erhöhen. Bisher gibt es jedoch wenig regionale Anreize zur Nutzung von KSH, was dazu führt, dass viele dieser Hölzer im Wald verbleiben. Nur wenige Betriebe in Kiefernregionen können KSH verarbeiten, obwohl sich einige Säger technologisch für den Starkholzeinschnitt umgerüstet haben. Die Qualität der Massivholzprodukte aus KSH kann durch Faktoren wie Risse und Harzgehalt beeinträchtigt werden. Die großen Stammdimensionen bieten jedoch Chancen für eine kundenspezifische Sortierung. Durch die Trennung von Kern- und Splintholz können höhere Wertschöpfungen erzielt werden, da beide Holzsortimente unterschiedliche Eigenschaften im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Modifizierbarkeit und Extraktstoffgehalt aufweisen. Das Projekt KiefernStolz konnte aufzeigen, dass durch gezielte Auswahl und flexible Verarbeitung hochwertige Produkte aus KSH hergestellt werden können, was Hoffnung auf eine bessere Nutzung des Rohstoffs gibt. Eine Vernetzung zwischen Verarbeitenden und Veredelnden Betrieben konnte erste Pilotvorhaben zur KSH-Nutzung hervorbringen. Eine effiziente logistische Bündelung des KSH-Sortiments wurde als elementare Herausforderung für die Schnittstelle Forst und Holz identifiziert.

Die Verklebung von Kiefern-Starkholzfurnieren mit Isocyanat-basierten Klebstoffen war erfolgreich und erfüllte die nach DIN EN 314 erforderlichen Festigkeitsanforderungen. Dies galt auch, wenn die Furniere vor der Prüfung einer hygri-schen und/oder thermischen Belastung ausgesetzt wurden. Im Vergleich zu den Referenzklebstoffen wiesen PUR und pMDI geringere Elastizitätsmodule auf. Bei der Verklebung von Kernholzfurnieren traten aufgrund der teilweise hohen Harzgehalte im Kiefern-kern vermehrt Dampfblasen auf. Scherversuche an Kernholz-Kernholz- und Kernholz-Splintholz-Verleimungen zeigten, dass mit PUR geringere Festigkeiten als mit dem Referenzklebstoff MUF erreicht wurden. Die Verklebung von Holz und Metall konnte mit einem Klebstoff auf Isocyanatbasis ohne Verwendung eines Primers erreicht werden. Die Verwendung eines Primers führte zu einer Erhöhung der Klebfestigkeit. Die Überprüfung der möglichen offenen Zeit an einem hochreaktiven und einem reaktionsträgen PUR-Klebstoff ergab, dass die Herstellerangaben sinnvoll sind und eingehalten werden sollten. Hinsichtlich der Prozessparameter Druck und Temperatur konnte an Buchenfurnieren festgestellt werden, dass höhere Biegefestigkeiten bei höheren Pressdrücken und Temperaturen erreicht werden. Insbesondere die Presstemperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### Arbeitspaket 1: Furnierbasierte 2d- und 3d-Verbundwerkstoffe für lasttragende Anwendungen

#### 1.1.1 Zielsetzung des Teilvorhabens

Der vermehrte Bedarf am nachwachsenden Rohstoff Holz und seine durch Klimawandel und Kalamitäten bedrohte Verfügbarkeit, machen es unumgänglich die vorhandenen Ressourcen optimal zu nutzen. Das vom Konsortium festgestellte steigende Aufkommen von Starkholz der Kiefer sorgt dafür, dass neue Nutzungskonzepte für diesen Rohstoff interessant werden. Die Kiefer stellt vor allem für die OSB-Industrie nötiges Industrieholz zur Verfügung und findet auch als Schnittholz für die Bauindustrie Verwendung. Die auf der Basis erster Datenanalysen im Vorfeld des Verbundvorhabens sich abzeichnende Verschiebung der Altersstruktur hin zu älteren Beständen, deren Abnutzung unumgänglich in einem höheren Starkholzanteil resultieren muss, macht die Verwendung von Kiefer aufgrund ihres hohen Aufkommens in Norddeutschland auch für die Produktion von Furnierholzprodukten interessant. Die hohen Stammdurchmesser erschweren die Verarbeitung in massentauglichen Profilerspaneranlagen und spezialisierte Bandsägentechnologie ist erforderlich (Duriot et al. 2021). Die Verarbeitung in einer Furnierschälanlage erlaubt hingegen eine höhere Ausbeute. Als Verschnitt fällt nur ein geringerer Teil unter der Rinde an, bis der Stamm von konischer auf zylindrische Form gebracht wurde. Das Verkleben mehrerer Lagen Furnier, durch Versatz und Schäftung erfolgt dies im Werk zu einem endlos-Stapel, erlaubt die effektive Streuung von festigkeitsmindernden Holzmerkmalen über den Plattenquerschnitt hinweg, sodass letztlich mechanische Festigkeiten über denen des gesägten Vollholzes erreicht werden können. Auch hier können Holzmerkmale wie Harzeinschlüsse mit weniger Verschnitt herausgetrennt werden. Die letztliche Orientierung der Holzfasern entscheidet, ob ein besonders dimensionsstabiler Plattenwerkstoff erzeugt wird, oder bei gleicher Ausrichtung ein speziell für Biegebelastungen in einer Richtung ausgelegter Träger. Mischformen zur Erzeugung der gewünschten Eigenschaften sind ebenfalls üblich.

Das Teilvorhaben 1 setzte sich als Ziel, die Herstellung von Furnierschichtholz (LVL) aus Kiefer zu untersuchen, die spezifischen Herausforderungen der Kiefer zu identifizieren und Möglichkeiten der weiteren Optimierung aufzuzeigen. Zunächst bedeutete dies, Referenzwerte zu liefern, mögliche Prozessparametereinflüsse zu identifizieren und in Abstimmung mit Teilvorhaben 5.2. das Leistungsverhalten bei Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe zu beurteilen und mögliche Optimierungschance zu identifizieren. Für die Verwendung als Formteil sollte das Verhalten von Kiefernlagenwerkstoffen unter verschiedenen Bedingungen der Herstellung und Anwendung beurteilt werden, wofür ein Beurteilungsverfahren konzipiert werden sollte. Bei diesen Arbeitsschritten galt es die furnierverarbeitende Industrie, vertreten durch Steico SE mit einzubeziehen und Norddeutsche Kiefernsortimente in der Verarbeitung zu LVL qualitativ zu beurteilen.

## 1.1.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete

### *Furnierherstellung aus Kiefernstarkholz unterschiedlicher Güteklasse unter Variation der Aufschlussbedingungen*



Abbildung 1: Prozess der Schälurnierherstellung mit Kiefernstamm bei 70 °C plastifiziert mit Harzausblühungen, ein Kiefernabschnitt im entrindeten Zustand und abschließend während dem Schälprozess von Spindeln geführt.

Als Standardbedingung der Furnierherstellung kann die Plastifizierung bei 70 °C Kochertemperatur angesehen werden. Die erhöhte Temperatur bewirkt Veränderungen der Holzstruktur, vor allem des Lignins, durch die der Stamm schneller Wasser aufnehmen kann, was wiederum den Wärmetransport in die inneren Stammbereiche begünstigt. Die anatomischen Eigenschaften des Kiefernkernholzes erschweren jedoch die Aufnahme von Wasser deutlich, so kann der Kernbereich nur geringfügig in seiner Feuchte angehoben werden, sodass Feuchteunterschiede von 30 % bis 40 % zwischen Kern und Splint auftreten können. Die am WKI verarbeiteten Stämme wiesen eine ungefähre Kernfeuchte von 40 % auf. Thermographische Aufnahmen auf frisch geschälten Stammrestrollen (Abbildung 2) ergaben eine ungefähre Temperaturdifferenz zwischen

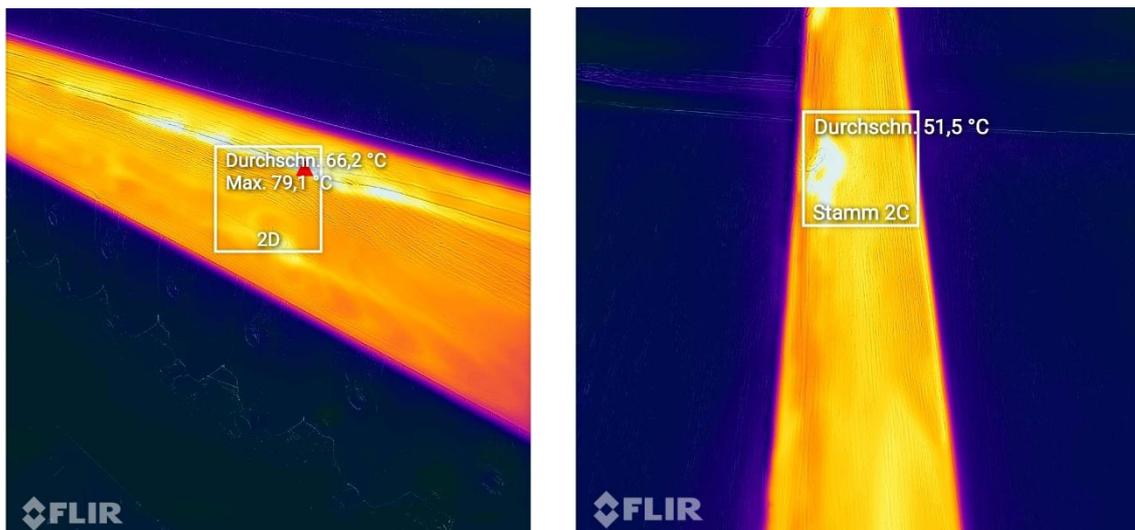


Abbildung 2: Thermografische Aufnahmen von Stammrestrollen des Schälprozesses, links bei 90 °C Kochertemperatur, rechts bei 70 °C Kochertemperatur.

Kochertemperatur und Holzkerntemperatur von 20 °C während dem Schälvorgang. Deutliche Unterschiede in der Durchwärmung wurden bei erhöhten Harzanteilen beobachtet. Insbesondere um Äste herum, aber auch in Harzstreifen über mehrere Dutzend Zentimeter verlaufend Temperaturdifferenz lediglich bei ca. 10 °C.

Für die Furnierqualität ist in der optischen Beurteilung die Oberflächenbeschaffenheit entscheidend. Im makroskopischen Sinn ist dies durch die Glätte des Furniers zu Beschreiben. In den ersten verarbeiteten Chargen auftretende Riefen auf der Furnieroberfläche, sich auch nach Schärfung des Furniermessers bald wieder auftretende Zerstörung und Rissbildung auf der Furnieroberfläche deuteten auf fehlerhafte Behandlung der Messer hin. Feine Einrisse der Schneidkante, dort wo das Messer auf härtere Oberflächen wie Äste oder ausgehärtete Harzeinschlüsse mit Verschmutzungen, insbesondere mineralischer Art, trifft führen zur Beschädigung der Messerschneide. Diese Unregelmäßigkeiten der Schneidfläche führen zu Fehlern in der Furnieroberfläche. Ein unsauberer Schnitt kann diese einreißen anstatt schneiden und zu schmalen Stauchungen führen. Auch stumpfe Abscherungen, durch die großflächigere Stauchungen verursacht werden, die mehrere cm lang sein können, sind möglich, wenn sich an der abgestumpften Messerschneide Holzmaterial ansammelt und über die Schäflfläche gepresst wird. Gegen diesen Prozessfehler wurde mit der Anschaffung eines speziellen Schleifgerätes der TKM Group entgegengewirkt, sowie der Härtung des Messerstahls um die Standfestigkeit zu verlängern. Das Schleifgerät verbindet einen herkömmlichen Schliff der Schneidkante mit dem zusätzlichen Schliff einer Mikrophase (Abbildung 3). Der steile Winkel der Schneide führt in der Spitze zu einer äußerst geringen Materialstärke, durch die der Stahl zum einen zu Mikrorissen neigt (Überhitzung beansprucht den Stahl, da bei geringer Materialstärke die Wärme schlecht abgeführt werden kann und der Querschnitt anfälliger für Einrisse ist), die zu den genannten Qualitätseinbußen auf der Furnieroberfläche führen können, zum anderen ist die Laufsicherheit der Schneidkante beeinträchtigt. Dichteunterschiede im Holzmaterial, zum Beispiel Grobäste, Reaktionsholz, Jahrringbreitenunterschiede und Harzeinschlüsse, können bei gleichbleibendem Anpressdruck zu einem geringfügigen Federn der Schneidkante führen. Gewisse Dickenunterschiede im Furnier von  $\pm 0,1$  mm bleiben bestehen, allerdings sorgt auch hierbei die Mikrophase dadurch, dass die Schneidkante nicht einfach flach ausläuft, sondern in den letzten  $\mu\text{m}$  meißelartig abgeschrägt ist, für eine größere Materialstärke und sichereren Lauf der Messerschneide. Die Ausbeutevorteile von Furnierschälholz lassen sich nur bei hoher Maschinenstandzeit voll ausnutzen. Insbesondere Starkholz, bei dem die Furniermaschine pro Stamm längere Laufzeiten hat, bei denen sich das Schneidwerkzeug erwärmen und reißen kann und höheren Anteilen an weniger aufgefuechteten Kernholz, die im schälbaren Stammquerschnitt nutzbar sind, würden sich langfristig abrasiv auf die die Messerqualität und damit die Oberflächenqualität auswirken.

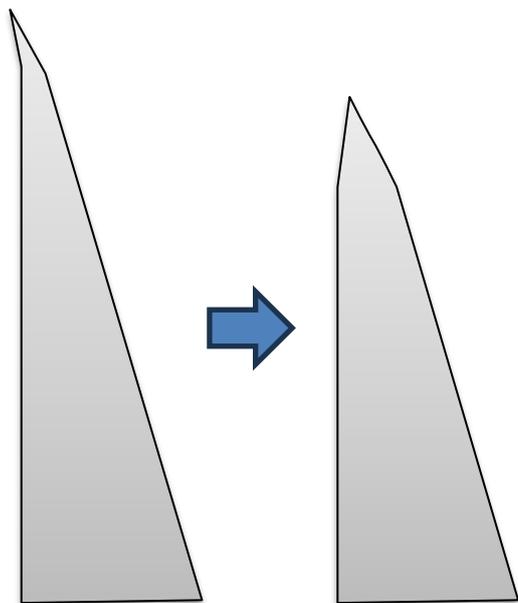


Abbildung 3: Links Furniermesserschneidkante mit Gratbildung durch Feinschliff. Rechts eine mit Mikrophase entgratete Schneidkante.

Zur Charakterisierung der Eignung von Kiefernbeständen für die Furnierwerkstoffproduktion wurde ein Kreuzversuch mit dem assoziierten Projektpartner Steico SE durchgeführt. Je 30 Festmeter von Stammabschnitten vom Stammfuß und Abschnitten von oberhalb der Astungsgrenze oberhalb 6 m Baumhöhe wurden getrennt gepoltet. Von jedem Polter wurde eine Stichprobe an das Fraunhofer WKI verbracht. Die Stämme standen noch vor dem Einwachsen in die Starkholzklasse und entsprechen damit dem Massensortiment der Nachkriegsaufforstung, die bei der sich in den Untersuchungen von AP2 abzeichnenden Verschiebung der Altersstruktur in den nächsten 40 Jahren überwiegend das Kontingent des Starkholzes stellen werden. Dieses Furniermaterial aus Sachsen-Anhalt stellt auch in den folgenden Unterarbeitspaketen die Materialgrundlage dar. Die Abschnitte in Tabelle 1 wurden zweigeteilt, um unterschiedliche Prozessparameter anzuwenden, im Sinne einer Validierung der Ergebnisse aus Starkholzmaterial aus Niedersachsen.

Tabelle 1: Übersicht über die Durchmesser der verarbeiteten Stammabschnitte altmärkischer Kiefer.

Stammkennung	A	B	C	D	E	F
Durchmesser	46 cm	37 cm	33 cm	42 cm	41 cm	32 cm

Als Furnierstärke der obigen 6 Stämme wurden 3,3 mm angestrebt, um im verdichteten Zustand eine Lagenstärke von 3 mm zu erreichen. Die Schälmaschinenkonfiguration wurde hierfür mit einem Messerwinkel von 20°, einem horizontalen Messerspalt von 2,65 cm und einem Freiwinkel von 3° gewählt.

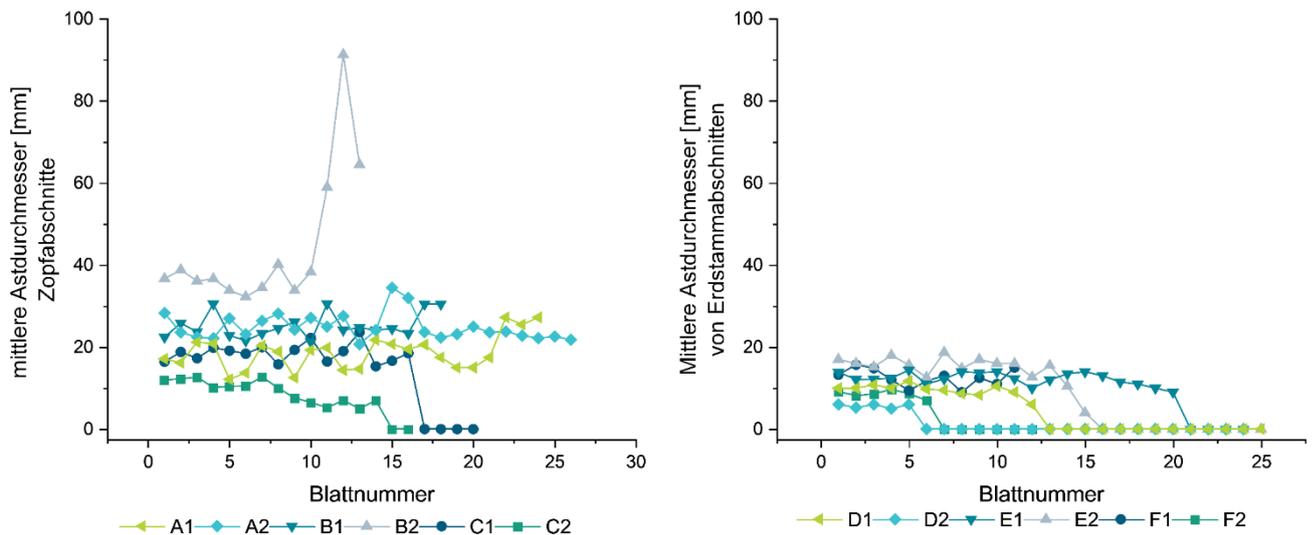


Abbildung 4: Mittlere Astdurchmesser je Furnierblatt, kernseitig beginnend nummeriert.

Jedes abgelegte Furnierblatt wurde zunächst optisch bewertet, hierzu wurden Äste und Astlöcher auf jedem Blatt vermessen. Für jedes Furnierblatt wurde hierfür eine Wiederholung des Astmusters ausgewählt, und in Anlehnung an den US PS1-95 Standard für Sperrholz bewertet. Abweichend wurde nicht streng orthogonal zum Faserverlauf gemessen, sondern der größte Durchmesser aufgezeichnet. Wir kennzeichnen durch die daraus folgende Deklaration als „Reject“ effektiv Furnierblätter, die durch Kappen und neues Fügen von Steilästen und Grobästen nachbearbeitet werden müssen. Im Standard wird nach fehlerfreien Furnieren „N“, astfreien „A“ und anschließend unterschiedlich Riss- und Ast-belasteten visuellen Klassen „B“, „C“ und „D“ unterschieden. Im Unterschied zu DIN EN 635-3 wird nicht nach der Sichtqualität des Deckfurniers eine Platte bewertet, sondern einzelne Furnierblätter auch nach ihrer Eignung für innere Plattenlagen beurteilt. In Abbildung 4 sind die je Furnierblatt (Maße ca. 1 × 1,5 m) gemittelten Astdurchmesser aufgetragen. Die Kennzeichnung der Stämme A bis F entspricht hierbei der Auftrennung für die Plastifizierung bei unterschiedlicher Kochertemperatur. Die Einzelabschnitte sind auf 1,5 m abgelängt. Auch dieser geringe Abstand im Stammverlauf resultiert bereits in deutlichen Unterschieden der Astdurchmesser im oberen Stammbereich, z.B. bis zu 10 mm zwischen den Abschnitten B1 und B2. In den Erdstammstücken fällt dieser Unterschied kaum ins Gewicht, hier lagen die verzeichneten Astdurchmesser im Mittel unter 20 mm. Die beste Furnierqualität erreichte unter den oberen Abschnitten Stamm C, der, obwohl er oberhalb von 6 m Stammhöhe entnommen wurde, relativ feinastige und sogar astfreie Furniere geliefert hat.

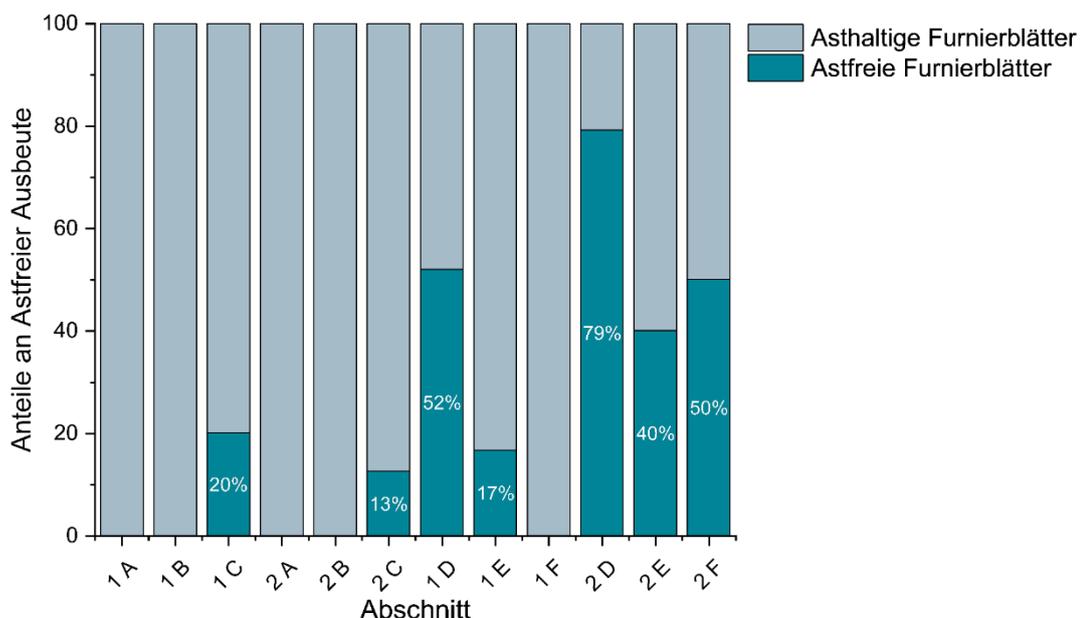


Abbildung 5: Die relativen Anteile an astfreien Furnierblättern aus Abschnitten oberhalb der Astungsgrenze (A-C) und aus Erdstammstücken (D-F).

In diesem Punkt muss auf die astfreie Ausbeute des Schälprozesses verwiesen werden, die in Abbildung 5 dargestellt ist. Unter den oberen Abschnitten konnte nur Stamm C astfreies Material vorweisen, das sich durch seine besseren mechanischen und vor allem optischen Eigenschaften für die Außenlagen von Furnierschichtwerkstoffen eignet, um dort eine Ansichtsqualität herzustellen.

Die Grundsatzidee in der Trennung von Stammfußabschnitten und Material oberhalb der Astungsgrenze liegt in der Motivation Sortimente speziell nach Weiterverarbeitung als Schnittholz und für die Furnierproduktion bereitstellen zu können. Die Homogenisierung der Produkteigenschaften bei der Furnierwerkstoffproduktion größere Qualitätsschwankungen ausgleichen. Wie erfolgreich dieser Versuch in Bezug auf die Festigkeitseigenschaften bewertet werden kann, wird im folgenden Unterkapitel analysiert. Die visuelle Qualität auf Basis von Ästen und Rissen, wobei letztere kein signifikantes Kriterium für die untersuchten Furniere darstellten, ist in Abbildung ausführlich dargestellt. Trotz des großen Durchmessers von Stamm A, der ihn als Starkholzanwärter kennzeichnet, hat im untersuchten Stammbereich keine ausreichende Überwallung der Grobäste stattgefunden. Es entfielen 56 % der Furnierblätter, jeweils ungefähr einem Laufmeter der Furnierbahn entsprechend, in Qualitätsklasse C, die bis 38 mm Astbreite quer zur Faser erlaubt.

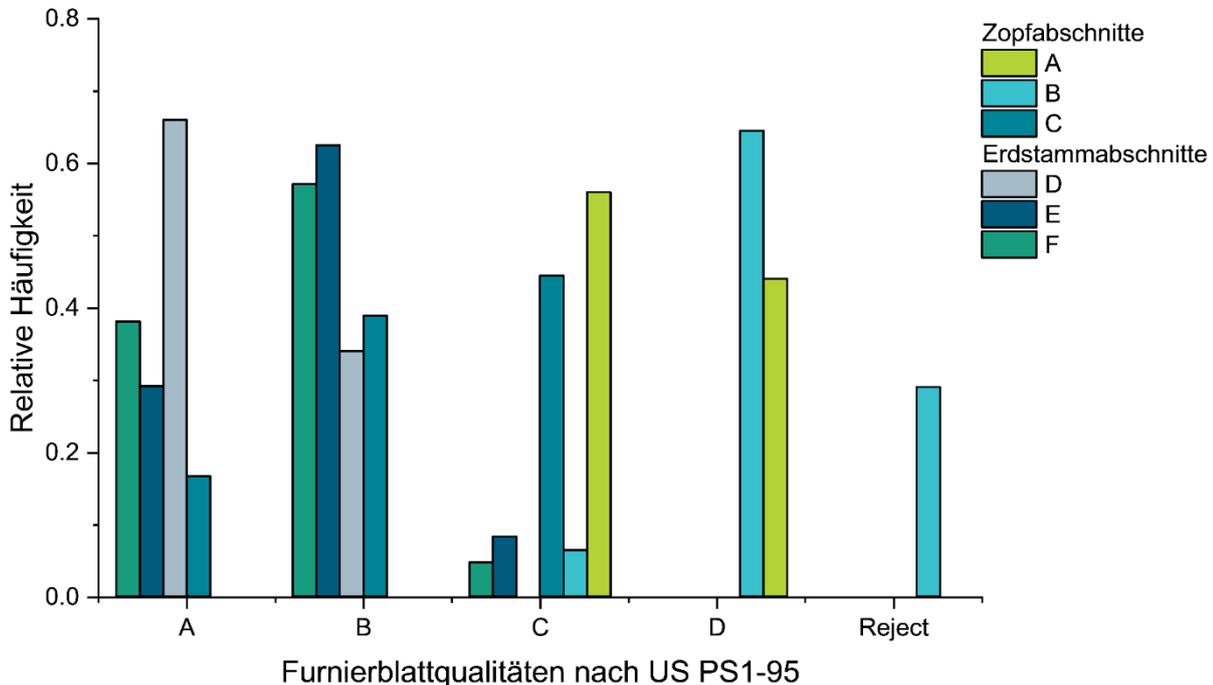


Abbildung 6: Relative Qualitätsanteile in Anlehnung an US PS1-95 bewertet.

Das astfreie Material aus Stamm C resultierte in einem Anteil von 17 % an A-Furnieren. In die B-Qualität entfielen 39 % der Furniere und die restlichen 44 % in Klasse C. Schlechte Ergebnisse wurden für Stamm B verzeichnet. Neben vorherrschendem Anteil von 65 % D-Furnieren, die für eine ausgesprochene Grobastigkeit sprechen, sind 29 % der Furnierblätter von teils schlecht verwachsenen Steilästen betroffen gewesen. Entsprechende Blattabschnitte müssten entweder als Ausschuss verworfen, oder bei erhöhtem Klebstoffaufwand durch Schäftung neu gefügt werden. Wir können im Vergleich der Qualitätsklassen einen deutlichen Unterschied zwischen Stammfußmaterial und Material oberhalb der Astungsgrenze erkennen. Für die Erdstammabschnitte liegt der Schwerpunkt der Klassenverteilung auf B-Furnier. Während Stamm C, als visuell bester Stamm der oberen Abschnitte, noch signifikante Anteile an C-Furnier aufwies, ist im Stammfuß höchstens 8 % in die C-Qualität sortiert worden. Das hohe visuelle Qualitätspotential von Kiefernstarkholz wird von den Erdstammstücken demonstriert und kann abhängig der Abschnittsherkunft auch über klassischer Astungsgrenzen erreicht werden, hierbei sind der Standort und die individuelle waldbauliche Behandlung entscheidend. Die Zusammenhänge zwischen Stammform und absoluter Ausbeute ist von Venn et al. (2020) für Spindel-lose Schälmaschinen hinreichend beschrieben, beide Verfahren unterscheiden sich im Durchmesser der Restrolle, sind ansonsten jedoch vergleichbar.

#### **Herstellung plattenförmiger und geformter Referenzbauteile unter Variation der "Furnierherkunft", des Lagenaufbaus, der Furniervorbehandlung und des Klebstoffsystems**

Starkholzabschnitte, die von der Stiftung Braunschweiger Kulturbesitz dem Projekt KiefernStolz zur Verfügung gestellt wurden, sind in AP 5.1 als Schnittholz verarbeitet und analysiert worden. Eine Stichprobe wurde am Fraunhofer WKI verarbeitet, um AP 5.2 benötigtes Furniermaterial für Verklebungsversuche zur Verfügung zu stellen. In Absprache mit AP 5.2 wurden für die Herstellung von plattenförmigen und umgeformten Furnierwerkstoffen am Fraunhofer WKI ein Klebstoff auf Polyurethan-Basis ausgewählt (Jowapur 685.30). Als Phenol-Formaldehyd-Referenz diente Prefere 4094. Beide Klebstofftypen wurden in Kombination mit Variation der Parameter Plastifizierungstemperatur und Furnierqualität nach Stammhöhenherkunft angewandt. Das Material der Stiftung Braunschweiger Kulturbesitz wurde hierbei in ersten Versuchen als plattenförmiger Werkstoff behandelt. Zur Bewertung wurden Prüfkörper aus den 500 x 500 x 9,5 mm Platten entnommen und

gemäß der geringen Dicke nach DIN EN 310 (1993) auf Biegeeigenschaften, nach EN 13354 (2009) auf die Scherfestigkeit der Klebfugen und nach prEN 14374 (2016) auf die Druckfestigkeit geprüft. Während der Plattenherstellung wurden beide Klebstoffe mit 200 g/m<sup>2</sup> aufgetragen. Bei einem Pressdruck von mindestens 1 N/mm<sup>2</sup> wurden die Platten für 30 Sekunden je mm Dicke auf 130 °C aufgeheizt, um eine Plattenstärke von 9,5 mm aus sieben 1,5 mm dicken Furnieren zu erreichen. Die Platten aus altmärkischer Kiefer wurden mit gleichen Parametern hergestellt, allerdings wurde die Presszeit auf 27 Minuten verlängert, um die Plattendicke von 39 mm zu berücksichtigen indem zusätzlich je mm von der Plattenmitte zur äußersten Klebfuge weitere 30 s Presszeit veranschlagt wurden. Für eine bessere Vergleichbarkeit zu LVL-Herstellungsverfahren der Praxis wurde 3,3 mm dickes Furnier verwendet. Das Herstellungsverfahren von umgeformten Furnierwerkstoffen wurde auf zwei unterschiedlichen Presswerkzeugen getestet. Für beide Varianten wurde 1 mm starkes Furnier verwendet, um die Beanspruchung der einzelnen Holzlagen in Formwinkeln zu begrenzen. Im ersten Verfahren wurde der kaltklebende Jowapur 685.30 benutzt, um verschiedene Lagenanzahlen herzustellen (Abbildung 7).



Abbildung 7: Formwerkzeug und Vakuumpresse mit umgeformter Kieferfurnierplatte mit gesperrten Lagen und rissfreier Oberfläche trotz Totast im Formwinkel.

Varianten mit 3, 5, 7, 9 und 11 Lagen wurden optisch miteinander verglichen, nachdem diese auf einer Vakuumpresse hergestellt wurden. Der niedrigviskose PU-Klebstoff war in der Lage durch das Vakuum auch Holzbereiche um Äste herum gut zu durchdringen, wodurch auch Totäste auf der Oberfläche effektiv in die Formteilmatrix eingebunden wurden. Nach einmonatiger Lagerung im Referenzklima 20 °C und 65 % r.F. wurde mittels Spaltmaß die Formänderung zum formgebenden Werkzeug gemessen. Es traten keine oberflächlichen Risse in den geformten Bereichen auf. Die 11-lagige Variante wies mit maximal 0,5 mm Spaltmaß nur geringe Verformungen auf. Diese stiegen bei der Variante mit fünf Lagen auf 1,3 mm an und die drei-schichtige Variante mit 20 mm Spaltmaß wurde als untauglich verworfen. Da hierbei gesperrte Lagen genutzt wurden, fiel die letztliche Entscheidung für weitergehende Untersuchungen zum Verformungsverhalten des Kiefernurniers in unterschiedlichen Konfigurationen und Prozesseinstellungen letztlich auf eine acht-schichtige Variante, die in einem späteren Unterarbeitspaket vorrangig mit rein axialer Faserausrichtung in einem Heißpressprozess verarbeitet wurde. In einer Vorsortierung wurden für diese Versuchsreihe standardmäßig nur Furniere mit Astbreiten unter 5 mm ausgewählt. Um dem Anspruch höherer Formstabilität an umgeformten Teilen gerecht zu werden, wurde die Heißpresszeit auf 20 Minuten verlängert.

Um zutreffend die Auswirkungen der Plastifizierungstemperatur vor dem Schälprozess auf die Festigkeit beurteilen zu können wurden für die sieben-schichtigen Furnierplattenwerkstoffe spezifische Festigkeiten als Festigkeitswerte in  $\text{N} \times \text{m} \times \text{g}^{-1}$  in Relation zur Dichte berechnet. Durch Dichteschwankungen im Holzurnier kann der Einfluss von Querschnittsänderungen einzelner Furnierlagen durch unterschiedlich ausgeprägte Schälrisse überdeckt werden. In longitudinaler Richtung ist sowohl die Biegefestigkeit, als auch der Elastizitätsmodul der bei 90 °C plastifizierten und mit PF gebundenen LVL-Platten deutlich höher als die übrigen Varianten. Bei der orthogonalen Biegefestigkeit hingegen hat speziell die mit PU-gebundene 90 °C Plastifizierungs-Variante die besten Ergebnisse erzielt. Die Scherfestigkeit, die als Blockscherfestigkeit entlang der Klebfuge zur mittleren Furnierlage durchgeführt wurde, hat ebenfalls eine signifikant höhere Festigkeit für die PU-Varianten ergeben. Innerhalb dieser ist die 90 °C Variante noch einmal signifikant besser, was insbesondere einen Qualitätsvorteil für die Verklebung mit dem niedrigviskosen Klebstoff suggeriert. Das Ausfüllverhalten von unterschiedlich ausgeprägten Schälrisse durch die Klebstoffsysteme und verbessertes Adhäsionsverhalten in den obersten Zellschichten, siehe Scherfestigkeit, scheint die Eigenschaften je nach Prüfachse signifikant zu beeinflussen. Bei der Druckfestigkeit in Faserrichtung stellte sich die aussteifende Wirkung des Phenol-basierten Klebstoffs als überlegen heraus. Innerhalb der Gruppe von PF-gebundenen Platten waren jene mit Furnier, das bei 90 °C plastifiziert wurde, noch einmal signifikant besser, ein Trend der sich bei PU hier nur andeutete. Bei der orthogonalen Druckfestigkeit wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Klebstoffsystemen festgestellt, die höhere Plastifizierungstemperatur erreichte aber auch hier die höheren spezifischen Festigkeiten.

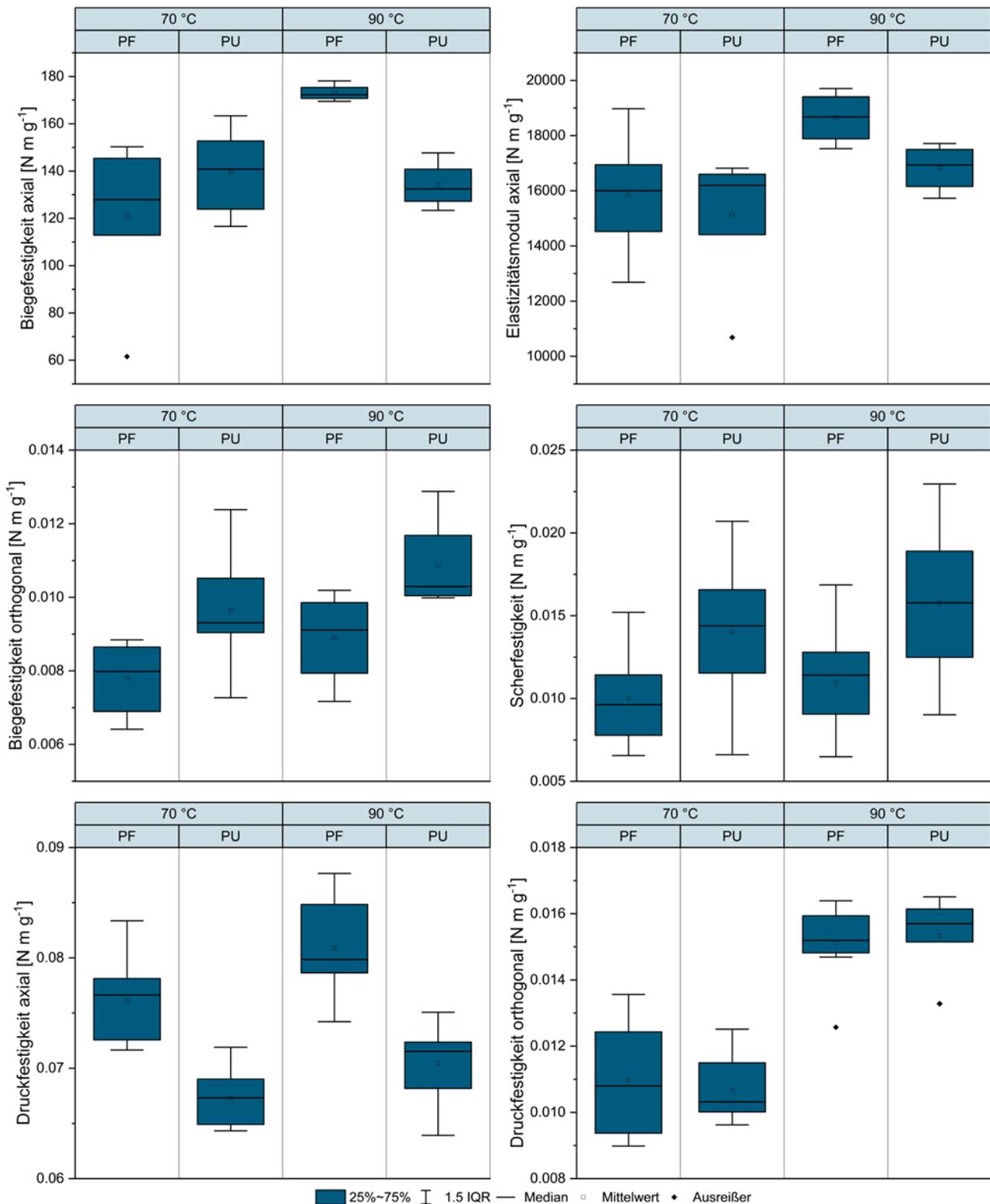


Abbildung 8: Spezifische Festigkeitswerte zum Vergleich der Eigenschaften von Furnierholzplatten unter Variation der Kochertemperatur und des eingesetzten Klebstoffsystems.

Die Veränderungen der Furnieroberfläche, die durch eine höhere Plastifizierungstemperatur erreicht werden, scheinen sich für das untersuchte Material positiv auf die mechanischen Eigenschaften auszuwirken. Da die Analyse auf Basis der spezifischen Festigkeitswerte durchgeführt wurde und somit die Dichteschwankungen der einzelnen Prüfkörper berücksichtigt werden konnten, wurde eine Quelle für Materialschwankung ausgeschlossen, da innerhalb einer Platte nach Qualitätsortierung Furnierblätter aus unterschiedlichen Stammbereichen, also Kern- und Splintmaterial, in unterschiedlichem Anteil eingesetzt wurden. Diese Beobachtung sollte, aufgrund der mit einer höheren Plastifizierungstemperatur einhergehenden

höheren Energieverbräuche, in den nachfolgenden Untersuchungen erneut betrachtet und verifiziert werden, um mögliche Qualitätsgewinne genauer quantifizieren zu können.

Tabelle 2: Absolute Festigkeitswerte aus dem Vergleich zwischen Plastifizierungstemperatur und Klebstofftyp.

Verarbeitetes Material	160 Jahre alte Kiefer, auf sandig bis lehmig-schluffigen Fließerden über Tongrund, Ebene mit tief-sitzender Staunässe, mäßig gut Nährstoffversorgt			
	70 °C		90 °C	
Plastifizierung [N mm <sup>-2</sup> ]	PF	PU	PF	PU
Biegefestigkeit 0°	75.31	93.44	136.03	114.80
Elastizitätsmodul 0°	9886.24	10134.14	14654.57	14437.34
Biegefestigkeit 90°	4.82	5.90	6.87	9.27
Elastizitätsmodul 90°	444.34	501.84	895.45	862.18
Druckfestigkeit 0°	45.97	45.06	63.24	60.60
Druckfestigkeit 90°	6.94	7.14	12.23	13.01
Scherfestigkeit	5.63	8.72	8.08	12.18

Die in weiteren Untersuchungen durchgeführten optischen und mechanischen Qualitätsuntersuchungen (Tabelle 2, Abbildungen 4 bis 6) dient erstens der Beurteilung einer sortimentsweisen Trennung von Erdstammmaterial und kronennäheren Stammabschnitten in denen eine größere Varianz der Astigkeit vorliegt. In Absprache mit AP 5 dient dieses Vorhaben einer Trennung des Materials nach seiner Verwertung. Astigere Abschnitte könnten durch die Homogenisierung in Furnierwerkstoffen leichter zur Anwendung gebracht werden als im Schnittholzbereich, der durch strenge Sortiervorschriften und gesicherte Korrelationen zur Mechanik bei hoher Astigkeit viel Ausschussware, oder bei Keilzinkung viele Kappstellen, produziert. Die Kritikalität der Festigkeitsminderung im Furnierwerkstoff durch eine solche Sortimentsverwertung sollte analysiert und beurteilt werden. In einer allgemeineren zweiten Betrachtungsweise soll mit diesem Stammmaterial aus altmärkischen Beständen die generelle Qualität norddeutscher Kiefer aus der Generation der Nachkriegsaufforstungen zu charakterisieren, die in den kommenden Jahrzehnten in die Starkholzklasse hineinwachsen wird. Die untersuchten Abschnitte stellen mit ihrer B/C Qualität einen zu erwartenden Archetyp der Kiefernqualität in Norddeutschland dar.

Die visuelle Charakterisierung ist im vorhergehenden Unterarbeitspaket hinreichend beschrieben worden. Die mechanischen Unterschiede, die aufgrund des Astaufkommens und der Astdurchmesser entstehen, sowie Zusammenhänge mit der Rohdichte in unterschiedlichen Stammteilen sind, zunächst als absolute Festigkeitswerte aus Biegeprüfungen in Abbildung 9 dargestellt. Als Referenzprodukt kann für Beispielwerte Steico LVL R herangezogen werden, welches in Dicken von 39 mm aufwärts angeboten wird. Dieser Produktquerschnitt wurde zur Herstellung der Platten in Abbildung 9 genutzt, wobei analog 3,3 mm dickes Furnier verwendet wurde. Für Steico LVL R sind 50 N/mm<sup>2</sup> als charakteristischer Flachkant-Biegefestigkeitswert angegeben. Für den Elastizitätsmodul in Faserrichtung sind 12.000 N/mm<sup>2</sup> als charakteristisch angegeben. Solche charakteristischen Werte sind durch das fehlende Aussortieren von Furnierblättern nicht zu erreichen. Zu große Standardabweichungen fließen in die entsprechende Berechnung mit ein. Stattdessen wurden für die einzelnen Platten die Astigkeitswerte der verwendeten Lagen festgehalten und erlauben das Aufstellen einer Regression zwischen mittleren Astdurchmesser sowie Festigkeit und Elastizität. Als Bestimmtheitsmaß zur spezifischen Festigkeit wurde ein R<sup>2</sup> von 0.72 erreicht. Weniger deutlich fällt der Zusammenhang zwischen Astigkeit und Elastizität in dieser Plattenstärke aus. Hier wurden 0.25 erreicht. In absoluten mechanischen Werten erreichte das Stammmaterial oberhalb von 6 m in der Biegeprüfung 58.88 N/mm<sup>2</sup> für die Abschnitte die bei 70 °C vorbehandelt wurden. Die LVL, die bei 90 °C plastifiziert wurden erreichten einen Mittelwert von 66.16 N/mm<sup>2</sup>. Die Furnierschichtplatten aus Erdstammstücken erreichten bei 70 °C einen Mittelwert von 66.42 N/mm<sup>2</sup>, während das bei 90 °C vorbereitete Furnier 71,90 N/mm<sup>2</sup> erzielte. Die Varianz der Ergebnisse nahm für beide Stammkontingente bei Steigerung der Plastifizierungstemperatur zu. Die Standardabweichung der Erdstammfurnierplatten ist um ca. 3 N/mm<sup>2</sup> höher, die der oberen Stammabschnitte um ca. 4,7 N/mm<sup>2</sup>. Der ermittelte lokale Elastizitätsmodul der vor der zerstörenden Biegeprüfung durch Aufbringen von 50 % der zu erwartenden Kraft gemessen wurde, betrug für das obere Stammmaterial 13.165 N/mm<sup>2</sup> bei 70 °C Vorbehandlung und 12.700 N/mm<sup>2</sup> bei 90 °C Vorbehandlung. Das Furniermaterial aus den Erdstammabschnitten erzielt auch hier die höheren Werte mit 15.682 N/mm<sup>2</sup> und 14.905 N/mm<sup>2</sup>. Trends bezüglich unterschiedlich großer Streuung lassen sich hierbei nicht erkennen. Die Standardabweichungen schwanken zwischen 1205 N/mm<sup>2</sup> und 2524 N/mm<sup>2</sup>. Im Vergleich mit den Referenzwerten aus der Industrie scheint das untersuchte Kontingent an altmärkischer Kiefer sehr gut geeignet für die Herstellung von Furnierschichtholz, eine Vorsortierung entsprechend der Festigkeitszusammenhänge mit der Astigkeit erlaubt das Einhalten hoher Qualitätsanforderungen tragender Bauteile. Die Unterschiede in der Astigkeit und Dichte zeigen hierbei die höhere Qualität des Stammfußmaterials. Beobachtungen von Steico SE, die 119 Erdstammstücke und 151 Abschnitte von den

oberen Stammbereichen in einer LVL-Produktionslinie verarbeitet haben, stellen die gute visuelle Qualität im Erdstammbereich mit Eignung als Deckfurnier fest. Speziell für dieses Material wurde in der Vorsortierung ein untypisch hoher Anteil an metallbelasteten Stämmen festgestellt. Für die Furnierherstellung ein eindeutiges Ausschlusskriterium. Für die Untersuchungsbestände in der Altmark sind keine historischen Zusammenhänge hierzu, starke Bejagung oder Nutzung als Schießgelände bekannt. Die Ausbeute in der Furniergewinnung war bei den Erdstammstücken höher. Die durch Rohdichtemessungen und dynamische Elastizitätsmodulmessung ergaben für die Erdstammstücke im Splintholz den höheren zu erwartenden Modul, passend zur im Baualter abnehmenden Wachstumsleistung. Für das Material der oberen Stammabschnitte wurde für die Furnierblätter aus Kernholz ein höherer Modul gemessen als im Splintmaterial. Die Furniere der oberen Stammabschnitte wurde durch seine höhere Materialvarianz als problematisch eingestuft – geeignet für die Prozessierung, aber mit Einschränkungen durch die Astigkeit. Im Zusammenhang hiermit wurde auch ein hoher Harzgehalt, speziell der oberen Abschnitte, festgestellt.

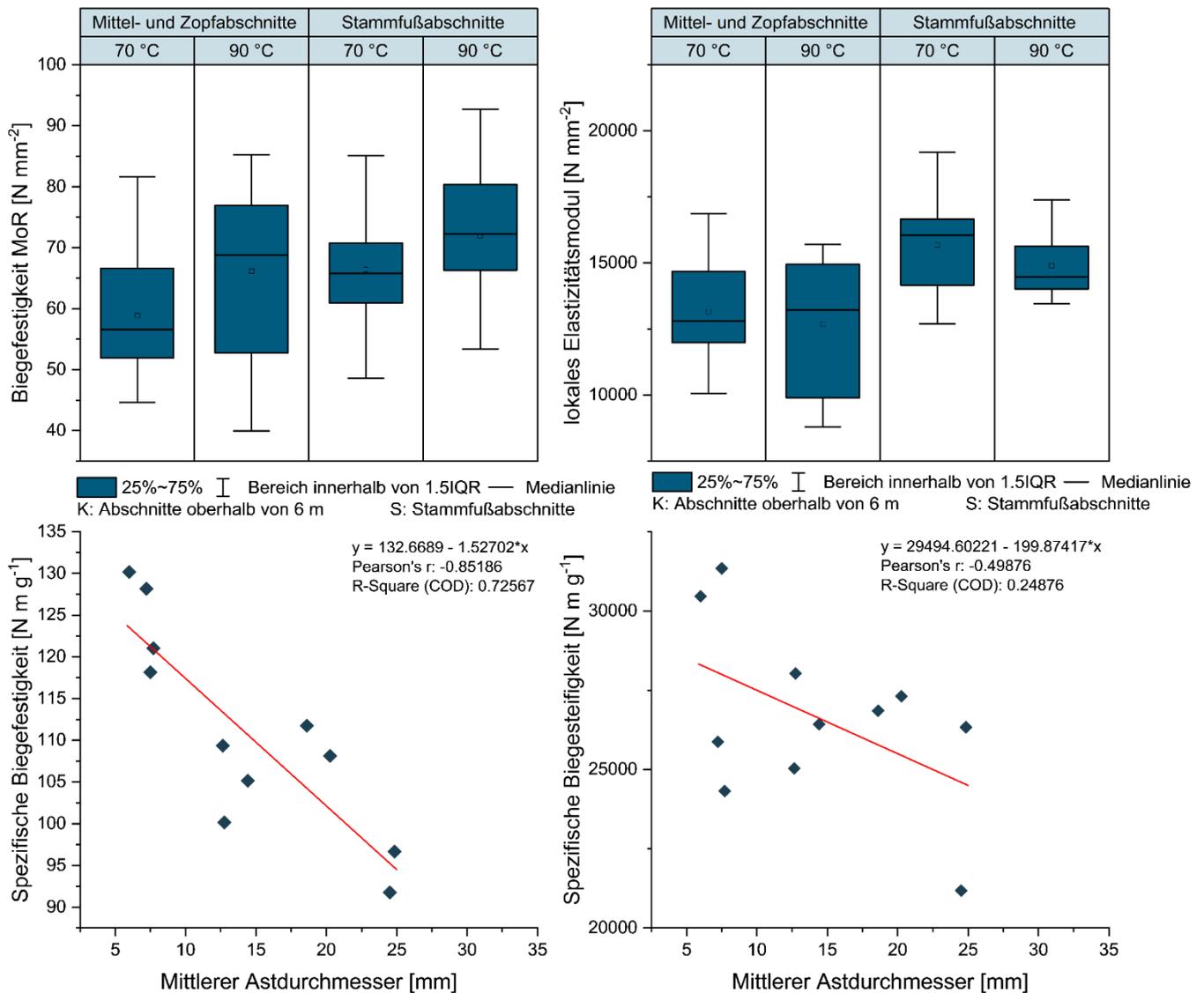


Abbildung 9: Absolute Werte der Flachkant-Biegeeigenschaften von 39 mm Furnierschichtplatten aus unterschiedlichen Stammsortimenten und wechselnder Vorbehandlung, sowie um die Holzrohichte korrigierte Biegeeigenschaften in Abhängigkeit der gemittelten Astigkeitswerte.

## Untersuchung der Plastifizierung

Um die im vorigen Kapitel untersuchte Wirkung der Vorbehandlungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen wurden weitergehende Analysen der Versuchsdaten durchgeführt. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, auch bei schlechterer visueller Furnierqualität könnte auch die Nutzung von oberem Stammabschnitten ermöglichen und die Ausbeute an Holzmaterial im Herstellungsprozess erhöhen. Dem gegenüber steht der energetische Mehraufwand in meistens offenstehenden Kochcontainern eine höhere Durchschnittstemperatur bereitzustellen. Zu diesem Zweck soll die Einflussgröße der Vorbehandlungstemperatur eingehender definiert werden. Für die Untersuchungsmaterialien altmärkischer Kiefer wurde die Zugfestigkeit als zusätzliche Größe erhoben. Untersucht wurden hierfür einzelne Furnierproben, ausgestanzt aus Splintbereichen der Stämme A – F. Zum einen konnte so die Einflussgröße von globaler Faserabweichung in ansonsten fehlerfreien Holzproben bestimmt werden (Abbildung 10), die nach Bestimmung der Probenrohichte mit der Vorbehandlungstemperatur als letzte verbleibende Einflussgröße herausgestellt wurde. Zur Beurteilung der

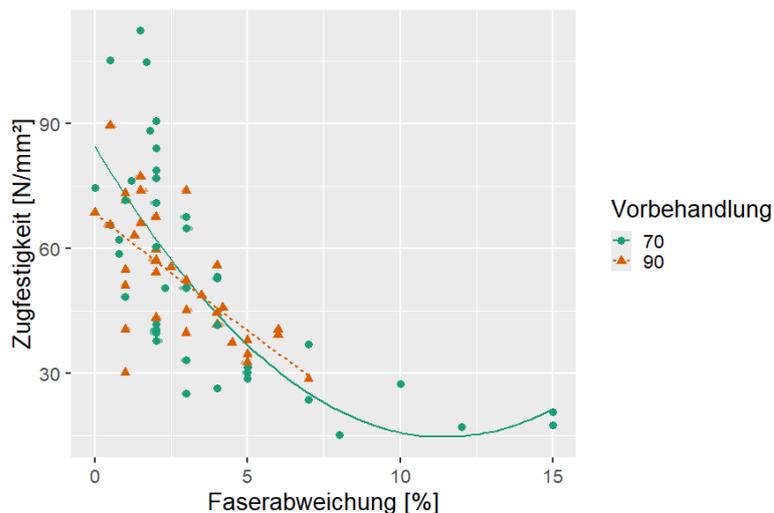


Abbildung 10: Die Zugfestigkeit von einzelnen Furnieren in Abhängigkeit ihrer Faserverläufe unter Berücksichtigung der Vorbehandlungstemperatur während dem Schälprozess.

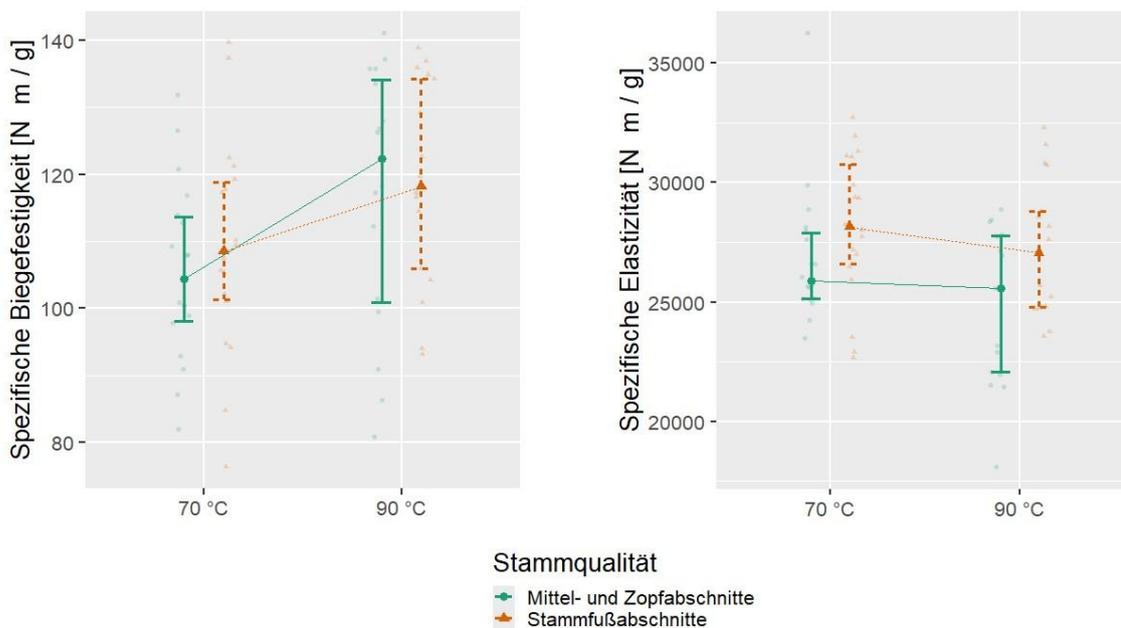


Abbildung 11: Die spezifischen Festigkeiten und Elastizitätswerte in axialer Plattenrichtung aus Flachkantbiegeprüfungen von 39 mm LVL-Platten unter Berücksichtigung von Vorbehandlungstemperatur und der Stammsortimente.

Effektgröße der Vorbehandlung wurden für das altmärkische Material die spezifischen mechanischen Eigenschaften der Biegefestigkeit und Elastizität in Faserrichtung genutzt. Die Zugprüfung erweitert die Betrachtung der mechanische Werte und liefert als Qualitätsbewertung am Zwischenprodukt eine Einschätzung inwiefern die Vorbehandlung mit erhöhter Temperatur den Holzkörper beeinflusst, ohne dass langwierige mikroskopische Auswertungen der Furnierrisse nötig sind. Die Furnierrisse sind im geschälten Furnier Ansatzpunkt für Einrisse, da sie in Abhängigkeit des Faserwinkels den Querschnitt der Zugprobe

schwächen. An Rissen besteht kein tangentialer Zusammenhalt im Holz mehr. Untersuchungen zur Verteilung der Zugfestigkeit haben mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Normalverteilung innerhalb der Untersuchungsstämme ausgewiesen. Für die Varianz wurde jedoch mit  $p < 0.5$  eine Inhomogenität festgestellt. Diese ist in der grafischen Darstellung Abbildung 10 leicht zu vermuten. Zur Definition der Effekte in einer multiplen Regressionsanalyse wurde der Faktor Faserabweichung als nichtlinear eingestuft und als Polynom berücksichtigt. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Nicht lineare Regressionsanalyse der Zugfestigkeiten von Einzelfurnieren in Abhängigkeit von Vorbehandlung, Rohdichte und Faserabweichung. Signifikanznotierung: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Koeffizient	Faktor	Standardfehler	Wahrscheinlichkeit (> t )	
(Interzept)	24,90	8,90	0,01	**
Vorbehandlung	-5,96	3,34	0,08	.
Dichte	0,07	0,02	0,00	***
Faserabweichung Poly(1)	-121,88	14,62	0,00	***
Faserabweichung Poly(2)	49,97	14,49	0,00	***
Angepasstes R2	0.54	Modell	0.00	***

Ohne eine Skalierung der Daten von Koeffizienten nach Mittelwert und auf Standardabweichung sind die Faktoren für Vorhersagezwecke in einer Funktion anzuwenden. Die Relationen zwischen den Koeffizienten sind über ihre Signifikanzwahrscheinlichkeiten abzuschätzen. Tiefergehende Darstellungen über eine Hauptkomponentenanalyse, um diese Relationen herauszuarbeiten, braucht es für die Zwecke des Vorhabens nicht. Die Vorbehandlung, deren Faktor sich auf die Steigerung der Temperatur von 70 °C auf 90 °C bezieht, hat bei der Zugfestigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit. Mit einem p-Wert von 0.08 bewegt sich der Koeffizient nahe der Plausibilitätsgrenze und sollte daher in seiner Wirkung analog der übrigen Faktoren interpretiert werden. Die Zugfestigkeit nimmt bei erhöhter Vorbehandlungstemperatur mit großer Wahrscheinlichkeit ab. Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse der Prüfung zum Biegeverhalten. Während die Dichte-bereinigten Werte des lokalen Elastizitätsmoduls ebenfalls einen negativen Faktor aufwiesen, ist die Festigkeit selbst mit einem p-Wert von 0.01 deutlich positiv beeinflusst.



Abbildung 12: Plattenquerschnitte von bei 90 °C vorbehandelten Schälstämmen (oben links und links Mitte) und bei 70 °C vorbehandelten Furnieren (Rest).

Je nach Belastungsachse und in Abhängigkeit des Kraftbereichs, ob elastische oder plastische Verformung, wirkt sich die Vorbehandlungstemperatur unterschiedlich aus. Für die Biegeeigenschaften verklebter Werkstoffe ist eine höhere Plastifizierungstemperatur positiv zu bewerten. Die visuelle Beurteilung der Querschnittsflächen in Faserrichtung zeigte für die 39 mm LVL-Platten aus 3,3 mm Furnierlagen deutliche mit Phenol gefüllte Schälrisse in Platten die bei 90 °C plastifiziert wurden. Die Querschnitte der bei 70 °C vorbehandelten Stämme zeigten rissfreie Querschnittsflächen (Abbildung 12). Dies deutet darauf hin, dass die erhöhte Plastifizierungstemperatur durch eine Erweichung der Lignin-reichen Mittellamellen bei der Beanspruchung im Schälprozess zu einem tieferen Aufreißen der Furnierbahn führt. Werden diese Risse mit unelastischem Phenolharz gefüllt steigen Festigkeit und Steifigkeit. Füllen sich diese Risse mit elastischerem Polyurethan, dass im hier gewählten Produkt eine

geringere Viskosität und ein besseres Eindringverhalten in die oberen Zellschichten aufwies, werden durch bessere Verklebungseigenschaften zusätzliche Scherkräfte aufgenommen. In der Folge steigt die orthogonale Biegefestigkeit und Scherfestigkeit entlang der Klebefuge. Die Druckfestigkeit in axialer Richtung wird überproportional durch das druckfestere Phenolformaldehyd gesteigert. In orthogonaler Richtung wirken die stärker verfüllten Fugen unabhängig vom Klebstoff als Materialaussteifung.

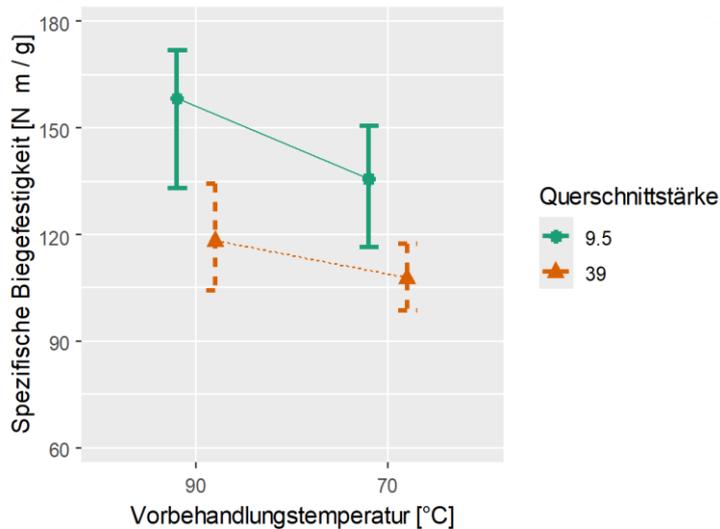


Abbildung 13: Spezifische Biegefestigkeit verschiedener Werkstoffquerschnitte im Vergleich.

Dieser Effekt der Rissverfüllung mag mit zunehmendem Plattenquerschnitt abgeschwächt wirken. Die Biegefestigkeitsdaten wurden daher mit dem Plattenquerschnitt als gruppierendem Faktor in einem linearen gemischten Modell aller PF-gebundenen Platten analysiert (Abbildung 13). Die spezifischen Festigkeiten hängen signifikant mit der Vorbehandlungstemperatur zusammen. Die Varianz eines solchen Modells wird zu 56 % dem Querschnitt zugeordnet der Effekt der Plastifizierung ist jedoch konsistent mit  $13.2 \text{ N m g}^{-1}$  Steigerung der spezifischen Biegefestigkeit als fester Effekt. Ein einfacheres Zwei-Faktor Modell kommt zu demselben Ergebnis.

### Überprüfung des Werkstoffverhaltens bei kraftfreien und kraftinduzierten Belastungen

Die Maßhaltigkeit von Platten ist eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz als Bauteil. Werkstoffinterne Spannungen, induziert durch unterschiedliche Faserverläufe einzelner Lagen und Feuchtedynamik, sind insbesondere bei umgeformten Werkstoffen wichtig. Veränderte Radien sorgen für zusätzliche Fehleranfälligkeit. Furnierlagenwerkstoffe eignen sich durch ihren lamellaren Aufbau und Flexibilität gut für geformte Teile. Für Kiefernurnierwerkstoffe sollten daher verschiedene Prozessparameter wie, Klebstofftyp, Aushärtungszeit und Lagenaufbau auf ihren Einfluss auf das Verformungsverhalten von Werkstoffplatten hin untersucht werden. Ein beispielhaftes Formteilwerkzeug wurde ausgewählt, dass über seine Geometrie verschiedene Verformungsfehler abbilden kann.

Die Klebstofftypen Phenolformaldehydharz und Polyurethan, die bereits in den vorherigen Versuchen zum Einsatz kamen wurden auch hier eingesetzt, um ihren Einfluss auf das Verformungsverhalten nach der Plattenumformung zu beurteilen. Je Variante wurden zwei Platten hergestellt um ein Screening durchzuführen. Als Prozesstechnische Anpassung wurde an der Formteilpresse für jeden Klebstofftyp eine weitere Variante erzeugt, indem nach  $130 \text{ °C}$  (PF) und  $110 \text{ °C}$  (PU) – Heißpressen (Presszeit 20 Minuten) entweder direkt Entformt wurde, oder ein Rückkühlschritt durchgeführt wurde, während dem die Presse auf  $40 \text{ °C}$  heruntergekühlt wurde und dann diese Temperatur für 5 Minuten gehalten wurde (Presszeitverlängerung 20 Minuten). Zum Einsatz kam 1 mm dickes Kiefernurnier in 8 Lagen, das nach visueller Qualität vorsortiert wurde. Sondervarianten stellten eine Platte mit zwei Sperrlagen (2. und 7. Lage), sowie eine Variante für die gezielt eine Holzfehlerhäufung auf einer Plattenseite im Umformungswinkel erzeugt wurde. Die Geometrie ist in Abbildung 14 dargestellt.

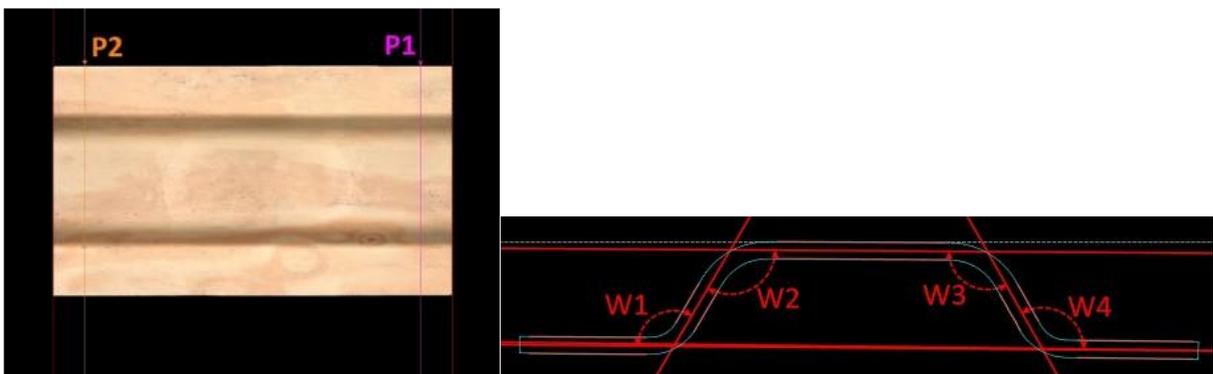


Abbildung 14: Formteilgeometrie aus Keyence 3D-Scanner mit Messpunkten für Winkelbestimmung und Querschnitt einer Messebene.

Nach Besäumen durchliefen alle Formteile über zwei Wochen einen Klimazyklus von 7 Tagen bei  $40 \text{ °C}$  und 30 % relativer Luftfeuchte, als heiß-trockenes Klima, gefolgt von 7 Tagen bei  $20 \text{ °C}$  und 85 % relativer Luftfeuchte als feuchtes Klima. Die wechselnde hygrische Dynamik sollte erwartungsgemäß Verformungen in

mehreren Dimensionen zur Folge haben. Diese wurden mit einem 3D-Laserscanner aufgenommen und konnten digital sichtbar gemacht werden. Zur Beurteilung der Abweichungen dient der Vergleich zu einem idealisierten Formteil, das digital über eine CAD-Anwendung erstellt wurde. Um neben einer optischen Beurteilung über die gesamte Fläche eine messbare Metrik beurteilen zu können, wurde in den 3D-Messdaten ein Vermessungsmuster definiert. Über zwei Messstreifen wurden die Winkel in den umgeformten Radien erfasst. Die Beträge der Winkeländerungen zu den idealen 120 ° im Formteileradius wurden für jeden Messstreifen summiert und als Maß der Verformung genutzt. Je Platte sind somit zwei Verformungswerte über die zwei Messpunkte vorhanden. Dreidimensionale Laserscans wurden jeweils eine Stunde nach dem Entformen (als Springback bezeichnet), nach zwei Tagen und nach sieben Tagen im Klima. Je Werkstück sind somit fünf Messzeitpunkte aufgezeichnet worden.

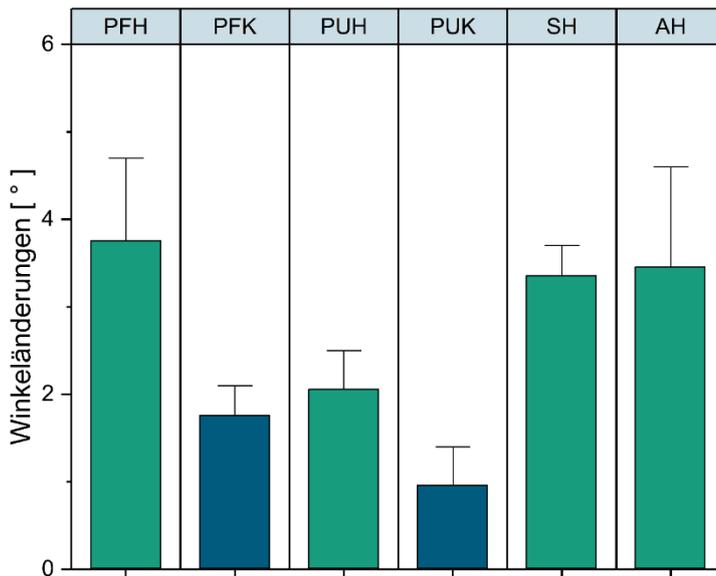


Abbildung 15: Verformung innerhalb einer Stunde nach dem Pressvorgang. H: Heißpressen ohne Rückkühlung; K: Heißpressen mit Rückkühlung; S: Furnierschichtholz mit gesperrten Lagen; H: Asthäufung als konzentrierte Holzfehlerstelle.

Als erster und vielleicht wichtigster Indikator für das Werkstückverhalten nach einem Pressprozess dient die Ermittlung des Springback. Die kurzfristige Verformung eines Formteils nach Entnahme aus der Presse gibt Aufschluss über Einfluss des Klebstoffsystems und der Presszeit, bzw. des Prozessschrittes der Rückkühlung. In Abbildung 15 sind die Werte der höchsten Winkeländerung beider Messpunkte als Datenpunkte verwendet worden und die durch die doppelte Variantenherstellung erhaltenen Standardfehler als Streuungsbalken dargestellt. Ein Unterschied zwischen den Heiß entnommenen Formteilen und den bereits rückgekühlten ist ersichtlich. Dieser ist sowohl bei PF- als auch bei PU-gebundenen Formteilen zu beobachten. Die kurzfristige Verformung liegt nach Rückkühlung jeweils bei ca. 50 % der Werte direkt nach dem Heißpressen entnommener Formteile. Hierbei ist sowohl die Plastifizierung des Holzes zu berücksichtigen, als auch eine schnelle Wasseraufnahme aus der Luft bei heißen und trockenen Holzteilen. Bei

Entformung im noch plastifizierten Zustand kann eine Verformung leichter Eintreten. Das In-Form-halten während der Abkühlung versetzt das Formteil zurück in einen nicht plastischen Zustand. Aus den Ergebnissen von AP 5.2 geht hervor, dass das verwendete PF-Klebstoffsystem als äußerst spröde zu charakterisieren ist, während die PU-Klebefuge noch stärker elastische Eigenschaften aufweist. Ebenfalls ist im Heißpressprozess von einem stärkeren Schwinden des PF-Klebstoffs auszugehen, da die Klebstoffreaktion als Kondensation unter Wasserabgabe und damit Volumenverlust erfolgt. Diese Eigenschaften erklären die Springback-Unterschiede zwischen PF- und PU-gebundenen Formteilen direkt nach dem Pressvorgang. Die ebenfalls ohne Rückkühlung hergestellten Varianten mit gesperrten Lagen und mit Holzfehler-Häufung unterschieden sich nicht von der mit fehlerfreiem Furnier hergestellten PFH-Variante.

Die Verformung während der zweiwöchigen Klimalagerung ist in Abbildung 16 dargestellt. Die beiden Messpunkte eines Formteils zur Ermittlung der Formteilwinkel sind durch unterschiedliche Symbole ausgewiesen. Im Vergleich der verschiedenen PF-Varianten fällt auf, dass, obwohl die Variante mit Rückkühlung den geringsten Springback hatte, während der heiß-trockenen Lagerung große Formveränderungen stattgefunden haben. Auch zwischen den einzelnen Messpunkten auf dem Formteil haben sich mitunter deutliche Differenzen in der Winkeländerung ausgebildet. Ob diese sich als Verwindung in der Plattenebene ausgebildet haben lässt sich nur anhand von Verformungs-Heatmaps der einzelnen Messlinien nachverfolgen. Die Variante mit gezielt gehäuften Ästen fällt nicht besonders negativ auf, nur nach dem Klimawechseln scheint sie länger als die übrigen PF-Varianten gebraucht zu haben, um einen Rückgang der Verformung zu erreichen. Die Variante mit gesperrten Lagen zeigt trotz vergleichbarem Springback-Verhalten eine deutliche Reduktion der Verformung im heiß-trockenen Klima und erreicht nach Wechsel in höhere Luftfeuchte schneller und sicherer die Ausgangsform. Schon wenige gesperrte Lagen können einen deutlichen Ausgleich der Quell- und Schwindbewegung erreichen.

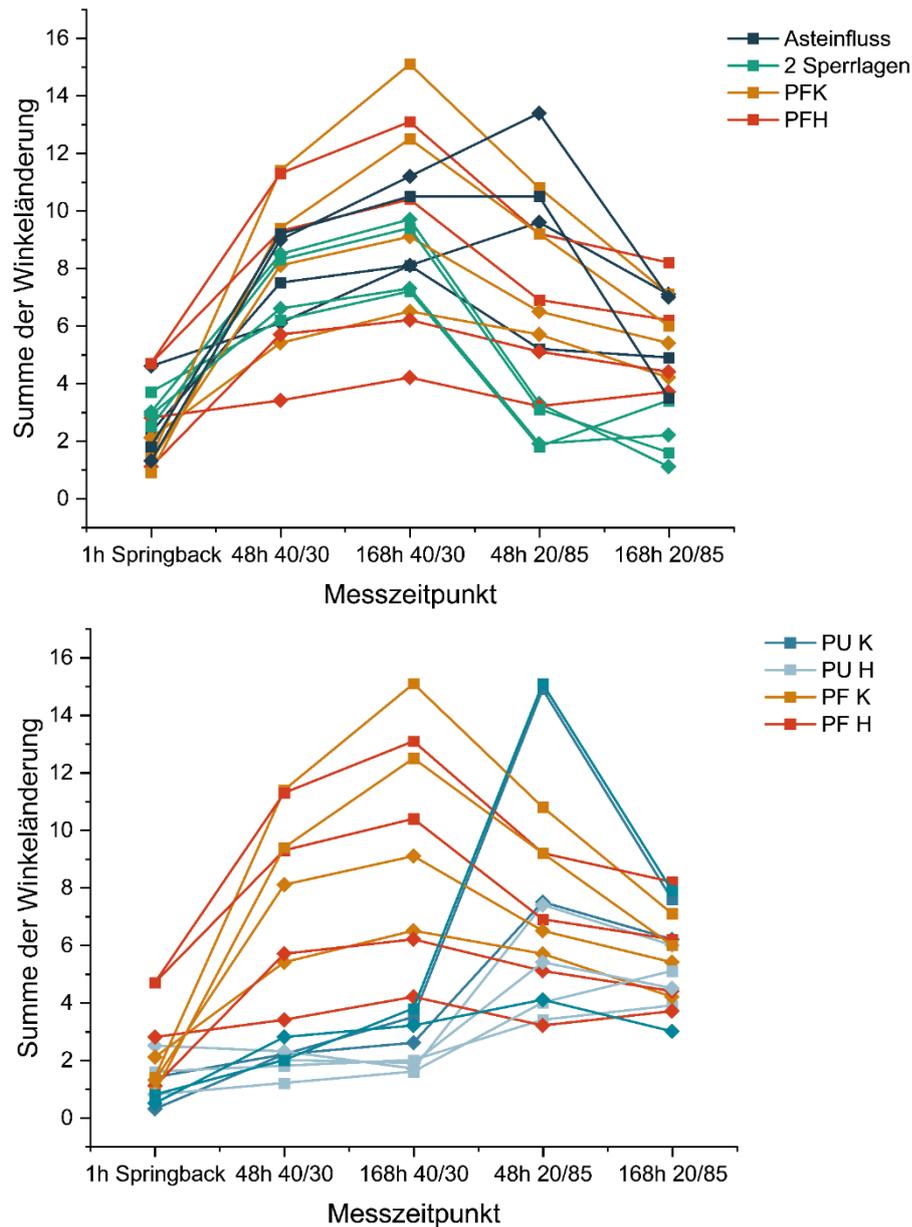


Abbildung 16: Verformungsverhalten von Furnierschichtholz während eines zweiwöchigen Klimazyklus. Abbildungen mit Phenolformaldehyd-gebundenen Formteilen mit Varianten zu Holzfehlern und Lagenaufbau oben und Polyurethan-gebundene Formteile im Vergleich zu PF unten. Formteile sind durch die Symbolformen gekennzeichnet.

Im Vergleich zu den PF-Varianten verhielten sich PU-gebundene Formteile grundlegend anders. Wie in Abbildung 16 nachzuerfolgen, stellte sich während der heiß-trockenen Lagerung keine deutliche Verformung ein. Lediglich ein Angleichen der Varianten mit und ohne Rückkühlung deutet auf ein Arbeiten des Holzes. Während der Wechsel auf 85 % Luftfeuchte und Normaltemperatur bei den PF-Varianten zu einer Rückentspannung der Verformung geführt hat, stieg hier die Verformung der PU-gebundenen Varianten deutlich an. Die Rückgekühlte Variante ist hierbei das Extrembeispiel.

Dieser Unterschied im Verformungsverhalten ist maßgeblich auf das unterschiedliche Reaktionsverhalten der Klebstoffsysteme zurückzuführen, kann aber auch durch eine zellwandmodifizierende Wirkung durch das PF-Harz, welche eine Rückquellung verhindern kann, begründet werden. Die Holzfeuchte der Furniere vor dem Klebstoffauftrag lag bei  $6 \pm 1$  %. Während das PU-System einen Teil der im Holz vorhandenen Wassermenge zur Aushärtereaktion nutzen konnte, wurde sie bei PF durch die wasserbasierte und -ausbildende Reaktion weiter erhöht. Der Heißpressprozess reichte nicht aus um den PF-gebundenen Formteilen die restliche Wassermenge zu entziehen. Im heiß-trockenen Klima setzte somit eine Schwindbewegung ein, während beim PU im feuchteren Klima eine leichte Quellung stattgefunden hat.

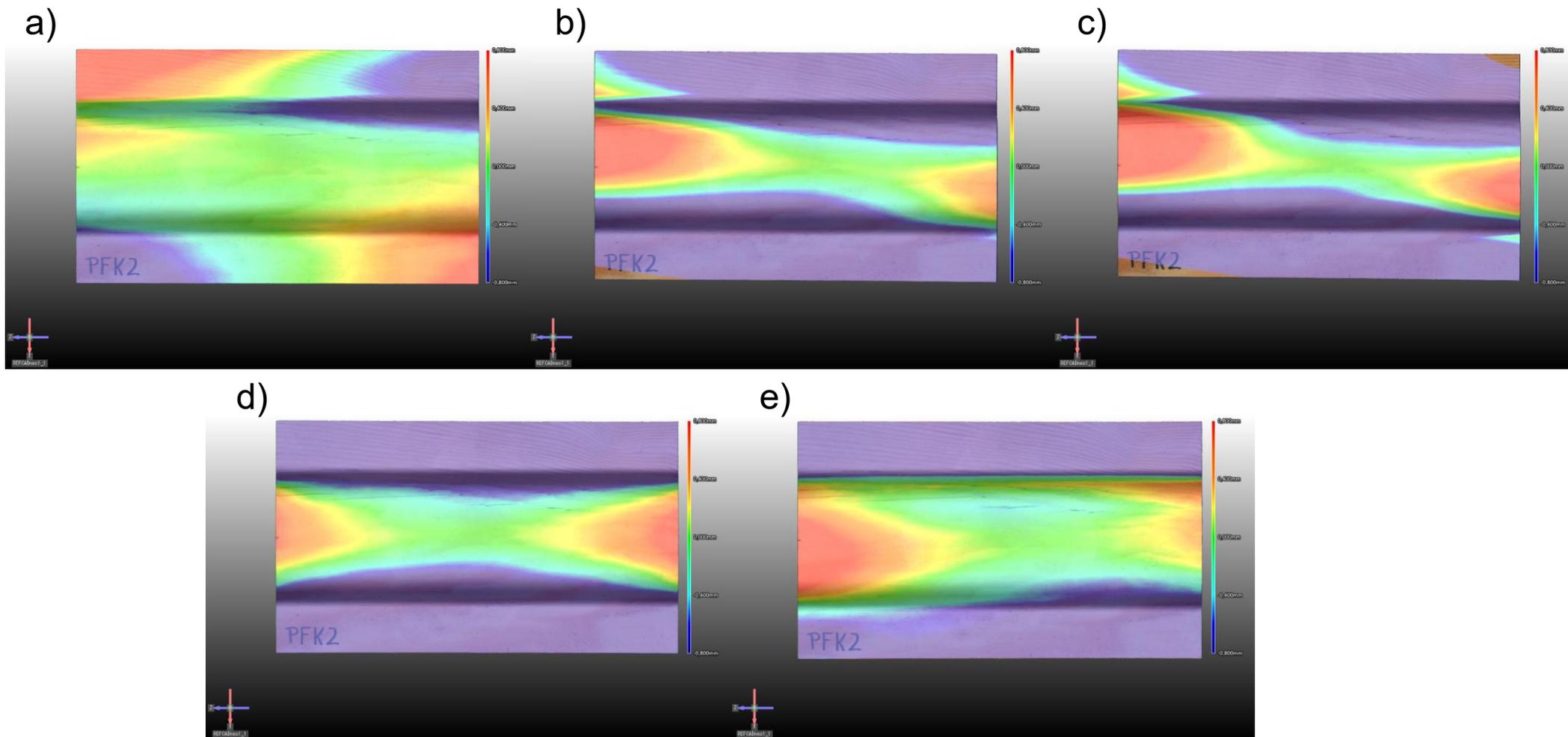


Abbildung 17: Heatmaps des Verformungsverhaltens von PFK. Skala für Abweichungen nahe 0 (grün) und Werten von 0,8 mm (rot) bis -0,8 mm (blau) Abweichung aus der Idealebene. a) Springback b) 48 h bei 40/30 c) 168 h bei 40/30 d) 48 h bei 20/85 e) 168 h bei 20/85

Die Ergebnisse zur Formteilherstellung legen nahe, dass Kiefernurnier gut für den Prozess geeignet ist. Eine Vorsortierung, insbesondere nach Harzigkeit, ist jedoch auch hier bei Heißpressprozessen durchzuführen (Siehe AP 5.2). Ebenso ist grundsätzlich ein PU-Klebstoffsystem durch seine geringere Verformung zu bevorzugen, eine genaue Überwachung der Prozessparameter und der klimatischen Bedingungen sind dennoch unumgänglich, um Quell- und Schwindbewegungen zu minimieren.

## Arbeitspaket 2: KiefernStolz Waldbau

Bearbeiter: Hergen Knocke

### Abkürzungsverzeichnis

ALh/ Hlb	Anderes Laubholz hoher Umtriebszeit/ Hartlaubebäume	KWB	Klimatische Wasserbilanz
ALn/ Wlb	Anderes Laubholz niedriger Umtriebszeit/ Weichlaubebäume	nFK	nutzbare Feldkapazität
BHD/ DBH	Brusthöhendurchmesser/ <i>diameter at breast height</i>	RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
BWI/ NFI	Bundeswaldinventur/ <i>National Forest Inventory</i>	RVR	Rahmenvereinbarung Rohholzsortierung Deutschland
DSW	Datenspeicher Wald	SEA95	Standortserkundungsanleitung 1995
Efm	Erntefestmeter ( <i>volume under bark</i> )	SWB	Standortswasserbilanz
KA5	Kartieranleitung 5. Auflage	Vfm	Vorratsfestmeter ( <i>volume over bark</i> )
KSH	Kiefernstarkholz	WET	Waldentwicklungstyp
		WSMP	Waldschutz-Meldeportal
		WZE	Waldzustandserhebung

### 1.2.1 Zielsetzung des Teilvorhabens

Das Vorhaben zielt darauf ab, die nachhaltige Nutzung von Starkholz > 50 cm BHD der Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris* L.; im Folgenden: Kiefer) in Deutschland zu verbessern und zu bewerben. Durch eine holistische Analyse aktueller und zukünftiger Bestände sollen waldbauliche Strategien entwickelt werden, die nationalökonomisch opportune Wertschöpfung mit ökologischer Nachhaltigkeit verbinden. Zudem sollen Marktsignale gesendet werden, die den Aufbau regionaler Holzverwertungskapazitäten für Kiefernstarkholz (KSH) unterstützen (z.B. Krings 2023) und nationale Wertschöpfung fördern.

Auf Basis der dritten Bundeswaldinventur (2012) wird die künftige Waldentwicklung zugunsten einer Abschätzung des Holzaufkommenspotenzials modelliert. Die Altersstruktur verschiebt sich durch das Einwachsen von etwa 80-jährigen Aufforstungen in die Zielstärkeklasse, wodurch die KSH-Vorräte zunehmen. Gleichzeitig bergen Trockenstress und Schädlingsbefall Sterberisiken, die in aussagekräftigen Vorhersagen einfließen müssen.

Zwei neue Modellbestandteile, die klimawandel- und standortssensitives Wachstum sowie Absterben berücksichtigen, werden in den WaldPlaner-Simulator einbezogen und dienen dazu, szenarienbasiert verschiedene Waldentwicklungspfade vorherzusagen. Mit deren Hilfe kann der Einfluss auf das Holzangebot und den Umbaufortschritt bewertet werden. Um dem unausgeglichene Altersklassenaufbau zu analysieren, werden aktuelle, tatsächliche Waldbaukonzepte als Eingangsgrößen der Simulation nachempfunden.

Besonderes Augenmerk liegt auf der Dynamisierung der Standortkartierung bei klimawandelbedingter Standortdrift und der Integration standortgerechter Mischbaumarten in Kiefernwälder im Rahmen eines Waldumbaus. Schirmschlagartige Hiebe und gestreckte Ernteverfahren sollen lichtbedürftige und schattertragende Baumarten gleichermaßen fördern, wodurch Biodiversität und Klimastabilität erhöht werden.

Durch die enge Verzahnung von waldbaulichen, ökonomischen und holztechnologischen Analysen soll das Projekt dazu beitragen, langfristige Nutzungskonzepte für Kiefernstarkholz zu entwickeln. Diese sollen Forstbetrieben und der Holzindustrie helfen, auf sich verändernde Marktbedingungen und klimatische Herausforderungen proaktiv einzustellen.

### 1.2.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete

#### *Potentialabschätzung gegliedert nach Stärkeklassen und Qualitäten*

Nach etwa einem Jahr war die Datenakquise abgeschlossen. Das untersuchte Projektgebiet für dieses Arbeitspaket umfasst (vgl. Abb. 1) die Länder Brandenburg (BB), Hessen (HE), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Niedersachsen (NI), Sachsen-Anhalt (ST) und Schleswig-Holstein (SH).

Daten-Bereitstellung auf Basis der sechs KiefernStolz-*letter of intent*:

- Rohdaten der BWI<sup>3</sup>, jedoch ohne Koordinaten
- Rohdaten der Waldzustandserhebungen (WZE)
- Forsteinrichtungswerke der Landeswälder; z.T. DSW-Fortschreibungen des Nicht-Landeswaldes
- separierte Ästungsangaben in den neuen Bundesländern (werden im DSW2 nicht mehr aktualisiert)
- Standortdaten des Staats- und Nichtstaatswaldes (Kartierungen, Modellierungen)

- Waldbau-Richtlinien des Landeswaldes zur Baumartenwahl (WET), Begründung, Pflege (Ziel-Schlussgrade) und Ernte sowie Zielstärken- oder Hiebsreifedefinitionen
- Ertragstafelangaben

Daten-Akquise auf eigene Veranlassung:

- Forsteinrichtungswerke des Bundeswaldes und großer, kieferndominierter Körperschaftsbetriebe (Klosterforsten Hannover, Stadforstamt Rostock)
- NWE-Kulissen der Landeswälder
- Vorschätzung der Standortskartierung für den Nichtstaatswald Niedersachsens (Schirrmeyer et al. 2023)
- Bodenübersichtskarte 1 : 200.000 (BÜK200)
- Rohdaten (Schadensmeldungen) des Waldschutz-Meldeportals für die Landeswälder HE, NI, SH, ST
- Tageswerte historischen und zukünftigen Wetters (Hübener et al. 2017; Suttmöller et al. 2021)
- aktuelle Ertragstafeln nach Albert et al. (2024; Nuske et al. 2022)

Somit wurde die Projektkulisse auf eigenes Betreiben verbessert und der Datenstand auf den gesamten Staatswald (Bundes- und Landesforsten) ausgedehnt. Nicht zur Verfügung gestellt oder ermittelt wurden Ästungsangaben des Nichtstaatswaldes (Bescheidaten werden z. B. nach Nds. AktO nicht länger als 10 Jahre archiviert und sind vertraulich) sowie exakte Koordinaten der BWI<sup>3</sup>. Letztere waren aber für eine Verschneidung der Trakte mit den genauen Standortinformationen zur bestmöglichen und detaillierten Prognose der Waldentwicklung notwendig. In einem Vergleich führte das vTI für Waldökosysteme diese Verschneidung schließlich auf Basis der Standort- oder Flurstücks-/ Forstadress-Polygone des Gesamtwaldes als externe Serviceleistung durch.

Zur bestmöglichen Prognose wurde ebenfalls ein klima- und standortsensitives Oberhöhenbonitäts-Modell einbezogen (Schmidt 2020; Schick et al. 2023), für dessen Anwendung die föderalen Standortskartierungswerke vereinheitlicht werden mussten. Abb. 1 zeigt den Stand nach Übersetzung und Tab. 1 gibt den Schlüssel an.

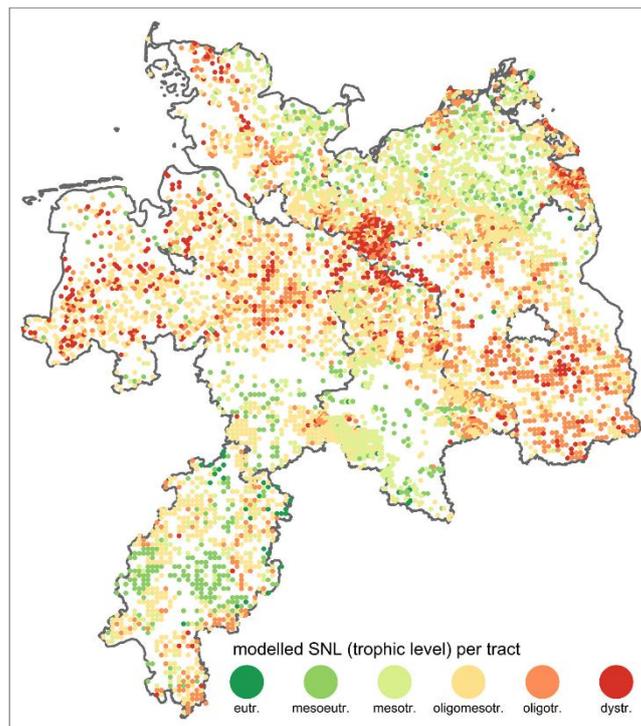


Abbildung 1: Modelled SNL (soil nutrient level) per NFI (National Forest Inventory)-tract in 2012. Key adapted from Schmidt et al. (2015). SNL per plot is reported as fitted value, i. e. the most plausible score, resulting from an estimated cumulative logit model (Fahrmeir et al. 2013, pp. 312–316) with including plot number as random intercept component. This modeling step avoids manipulations, such as empirical mean calculation, that are not adequate for the ordinal scale of the SNL outcome. Note that space between points (tracts) does not state forest cover but sampling density

Tabelle 1 Overview of harmonized soil nutrient level systems, adapted from Schmidt et al. (2015)

key	denotation	key NI, SH	key BB, MV, ST	key HE
1	eutrophic	6	RC, KC	CE
2	eumesotrophic	5+, 5	R	EU
3	mesotrophic	5-, 4+	K	GM
4	oligomesotrophic	4, 4-, 3+, 3	M+, M, M <sub>v</sub> , M-	ME
5	oligotrophic	3-, 2+	Z+, Z, Z-	SM
6	dystrophic	2, 2-, 1	A+, A, D	OT

Weil zunächst hypothetisiert wurde, dass geästete Kiefernbestände die Wertschöpfung erhöhen können und längere Produktionszeiträume rechtfertigen, fokussierte sich die Arbeit zunächst auf die Baum- und Bestandesqualitäten. Vor dem Hintergrund passender Bestandesalter und Beschäftigtenüberhängen der Staatsforstverwaltungen wurden viele Kiefernbestände zwischen 1980-2000 geästet (vgl. Knocke et al. 2023). Die vermutete, große Anzahl der geästeten Bäume in Staatsbesitz könnten demnach im Stande sein, den Waldbau maßgeblich zu verlangsamen. In diesem Zusammenhang konnte das Projekt KiefernStolz eine **vierte Ästungswelle** identifizieren, die den **drei vorhergewesenen Ästungswellen** nach Mayer-Wegelin (1936, p. 4) zwischen (1.) 1780-1800, (2.) 1860-1880, sowie (3.) 1920-1940 folgte.

Leider haben die Forstreformen der Zehner Jahre des 21. Jahrhunderts jedoch dazu geführt, dass sich die Forstadressen nicht nachvollziehbar geändert haben. Trotz versuchter Migration von Informationen des DSW1 auf den DSW2, insbesondere durch die Landesforst MV, konnte die Umbenennung von Abteilungen nicht zugeordnet werden. Während die meisten Bundesländer eine fiktive Landeswald-Abt. 23 nach Forstreform meistens als Abt. 2023 eingerichtet haben und die Ästungsangaben weiterhin unter der Zustandsbeschreibung fortgeschrieben ist, wurde in einigen Bundesländern die fiktive Landeswald-Abt. 23 nach Forstreform z.B. als Abt. 1834 geführt, ohne das Zustandsmerkmal ‚Ästung‘ zu beinhalten. Dabei gibt es keinen digitalen Übersetzungsschlüssel für diese Umbenennung.

Andere öffentliche Forstbetriebe, wie z.B. die Klosterforsten Hannover, können zwar Konstanz bei der Forstadressbezeichnung vorweisen, aber führen im Lagerbuch/ Tabellenband keine Ästungsinformationen mehr. Letztlich konnte auf Basis einer internen Liste der Landesinventurleiter, die für die Neuen Bundesländer anlässlich der BWI<sup>2</sup> (Stichtag 01.10.2002) vor den Forstreformen *nur an den Trakten* manuell Lager-/ Wirtschaftsbücher nach Ästungsmerkmalen abgeprüft hat, eine Information für den Landeswald zugeordnet werden (Knocke et al. 2023).

Letztlich bestehen bei den Tabellenwerken der Forsteinrichtung, die innerhalb einer Buchungseinheit (Forstadresse) nicht räumlich explizit sind, weitere Herausforderungen, wie **bestandesweise Ästungsinformationen**, die an **einzelbaumweise Stichprobenobjekten** der BWI **angehängt** werden sollen. Näherungsweise haben wir nicht verortbare Hilfsflächen eines Bestandes (Böckmann et al. 2000) auf die gesamte Bestandesfläche ausgedehnt und nur Individuen der baumsoziologischen 1.-3. Klasse nach Kraft (1884) als Merkmalsträger ‚Ästung‘ versehen.

Die Potenzialabschätzung anhand der BWI<sup>3</sup> ergibt, dass **im Projektgebiet etwa 77 % der deutschen Kiefernfläche** liegen, während es **nur knapp 40 % des deutschen Waldes** umfasst. Der durchschnittliche Kiefern-Bestand wurde zwischen 1939 und 1955 durch Pflanzung begründet, ist stammzahlreich erwachsen und wurde mäßig durchforstet. Flächen- und vorratsmäßig stockt er in ostdeutschen Bundesländern auf armen bis mittleren Standorten der planaren Höhenstufe bei ebenem bis leicht geneigtem Gelände.

Im Jahr 2012 sind im Projektgebiet bereits 5 % als KSH > 50 cm BHD zu bezeichnen (entspricht 24,4 Mio. m<sup>3</sup>); aber nur etwa 1 % des gesamten Kiefern-Holzvorrates wurde von den BWI-Messtrupps (konservativ) als geästet angesprochen. **Nach Verschneidung** der o.g. Ästungsinformationen der staatlichen Forsteinrichtungswerke, und zwar nur derer des Staatswaldes, **verfünffacht sich der geästete Vorrat des Gesamtwaldes** und beträgt im Staatswald je nach Land bis zu 10 %. Betrachtet man, dass in den 24,4 Mio. m<sup>3</sup> auch nicht-hiebsreife Stämme enthalten sind, die im Staatswald erst ab 55 cm BHD als zielstark definiert werden (und lässt außer Acht, dass der Nichtstaatswald ggf. noch höhere Zielstärken haben könnte), waren 2012 immerhin noch rd. 11,3 Mio. m<sup>3</sup> Kiefern reif.

Diese bereits 2012 hiebsreife Menge, deren Nutzung man gutachtlich-waldbaulich auf etwa 20 Jahre strecken könnte, steht im Rahmen einer konservativen Schätzung (Umrechnung Vfm in Efm mit Faktor 0,8) mit jährlich rund 453 Tsd. Efm zur Verfügung. Dabei sind die „Einwachser“ aus dem Durchmesserbereich < 50 cm nicht berücksichtigt, die massiven Nachschub leisten werden. Ebenfalls sind Hiebsmassen aus Altdurchforstungen nicht berücksichtigt, die ebenfalls bereits KSH enthalten können.

Weil das Modell zur inneren Astigkeit (Schmidt 2002) keine Qualitätsklassen gem. RVR ausgibt, wurde mit den Bestandessortentafeln von Offer & Staupendahl (2009) gearbeitet. In Abhängigkeit von drei gutachtlich zu taxierenden Wertklassen, enthalten Bestände der Wertklasse 1 (geästet oder ansonsten feinastig) und Wertklasse 2 (normale Bestände) beide Wertholz der Qualität A, das sich nur im Anteil je Bestand unterscheidet. Die Wertklasse 3 (grobästige oder z.B. geschälte Bestände) enthält kein Wertholz.

Tabelle 2 Anteile von Kiefern-Stammholz der RVR-Qualitätsklasse A nach Wertklassen (Offer & Staupendahl 2009) ungeachtet vom Ästungsstatus

Wert- klasse	Durchmesser Grundflächenmittelstamm [cm BHD]	Anteil Stammholz Qualität A [%]
1	44	7,6
2	44	1,4
3	44	0
1	54	14,9
2	54	2,6
3	54	0

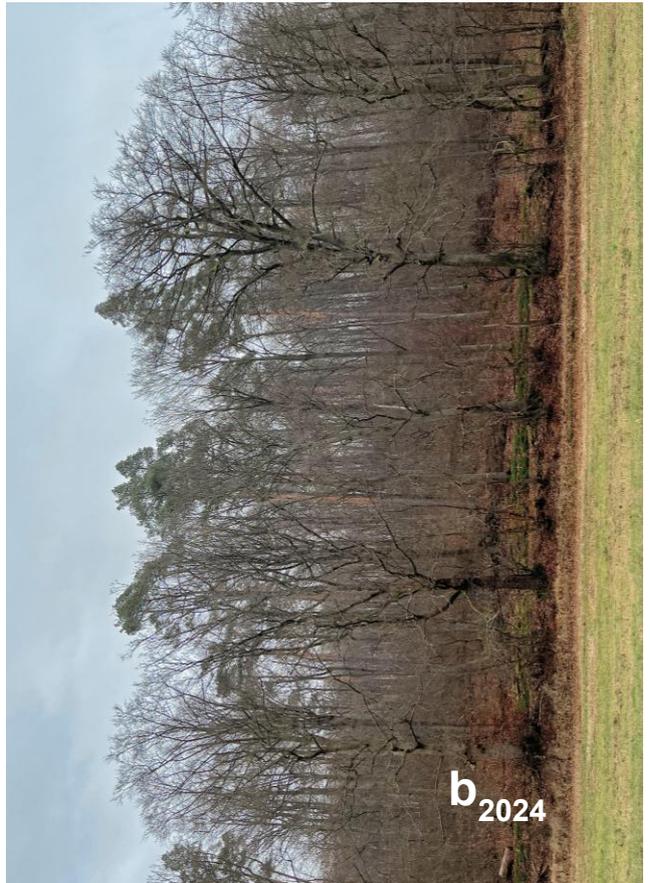
Tabelle 2 verdeutlicht, dass auch in nicht-geästeten Beständen mit Wertholz zu rechnen ist und die Qualität der Bestände auch allgemein von Feinästigkeit durch innere (z.B. Genetik) oder äußere (z.B. Nachbarschaftsbeziehung, Mikrostandort) Faktoren bestimmt wird. Die **Bereitstellung von Kiefernstarkwertholz** ist jedoch mit **hohen Transaktionskosten im Forstbetriebsdienst** verbunden, weil **Ästungsnachweise zwar auf Bestände** bezogen sind, zum Verkauf jedoch **wertholzhaltige Einzelstämme** identifiziert werden müssen. Dieser Prozess setzt eine **vollständige okulare und im Vergleich zu einer Durchforstung zeitintensivere Ansprache einer Hiebsfläche** voraus. Die mitunter herausfordernde Vermarktung von Koppelprodukten (z.B. Nutzschild- (Paletten-) und Industrieholz) sowie erhöhten Holzerntekosten bei Sammelhieben seien an dieser Stelle erwähnt.

Für eine statistische Unverzerrtheit und Symmetrie wäre im Übrigen nicht nur eine Recherche von potenziell qualitätserhöhenden Ästungs-, sondern auch qualitätsmindernden Harzungsinformationen vonnöten. Dies würde das Kollektiv der fortzuschreibenden Bestände nicht nur einseitig hinsichtlich ihrer Zielstärke anheben, sondern auch bei grobästigen, geschälten, instabilen oder Harzlachten-versehenen Beständen in der Hiebsreifedefinition absenken.

Für eine genaue Bezifferung der Stärke- und Qualitätsklassen nach Waldbesitzart verweisen wir auf die Kalkulationsprogramme von Offer & Staupendahl (2009) oder Fuchs et al. (2023).

### ***Fortschreibung und Schätzung des Kiefernholzaufkommens für die nächsten 50 Jahre***

Die nachfolgenden perspektivgleichen Bildpaare veranschaulichen exemplarisch eine Waldentwicklung hin zu Schatt- oder Lichtbaumarten, wie sie dem simulierten Holzaufkommen zugrunde liegt. Sie umspannen Zeiträume von 30 bis hin zu 94 Jahren. Baum-Nr. 1036 (Buche) in Abb. 2a und Baum-Nr. 36 (Kiefer) in Abb. 2d stellen dabei dasselbe Individuum dar. Die Waldentwicklung unter Minimierung des Kiefernanteils (Abb. 2a, b) und Maximierung des Kiefernanteils (Abb. 2c, d) spannt damit einen Unsicherheitsraum auf, in dessen Leitplanken sich die „wahre“ Waldentwicklung darstellen könnte.



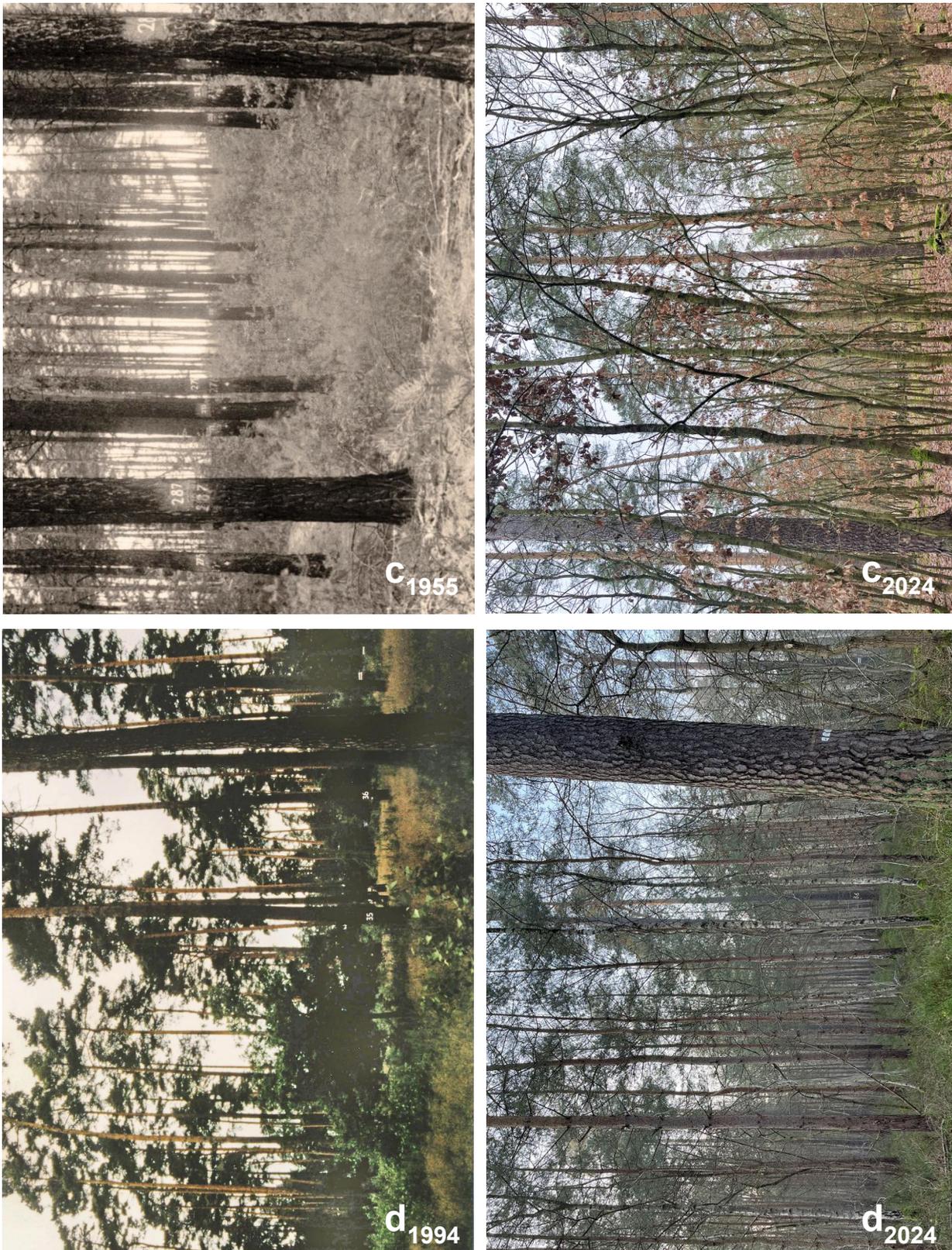


Abbildung 2 Versuche der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt und ihrer Vorgängerinstitutionen mit Waldumbau-Bezug (Angaben zu Kiefer und Oberstand): Perspektivgleiches Bildpaar der Versuche a und b Rotenburg (Fulda) 1245<sup>I</sup> (Nentershausen 45; Werte 1934/ 2024; Alter: 94/ 180 a, Ernte-Start 2005 (161 a), D-Grad/ ZSN, SI: 27,8/ 29,3 m, G: 14,9/ 4,5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, M: 45,5/ 20,6 %, aktiv 1914-heute), c Serno 138<sup>III</sup> (Anhalt 1244a2; Werte 1955/ 2024; Alter: 75/ 157 a, kein Ernte-Start, B-Grad/ ADF, SI: 24,0/ 22,0 m, G: 23,4/ 17 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, M: 100/ 100 %, aktiv 1929-2007, Aufgabegrund: Parzellengröße) und d Fuhrberg 278<sup>I</sup> (Werte 1994/ 2024; Alter: 110/ 140 a, Ernte-Start 1988 (104 a), L I-Grad/ ZSN/ ADF, SI: 28,6/ 23,3 m, G: 16,3/ 3,1 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, M: 100/100 %, aktiv 1988-2023, Aufgabegrund: Zweckerfüllung) gemäß Versuchsakten (NW-FVA 2025). Zur Versachlichung wurden Personen in den Bildern mithilfe der KI-Funktion der Software Adobe Photoshop ® entfernt (Behandlung über die Zeit als Grad nach VDFV (1902), a: an-num, ADF: Auslesedurchforstung bzw. -läuterung, G: Bestandesgrundfläche, M: Grundflächenmischungsanteil, SI: site index als absolute Oberhöhenbonität im Alter 100, ZSN: Zielstärkennutzung).

Nach dem zeitlich-räumlichen Verschnitt von Standorts- und Forsteinrichtungsdaten mit den Stichprobenobjekten der BWI<sup>3</sup> stand eine realistische Nachempfindung der Waldentwicklung an. Dies beinhaltet zum einen Zielschlussgrade gemessen an Bestandesoberhöhen (Grundflächenleitkurven), sowie zum Anderen die Baumarten- und Mischungsanteilsfestlegung durch Waldentwicklungsziele (HE), Waldentwicklungstypen (WET; Bundesforst, NI, SH), oder Betriebszieltypen (BB, MV, ST). Im Folgenden wird vereinfacht von WET gesprochen.

Die Fortschreibung findet dabei in einem detaillierten, realistischen **bottom-up-Prozess** statt, bildet **lokales** Wachstum ab und greift auf den einzelbaumweisen und prozessbasierten Simulator WaldPlaner auf der Basis von TreeGrOSS zurück (Hansen & Nagel 2014). Damit unterscheidet sich dieser Ansatz von **top-down-Prozessen**, die die Waldentwicklung und das Holzaufkommen **global** durch Ertragstafeln, Änderungsraten zwischen zwei BWI-Zeitpunkten fortschreiben (Rosenkranz et al. 2023) oder die Waldentwicklung zwar lokal errechnen, aber den Waldumbau vollständig vernachlässigen (BMEL 2016; Bösch et al. 2016).

Der WaldPlaner benötigt Modelleinstellungen, wie Grundflächenleitkurven zu Durchforstungs- und Nutzungsgängen, Zukunftsbaum-Anzahlen, Hiebsreifedefinitionen, WET-Ziele und Angaben zu Restvorräten (Habitatbäume). Die Einstellungen sind in Knocke et al. (2024c) enthalten.

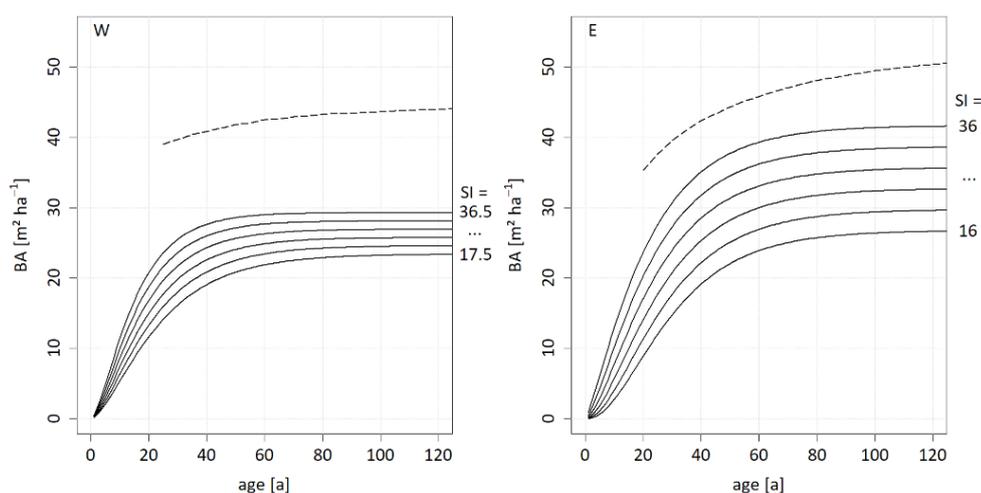


Abbildung 3 Site-index ( $SI_{100}$ ) depending target basal areas (BA) of *P. sylvestris* (solid lines) per region after particular silviculture guidelines referring to **W**) yield tables of Wiedemann (1943) or **E**) Lembcke et al. (1975) & maximum density in respective yield level regions (dashed lines) (Döbbeler & Spellmann 2002) for top heights of greatest pictured SI

Im Vergleich von Neuen (E) und Alten (W) Bundesländern in Abb. 3, der die Grundflächenhaltungen je nach Ertragsklasse (SI als absolute Oberhöhenbonität im Alter 100) über dem Bestandesalter darstellt, zeigen sich deutlich unterscheidende Bewirtschaftungskonzepte. Während die westlichen Länder HE, NI, SH die kritische Grundflächenhaltung für ihr Ertragsniveau unterschreiten, optimieren die östlichen Länder BB, MV, ST die Bestandeszuwächse. Während die einen eher auf Einzelbaumstabilität setzen, scheinen die anderen mutmaßlich eher auf Bestandesstabilität abzielen. Weil das **Durchmesserwachstum** herrschender Bäume generell **durch Auslesedurchforstungen positiv beeinflusst** wird, vermag es ein **stärkeres Durchforstungsregime**, die Bäume **eher zur Zielstärke zu führen** und den **Waldumbau zu beschleunigen** bzw. **Holzerntemengen zu strecken**.

Eine zukünftige Waldentwicklung richtet sich des Weiteren nach lichtökologischen Leitplanken: Je nachdem, ob Bestände in Licht- oder Schattbaumarten überführt werden sollen, ändern sich Zeitpunkte der Zielstärkenutzungen, Nutzungsgänge und Überschirmungszeiträume. Am kontrastreichsten wäre dabei ein auf standörtlicher Grundlage empfohlener Ansatz einer Maximierung des Kiefernanteils (Lichtbaumarten werden als Folgebestand bevorzugt) und einer Minimierung des Kiefernanteils (Schattbaumarten werden als Folgebestand bevorzugt), der in Abb. 4 gezeigt ist.

Praxis und Forschung fordern eine **Dynamisierung der forstlichen Standortkartierung** (Mason et al. 2018; Hamkens et al. 2022; Schröder et al. 2023), weil sich die früher postulierte Standortkonstanz im Rahmen einer klimawandelbedingten Standortdrift aufhebt. Dieser Forderung wird in den Ländern HE, NI, SH, ST und bei Bundesforst durch einen sog. Ensemble-Ansatz entsprochen, der die zukünftige Wasserversorgung der Waldstandorte durch verschiedene Modellläufe des RCP 8.5 Klimamodellensembles dynamisiert (Hübener et al. 2017). Damit hat der je nach Klimamodell unterschiedliche Wasserhaushalt der Zukunft in Form der Standortwasserbilanz (SWB) unmittelbaren Einfluss auf die WET- und damit die Baumartenwahl.

$$SWB = KWB_{(Vegetationszeit)} + nFK \quad (1)$$

$$KWB_{(Vegetationszeit)} = \text{Niederschlag} - \text{potenzielle Evapotranspiration} \quad (2)$$

Nur mittelbar haben die Länder BB und MV einer klimawandelbedingten Dynamisierung der Standorte entsprochen, die die WET-Wahl nicht am Wasserhaushalt des jeweiligen Standortes, sondern an der zukünftigen Ausdehnung der Klimafeuchtestufen festmachen. Dabei ändert sich nicht der WET selber, sondern eine Teilmenge je Klimafeuchtestufe möglicher WET. Zudem verwenden BB und MV andere Modellstränge mit einer jährlichem Temperaturanstieg *unter* denen des RCP 8.5 (MLUK 2022; Thurm & Wirner 2023; Schröder et al. 2023). BB und MV verwenden anstelle einer KWB eine sogenannte metrische, ökoklimatische Wasserbilanz, die die Solarstrahlung und Binnen-/ Meeresgewässer-Einflüsse detaillierter abbildet.

Potenziell planungsrelevante Parameter für die Baumartenwahl sind am Beispiel von MV in Abb. 5 verdeutlicht. Der Gesamtwald dieses Bundeslandes wird dabei von zonalen Standorten der Stamm-Feuchtestufe **T2 dominiert** (Schulze et al. 2013), die terrestrische, **mäßig frische Standorte** beschreibt und **wenig differenziert** scheint (Abb. 5b). Versucht man, die WET-Wahl in MV (wie in HE, NI, SH und ST) anhand der nFK zu gestalten, wird eine **innerhalb der Feuchtestufe T2 große Bandbreite von Feldkapazitäten** ( $\text{mm m}^{-2} \text{m}^{-1}$ ) deutlich (Abb. 5c), die eine Planungseignung einer modellierten nFK versagen. Im Gegensatz zu BB ist für den Gesamtwald von MV leider keine flächige nFK auf Basis einer forstlichen Standortkartierung vorhanden, weshalb approximativ die BÜK200 mit der KA5-Pedotransferfunktion herangezogen wurde, bevor dieser Ansatz verworfen wurde.

Schließlich konnte anhand der BWI<sup>3</sup>-Traktecken eine flächig berechnete KWB (Sutmöller et al. 2021) für BB und MV dazu genutzt werden, allgemein gültige klimatische Schwellenwerte je gegenwärtiger Klimafeuchtestufe näherungsweise zu „übersetzen“. Heute begründete Waldbestände werden aller Voraussicht nach auch noch im Jahr 2100 wachsen. Weil die WET im gesamten Projektgebiet anhand von (je nach Klimamodell innerhalb des Klimamodellstrangs RCP 8.5) differierenden KWB für die Periode 2071-2100 ausgewählt werden, kann die Baumartenwahl für BB und MV nun auch durch eine räumlich-zeitliche Verschiebung der Klimafeuchtestufen indirekt dynamisiert werden. Dazu dienen die in Tab. 3 festgelegten Schwellenwerte unter der Annahme, dass sich die expertenbasierten Einschätzungen der Baumarten-Performance (welche Art kann bei welchem Wasserdefizit noch angebaut werden?) nicht ändern.

*Tabelle 3 Abgrenzung von KWB-Schwellenwerten in der Vegetationszeit für die Klimaperiode 1991-2020 in BB und MV zur Nachempfindung gegenwärtigen Klimafeuchtestufen des Tieflandes (T)*

Klimafeuchte- stufe	Schwellenwert MV [mm m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ]	Schwellenwert		Range	
		BB [mm m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ]	(min-max) MV [mm m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ]	(min-max) BB [mm m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ]	
Tt+/ Ttt	≤ -221	≤ -250	-229 – -123	-265 – -184	
Tt	≥ -220	≥ -240	-200 – -109	-279 – -180	
Tmt	nicht kartiert	≥ -230	nicht kartiert	-274 – -146	
Tm	≥ -180	≥ -215	-174 – -80	-268 – -129	
Tf, Tlf, Tlm	≥ -140	≥ -170	-174 – -62	-229 – -123	

Für alle sechs Bundesländer konnte somit eine dynamisierte Standortkartierung verwendet oder erzeugt werden, die auf Basis der nFK und KWB (HE, NI, SH, ST) oder nur der KWB (BB, MV) in Abhängigkeit des eingespielten Klimasignals andere Teilmengen von WET je Standort ausgibt. Die nFK wurde dabei den Standortkartierungswerten direkt entnommen werden (Knocke et al. 2024c).

Das Ergebnis der Standortdynamisierung ermöglicht die Konzeption eines Szenariotrichters (Abb. 4), der durch die Leitplanken „Klima“ und „Waldbau“ begrenzt wird. Mit anderen Worten: Je nach Klimamodell- und WET-Wahl fällt der zukünftige Waldzustand anders aus. Die „Wahrheit“ im Jahr 2062 liegt dabei innerhalb des Trichtermundes. Das Klimamodelle EC-Earth können dabei als gemäßigt und HadGEM als extrem bezeichnet werden, wobei der Modellstrang RCP 8.5, innerhalb dessen die Modelle sich befinden, generell als pessimistisch einzustufen ist. Abb. 4b & 4d korrespondieren dabei mit den Karten in Abb. 5g & 5h.

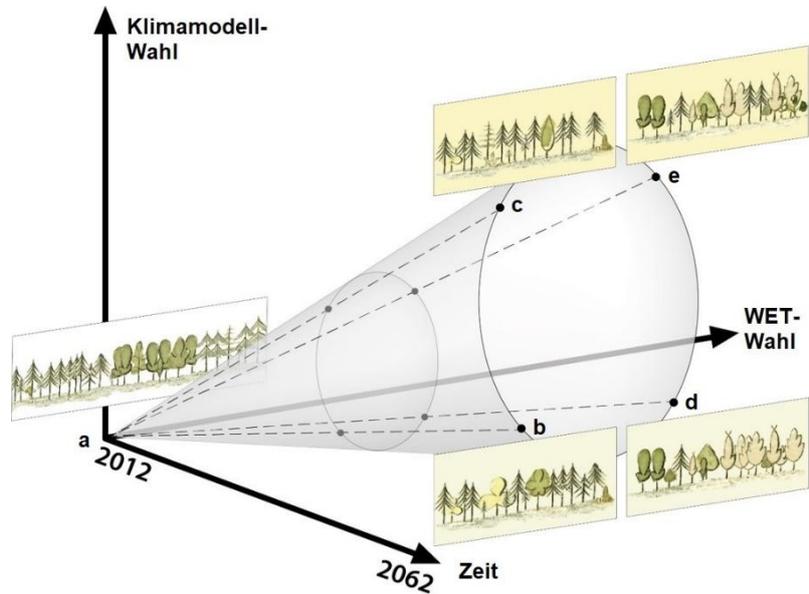


Abbildung 4 Szenariotrichter ohne Berücksichtigung irregulärer Mortalität **a)** heutiger Bestände mit Waldumbauverpflichtung im Jahr 2012 und nach 50 Jahren Simulation **b)+d)** im Jahr 2062 gemäß gemäßigttem Klimamodell EC-Earth (RACMO) des RCP 8.5 & **c)+e)** und extremem Klimamodell HadGEM2 (WettReg13) des RCP 8.5 Modellstrangs. Dabei sind **b)+c)** die maximale & **d)+e)** die minimale Kiefern-Beteiligung bei der möglichen WET-Auswahl je Standort. Abbildung basierend auf Guimpel (1819)

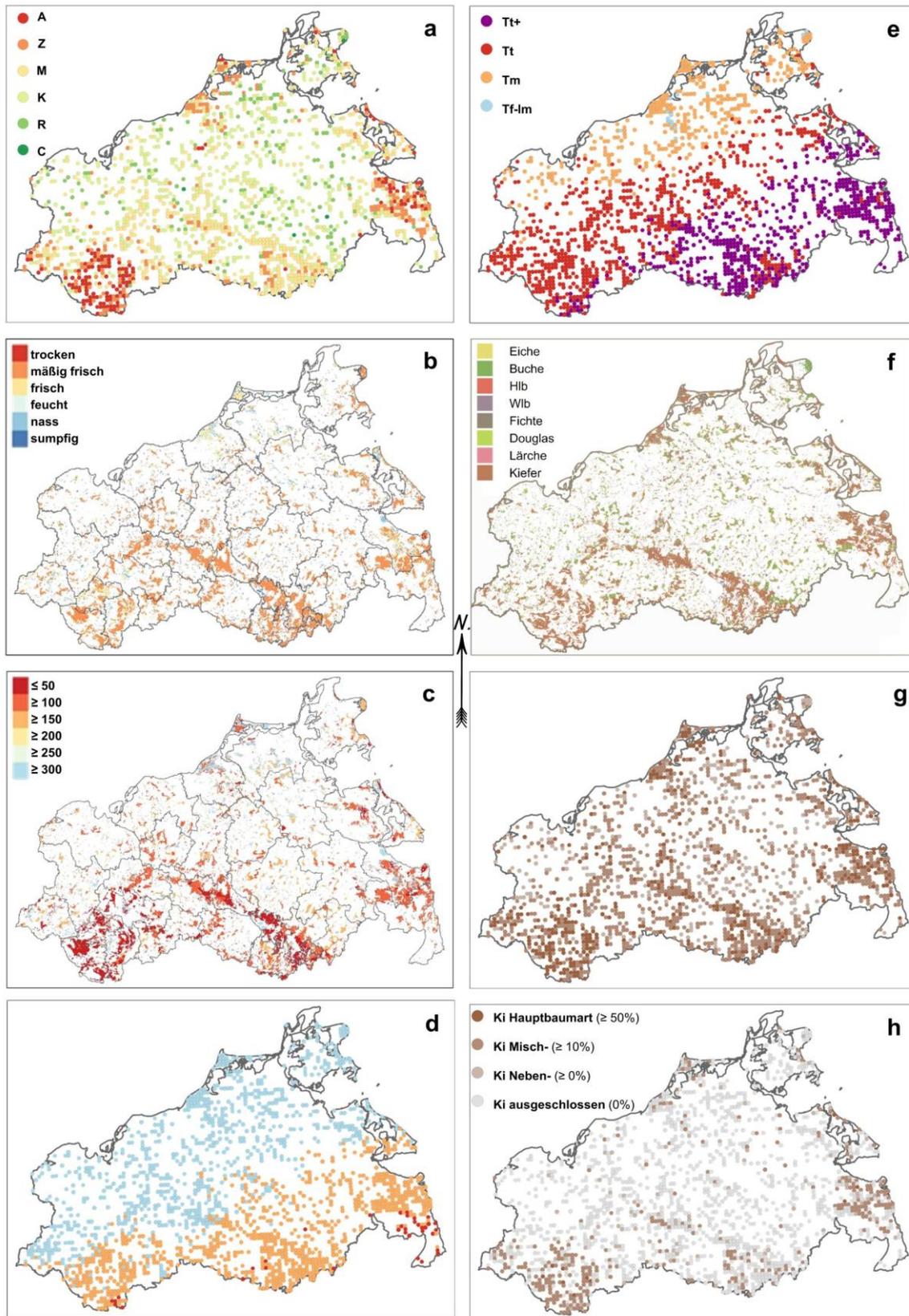


Abbildung 5 Für die Dynamisierung der Standortkartierung und Prognose eines standorts- und klimasensitiven Waldumbaus potenziell relevante Parameter am Beispiel von MV: **a**) Median rezenter Stamm-Nährkraftstufen der SEA95 (Schulze et al. 2013) je BWI-Trakt, **b**) nach Thurm & Wirner (2023) gruppierte Stamm-Feuchtestufen der SEA95 des Gesamtwaldes, **c**) anhand der BÜK200 und KA5-Pedotransferfunktion (BGR 2005) geschätzte nFK [mm m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup>] im Gesamtwald, **d**) nachempfundene, gegenwärtige Klimafeuchtestufen (KWB-Schwellenwerte aus Tab. 3) für die Periode 1991-2020 je BWI-Trakt, **e**) zukünftige Klimafeuchtestufen (RCP 8.5 EC-Earth) je BWI-Trakt für die Periode 2071-2100 (Hübener et al. 2017), **f**) Baumartenverteilung im Gesamtwald für 2018 (Blickensdörfer et al. 2022, 2024), **g**) maximal und **h**) minimal mögliche Kiefern-Anteile (% Bestandesgrundfläche) bei Bevorzugung von Licht-/ Schattbaumarten je BWI-Trakt innerhalb verschiedener WET-Subsets des Standorts und der Klimafeuchtestufe (Thurm & Wirner 2023) unter RCP 8.5 EC-Earth

Die aktuelle **ungleiche Alters- und Stärkeklassenverteilung** der Kiefer und übrigen Baumarten in Norddeutschland wird sich bis 2062 (innerhalb des Szenariotrichters, den wir als Unsicherheitsraum betrachten) trotz des **Spielraums der Forstplanung (WET-Wahl, Klimamodell-Wahl) nicht ausgleichen**.

Die vorhergesagten Anbauflächen der Kiefer machen bis 2062 einen Rückgang aus – egal wie sehr Kiefer gefördert wird. Die Standflächen nehmen von 1,358 Mio. Hektar (2012) auf ein Minimum von 0.919 Mio. Hektar (2062, Schattbaumarten bevorzugt, moderates Klima) oder 1.123 Mio. Hektar (2062, Licht-Baumarten bevorzugt, extremes Klima) ab. Die regionale Verteilung und Unsicherheiten variiert zwischen den westlichen und östlichen Bundesländern, wobei reine Kieferbestände in den östlichen Regionen höhere absolute Waldumbau-Fortschritte aufweisen, aber auch höhere Unsicherheiten zeigen. Aufgrund des schwächeren Durchforstungsregimes (Abb. 3) in den östlichen Bundesländern werden die Zielstärken später erreicht und der relative Waldumbau, gemessen an der gesamten Kiefern-Reinbestandsfläche, bleibt mit 11-19% deutlich hinter den westlichen Bundesländern zurück.

Insgesamt sind die waldbaulichen Auswirkungen (WET-Wahl) auf die Anbau-/ Standfläche und Vorräte etwa viermal höher, als die Effekte der Klimamodell-Wahl. In der Forstwirtschaft wird ein adaptives Management (Spielraum in WET-Wahl je nach Standort/ Klima) nicht als Unsicherheit betrachtet, sondern eher als Vielfalt von Handlungsoptionen (Ehwald 1949).

Weitere Ergebnisse sind in Knocke et al. (2023, 2024b, c) enthalten.

### **Waldbauliche Konzepte und deren Evaluierung**

Im nächsten Arbeitspaket stand die Prognose einer noch realitätsnäheren Waldentwicklung an, die neben regulärer Mortalität (Seneszenz und Ontogenese (Alter), dichtebedingtes Sterben durch Konkurrenz) auch irreguläre Mortalität (biotische, abiotische und Hintergrundmortalität) berücksichtigt. Auf Grundlage dieser Entwicklung soll der Versuch unternommen werden, die waldbaulichen Einstellungen des WaldPlaners in ihrem Effekt auf das Simulationsergebnis in 2062 analysieren, die auf den Waldbau-Richtlinien der sechs Länder beruhen. Die **Waldbaukonzepte** sollen hinsichtlich folgender **Kriterien**, die im Projektantrag und anhand einschlägiger Literatur artikuliert wurden (z.B. Hentschel et al. 2019; WBW 2019; Bolte et al. 2021), evaluiert werden:

- **jährlich annähernd gleichbleibende Bereitstellung von Kiefernholzvolumina** (Durchforstung und ernte) als Rohstoffquelle – und Marktsignal – für Holzindustrie (Abnehmer) und als Einkommensquelle für Forstbetriebe (Anbieter) ohne die Baumartenwahl des Waldumbaus vorzugeben
- **Produktion von KSH** über 50 cm BHD nur unter der Prämisse, dass es zugleich Kiefernstarkwertholz der **Qualitätsklasse A** ist
- **möglichst hoher Waldumbau-Fortschritt für einen Walderhalt im Klimawandel** – einerseits ohne Hiebsopfer (Ernte heibsunreifer Bestände) aber andererseits ohne mögliche Fehlerquellen von Generalregeln (verminderte  $\gamma$ -Diversität und Habitatverlust, Pflanzfehler, klimawandelbedingte Abkühlung bei Abriss des Golfstroms macht Laubholzanbau inopportun)
- **Risikominderung** durch ökologische und ökonomische Gesichtspunkte: Bestandesmischungen, Ungleichaltrigkeit und ein Durchforstungsregime anhand einer gestaffelten Pflege für Stabilität (h/d-Werte), Kalamitätsvorsorge (Dürre, Insekten) und natürliche Vorverjüngung (evtl. als späterer Nachwuchs)

In diesem Zusammenhang sollte mit den Daten der WZE eine Reparametrisierung von bestehenden Überlebenszeitmodellen erfolgen. Aufgrund der pessimistischen, aber lebensetzten Annahmen des für die WET-Wahl und die sensitive Oberhöhenbonitierung verwandten RCP 8.5 Klimamodellstrangs würden innerhalb der Simulation aber dermaßen heiße und trockene Klimate zum Ermitteln der irregulären Mortalität auf die BWI<sup>3</sup>-Modellbestände angewendet werden, wie sie in der WZE seit 1984 nicht vorkommen. Mit anderen Worten: Die Prognose der Waldzusammensetzung würde vollständig im Extrapolationsbereich der reparametrisierten Modelle stattfinden. Daher wurde sich entschieden, mit den derzeit umfassendsten Überlebenszeitmodellen von Brandl et al. (2020) zu arbeiten, die am meisten Baumarten abdecken, den größten Standortsgradienten erfassen (Kastilien bis Karelien), positive Baumartenmischungseffekte berücksichtigen und klimasensitiv sind. Dies bedeutet, dass sie das Überleben nicht nur als Funktion über dem Alter, sondern auch in Abhängigkeit von Mischung und Klima ermitteln und somit für eine Vorhersage der Zukunft geeigneter sind.

Im Rahmen der Waldumbaudebatte der 1980er Jahre und in Anlehnung an die Dauerwaldidee mit naturgemäßer Forstwirtschaft, sind reine Altersklassenwälder nicht mehr forstpolitisches und waldbauliches Ziel. Die **Anwendung von Überlebenszeitmodellen beruht** jedoch auf einer **räumlich-zeitlichen Teilbarkeit von Altersklassenwäldern**, die als **schlagweiser Hochwald** bewirtschaftet werden (bei einer

Überlebenswahrscheinlichkeit von 75% das Alter 100 zu erreichen, gelangen entweder 75 von 100 Beständen komplett in das Alter 100 oder ein Bestand nur zu 75% Bestockungsanteil). Allerdings nehmen gemischte, weniger abgrenzbare und ungleichaltrige Wälder zu und Deutschland weist verschieden starke Schadausmaße (gemischte Schweregrade; Wohlgemuth et al. 2019, p. 134)) in seinem Störungsregime auf: Langfristig betrachtet überwiegen kleine Störungen und Bestände sterben nicht immer komplett ab.

Weil das Stichprobendesign der WZE mit dicht benachbarten Kreuztrakten hochgradig autokorreliert ist, besteht die Gefahr, dass echte Bestandesstörungen nicht erfasst werden (Fuchs et al. 2022). Zusammen mit dem Nachteil, dass eine Prognose auf Basis der WZE bei verknüpften klimatischen Einflussgrößen schnell in den Extrapolationsbereich gerät, wurde sich dazu entschieden, diese Datenquelle nicht zu verwenden. Um jedoch die **Schweregrade von Störungen hinsichtlich kleiner oder großer Schäden zu quantifizieren**, konzentrierte sich die Arbeit auf dem **Waldschutz-Meldeportal (WSMP)** der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, das für den Landeswald in HE, NI, SH und ST mit den **Forsteinrichtungswerken verschnitten** werden kann. Dadurch lässt sich ins Verhältnis setzen (ist-Schaden zu soll-Wirtschafts-/Lagerbuchhaltung), wie stark der Schweregrad, bedingt auf sein Eintreten, ausfällt.

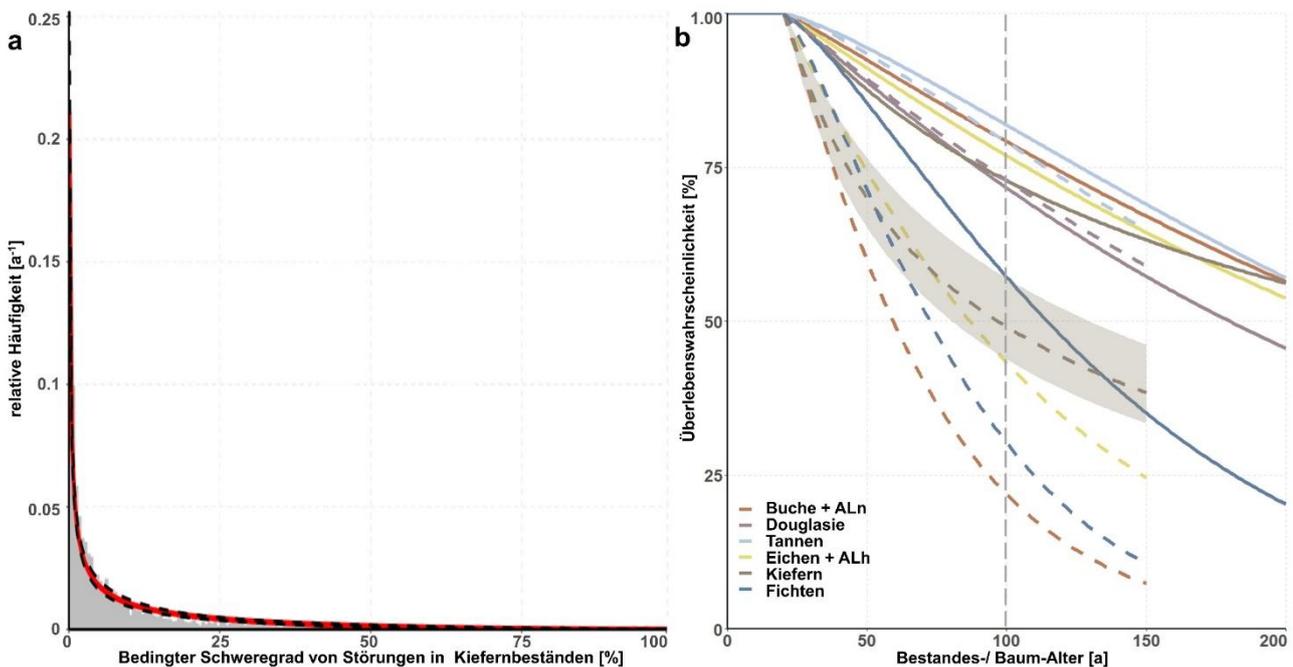


Abbildung 6 Störungen und Mortalität **a**) als mittlerer Schweregrad (Schadauswirkung) letaler Störungen in Beständen mit Kiefernbeiträgen von 2014-2024 anhand des WSMP (rot: modelliert, grau: empirisches Histogramm des Inferenz-Datensatzes) und **b**) als Median der Überlebenswahrscheinlichkeit nach Brandl et al. (2020) angewendet auf die BWI<sup>3</sup>-Traktecken des Projektgebietes für Klima der Periode 1971-2000 (durchgezogene Linien) und der 30-jährigen Perioden von 1983-2002 (gestrichelte Linien). Der Unsicherheitsbereich ergibt sich aus einzelstandörtlichen Abweichungen und stellt 95 % Konfidenzintervalle dar

Der Datensatz des WSMP hat für die Kiefer im Landeswald von HE, NI, SH und ST nach Bereinigung von unplausiblen oder Sammelbuchungen zwar noch über 20.000 Einträge, aber weist kaum Lepidopterenfraß auf und betrachtet eine relativ kurze Zeitspanne von nur 10 Jahren (2014-2024). Somit ist die Übertragbarkeit auf waldbauliche Fragestellungen mit Vorsicht vorzunehmen. Dennoch reicht die **Größenordnung von vielen niedrigen zu wenigen hohen Schweregraden** für die Prognose von Waldentwicklungstrends aus (Abb. 6a). Insgesamt wird sich die **Sterblichkeit in den nächsten 50 Jahren unter Anwendung von RCP 8.5 Klimäläufen massiv weiter steigern** (Abb. 6b). Vor dem Hintergrund von der sehr pessimistischen Zunahme der Sterblichkeit (Abb. 6b) wurde sich dazu entschieden, für die Ergebnispräsentation die Szenariowerte mit/ ohne irreguläre Mortalität zu mitteln.

Mit den bekannten Limitationen sei auf die komplex verkettete Sterblichkeit der Kiefer verwiesen (Rigling et al. 2006; Vacchiano et al. 2012), die in Abb. 7 auszugsweise dargestellt werden. Demnach wird stellt sich das Überleben der Kiefer am Rande ihres Ökoton dar, das sich gut durch eine ganzjährige KWB beschreiben lässt: Je negativer die 30-jährige Wasserbilanz, desto höher ist der Schweregrad von Störungen. Des Weiteren scheinen geringe Bestockungsgrade das Überleben der Kiefer zu beeinträchtigen, welche wir als Samenbaum- oder Überhalter-Bestandessituationen über Nachwuchs in den Daten identifizieren konnten. Zudem scheinen Nicht-Wind-Störungen, wie Insekten, Pilze oder Dürre, die Sterblichkeit zu fördern. Interessanterweise hat, unter extremsten Klimabedingungen im Zeitfenster von 2014-2024 und unter dem Eindruck der **Jahrtausenddürre 2018** (Büntgen et al. 2021), ein geringer Mischungsanteil von Kiefer (also

hohe Baumarten-Beimischung) einen negativen Effekt auf das Überleben. Dies könnte sich mit insgesamt höherer Konkurrenz unter günstigen Bedingungen erklären lassen (intensiv gemischte Kiefernwälder stocken auf besser nährstoff- und wasserversorgten Böden) und auch durch niedrige Nischen-Komplementarität bei redundanten Nachbarn begründet sein.

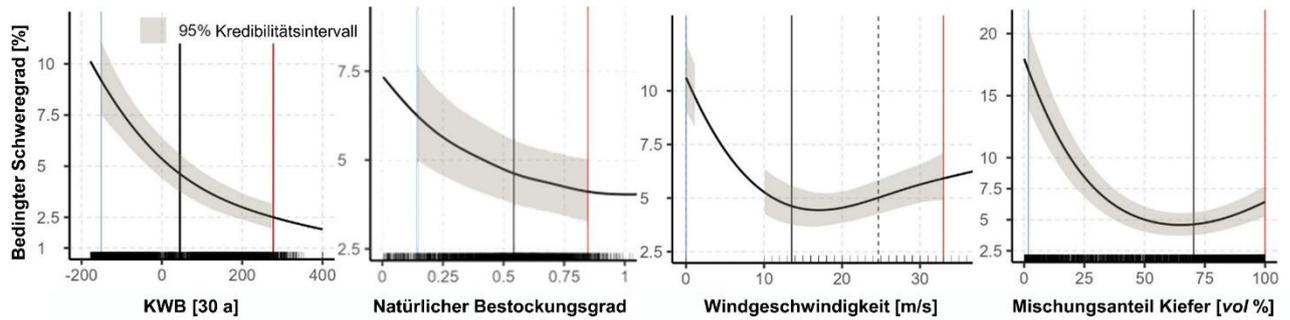


Abbildung 7 Populationseffekte auf Basis des WSMP von vier (aus 12) ausgewählten Kovariablen, die im Zusammenhang mit letalen Störungen in Verdacht stehen, den bedingten Schweregrad des Schadausmaßes kausal zu beeinflussen. Blaue und rote senkrechte Linien markieren das 2,5 bzw. 97,5 % Perzentil sowie schwarze senkrechte Linien den Mittelwert der empirischen Datenverteilung

Die **Neuartigkeit** der auf Basis der WSMP-Erkenntnisse durchgeführten wiederholten Simulationen im WaldPlaner liegt darin, den **Einfluss des irregulären Absterbens auf die Wälder unter einzelbaum- oder bestandesweisen Mortalitätsmustern zu quantifizieren** (Abb. 8), um die Ertrags- und Erntepotenziale zu untersuchen. Durch Aufspannen eines weiteren Szenariotrichters aus zwei Bewirtschaftungs- und zwei Klimaprojektionen auf 17.551 BWI<sup>3</sup>-Trakten in Norddeutschland bewerten wir voraussichtliche Unsicherheiten. Der Übergang der Waldzusammensetzung durch Raum und Zeit mit bedingten Hazardraten ähnelt einem Markov-Prozess über Monte-Carlo-Sampling, indem das Überleben in 5-Jahres-Schritten zehnfach auf den Bestand oder den Baum angewendet wird.

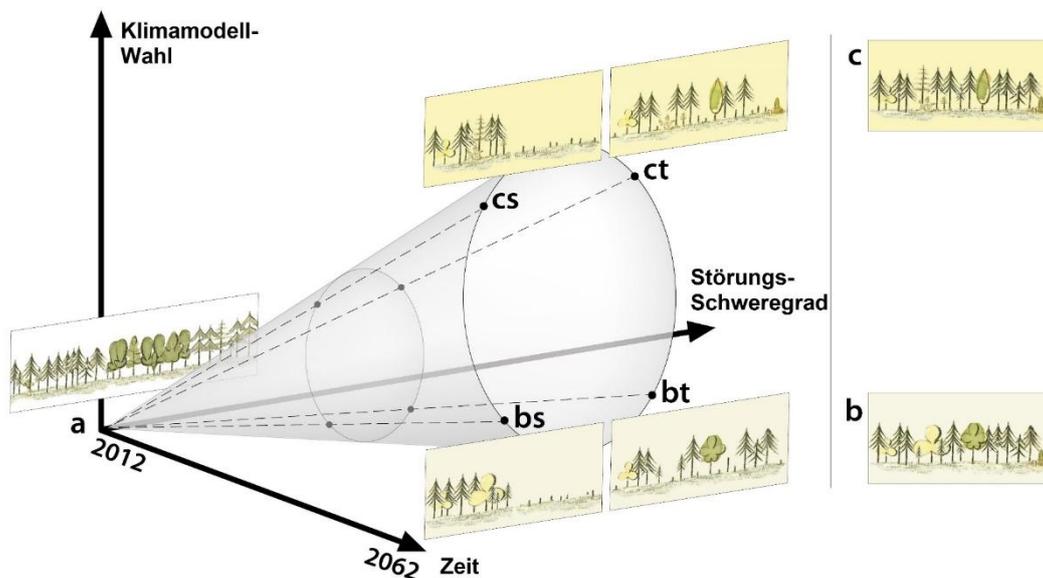


Abbildung 8 Szenariotrichter mit Berücksichtigung irregulärer Mortalität **a)** heutiger Bestände mit Waldumbauverpflichtung im Jahr 2012 und nach 50 Jahren Simulation **bs)+bt)+b)** im Jahr 2062 gemäß gemäßigem Klimamodell EC-Earth (RACMO) des RCP 8.5 & **cs)+ct)+c)** und extremem Klimamodell HadGEM2 (WettReg13) des RCP 8.5 Modellstrangs. Dabei bilden **bs)+cs)** einen maximalen Kiefern-Anteil in den empfohlenen WET mit bestandesweiser (stand-wise, 's') Mortalität und **bt)+ct)** einen maximalen Kiefern-Anteil in den empfohlenen WET mit einzelbaumweiser (tree-wise, 't') Mortalität ab. Die ungestörten Szenarien **b)** und **c)** sind zur Kontrastierung und Mittelung der Ergebnisse gegenübergestellt. Abbildung basierend auf Guimpel (1819)

Perspektivisch verdoppelt sich die Mortalität je nach Baumart (Abb. 6b). Im Vergleich zu einer ungestörten Entwicklung, sind die Ergebnisse des Waldumbaus ungewiss; **Bestandsverluste können den Umbau um bis zu 10 % beschleunigen, während Baumverluste sie verlangsamen können.** Bei Störungen nehmen der Volumenzuwachs und das Alter der Bestände ab, während die Erntemengen mittelfristig steigen (Abb. 9a), wobei sich der **Vorrat an Starkholz verfünffacht** (Abb. 9b). Der Anteil von außerplanmäßigen (Zwangs-) Nutzungen kann im Mittel für die Kiefer in Zukunft bis zu 30 % betragen, was sich mit anderen

Expertenschätzungen deckt (Bolte 2022). Der Anteil der End-/ Hauptnutzungen (Ernte) am Gesamteinschlag der Kiefer entwickelt sich von 21 % in 2012 zu im Mittel 63 % in 2062.

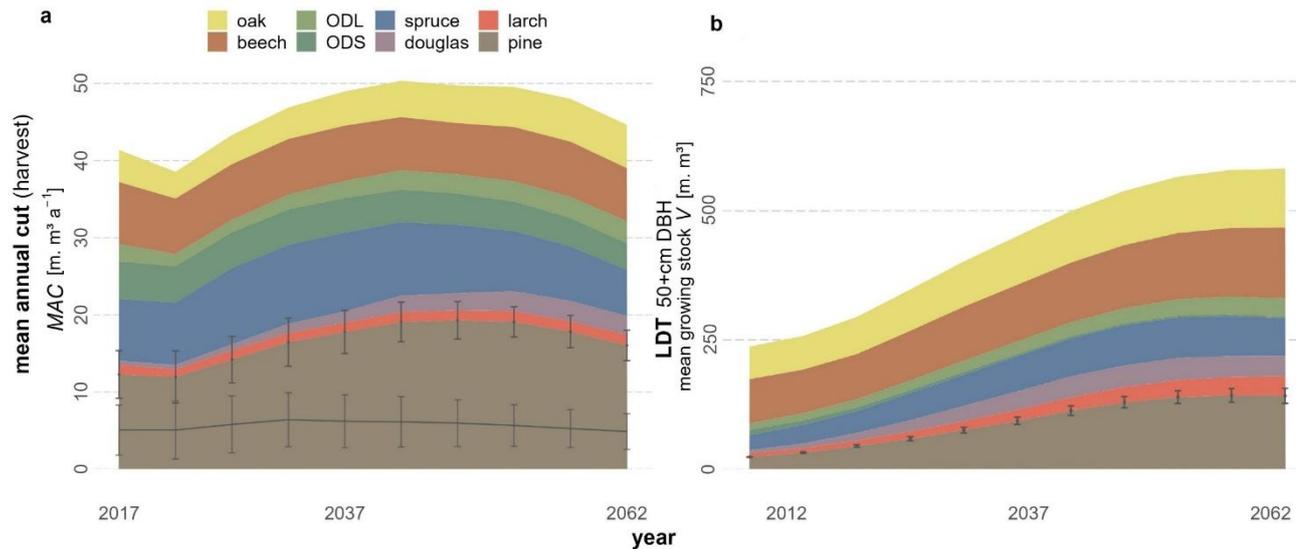


Abbildung 9 Vorhergesagte Waldentwicklung und des Holzaufkommens auf Basis der BWI<sup>3</sup> bis 2062 im Mittel aller Szenarien (mit und ohne irreguläre Mortalität) als a) Entwicklung des mittleren jährlichen Einschlages (mean annual cut, MAC) im Projektgebiet (die untere graue Linie gibt dabei die Zwangsnutzungen an) und b) als Zunahme des Starkholzvorrates (large-dimensioned timber, LDT) über 50 cm BHD. Die Fehlerbalken zeigen die Abweichung zum kleinsten/ größten Szenario-Wert an, der sich bei der Prognose der Waldentwicklung unter Störungen aus zehn Monte-Carlo-Simulationen zusammensetzt

Der **gesamte Kiefernvorrat im Projektgebiet wird sich** (ungeachtet der Einbeziehung von regulärer/ irregulärer Mortalität) von 424 Mio. m<sup>3</sup> in 2012 ausgehend, **kontinuierlich verringern**. Auch in den Szenario-Strängen, wo die Kiefer im Waldumbau – bei WET-Empfehlung – maximiert werden soll, beträgt ihr Anteil in 2062 (mit irregulärer Mortalität) 312 Mio. m<sup>3</sup> bzw. (ohne irreguläre Mortalität) etwa 354 Mio. m<sup>3</sup>. Beide **Entwicklungstrends sind hochgradig von dem rechtsschiefen Altersklassenaufbau der Kiefernwälder beeinflusst**. Aufgrund des Klimawandels und der baumdemografischen Entwicklung der Wälder sind der Ertragsrückgang (weniger Nettozuwachs) und die verbleibenden 40 % Monokulturen kritisch zu bewerten.

Weitere Ergebnisse mit Einbeziehung der irregulären Mortalität sind in Knocke et al. (2024a, d) enthalten.

### Empfehlungen für Politik und Praxis

Beide Simulationen, sowohl mit oder ohne Berücksichtigung der irregulären Mortalität, zeigen frappierend auf, dass die Waldentwicklung sehr träge ist. Daher schlagen wir differenziertere waldbauliche Konzepte vor, um die Wälder proaktiv (Braunschweiger et al. 2024) an die alarmierenden Veränderungen anzupassen.

Eine „**climate-smarte forestry**“ **steht vor großen** und zum Teil widersprüchlichen **Herausforderungen**: Einerseits, vor dem Hintergrund steigender Risiken (Zunahme Kalamitäten, Extremereignisse, Vorräte/ Oberhöhen) muss der **Waldumbau** weg von anfälligen Reinbeständen oder nicht standortgerechten Mischungen beschleunigt werden, was Zielstärkensenkungen und Nutzungsstaffelungen impliziert (**Akzeleration**). Andererseits sind neben mittelfristig ausbleibenden Nutzungspotenzialen nach einer Zielstärkensenkung (Bösch et al. 2017) und die jüngste Abnahme des Fichtenvorrates, auch negative Konsequenzen für Biodiversität (Hartard & Schramm 2009; Turmukhametova et al. 2020) und Kohlenstoffspeicherung zu erwarten, weshalb Teile des verbleibenden Vorrats über eine lange Periode zur Nutzung aufgeteilt werden sollten (**Retardation**), um für eine kontinuierliche Einkommensquelle der norddeutschen Forstbetriebe zu sorgen. **Beide Ansätze sind gleichberechtigt** und sollten parallel Anwendung finden: Risikobestände sollten in ihrer Nutzung vorgezogen und betriebssichere Bestände für spätere Nutzungspotenziale zurückgestellt werden.

Zur kontinuierlichen Holzbereitstellung, zur ausschließlichen Produktion von KSH als Wertholz, einem angemessenen Waldumbau-Fortschritt sowie zur Risikominimierung stellen wir fest, dass

- **eine intensivere Durchforstung grundsätzlich positiv** zu bewerten ist, insbesondere bei gestaffelter Pflege, weil sie die Durchmesser-Differenzierung fördert und stabilere h/d-Werte erzielt (Sohn et al. 2016; del Río et al. 2017; Bauhus 2022), Dürreanfälligkeit und Interzeptionsverluste verringert (Archambeau et al. 2020), Bäume schneller zur Zielstärke führt und den Waldumbau beschleunigt (Wiedemann 1948, p.

38; Knocke et al. 2024c) – aber auch die Zuwachsoptimale bzw. kritische Grundflächenhaltung unterschreitet (Assmann 1970, p. 231),

- **eine bei der Ernte kurze Eingriffsfolge positiv** zu bewerten ist, um das Stützgefüge im Bestand zu erhalten, Lichtbaumarten zu fördern (Schall & Ammer 2013), keine Zuwachsanhäufung zu riskieren und Überhälter sicher ausreifen zu lassen (saubere Waldwirtschaft),
- **eine Streckung durch langjährige Nutzungsgänge von z.B. 40 Jahren sinnvoll** ist – sofern die Ernte frühzeitig vor einer Anhäufung von reifen Kiefern beginnt – und auch dauerhaft ungleichaltrige Bestände erzielt (Nyland et al. 2016, p. 332; Bartsch et al. 2020, p. 154): Dazu dienen variable Zielstärken in Abhängigkeit von Mortalitätsrisiko und Qualität für den Einzelbaum und am Längsten verbleiben Z-Bäume, die bei einem hohen Wertzuwachs echte Überhälter und nicht nur Samen-/ Habitatbäume werden; sowie
- **eine Mischungsanteilsfestlegung von bis zu 80/ 90 % Kiefer als Bestandesziel negativ** zu bewerten ist, wie derzeit z.B. in WET-Nr. 70 (NI) und WET-Nr. 13 (MV) (Böckmann et al. 2019; Thurm & Wirner 2023), weil dies zu wenig Portfolio-Differenzierung ermöglicht (Markowitz 1991; Yachi & Loreau 1999; Jactel et al. 2005).

Insgesamt ist **nicht die Senkung von Zielstärken** vorteilhaft, sondern ein je Bestand **früherer Fokus auf die Ernte als bisher** mit einer Streckung der Haupteinkommensquelle (Gerhardt 1923; Knocke et al. 2025). Damit können baumindividuelle Qualitätspotenziale optimal und ohne Hiebsopfer ausgeschöpft werden. In der norddeutschen Kiefernwirtschaft werden vorrangig Schirmschläge angewendet, die ungeachtet ihrer Ausdehnung im Folgebestand großschirmschlagartige, undifferenzierte, gleichaltrige Strukturen erzeugen (Bartsch et al. 2020, p. 519). Die Waldbaukonzepte (Baumartenwahl-, Behandlungs- und Forsteinrichtungs-Richtlinien) **operationalisieren dabei den Vorgriff/ die Rückstellung der Nutzung von Beständen, Baumgruppen oder Einzelbäumen unzureichend**. Insbesondere sind die **Konzepte dann zu starr, wenn der Übergang von der Pflege (Vornutzung) auf die Ernte (Haupt-/ Endnutzung) an den Turnus einer Forsteinrichtung** oder Zwischenrevision gebunden ist, die **Reviere/ Bezirke zu groß** sind oder der Betriebsdienst in **unflexiblen Blöcken** arbeitet.

Bevor Verjüngungsformen oder einzelbaumweise Zielstärken/ bestandesweise Hiebsreifen diskutiert werden können, sollte eine **bestandesweise Priorisierung der Nutzungsreihung** in einem **top-down-Ansatz** vorgenommen werden, um einen abgewogenen Waldumbau zu gewährleisten (Axer et al. 2023):

1. besitzartenübergreifend zunächst auf **Landschaftsebene** (1 000 ha,  $\gamma$ -Diversität) zur Fokussierung auf Reinbestandskomplexe,
2. dann auf **Forstorts- bzw. Schutzgebiets-Ebene** und auf **Bestandes- bzw. Standorts-Ebene** zur Steigerung der  $\beta$ - und  $\alpha$ -Diversität,
3. Betriebssicherheit: Zunächst Reinbestände, nicht standortgerechte Kiefernbestände und schlechte Bestandesstabilität in Anlehnung an König (1999) und Weller et al. (2022)
4. Bestandesqualität (Ästungen, Harzlachten, ...)

Dabei greifen 3. und 4. bereits Elemente auf, die die Verjüngungsform innerhalb eines Bestandes charakterisieren. Für eine differenziertere und wertschöpfungsorientiertere Bewirtschaftung der Kiefer in Norddeutschland wird eine **multikriterielle Definition der Zielstärke mit uneinheitlichen Überschirmungen empfohlen**, die folgende Aspekte berücksichtigt:

- baumindividueller **Zielstärkenrahmen** von 40-60 cm BHD ohne bestandesweise Hiebsreife-Definitionen, wann die Ernte beginnt
  - oberer Bereich (50-60 cm) für später zu nutzende, stabile, wertholzhaltige oder seltene Bäume/ Baumgruppen, mittlerer bis schwacher Nährstoff- und Wasserversorgung
  - mittlerer Bereich (45-50 cm) zur flexiblen Einteilung durchschnittlicher Verhältnisse
  - unterer Bereich (40-45 cm) für zeitnah zu nutzende, instabile, geschälte, grobästige oder geharzte Bäume/ Baumgruppen, die das Standortpotenzial nicht ausnutzen („zu gute“ Nährstoff- und Wasserversorgung)
- **kombinierte Verjüngungsformen** mit Elementen des Schirm- und Femelschlags grundsätzlich ohne Saum- oder Kahlschläge: Einzelbaumweise Zielstärkennutzungen *und* ungleichmäßige Überschirmungen (im Sinne starker Niederdurchforstungen/ C-Grade) mit räumlich stark differenzierten, den lichtökologischen Ansprüchen der Folgebaumart gerechten Altbestandsstellungen und unter Wahrung einer räumlichen Ordnung
- Diversifizierung der Verjüngungsformen, z.B. durch **situative Ausnahmemöglichkeiten**, wie initiale Lochhiebe als Element des Femelschlags in Reinbestandskomplexen (Mortzfeldt 1896; Bartsch et al. 2020, p. 542; Muys and Messier 2023)

Tabelle 4 führt die Argumente der bewertungsrelevanten Kriterien auf, die die o.g. Modifikation der bestehenden Waldbaukonzepte stützen.

Der Politik wird eine **stärkere und noch gezieltere Förderung der privaten und öffentlichen Forstwirtschaft** empfohlen, weil der Waldumbau der betontesten Reinbestände unter optimalen Holzvermarktungsbedingungen bis 2060 nur zu etwa 60 % abgeschlossen ist. Experten **fordern daher eine Vervierfachung des Umbautempos**, um z.B. die Anpassung der heutigen Fichten- und Buchenbestände bis 2050 abzuschließen (Bolte et al. 2021).

Der Waldumbau sollte **durch gestaffelte Pflegekonzepte**, die in den **neuen Ertragstafeln** von Albert et al. (2024) operationalisiert wurden, sowie eine **frühere, jedoch differenziertere Fokussierung auf die Ernte** implementiert (Erlasse, ...) und vorangetrieben werden. Insbesondere sollte eine noch gezieltere Lenkungswirkung von Fördermitteln genutzt werden, um besonders umbauwürdige Waldbestände des Nichtstaatswaldes in ihrer Nutzung zu animieren (z.B. höhere Anteils-/ Vollfinanzierung des Waldumbaus in Reinbestandskomplexen). Um diese Maßgaben zu erreichen, sind vor allem eine **proaktive und personell leistungsfähige Beratung und Betreuung** der Waldbesitzenden sowie vor dem Hintergrund des weggefallenen Waldklimafonds **mehr anwendungsorientierte Forschung** nötig. Insbesondere wäre eine Prognose auf Basis der vierten Bundeswaldinventur nötig, um die vorgeschlagenen Änderungen der Waldbaukonzepte in ihrer Wirkung zu untersuchen.

Tabelle 4 Zusammenfassende Bewertung der Bestandteile bestehender Kiefern-Waldbaukonzepte anhand der für die Projektziele von KiefernStolz relevanten Kriterien

Kriterium laut Literatur und Projektantrag Bestandteil des Kiefern-Waldbaukonzepts	Gleichbleibende Menge Holzbereitstellung	Produktion von KSH > 50 cm BHD nur als Wertholz	Waldumbau-Fortschritt	Risiko-minimierung
<b>Intensiveres Durchforstungsregime</b> (westliche Bundesländer)	▼ Unterschreitung der zuwachsoptimalen Grundflächenhaltung	◀▶▶▼ Kein altes KSH, Bäume sind ab 70 Jahren zielstark	▶▶▶ Zielstärken werden eher erreicht	▶▶ Unterstand/ Vorausverjüngung, weniger Interzeptionsverluste, bessere h/d-Werte
<b>Extensiveres Durchforstungsregime</b> (östliche Bundesländer)	▶ zuwachsoptimale Grundflächenhaltung	◀▶▶▶ Auch altes, feiningriges KSH, Bäume sind erst nach 90 Jahren zielstark	▼▼▼ Zielstärken werden später erreicht	▼ Schlechtere h/d-Verhältnisse, weniger Vorausverjüngung, mehr Interzeptionsverluste
<b>Maximale Entnahmemengen</b> von 80 Vfm/ha (Pflege) oder 300 Vfm/ha (Ernte)	▶▶ Holznutzung im Sinne der Gerhardt'schen Formel gestreckt	▼ Limitation bei Ernteeingriffen	▼ Verzögerung des Umbaus bei Ernteeingriffen	▶ Geringe Bestandesstabilitäts einbußen nach Eingriff (Stützgefüge)
<b>Nach gestaffelter Pflege bei Ernte wieder kurze Eingriffsturnusse</b>	▶ Weniger Nutzungsdringlichkeiten oder -rückstände	▶▶▶ Baumqualitäten überprüfbar, keine Anhäufung undiff. Massen	▶▶ Angepasste Lichtsteuerungsmöglichkeiten für Nachwuchs	▶▶▶ Weniger Insekten- oder Sturmgefährdung, Stützgefüge und Bestandespfleglichkeit
<b>Nutzungsgang von 40 Jahren</b> (Schattbaumarten im Fokus)	▶ Holznutzung im Sinne der Gerhardt'schen Formel gestreckt	▶ Baumindividuelle Qualitäten können ausreifen	▼▼ langsamere Generationenfolge	◀▶▶ Längere Ungleichaltrigkeit, Generationenfolge lang (Überalterung Oberstand)
<b>Nutzungsgang von 20 Jahren</b> (Lichtbaumarten im Fokus)	▼ Holznutzung verkürzt	▼▼▼ Bestandesvorräte aller Qualitäten häufen sich undifferenziert an	▶▶ Schnellere Generationenfolge	▼▼▼ Nur kurze Ungleichaltrigkeit, Anfälligkeit für Insekten und Sturm
<b>Erntebeginn bei 25 %</b> zielstarker Bestandesgrundfläche (Schattbaumart im Fokus)	▶ Holznutzung im Sinne der Gerhardt'schen Formel gestreckt	▶ Baumindividuelle Qualitäten können ausreifen	▼ Langsamere Generationenfolge (Überalterung Oberstand)	◀▶▶ Keine Priorisierung/ Staffellung von Hochrisikobeständen
<b>Erntebeginn bei 50 %</b> zielstarker Bestandesgrundfläche (Lichtbaumart im Fokus)	▼▼▼ Holznutzung verkürzt und Altersklassen-Peak wird zeitgleich vermarktet	▼▼▼ Bestandesvorräte aller Qualitäten häufen sich undifferenziert an	▶ Kürzere Generationenfolge (schnelle Abnutzung Oberstand)	▼▼▼ Instabile Samenbäume, keine langlebigen Überhälter/ Habitatbäume
<b>Bestandesdefinition für Ernte</b> (Rahmen für Hiebsreife; (BB), MV): 30-35 cm d <sub>g</sub> ; Wertholz 55 cm BHD	◀▶▶ Frühere Möglichkeit des Erntebeginns bei jedoch hohen Ausgangsvorräten, geringe Spreitung der Definition für Bestandes- und Risikotypen	◀▶▶ Frühe Fokussierung auf Ernte, keine Anhäufung von undifferenzierten Massen, lange Ausreifungsmöglichkeit für Wertholzbäume	◀▶▶ Schnelle Abnutzung von Beständen, die lichtökologisch ähnliche Voraussetzungen schafft	▼▼▼ Kein Stützgefüge, kaum Ausnutzung des baumindividuellen Wertschöpfungspotenzials, wenig Habitatstrukturen
<b>Baumdefinition für Ernte</b> (Rahmen für Zielstärke; HE, NI, SH, ST): (40-) 45 cm BHD; Wertholz 55 cm BHD	◀▶▶ Eher geringe Spreitung der Definition für Bestandes- und Risikotypen	◀▶▶ Frühe Fokussierung auf Ernte, keine Anhäufung von undifferenzierten Massen	◀▶▶ Schnelle Abnutzung von Beständen	▼ Keine operationalisierte Priorisierung/ Staffellung von Hochrisikobeständen
<b>Mischungsanteile</b> von über 70 % Kiefer gem. WET (NI, MV)	◀▶▶ Auch zukünftig wieder mehr Kiefer	◀▶▶ Gute innerartliche Astreinigung	▼▼ Artengleicher Ersatz, u.U. temporäre Reinbestände	▼▼▼ Kaum Mischungsportfolio

## Zusammenfassung

Die Modellierung der Waldentwicklung mittels BWI<sup>3</sup> von 2012 bis 2062 zeigt eine hohe Zunahme der KSH-Vorräte > 50 cm BHD. Während sich die Alters- und Stärkeklassenverteilung nach rechts verschiebt, bleibt die Zusammensetzung der Wälder unausgeglichen. In den sechs Norddeutschen Flächenländern (BB, HE, MV, NI, SH, ST) nimmt der Gesamtvorrat der Kiefer unter Risiko zwischen 20 und 26 % ab; und zwar auch wenn Kiefernwälder, wo empfohlen, wieder in Kiefer verjüngt werden. Der Vorratsabbau ist bei einer Verjüngung hin zu Schattbaumarten geringer, weil hier längere Überschirmungszeiträume praktiziert würden.

Die Umwandlung von Reinbeständen schreitet unterschiedlich voran: Kiefernflächen werden 2062 zu etwa 50-70 % umgebaut sein, während Laubholzreinbestände langsamer und Fichtenbestände schneller in andere Bestockungstypen wechseln. Die Modelle zeigen, dass eine verstärkte Durchforstung und rechtzeitige Ernte die Umbaurate um 20 % steigern könnte.

Unter Klimaveränderungen könnte sich die Wahrscheinlichkeit für Kiefern, das Alter 100 zu erreichen, von derzeit etwa 70 % auf zukünftig nur noch 50 % verringern. Dennoch verfünffachen sich die Starkholzanteile auch unter Risiko, während der Kiefern-Schwachholzvorrat fast halbiert wird. Ein Drittel der Holznutzung könnte künftig auf Kalamitätsereignisse zurückzuführen sein. Bestandesweise Störungen fördern den Bestockungswechsel, während baumweise Mortalität dazu tendiert, den Waldumbau zu hemmen.

Ein modifizierter Waldumbau muss standorts-, bestandes- und baumpezifisch erfolgen. Eine differenzierte Nutzung mit Zielstärken von 40–60 cm BHD kann zum Ausgleich von Alters- und Stärkeklassen beitragen und Wälder klimafest machen. Bei einer diversifizierten Bewirtschaftung mit früherem Fokus auf die Ernte und längeren Verjüngungsfenstern, kann für die Forstbetriebe eine nachhaltige Ertragsperspektive (Einkommensquelle) eröffnet, Holz für die Industrie kontinuierlich angeboten, Risiken vermindert, und die ökologische Resilienz der Wälder erhöht werden.

Weiterer Forschungsbedarf ist auf Basis der vierten Bundeswaldinventur nötig, um die vorgeschlagenen Änderungen der Waldbaukonzepte in ihrer Wirkung zu untersuchen.

## Arbeitspaket 3: Analyse der Wertschöpfungspotentiale in Nordwestdeutschland

### 1.3.1 Zielsetzung des Teilvorhabens

#### Allgemein

Das Teilprojekt verfolgt das Ziel der betriebswirtschaftlichen Analyse der Nutzungspotentiale von Kiefernstarkholz aus der Perspektive des Absatzes und der vorgelagerten Produktion. Dazu greift es u.a. auf das Pressler'sche Weiserprozent als etabliertes Standardverfahren der Bestimmung verschiedenster Produktionsoptima (klassischerweise in Bezug auf die Umtriebszeit) zurück (Chang und Deegen 2011; Viitala 2016). Als Forschungslücken wurden zum einen die spezifische Anwendung dessen auf die Kiefernstarkholzproduktion identifiziert, wobei neben der „klassischen“ Frage nach der Umtriebszeit auch jene nach dem optimalen Standraum im Zuge einer Durchforstung beantwortet werden soll. Zum anderen sollen die Heuristiken dieses theoretischen Erkenntnismodells mit empirischen Daten aus Fallstudien und dem Holzabsatz verglichen werden.

#### Starkholzdefinition

Als Nutzholz-Sortiment (liegender Stamm) wird Starkholz als Holz mit Stärkeklasse  $\geq 4$  aufgefasst (Kändler 2008). Stehendes Holz wird als Starkholz ab 50 cm BHD definiert (Kändler 2008; Nagel 2016; Spellmann und Fischer 2016; Bauhus u. a. 2021).

#### Absatz

Die vor Projektbeginn antizipierten Märkte für Kiefernstarkholz sind begrenzt und für Anbieter oft wenig lukrativ. Deutlich wird dieses am Beispiel des Kieferneinschlages der Niedersächsischen Landesforsten. Im Zeitraum von 2013 bis 2015 wurden jährlich durchschnittlich 300.000 Fm Kiefernholz geerntet. Davon entfielen ca. 200.000 Fm auf sägefähige Sortimente, von denen nur 2.500 Fm (entspricht 1,25 %) als Wertholz (F/A/AB) verkauft wurden. Insgesamt wurden (ab Stärkeklasse 4) jährlich rund 10.000 Fm Starkholz vermarktet. Im Rahmen des Projektes wurden diese Zahlen aktualisiert und die Marktstrukturen analysiert.

#### Produktion

Die wirtschaftlichen Risiken und Chancen der Starkholzproduktion wurden analysiert. Sollen (werthaltige) Starkholzbestände erzogen werden, wird die eine Entscheidungshilfe auf Basis der durch den Waldbesitzenden angenommenen knappen Produktionsfaktoren erstellt. Sollen einzelne Starkholzstämmen produziert werden, wird die erforderliche Rentabilität der Produktion mit natural erzielbaren Wertzuwachsen aus erstellten Fallstudien abgeglichen. Zudem wurde eine ökonomische Optimierung von Durchforstungseingriffen modelliert und ebenfalls mit Fallstudien verglichen. Ein intuitives Durchforstungsmodell wurde als Planungs- und Entscheidungshilfe entwickelt, das Forstbetrieben ermöglicht, ihre Ernte- und somit reziproke Investitionsentscheidungen an den aktuellen und zukünftigen (Markt-) Bedingungen und -erwartungen auszurichten. Die ökonomische Bewertung dieser Strategien erfolgt unter Berücksichtigung von Faktoren wie Marktpreisen (Holzverkaufserlöse), Verarbeitungskosten (Holzerntekosten), Investitionsrisiken (Überlebenswahrscheinlichkeiten der Kiefer) und ökologischen Rahmenbedingungen (Wüchsigkeit/Bonitäten der Kiefer).

Die Bedeutung der Analyse der Starkholzproduktion zeigt sich deutlich bei der Starkholzvorratsentwicklung (Abbildung 1). Insbesondere bei höheren Bonitäten sind innerhalb typischer Umtriebszeiträume erhebliche Starkholzvolumina auf Bestandesebene unter Annahme aktueller Zuwachsniveaus und Behandlungskonzepten zu erwarten. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird zudem die Kiefer voraussichtlich eine wichtigere Rolle in der Nadelrohholzproduktion einnehmen (Döbbeler und Spellmann 2002). Insbesondere auf ärmeren und trockeneren Standorten (Albert u. a. 2017) wird sie weiterhin eine wichtige Wirtschaftsbaumart bleiben (Knocke u. a. 2024, Teilvorhaben 2).

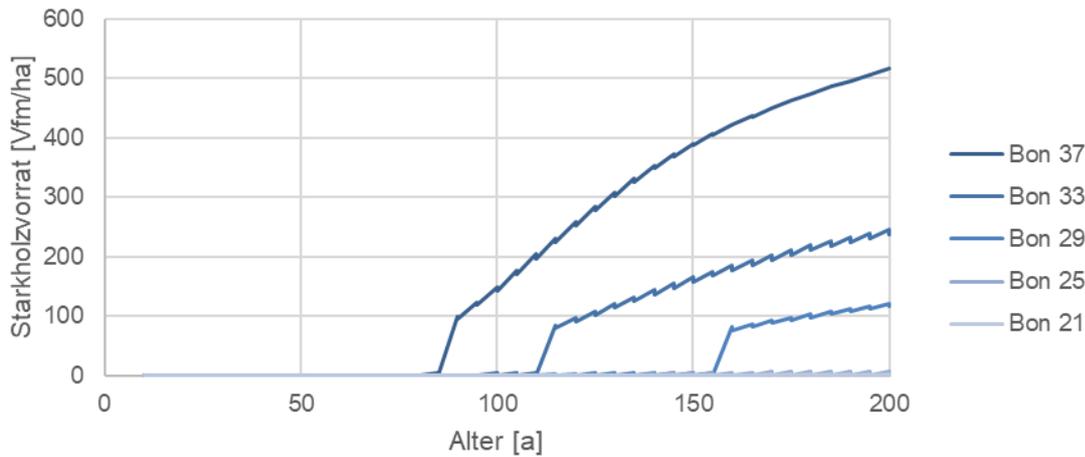


Abbildung 1: Kiefernstarkholzvorratsentwicklung verschiedener Bonitäten unter Annahme der Stärkeklasse  $\geq 4$  als Starkholz; basierend auf den Neuen Ertragstafeln für Nordwestdeutschland (Albert u. a. 2022, 2024), für die Zeiträume der Starkholzproduktion extrapoliert mittels Nuske u.a. (2022), Weibull-gefitet, sortiert gemäß der Bestandessortentafel Kiefer WBR 2014 (ML 2013)

## Material und Methodik

### Absatz

Auf Basis der Holzeinnahme des dominanten Kiefernrohholzbereitstellers des Untersuchungsgebietes (NLF u. a. 2024) wurden rund 3,7 Mio. Fm Kiefernholzabsatz aus 13 Jahren mit rund 1.500 Abnehmenden analysiert (Tabelle 1). Hierzu wurden die abgesetzten Holzvolumina in die zusätzlichen Absatzstraten Kiefernstarkholz (Stärkeklasse  $\geq 4$ ), Kiefernwertholz (Güteklasse  $> B/C$ ; besser als das Massensortiment (Maack und Hofheinz 2024) bzw. die *Commodities* (Möhring und v. Bodelschwingh 2016)) sowie Kiefernwertstarkholz (Erfüllung beider zuvor genannten Kriterien) zugeordnet. Anschließend wurde die Anzahl der Kunden, welche Kiefernholz innerhalb des Stratum abgenommen hatten, ermittelt. Basierend auf diesem aufbereiteten Datensatz wurde eine ABC-Analyse durchgeführt. In Erwartung von Lorenz-Kurven deutet ein flacher Verlauf auf eine hohe (erforderliche) Nähe zum Endkunden in der Absatzkette hin (Thommen u. a. 2020, 172).

Tabelle 1: Struktur der Kiefernabnahme & (kalkulatorisch-jährl.) Werte je Abnehmer

Absatzgruppe			Kalkulatorisch-jährliche Abnahmewerte je Abnehmer			
Bezeichnung	Volumen [fm]	Kundenzahl [Stk.]	Min. [fm]	Median [fm]	Mittelw. [fm]	Max. [fm]
Kiefer gesamt	3.660.766	1.534	0	1	184	59.854
Kiefernstarkholz	160.265 (~4,3 %)	377	0	1	33	1.500
Kiefernwertholz	106.269 (~2,9 %)	260	0	2	84	7.987
Kiefernwertstarkholz	49.265 (~1,4%)	166	0	1	23	629

### Produktion

Zur Ermittlung der optimalen Erntedimensionen wird zunächst ein bioökonomisches Modell erstellt. Dieses besteht natural aus einem Waldwachstumsmodell der *Neuen Ertragstafeln für Nordwestdeutschland* (Albert u. a. 2022, 2024) (für die Zeiträume der Starkholzproduktion extrapoliert mittels Nuske u.a. (2022), anschließend werden Vorräte und Durchmesser des verbleibenden und ausscheidenden Bestandes in Regressionsmodellen Weibull-gefitet). Diese Naturaldaten werden anschließend mittels  $d_g$ -abhängigen Holzverkaufserlös- und Holzerntekostenfunktionen aus Holzverkaufserlösen, Sortenverteilungen und Holzerntekosten des hessischen Staatswaldes bewertet (v. Bodelschwingh 2018; Fuchs u. a. 2023). Das erstellte bioökonomische Modell wird dann genutzt, um prämissenabhängig eine Entscheidungshilfe für die Starkholzproduktion zu erstellen.

Die Entscheidung der Produktion von (werthaltigem) Kiefernstarkholz ist eine Investitionsentscheidung eines Forstbetriebes. Charakteristisch für eine Investition ist die Knappheit der einzusetzenden Produktionsgüter (Thommen u. a. 2020, 377). Für die bestandesweise forstliche Produktion sind klassischerweise die Güter Kapital und Fläche knapp (Möhring 2009). Kapitalknappheit entspricht der Endlichkeit der Geldmittel des

Forstbetriebes. In der Kiefernstarkholzproduktion eingesetztes Kapital könnte damit auch einen alternativen Nutzen stiften, welcher jedoch dem Betrieb entgeht. Entsprechend liegen Kapitalopportunitätskosten vor. Flächenknappheit entsteht durch die begrenzte Fläche eines Forstbetriebes. Waldbaulich gesprochen unterdrückt bspw. der aktuell aufstockende Bestand den Nachfolgebestand.

Liegt eine Knappheit beider Produktionsfaktoren vor, wird die optimale Umtriebszeit und die korrespondierende optimale Erntedimension mittels des Weiserprozentes nach Pressler (1860) ermittelt (Möhring 2009). Diese kann im Sinne der „neoklassischen Investitionstheorie“ interpretiert werden (Möhring 1994, 52). Dem Prinzip der Marginalanalyse folgend (Price 1989, 132) liegt die ökonomisch optimale Erntedimension dann vor, wenn der erwartbare Wertzuwachs der kommenden Periode den erwartbaren Opportunitätskosten ebendieser entspricht. Da die Differenzfunktion der Komponenten des Pressler'schen Weiserprozentes der Differenzfunktion des Bodenertragswertes nach Faustmann entsprechen (vgl. Ohlin 1921), ist es in den methodischen Kontext des Faustmann-Pressler-Ohlin-Theorems (*FPOT*) einzuordnen. Das Pressler'sche Weiserprozent kann neben der bewerteten Holzproduktion noch um Risikokosten und waldbauliche Nutzen zum erweiterten Pressler'schen Weiserprozent (*EPWP*) (Möhring und v. Bodelschwingh 2016) entwickelt werden, um komplexeren Bestandessituationen zu genügen (Formel 1).

$$wzW + wn - rcl = Ax \times i + bb - rcd$$

*Formel 1: Erweitertes Pressler'sches Weiserprozent für Bestände*

Hierbei entspricht der Wertzuwachs *wzW* dem Zuwachs an erntekostenfreien Holzerlösen, *wn* dem waldbaulichen Nutzen (bspw. durch Frostschutz für einen Voranbau, zunehmend mit dem Bestandesalter) und den laufenden Risikokosten *rcl*, welchen der Holzerlöszuwachs (bspw. durch das Risiko des Eintretens von Kalamitäten) ausgesetzt ist. Diese bilden in Summe den linken Term (*lt*). Die Kapitalopportunität drückt sich in den Zinskosten des im Holz gebundenem Kapitals  $A_x \times i$  aus, während die Flächenopportunität durch die entgangene Bodenbruttorente eines Nachfolgebestandes *bb* abzüglich der durchschnittlichen Risikokosten dessen *rcd* ausgedrückt wird. Diese bilden den rechten Term (*rt*). Äquivalent zu diesem Kalkül stellt sich die optimale Erntedimension dann ein, wenn das Pressler'sche Weiserprozent (*PWP*) dem Kalkulationszins entspricht.

Die vorgestellten Prämissen der Flächen- und Kapitalknappheit gelten regelmäßig, wobei für einen Überhaltbestand, mit einem indifferenten Einfluss auf den Nachfolgebestand, angenommen werden kann, dass die Flächenopportunität entfällt (Möhring 2009). Entsprechend kürzt sich die Formel um diesen Term (Formel 2, weitergehend vereinfacht). Der Überhaltbetrieb ist ein in der Kiefernwirtschaft seit Jahrzehnten etabliertes Produktionsprogramm (vgl. Baader 1941), insb. im nordwestdeutschen Raum (vgl. Jaeger 1974).

$$wzW = Ax \times i$$

*Formel 2: Kalkül für den Nachfolgebestand indifferente Überhälter*

Zur Ermittlung der optimalen Erntedimension werden, unter Nutzung des EPWP, in einem ersten Schritt folgende Annahmen getroffen: Unterstellung einer Situation der Sicherheit (kein Risiko), die Annahme identischen Ersatzes (Nachfolgebestand mit identischer Baumart und Bonität wie der aktuelle), eine durchschnittliche Wertklasse (2, entspricht 2,2 % Wertholzanteil bei BHD 50 cm (Offer und Staupendahl 2009)) bei hochmechanisierter Holzernte mit motormanuellem Anteil im Starkholz (siehe Arbeitspaket 4), Begründungskosten von 400 €/ha, Pflegekosten von 600 €/ha im Alter 10 sowie ein mindest- $d_9$  von 12 cm bei der Erstdurchforstung. Als Kalkulationszins werden 1,5 % verwendet (Möhring 2014). In einem zweiten Schritt wird basierend auf dem ersten eine Sensitivitätsanalyse für einen Kiefernbestand einer mittleren Oberhöhenbonität von 29 m im Alter 100 durchgeführt, um starke Treiber einer hohen Erntedimension zu identifizieren. Diese werden entsprechend ihrer Auswirkungen in schwache (+10 Jahre optimale Umtriebszeit), mittlere (+ 20 Jahre optimale Umtriebszeit) und starke (> + 20 Jahre optimale Umtriebszeit) differenziert. Für die Risikoimplementierung wird von altersindifferenten Risiken für die Kiefer ausgegangen ( $\alpha = 1,0$  (vgl. Möllmann und Möhring 2017)). Durch diesen Aufbau lassen sich jedoch auch altersdifferente Risiken (Jugendrisiken, Altersrisiken) abbilden, während sich grundsätzlich ein altersindifferentes Risiko lediglich durch eine Erhöhung des Kalkulationszinssatzes abbilden ließe (Reed 1984). Basierend auf Formel 2 wird im dritten Schritt der Wertzuwachs mit den Kapitalopportunitätskosten verglichen. Hierbei wird die optimale Erntedimension erreicht, wenn das Wertzuwachsprozent (*WZP*) dem Kalkulationszins entspricht (Möhring 2009).

Das dem Pressler'schen Weiserprozent (sowie auch dem Wertzuwachsprozent) inhärente Konzept der Marginalanalyse wird in einem vierten Schritt in einem neuen ein-Perioden-Modell auf die Standraumfrage übertragen, um einen theoretischen Erkenntnisrahmen für den Produktionsprozess von Kiefernstarkholz zu schaffen. Dieser Prozess ist von den Entscheidungen des Erhalts (Investition), Erhalt und Freistellung (erweiterte Investition) und Nutzung (Desinvestition bzw. Liquidierung) von Einzelbäumen geprägt. Bspw. zeigt sich die Investition von Kapital und Fläche über einen Zeitraum in einen Bestand in initial steigenden Bodenertragswerten, welche durch Durchforstungsentscheidungen verändert werden können (Halbritter 2020). Die Implementierung dieser Entscheidung in das *FPOT* findet bisherig über Kohortenmodelle (z.B. Jacobsen u. a. 2018), Matrizenkalkulationen (z.B. Rämö und Tahvonon 2017) sowie über Ableitungen (z.B.

Heshmatol Vaezin u. a. 2009) und Enumerationen (z.B. Koster und Fuchs 2022) auf Einzelbaumebene statt. Da der Bewirtschaftende die Standraumfrage auf ebendieser Ebene des Einzelbaumes entscheidet, wurde im vierten Schritt ein einfacherer und intuitiver Ansatz als die bestehenden entwickelt. Hierzu wurde auf das Fisher-Separationstheorem (Fisher 1930) zurückgegriffen, welches besagt, dass die Investitionsentscheidung eines Unternehmens unabhängig von den individuellen Präferenzen der Eigentümer ist. Übertragen auf die Durchforstungsentscheidung unterstellt dies, dass die Durchforstungsentscheidung des Bewirtschaftenden bezüglich eines Einzelbaumes (Investitionsentscheidung) unabhängig von den umgebenden Bäumen getroffen werden kann. Diese werden als beliebig teilbar sowie homogen angesehen. Bei einer Freistellung bis zum optimalen Standraum entspricht der Grenznutzen (Grenzwertzuwachs des freigestellten Baumes) den Grenzkosten (Holzproduktionswert (Möhring u. a. 2006) des umgebenen Bestandes). Die Freistellung erzeugt waldbaulich gesprochen keine „Hiebsopfer“, welche nicht durch den (Grenz-)Wertzuwachs der Starkholzkiefer ausgeglichen werden können. Folgende Annahmen wurden getroffen: Der Kronenraum steht exklusiv entweder dem Einzelbaum oder dem umgebenen Bestand zur Verfügung, die Kiefer leistet den Zuwachs des volumengewichteten Kreisflächenmittelstammes des ausscheidenden und verbleibenden Bestandes einer Oberhöhenbonität 33 (nach Albert u. a. 2024) im Alter 90. Der Nutzen des in Anspruch genommenen Standraumes der Kiefer folgt einer monoton steigenden, parametrisierten Hossfeld IV-Funktion (siehe Pretzsch 2010, 394) mit einem Erreichungsgrad von 100 % des errechneten Ertragstafelvolumenzuwachses, wenn der Standraum der Kiefer dem Standraum (nach Döbbeler u. a. 2002; genutzt in Hansen und Nagel 2014, 201) des Kreisflächenmittelstammes des verbleibenden Bestandes in selbiger Bonität im identischen Alter entspricht. Ohne Standraum liegt dieser bei 0 %, zudem wird bei 130 % eine Asymptote angenommen. Unter Nutzung der weiteren Eingangsparameter (Wertklasse, Holzernteverfahren und Holzerntekostenstufe für die Berechnung der holzerntekostenfreien Holzerlöse (nach v. Bodelschwingh 2018) sowie die daraus abgeleiteten Wertzuwächse der Starkholzkiefer; Überlebenswahrscheinlichkeiten und Risikotypen ( $\alpha$ ) der Starkholzkiefer, des Nachfolgebestandes sowie des umgebenen Bestandes für eine Risikoadjustierung; den Umrechnungsfaktor von Vfm in Efm; den Ausgangs-BHD und- standraum sowie das Ausgangsalter der Kiefer; die Baumart, Bonität, Erlös- und Kostenwertziffer, Waldbaukosten sowie das Ausgangs- und Endnutzungsalter (analog zu Möhring u. a. 2017) für den umgebenen Bestand; den Kalkulationszins für die ökonomische Bewertung) lässt sich eine Vielzahl an Produktionsszenarien darstellen, wobei der methodische Kern einer Marginalanalyse erhalten bleibt. Insbesondere die Nutzung einer Annuität als Opportunität für den umgebenen Bestand ist intuitiv als Rente zu verstehen (vgl. Möhring u. a. 2006). Das vorgestellte Szenario beruht auf folgenden Annahmen: Kalkulationszins von 1,0 %; Umrechnungsfaktor von Vfm in Efm von 0,8; Annahme von Sicherheit (kein Ausfallrisiko); Begründungs- und Pflegekosten der Kiefer wie in Schritt 1; aus dem Ausgangsdurchmesser von rund 38,8 cm herleitendem Standraum von rund 21 m<sup>2</sup> einer Kiefer der Oberhöhenbonität 33 im Alter 100 mit einem Alter von 90 Jahren der selbigen Wertklasse und dem identischen Holzernteverfahren wie in Schritt 1; der umgebene Bestand wird durch einen Buchenbestand der III. Ertragsklasse (nach Schober 1995) gemäß der Berechnung der Holzproduktionswerte (Möhring u. a. 2017) mit einer konstanten zweiten Wertziffer der Erlöse und dritten Wertziffer der Kosten bei einem mindest- $d_g$  bei Ersteintritt von 10 cm sowie Begründungskosten von 6.800 €/ha und weiteren waldbaulichen Kosten von 250 €/ha je im Alter 10 und 20 mit einem planmäßigen Endnutzungsalter von 150 Jahren repräsentiert. Die vorgestellten Annahmen sind sämtlich variabel im Modell eingebunden. Die Risikoimplementierung erfolgt sowohl für die Kiefer als auch für den umgebenen Bestand wie in Schritt 1 (nach Möllmann und Möhring 2017). Aus diesen werden anschließend die Erwartungswerte für den (Grenz-)Wertzuwachs und die (Grenz-) Opportunitätskosten des umgebenen Bestandes berechnet und projiziert. Neben dieser graphischen Lösung wird der optimale Standraum mittels eines Optimierungsalgorithmus bestimmt. Abschließend werden die Treiber des Standraums ermittelt und eingeordnet. Das angewandte Verfahren ist zudem in die Struktur des FPOT einzuordnen.

Um die Annahmen der vorgestellten Kalküle einzuordnen, werden Daten aus der „Betriebsinventur Niedersachsen“ (NFP 2023) aufbereitet, ausgewertet und diese empirische, naturale Grundlage mittels der im theoretischen Teil vorgestellten Bewertungsfunktionen (Fuchs u. a. 2023) in ein weiteres bioökonomisches Modell überführt. Hierbei werden Einzelbaumdaten von Kiefern aus dem Zeitraum 2000 bis 2022 im niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Landeswald für Bäume im Oberstand oder Überhalt ab einem BHD von 30 cm ausgewertet, sodass für diese auch eine Qualitätseinschätzung nach HKS für die unteren 8 m des Stammes (NFP 2009) vorliegt (Übersetzung der HKS-Güteklassen in die Wertklassen nach Fuchs u.a. (2023)). Die „Betriebsinventur Niedersachsen“ ist eine stratifizierte Stichprobeninventur mit konzentrischen Probekreisen und weist teilweise Wiederholungsaufnahmen auf. Es wird an den Kontrollstichprobenpunkten (KSP) zudem der Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes ( $d_g$ ) sowie seine Höhe ( $h_g$ ) erfasst. Somit lassen die Bonitäten, Höhen, Volumina und Werte je Baum sowie deren Veränderung ermitteln (in Hansen und Nagel 2014 genutzte Funktionen; nach Döbbeler u. a. 2002; Volumina nach Bergel 1987). Insgesamt wurden so rund 1.400 Starkholzkiefern mittels deskriptiver Statistik und explorativer Datenanalyse untersucht. Es wird auf die Kalküle des Volumenzuwachses (Quotient aus Volumenzuwachs und Ausgangsvolumen), des Wertzuwachs (Quotient aus Wertzuwachs und Ausgangswert (Borchert 2002, 56)) sowie des Wertfaktors (Quotient aus Wertzuwachsprozent und Volumenzuwachsprozent) zurückgegriffen.

Zusätzlich wurden aus den Daten der Betriebsinventur unter Nutzung des Kaplan-Meier-Schätzers Kurven für die Wiederantreffenswahrscheinlichkeit im Wirtschaftswald qualitätsdifferenziert hergeleitet. Hierzu wurden die Daten so aufbereitet, dass einzelne Bäume in verschiedenen Aufnahmejahren wieder identifizierbar sind.

### 1.3.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete

#### Absatz

Bereits aus den Volumina der Absatzgruppen wird die Nischenstellung des Kiefern(wert-)starkholz deutlich. Bemerkenswert ist, dass rund jeder zweite Festmeter Starkholz als Wertstarkholz abgesetzt wird. Im Rahmen der ABC-Analyse ergibt sich für Kiefernwertstarkholz die flachste Lorenzkurve (Abbildung 2). Dies weist auf eine hohe (erforderliche) Nähe zum Endkunden zwecks Absatzes dieses Sortiments hin. Aus dieser Nähe resultieren typischerweise direkte und wenig komplexe Absatzketten, welche hierdurch ein hohes Maß an Effizienz aufweisen. Zudem wird die über alle Absatzgruppen herrschende Fragmentierung deutlich. Jedoch ist diese für den Kiefernstarkholz- und Kiefernwertstarkholzabsatz von überproportionaler Bedeutung. Bei einer Differenzierung innerhalb der Absatzgruppen nach Stärkeklassen ergibt sich zudem eine zunehmend flache Lorenzkurve mit zunehmender Stärkeklasse. Hieraus resultiert die mit der Stärkeklasse ebenso zunehmende Bedeutung von Kleinabnehmern (1-499 Fm/a (vgl. Döring u. a. 2020)) sowie zusätzlich ein zunehmender Anteil von Wertholz mit der Zunahme der Stärkeklasse. Insgesamt dominiert die Stärkeklasse 4 jedoch den Markt für Kiefernstarkholz.

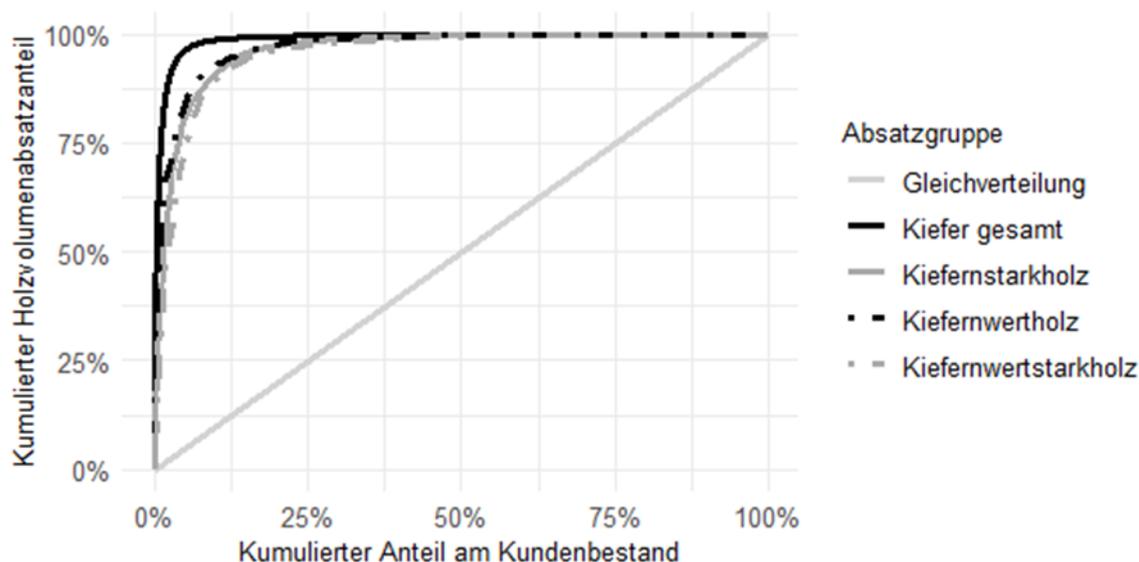


Abbildung 2: ABC-Analyse der Absatzgruppen

#### Produktion

Unter Nutzung des erstellten bioökonomischen Modells und der Anwendung des Kalküls des EPWP ergeben sich bei bestandesweiser Starkholzproduktion bonitätsabhängig optimale Erntedurchmesser der stärksten Stämme von 45 bis 50 cm (Abbildung 3). Bei diesen Dimensionen unterhalb des Starkholzbereiches entspricht der marginale Wertzuwachs ( $It$ ) den marginalen Opportunitätskosten ( $rt$ ). Qualitätsseitig weisen wertholzhaltige Bestände (Wertklasse 1) bei identischem Ersatz die niedrigste optimale Erntedimension über alle Bonitäten auf, während geringwertigere Qualitäten (dimensionsindifferente Wertzuwächse, bspw. bei Energieholz im Stockverkauf) höhere optimale Erntedimensionen erzielen.

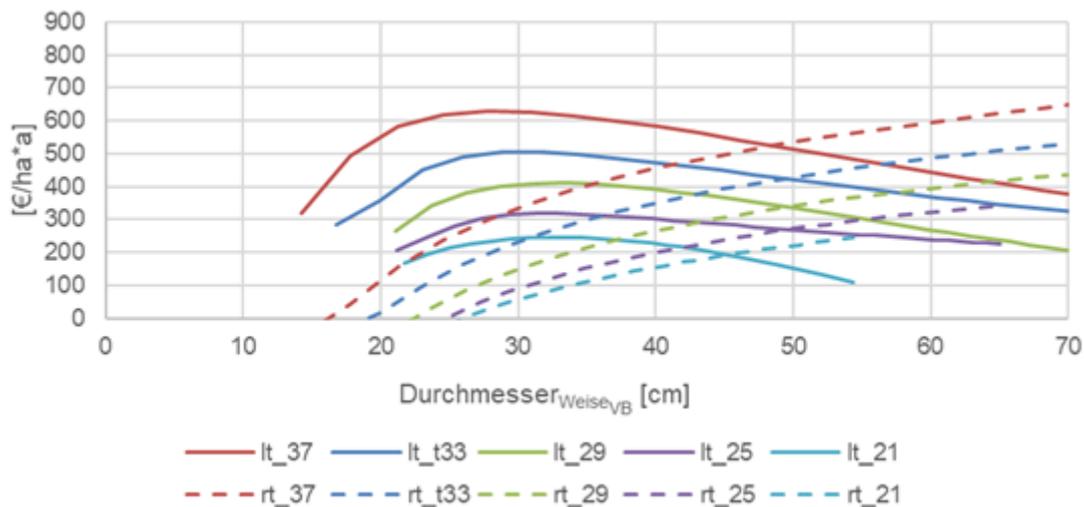


Abbildung 3: Bonitätsabhängige Wertzuwächse (lt) und Opportunitätskosten (rt) von Kiefernbeständen

Im Zuge des zweiten Schrittes erweisen sich heute überdurchschnittliche Wertklassen, in Zukunft unterdurchschnittliche Wertklassen, erhöhte Begründungs- und Pflegekosten (bis 5- bzw. 6-fach) und starke Jugendrisiken als schwache Treiber einer höheren Umtriebszeit. Mäßigen Einfluss weisen eine heute unterdurchschnittliche Wüchsigkeit bzw. reziprok eine zukünftig überdurchschnittliche Bonität sowie ein im Alter zunehmender waldbaulicher Nutzen (von bis zu 90 €/ha\*a) und ein Abfall der zukünftigen Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Alter 100 in den einstelligen Prozentbereich auf. Den stärksten Einfluss hat der Kalkulationszins. Eine vereinfachte graphische Interpretation der Auswirkung zukünftig geringerer Wüchsigkeit (Bonitäten) zeigt Abbildung 3. So führt ein nicht-identischer Ersatz der höchsten Bonität 37 durch eine nachfolgende Waldgeneration der Bonität 29 zu einem ansteigen der optimalen Erntedimension von unter 50 cm (Schnittpunkt durchgezogene und gestrichelte rote Linie) auf rund 65 cm (Schnittpunkt durchgezogene rote und gestrichelte grüne Linie).

Die im dritten Schritt unter Annahme der Flächenindifferenz (WZP statt PWP) des Oberstandes durchgeführte Analyse der optimalen Erntedimension begründet ökonomisch der Starkholzproduktion im Überhaltbetrieb. Dies gilt für mittlere und bessere Bonitäten, bei denen sich eine Zielstärke von rund 65 cm BHD für die stärksten Stämme ( $d_{Weise}$ ) bei mittleren Qualitäten (Wertklasse 2) ergibt (Abbildung 4).

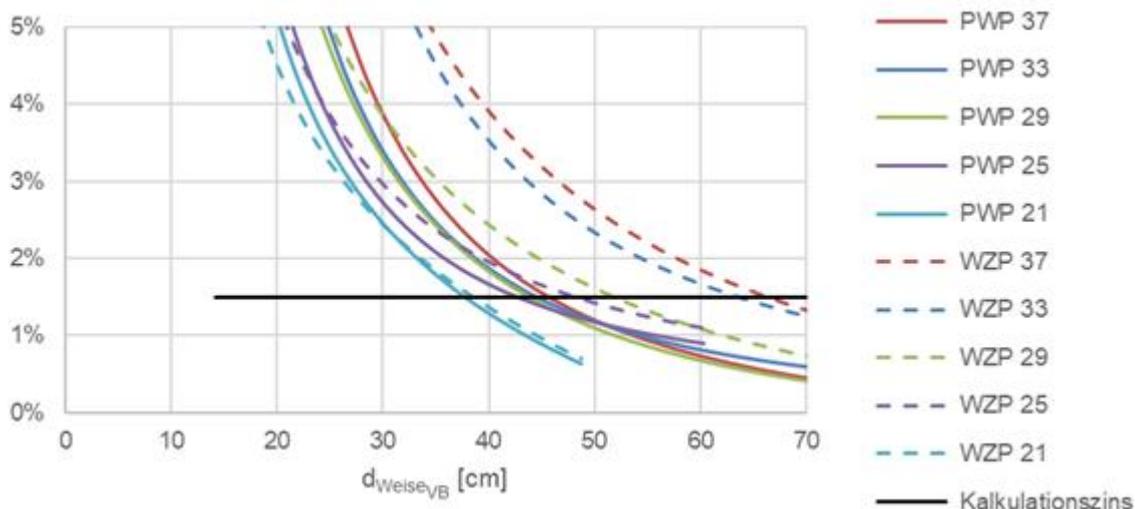


Abbildung 4: Bonitätsabhängiges Pressler'sches Weiserprozent (PWP) und Wertzuwachsprozent (WZP) von Kiefernbeständen

Das dargestellte Prinzip der Marginalanalyse wird genutzt, um im vierten Schritt die optimale Freistellung von Einzelbäumen im Starkholzproduktionsprozess zu bestimmen. Hierbei wird in der beispielhaft vorgestellten Konfiguration des Modells eine Freistellung um rund 4 m<sup>2</sup> (von rund 21 auf rund 25 m<sup>2</sup>) im Rahmen der Iteration als optimal bestimmt (Abbildung 5). Bei diesem Standraum entsprechen sich gemäß der Marginalanalyse die Erwartungswerte der Grenz-Wertzuwächse der Kiefer und der Grenz-Opportunitätskosten durch den umgebenen Bestand. Dies zeigt sich auch darin, dass der Erwartungswert des Grenz-Nettowertzuwachses (Grenz-Wertzuwachs abzüglich Grenz-Opportunitätskosten) null entspricht. Aus dieser graphischen Aufbereitung lassen sich nun die Treiber des Standraumes herleiten, welche zu einer Erhöhung des optimalen Standraumes führen: Eine Erhöhung der bioökonomischen Größen der Kiefer und ihres Grenz-

Wertzuwachses. Dies kann durch geringere Wüchsigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeiten oder Holzpreise, höhere Holzerntekosten, aber auch einem geringeren Standraumanspruch als angenommen („Packing“ (Morin u. a. 2025)) erfolgen. Alternativ führt auch ein Absinken der Überlebenswahrscheinlichkeiten und bioökonomischen Größen des umgebenen Bestandes, aber auch ein steigender Kalkulationszinssatz zu höheren optimalen Standräumen und damit einer intensiveren Freistellung. Die Implementierung in die Struktur des *F POT* lässt sich Tabelle 2 entnehmen.

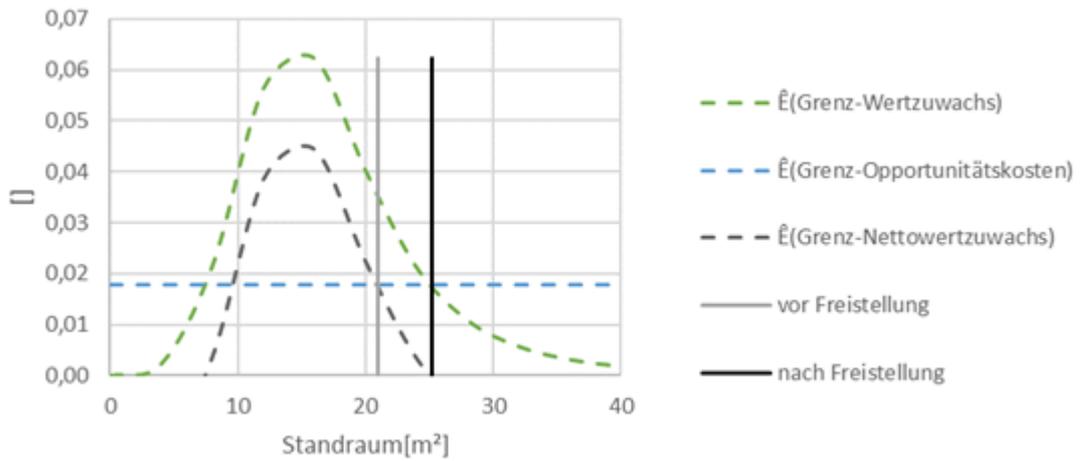


Abbildung 5: Marginalanalyse des optimalen Standraumes für die Kiefernstarkholzproduktion

Tabelle 2: Strukturierung der angewandten Kalküle

	<b>Ebene</b>	<b>Kalkül</b>	<b>Bewertungsansatz</b>
Optimale Erntedimension von Starkholz	ökonomisch optimale Hiebsreife	Zeitlicher Grenzzuwachs eines Baumes auf bestehendem Standraum (incl. Risiko)	Risikoadjustiertes Faustmann-Pressler- Ohlin-Theorem (FPOT)
		Opportunitätskosten der Verzögerung des Nachfolgebestandes auf bestehendem Standraum (incl. Risiko) sowie der Kapitalbindung	
	ökonomisch optimaler Standraum	Räumlicher Grenzzuwachs eines Baumes auf bestehendem und zusätzlichen Standraum (incl. Risiko)	Weiterentwicklungsansatz im Projekt
		Opportunitätskosten der Verzögerung des Nachfolgebestandes auf bestehendem Standraum und der Nutzung der Nachbarbäume auf bestehendem und zusätzlichen Standraum (incl. Risiko)	

Aus der Analyse der empirischen Daten der Starkholzkiefern ergeben sich folgende naturale und ökonomische Kennzahlen, welche auf Einzelbaumebene abgeleitet wurden: Starkholzkiefern wachsen über alle Qualitäten rund 3 mm/a im BHD zu. Deutliche Unterschiede zwischen den Qualitäten sind nicht ermittelbar. Hieraus ergeben sich (unter Einbezug des Höhenwachstums) rund 0,05 fm/a Volumenzuwachs, ebenso ohne Unterschiede zwischen den Qualitäten. Dies resultiert in einem Volumenzuwachsprozent von 1,75. Ökonomisch bewertet ergibt sich ein Wertzuwachs von rund 2,40 €/a, welcher in höheren Qualitäten am höchsten ist. Dies bedeutet ein Wertzuwachsprozent von rund 2,1. Hieraus ergibt sich ein Wertfaktor von rund 1,2. Dies bedeutet, dass je zugewachsenen Festmeter das 1,2-fache an Wert zuwächst.

Die Analyse der Wiederantreffenswahrscheinlichkeiten zeigt auf, dass die Bewirtschaftung Kiefern höherer Qualität erhält (höhere Wiederantreffenswahrscheinlichkeit) wobei sich etwa ab dem Alter 150 eine Umkehr dieser Verhältnisse einstellt (Abbildung 6). Es ist somit ein Einfluss der Bewirtschaftung erkennbar.

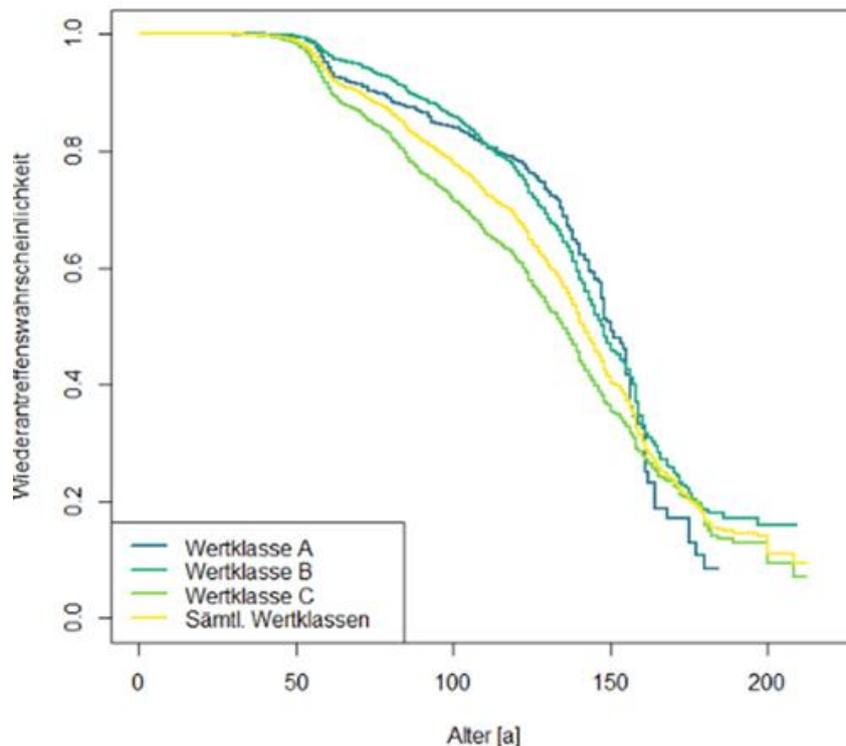


Abbildung 6: Wiederantrittswahrscheinlichkeiten von Kiefern-Einzelbäumen über das Alter (Güteklassendifferenziert)

## Diskussion

### Absatz

Der Umstand, dass mit zunehmender Stärkeklasse ein zunehmender Anteil des Starkholzes als Wertholz abgesetzt wird und der Verlauf der Lorenzkurve für Wertstarkholz deuteten darauf hin, dass absatzfähiges Starkholz einen effizienten Marktzugang findet. Bedingt durch die Datenbasis, kann Holz, welches nicht Eingang die Holzeinnahme findet, bspw. weil es nicht eingeschlagen wird, nicht berücksichtigt werden. So könnten bspw. geringwertigere Stämme im Bestand verbleiben. Auch sollte Wertholz aufgrund seiner erhöhten Flächen- und Kapitalopportunitätskosten geringeren Umtriebszeiträumen und somit Ernte- und Absatzdimensionen unterworfen sein, während für geringwertigere Stämme aufgrund ihrer geringeren Opportunitätskosten das Gegenteil gilt. Die nun aktualisierten Zahlen zeigen, dass unter Ausklammerung von geringqualitativem Kiefernstarkholz als „abgeschriebene Naturressource“ (Möhring und v. Bodelschwingh 2016), ein Absatz von Kiefernstarkholz stattfindet.

### Produktion

Die im ersten Schritt festgestellten optimalen Erntedimensionen liegen unterhalb der Starkholzdefinition. Daher lässt sich unter den getätigten Annahmen eine Starkholzproduktion ökonomisch nicht rechtfertigen. Zudem entsprechen diese den optimalen Erntedimensionen den Waldbauprogrammen der Landesforstbetriebe (NLF 2021; SHLF und NW-FVA 2021) sowie den typischen mitteleuropäischen Umtriebszeiten (Frey 1909; Mason und Alía 2000; Fischer und Mölder 2017). Des Weiteren sind Wertholzbestände aufgrund ihrer geringen optimalen Erntedimension nicht zur bestandesweisen Wertholzproduktion geeignet. Dies deutete sich bereits in den Absatzanalysen an.

Unter Beachtung der geringen „Durchmesser-Distanz“ zu Starkholzdimensionen ermöglicht jedoch die betriebliche Einschätzung der zukünftigen Produktionsbedingungen von Rohholz eine Erhöhung der Umtriebszeit von bis zu 20 Jahren. Dies ermöglicht ein Einwachsen ins Starkholz und stellt c.p. insb. bei Annahme zukünftig geringer Wüchsigkeit und Überlebenswahrscheinlichkeiten im Zuge des Klimawandels (vgl. Reich und Oleksyn 2008) eine ökonomische Erklärung der Starkholzproduktion dar. Hervorzuheben ist die Bedeutung des Kalkulationszinssatzes, welcher insb. bei höherem Ansatz als 1,5 % eine Starkholzproduktion, auch bei Unterstellung des Klimawandels, ökonomisch nicht rechtfertigbar erscheinen lässt.

Selbiges gilt auch für die Analyse des Überhaltbetriebs. Zudem nimmt die Flächenindifferenz an, dass kein Zusammenhang zwischen den Bestandesschichten besteht, wobei die Kiefer tendenziell zu hoher interspezifischer und inter-schichtiger Konkurrenz neigt (Hilmers u. a. 2025). Dabei sind die Wurzelkonkurrenz und Interzeption restriktiver als die Überschirmung durch Altkiefern (Petersen 2001). Auch sind die

Standortverhältnisse zu beachten (Heinsdorf 1994). So träge die Annahme der Flächenindifferenz insb. nicht auf trockene und/oder nährstoffarme Standorte zu. Folglich ist eine Starkholzproduktion vielfach lediglich ökonomisch in einem Überhaltbetrieb und damit auf Einzelbaumebene rational.

Das im Schritt vier entwickelte Modell zur Bestimmung der optimalen Freistellung bzw. Durchforstungsintensität ist ebenfalls vor dem Hintergrund der Flächenopportunität zu betrachten. So führt die angenommene Opportunität auf voller Kronenschirmfläche (vollem Standraum) zu einer Exklusivität des Kronenraumes für die Kiefer. Läge im vorgestellten Fall eine teilweise Flächenindifferenz vor (wie auch zuvor für einzelne Überhaltkiefern unterstellt, bspw. durch die vertikale Schichtung des Bestandes) wären größere Standräume ökonomisch optimal. Zudem geht das Modell von einer idealisierten kreisförmigen Krone aus, um die Simplizität zu wahren. Diese basieren auf durchmesserabhängigen Funktionen der Kronenbreite, während auch weitere Bestandescharakteristika, wie die Stammzahl (Saarinen u. a. 2022), Einfluss auf die Kronenbreite haben.

Das vorgestellte Modell stellt ein ein-Perioden-Modell dar. Kiefernstarkholz wird jedoch vielfach in Beständen mit mehreren Eingriffen erzogen, sodass sich je Eingriffszeitpunkt für den Einzelbaum die Frage nach dem optimalen Standraum stellt. Somit liegt eine mehrperiodige Fragestellung vor. Da das Wachstum der Kiefer als mit dem Alter (hier: 90 Jahre) monoton fallend unterstellt wird, liegt somit eine Pfadabhängigkeit vor. Bspw. starke Eingriffe in der Jugend ermöglichen ein stärkeres Durchmesserwachstum, welches über die Holzverkaufserlös- und Holzerntekostenfunktionen in die ökonomische Bewertung eingeht. So führt ein erhöhter Standraum in jungem Alter zu einem höheren Volumenzuwachs auf der Hossfeld-Nutzenfunktion des Standraumes, welcher einen überproportionalen Wertzuwachs erzeugt. Daher kann das vorgestellte Kalkül entweder lediglich auf ein-Perioden-Entscheidungen angewandt werden oder es gilt unter der Bedingung der Erzeugung von Sortimenten ohne Dimensionseffekt (z.B. Energieholz oder Industrieholz). Zusätzlich müssen die Holzerntekosten unabhängig vom Durchmesser sein, das Stück-Volumen-Gesetz gilt also nicht. Eine weitere Möglichkeit der Inhärenz der Pfadabhängigkeit stellt der Vergleich des aktuellen Standraumes bei gegebenem BHD mit dem „Norm-Standraum“ (nach Döbbeler u. a. 2002) für diesen Durchmesser dar. Daher wurde im entwickelten Modell auf den „Norm-Standraum“ einer „Norm-Kiefer“ gemäß der Kronenbreitenfunktion basierend auf dem Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes selbiger Bonität und selben Alters gemäß Ertragstafel zurückgegriffen.

Dennoch ist das Modell in der Lage mehrperiodige, durchmesserindifferente Produktionsprogramme zu simulieren. Hierbei wird das einfache vorgestellte Kalkül über die Perioden aufsummiert und es ergibt sich ein summarischer Grenz-Nettowertzuwachs von null über alle Produktionsperioden. Werden jedoch wieder Elemente der Pfadabhängigkeit (Holzerntekosten- und Holzverkaufserlösfunktion, Referenz des Standraumes zum Standraum einer Kiefer mit identischem Durchmesser) integriert, lässt sich zwar die Freistellung im optimalen Produktionsprogramm bestimmen, jedoch nicht mehr im vorgestellten Kalkül intuitiv lösen.

Aus der Auswertung der Betriebsinventur wird deutlich, dass Starkholzkiefern mit einem Wertzuwachsprozent über alle Qualitäten von 2,1 die in der mitteleuropäischen Forstwirtschaft üblichen Kalkulationszinsen übersteigen und somit bei Annahme einer Flächenindifferenz einen Überhaltbetrieb ökonomisch erklären können. Diesem Mittelwert liegt jedoch eine Verteilung zugrunde, nach welcher die Kiefern, welche die geringsten (i.d.R. negative) Wertzuwächse aufweisen eine Qualitätsverminderung erfahren haben. Dies verdeutlicht, dass die Möglichkeit der Entwertung eine ökonomische Rechtfertigbarkeit infrage stellt. Aus der Feststellung der höheren Wiederantreffenswahrscheinlichkeit qualitativ höherwertiger Kiefern bis ins Alter 150 ergibt sich, die Frage nach der (nicht-)Nutzung der geringwertigeren Kiefern (höhere Wiederantreffenswahrscheinlichkeit ab dem Alter 150). Diese Feststellung bestätigt empirisch das Kalkül aus Schritt 2, nach welchem mit höherer Qualität eine geringere optimale Erntedimension einhergeht. Die Frage nach dem Verbleib der geringwertigen Kiefern stellt sich auch im Zuge der Analyse des Kiefernholzabsatzes. Hervorhebenswert ist der Wertfaktor mit einem Wert  $\geq 1$ . Somit erreichen Starkholzkiefern im Mittel einen positiven Dimensionseffekt.

Abschließend ist auf die Relevanz der für sämtliche ökonomische Bewertungen verwendeten Holzerntekosten- und Holzverkaufserlösfunktionen zu verweisen (v. Bodelschwingh 2018; Fuchs u. a. 2023). Diese sind monoton fallend bzw. steigend und implizieren somit, dass Starkholzernteverfahren in der Stückfunktion (je Fm) nicht kostenintensiver sind als jene der Massensortimente (siehe Teilvorhaben 4) und, dass Starkholz ein preislich oberhalb der Massensortimente absetzbares Gut darstellt. Dies erfordert hochwertige Verwertungen in der Ver- und Bearbeitung von Kiefernstarkholzsortimenten. Sind diese Umstände nicht gegeben, ist eine Starkholzproduktion ökonomisch nicht erklärbar und starke Kiefernstämme können als „wirtschaftlich abgeschriebene Naturressourcen“ (Möhring und v. Bodelschwingh 2016) interpretiert werden.

#### Fazit und Ausblick

Basierend auf dem Absatz von Kiefernwertstarkholz kann ein fragmentierter aber auf dem aktuellen Absatzniveau effizienter Markt attestiert werden. Dies lässt absatzpolitisch Perspektiven für den Kiefernwertstarkholzabsatz aufseiten der Forstbetriebe erwarten. Unter Antizipation der Veränderungen der biologischen Produktion durch den Klimawandel kann die Starkholzproduktion ökonomisch rational sein. Insbesondere wenn ein flächenindifferenter Überhaltbetrieb geführt wird, für welchen die Kiefern in Nordwestdeutschland auch die erforderlichen Wertzuwächse leisten. Für Produktionsprogramme zur

Kiefernstarkholzproduktion liegt ein heuristisches Durchforstungsmodell vor, nach welchem bioökonomische Größen, Überlebenswahrscheinlichkeiten und der Kalkulationszins über die optimale Freistellung entscheiden.

Es bleibt somit festzuhalten, dass die Produktion von Kiefernstarkholz betriebswirtschaftlich interessant ist bei dimensionsabhängiger Wertdifferenzierung, der Bereitstellung eines waldbaulichen Nutzens durch den Oberstand, aktuell geringen und zukünftig hohen Risiken oder geringen Wüchsigkeiten sowie einem geringen Anspruch an die Verzinsung des eingesetzten Kapitals. Vornehmlich für höhere Qualitäten scheinen aktuell Absatzmöglichkeiten vorzuliegen.

## **Arbeitspaket 4: Sichere sowie umwelt- und bestandesschonende Starkholzernte / Abbildung der gesamten Prozesskette**

### **1.4.1 Zielsetzung des Teilvorhabens: Kriterien zur Bewertung der Holzernteverfahren in Kiefern-Starkholz-Beständen**

Im Rahmen dieses Teilprojektes sollten mögliche Verfahrensketten zur Bereitstellung von Kiefernstarkholz identifiziert, modelliert und anhand wichtiger Parameter für die Versuchsregion analysiert und verglichen werden. In Abstimmung mit den Projektpartnern sollten anschließend Fallstudien in charakteristischen Beständen durchgeführt werden. Auf den Erkenntnissen des Teilprojektes basierend, sollte eine Entscheidungshilfe abgeleitet werden können, um jeweils das optimale Verfahren nach ökonomischen, ökologischen und ergonomischen Gesichtspunkten in Abhängigkeit der Bestandes- und Eingriffscharakteristika identifizieren zu können.

Um geeignete Holzernteverfahren für Kiefern-Starkholzbestände auszuwählen, müssen diese Verfahren in einem ersten Schritt anhand von Bewertungskriterien geprüft werden. Für die Kiefern-Starkholzernte werden im Folgenden die relevanten Bewertungskriterien kurz dargelegt, um dann nach Eingabe relevanter Bestandesparameter anhand derer die Bestände charakterisiert werden können, um auf dieser Grundlage passende Verfahren zu bestimmen.

### **1.4.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete**

#### *Ökologie*

##### Bestandespfleglichkeit

Die Bestandespfleglichkeit angewandter Holzernteverfahren ist für eine langfristig ökonomisch und ökologisch erfolgreiche Bewirtschaftung von Waldbeständen maßgeblich. Ziel ist eine möglichst geringe verfahrensbedingte Schädigung des verbleibenden Bestandes, sodass auch Folgeschäden minimiert werden. Bei Holzerntemaßnahmen kann es durch Fällen, Aufarbeiten, Vorrücken und Rücken zu Schäden an den verbleibenden Bäumen kommen. Derartige Schäden werden gemäß Meng (1978) häufig erst ab einer Fläche von 10 cm<sup>2</sup> Rindenverletzung erfasst, da bei Schäden dieser Größe ein erhöhtes Risiko für den Baum besteht, von Sekundärschädlingen, wie Pilzen, befallen zu werden. Neben geringeren Verkaufserlösen bei verringerten Holzqualitäten kommen wirtschaftliche Verluste durch die Minderung des Holzzuwachses und eine Erhöhung der Aufarbeitungskosten durch einen höheren Sortieraufwand hinzu (Dimitri 1983).

Schadbeeinflussende Faktoren für die Entstehung von Rindenschäden sind in abnehmender Reihenfolge, laut Sauter und Nakou (2014):

- I. Entnahmeprozent
- II. Entfernung des Baumes zur Erschließungslinie
- III. Angewandtes Holzernteverfahren
- IV. Vorrückeentfernung
- V. Baumhöhe sowie Baumart

Darüber hinaus konnte Kudjelka (1977) aber auch einen Einfluss der Bestandesdichte auf das Schadprozent nachweisen. Fällungen zur Rückegasse sorgen im erhöhten Maße für Schäden an den Gassenrandbäumen. Je weiter ein Baum von der Rückegasse entfernt steht, desto weniger ist er selbst von Fäll- und Rückeschäden betroffen, trägt aber umso mehr selbst zur Schädigung von Bäumen näher der Rückegasse bei. Jedoch stellten Sauter und Nakou (2014) in ihren Modellberechnungen fest, dass ab einer Entfernung von 40 m die Schadanfälligkeit der Bestandesglieder wieder ansteigt, was ihrer Meinung nach auf schwieriger durchführbare Vorrückearbeiten zurückgeführt werden könnte. Auch Butora und Schwager (1986) vermuteten, dass zwei Drittel der Schäden in ihrer Untersuchung auf das Rücken und lediglich ein Drittel auf das Fällen zurückzuführen waren, was die Bedeutung der Vorrückeentfernung nochmal unterstreicht. Mit der Nähe zum Rückegassenrand nehmen außerdem nicht nur die Schadenswahrscheinlichkeit an Bäumen, sondern ebenso die jeweilige Schadintensität allgemein verfahrensbedingt zu (Meng (1978) und Bort et al. (1993)). Insbesondere lange Sortimente und weite Vorrückedistanzen tragen hierzu bei, da sich Langholz im Vergleich zu Kurzholz schlechter manipulieren lässt (Meng 1978; Sauter und Nakou 2014). Verfahren unter Verwendung von Greifzangen, die ein kontrolliertes Manipulieren der Stämme ermöglichen, können somit die Bestandespfleglichkeit im Vergleich zu Seilzugverfahren erhöhen (Han und Kellogg 2000; Sauter und Nakou 2014).

Die Vorrückentfernung bzw. die Rückegassenabstände und das angewandte Holzernteverfahren stehen häufig in enger Beziehung zu einander. Während bei einem Rückegassenabstand von 20 m der Bestandesblock allein von Harvester und Forwarder bearbeitet werden kann, muss bei 30 m Abstand als Ergänzung ein Forstwirt zum motormanuellen Zufällen aus dem Mittelblock in die Kranzone des Harvesters hinzugezogen werden. Bei einem Abstand von 40 m und mehr, ist je nach Baumhöhe ein zusätzliches Vorrücken in die Kranzone des Harvesters erforderlich (Sauter und Busmann 1994). Sauter und Busmann (1994) sowie Bort et al. (1993) stellten daher bei Einsatz des Harvesters und zunehmenden Gassenabständen in Beziehung zu den angewandten Holzernteverfahren höhere Schadanteile am verbleibenden Bestand fest. Bei 40 m Abstand der Rückegassen fielen die Schäden mit 10,6 % am höchsten aus, bei 30 m Abstand betragen sie 6,8 % und bei 20 m Abstand waren es 3,4 %. Eine vollmechanisierte Holzernte stellte sich demnach bei einem Rückegassenabstand von 20 m am bestandesschonendsten dar (McNeel und Ballard (1992); Sauter und Busmann (1994); Bort et al. (1993); Lageson (1997); Sauter und Nakou (2014)). In allen drei Varianten der Versuche von Sauter und Busmann (1994) war des Weiteren der Unterstand gefährdeter als der herrschende Bestand. Während bei den 30-Meter und 40-Meter-Abständen die meisten Schäden jedoch im mitherrschenden Bestand auftraten, traten bei den 20-Meter-Abständen die Schäden vermehrt am Unterstand auf. Auch hier war also ein Zusammenhang zum angewandten Holzernteverfahren erkennbar (Sauter und Busmann (1994)).

Ein weiterer Unterschied kann sich aus der Bauart des Harvesters ergeben. Raupenharvester verursachten in einer Untersuchung von Feller und Weixler (1998) ein durchschnittliches Schadniveau von 12 % an Bäumen des verbleibenden Bestandes, welches sich vor allem im Bereich der Rückegasse zeigte. Bereits zwei Meter in den Bestand hinein war lediglich noch ein Schadanteil von bis zu 5 % an den verbleibenden Bäumen zu beobachten. Raupenharvester können bestandespflegerischer sein, jedoch lediglich in Verbindung mit einer Baumhaltezange, die über dem Fällaggregat angebracht ist und das aufrechte Herausheben der abgesägten Bäume aus dem Bestand ermöglicht.

Mit Blick auf Schäden an vorhandener Verjüngung zeigte sich, dass beim motormanuellen Holzeinschlag die Bäume mit der Krone gezielter in eine günstige Richtung gefällt werden können. Der Schadensanteil liegt für motormanuelle Fällungen laut Granhus und Fjeld (2001) bei durchschnittlich 33 % (26-50 %), im Vergleich zu 41 % (17-76 %) Schadensanteil durch einen Harvester. Sowohl bei motormanuellen Arbeiten, als auch bei vollmechanisierter Holzernte stieg die Schadensanfälligkeit der Verjüngung mit der Pflanzhöhe und der Nähe zur Rückegasse (Preuhsler und Jakobi (1996); Sikström und Glöde (2000); Granhus und Fjeld (2001)). Bei Raupenharvestern mit Baumhaltezange wiesen Feller und Weixler (1998) nach, dass die Verjüngung ebenfalls weniger Schaden nimmt. Lediglich die Verjüngung direkt am zu fällenden Baum wurde durch Greif- und Fällvorgänge beschädigt, vereinzelt Schäden entstanden zudem in der Nähe der Rückegasse (ebenda).

Die Bedeutung des Fahrwerkes bei den Holzerntemaschinen auf die Bestandesspfleglichkeit im Gassenrandbereich hat Limbeck-Lilienau (1984) in einer Untersuchung dargelegt. Bei einem Radharvester lag der Schaden an den Gassenrandbäumen nach einem Eingriff bei 6 bis 15 %, wohingegen der Raupenharvester mit seinem starren Laufwerk zwischen 12 und 15 % geschädigter Bäume am Gassenrand hinterließ. Betroffen waren insbesondere der Stammfuß und oberflächliche Wurzeln. Radmaschinen verursachen durch die nachgebenden Reifen oft nur Rindenbeschädigungen, während die Raupenlaufwerke den Holzkörper großflächiger beschädigen oder zu Wurzelabrissen führen können (Limbeck-Lilienau (1984); Borchert et al. (2008)). Beim Radharvester hingegen zeigt sich mit steigender Hangneigung eine Zunahme der Schäden, beim Raupenharvester konnte diesbezüglich kein Zusammenhang festgestellt werden (Uhl et al. (2003)).

Nill et al. (2011) stellten des Weiteren unterschiedliche Schadanfälligkeiten der Baumarten in der Holzernte fest, wobei die Stärke dieses Einflussfaktors nur bei rund 6 % im Vergleich zu den vorgenannten Faktoren liegt (Sauter und Nakou 2014). Die Baumarten Fichte und Buche sind demnach am sensibelsten für Holzernteschäden, gefolgt von Eiche, Tanne, Kiefer, Bergahorn, Esche, Lärche und zuletzt der Douglasie als die am wenigsten anfällige Baumart. Da die Baumart Kiefer eine mittlere Schadanfälligkeit aufweist, muss bei der Kiefern-Starkholzernte auf ein bestandesspflegliches Holzernteverfahren geachtet werden.

## Bodenpfleglichkeit

Der Waldboden erfüllt wichtige Funktionen, wie das Filtern und Speichern von Wasser, fungiert als Lebensraum für Mikroorganismen und stellt sowohl Nährstoffe, Sauerstoff als auch Wasser zur Verfügung. Natürliche, unverdichtete Böden bestehen etwa zur Hälfte aus festen Bestandteilen sowie zur anderen Hälfte aus luft- und wasserführenden Poren (Frey und Lüscher (2008)). Die negativen Auswirkungen durch die Befahrung des Waldbodens gilt es zu minimieren.

Drei Faktoren bestimmen die Tragfähigkeit bzw. Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Befahrungsschäden (Sohns (2012); Lüscher et al. (2019)):

- I. Bodenart: Die Befahrungsempfindlichkeit steigt mit abnehmender Korngröße. Folglich sind tonige oder schluffhaltige Böden am empfindlichsten.
- II. Bodenfeuchtigkeit: Je höher der Wassergehalt des Bodens, desto empfindlicher wird dieser gegenüber Verdichtung und Verdrückung. Gefrorene Böden sind durch die Veränderung des Aggregatzustands des Wassers von Flüssig zu Fest weniger empfindlich.
- III. Bodendichte: Mit sinkender Lagerungsdichte des Bodens steigt dessen Empfindlichkeit. Ein hoher Skelettgehalt hingegen verringert die Befahrungsempfindlichkeit.

Durch Befahrung kann sich die effektive Lagerungsdichte, das verbleibende Grobporenvolumen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit und der Eindringwiderstand des Bodens ändern (Lüscher et al. (2009)). Der Kontaktflächendruck einer Forstmaschine und die Tragfähigkeit des Bodens stehen in direkter Beziehung zu einander (Borchert et al. (2012)). Übersteigt der Kontaktflächendruck die Tragfähigkeit, gibt der Boden nach und es bilden sich Fahrspuren. Die Ausbildung unterschiedlicher Spurtypen kann zur Abschätzung des Schadensausmaßes durch Bodenbeeinträchtigungen herangezogen werden. Die relevanteste Einflussgröße zur Ausbildung der Spurtypen ist der Bodenwassergehalt, der die Tragfähigkeit des Bodens maßgeblich beeinflusst.

Drei Spurtypen werden im Allgemeinen unterschieden (Borchert et al. (2012)):

- I. Elastische Verformung: Der Bodenwassergehalt liegt unterhalb der Ausrollgrenze. Die Spuren sind in der organischen Auflage in einer Tiefe von unter 10 cm erkennbar. Meist sind Stollenabdrücke der Maschinenreifen oder eine Komprimierung der organischen Auflage zu erkennen.
- II. Plastische Verformung: Der Bodenwassergehalt befindet sich zwischen der Ausroll- und Fließgrenze. Die Spurtiefe liegt etwa bei 10 cm, der organische Boden wird zum Teil seitlich aufgewölbt.
- III. Grundbruch: Hier ist der Wassergehalt am höchsten. Er liegt gleich mit oder über der Fließgrenze von Wasser. Neben der organischen Auflage wird auch der Oberboden seitlich weggedrückt. Die Spurtiefen sind über 10 cm tief und erreichen bereits den Unterboden.

Während die elastische Verformung noch zu akzeptieren ist, sollte ein Grundbruch dringend vermieden werden (TMLNU (2008); Borchert et al. (2012); Waas (2017)).

Zur Vermeidung von Bodenschäden werden organisatorische, waldbauliche und technische Maßnahmen unterschieden. Je nach vorliegenden Gegebenheiten und Planungshorizont sollten möglichst viele der Maßnahmen herangezogen werden.

- I. Organisatorische Maßnahmen beinhalten die Planung von Holzerntemaßnahmen einschließlich des Eingriffszeitpunktes, der Vorbereitung des Bestandes samt Erschließung, der Organisation geeigneten Personals und passender Maschinen sowie des Vorhaltens möglicher Ausweichflächen.
- II. Waldbaulich sind vor allem die Eingriffsstärke und -häufigkeit entscheidend. Diese Faktoren entscheiden, wie oft und mit welcher Holzmenge eine Rückegasse befahren wird.
- III. Technische Maßnahmen betreffen unter anderem die Auswahl eines geeigneten Holzernteverfahrens und dafür geeigneter Maschinen und -ausstattungen. Ein passendes Befahrungsmanagement sowie die Anlage von Reisigmatten reduzieren die Gefahr von Bodenschäden zusätzlich (FNR 2021).

Als wichtige Einflussgröße und relativ kurzfristig zu beeinflussendem Faktor, richten sich viele Maßnahmen auf den Kontaktflächendruck. Um diesen zu minimieren, existieren mehrere Möglichkeiten, die optimalerweise miteinander kombiniert werden. Durch niedrigen Reifenfülldruck, breitere Reifen und einen möglichst großen Raddurchmesser werden die Kontaktflächen der einzelnen Reifen vergrößert. Zudem sollte die Maschine über eine hohe Anzahl an Rädern verfügen, um die Radlast pro Reifen zu senken. Allerdings könnten laut Rakel (2021) Maschinen mit mehr als sechs Rädern einen Nachteil in Bezug auf höhere Wegeschäden an Gasseneinfahrten und in Hanglagen besitzen. Ebenso können Bogie-Bänder die Aufstandsfläche des Fahrzeuges erhöhen und/oder die Traktion erhöhen, um Schlupf zu vermeiden.

Eine weitere Maßnahme ist die Verringerung der Radlast durch ein niedriges Gesamtgewicht der Maschine, mit einer gleichmäßigen Gewichtsverteilung vorne und hinten (Borchert et al. (2012); Lüscher et al. (2019)). Bei Rückefahrzeugen gestaltet sich die Verteilung des Maschinengewichts jedoch als komplex, da sich die Beladungszustände und damit die Lastverteilungen im Verlauf der Holzurückung stetig verändern (Lüscher et al. (2019)).

Durch die Anlage von Reisigmatten verteilen sich die auftretenden Lasten auf eine größere Bodenfläche (Lüscher et al. (2019)). Hierfür wird der anfallende Schlagabraum konzentriert vor der Maschine auf der Rückegasse abgelegt (Borchert et al. (2012)). Verfügt die Reisigmatte über eine Stärke von 20 cm, minimiert sich der durchschnittliche Bodendruck bereits um mehr als die Hälfte (Neruda und Radomir (2004)). Eine gänzliche Verdichtung kann dadurch aber nicht verhindert werden (Lüscher et al. (2019)).

Sowohl Kremer (2008) als auch Uhl et al. (2003) gehen davon aus, dass im Vergleich zu Radfahrwerken der Kontaktflächendruck bei Raupenfahrwerken durch die größere Aufstandsfläche geringer ausfällt. Mit Radmaschinen befahrene Böden weisen bei sonst gleichen Bodenbedingungen eine höhere Lagerungsdichte und eine geringere Wasserleitfähigkeit auf als mit Raupenmaschinen befahrene Böden (Kremer (2008)). Die Regenerationsmöglichkeit der befahrenen Fläche ist bei Raupenmaschinen daher höher, da die Lagerungsdichte schneller wieder verringert und die Wasser- und Luftleitfähigkeit früher wiederhergestellt ist. Gegenüber dem Rad-System sind Raupenfahrwerke bei gleichen Bodenbedingungen daher als weniger schädlich für die tieferen Bodenschichten zu bewerten (Uhl et al. (2003); Kremer (2008)). Da die Raupen jedoch auf den unebenen Rückegassen nicht immer vollen Bodenkontakt haben, kommt es mitunter zu hohen punktuellen Belastungen, die auch in tieferen Bodenschichten starke Verdichtungen auslösen können (Lüscher et al. (2019)). Darüber hinaus müssen bei Lenkbewegungen der Raupen-Maschinen die Fahrwerke unterschiedlich schnell drehen, sodass es zu Abscherungen der oberen Bodenschichten und damit zu teilweise großflächigen Bodenumlagerungen kommt.

Mit zunehmender Hangneigung verändert sich die Achslastverteilung der Maschinen, der Krafteintrag erhöht sich und die Schlupfgefahr steigt (Ziesak (2004)). Die Schlupfgefahr ist am Hang bei Radmaschinen größer als bei Raupenmaschinen, die eine bessere Lastverteilung und größere Kontaktfläche zum Boden aufweisen (Uhl et al. (2003)).

Ein weiterer Faktor ist die Art der Rückung des Holzes, also meistens tragend, schleiftragend oder schleifend, seltener fliegend tragend oder schwebend tragend (Erler (2000)). Während Forwarder das Holz aus dem Bestand tragen und somit kein direkter Kontakt zwischen dem Holz und dem Boden besteht (ebenda), weist die schleiftragende Variante, beispielsweise beim Rücken von Langholz durch das Ziehen der Stämme über den Boden mit einer Klemmbank-Maschine, eine schlechtere Bodenpfleglichkeit auf (Sauter et al. (2004)). Mit jeder Überfahrt wird der Oberboden durch den schleifenden Stamm verlagert, wodurch sich eine Schleifrinne bilden kann, die bis in den Mineralboden hineinreicht.

### Biomasseentzug

Nährstoffe sind in Nadeln, Blättern, Ästen, Rinde und dem Holz des Baumes enthalten. Durch das Zersetzen von Biomasse können Würmer und Mikroorganismen, wie Pilze und Bakterien, diese Nährstoffe wieder verfügbar machen. Für den Erhalt des Ökosystems Wald ist die Funktion dieses Nährstoffkreislaufes daher von großer Bedeutung (Kölling et al. (2007); Gilge et al. (2020)).

Während sich die Biomasse anteilig absteigend auf Derbholz (80 %), Kronenmaterial (15 %) und Rinde (5 %) verteilt (Kolb und Göttlein (2012); Weis und Göttlein (2012)), ist der Nährstoffanteil im Derbholz im Verhältnis zur Biomasse sehr gering. Aufgrund des hohen Anteils des Holzes an der Biomasse eines Baumes ist der dort gespeicherte Nährstoffvorrat in der Gesamtbilanz des Baumes jedoch nicht unerheblich. Die Rinde verfügt über den geringsten Biomasseanteil eines Baumes, enthält aber gleichzeitig einen vergleichsweise hohen Nährstoffvorrat. Im Kronenmaterial ist der Nährstoffanteil, im Verhältnis zum geringen Biomasseanteil, am höchsten (Kolb und Göttlein (2012); Weis und Göttlein (2012)). Daraus ergibt sich, dass der Nährstoffentzug bei Vollbaumnutzung bis zu doppelt so hoch ist als bei einer auf die Derbholznutzung beschränkten Entnahme (Kolb und Göttlein (2012); Weis und Göttlein (2012)).

Da die Kiefer zu den Baumarten mit der größten Standortvielfalt gehört (Ellenberg (1996)), ist die mögliche Tragweite des Nährstoffentzugs durch die Holznutzung bei einer Kiefern-Starkholzernte standortspezifisch zu betrachten. In nährstoffreichen Böden kann dieser Nährstoffentzug kompensiert werden. Bei nährstoffarmen Böden ist die Nutzung entweder vollständig zu vermeiden oder aber extensiv vorzunehmen (Kolb und Göttlein (2012)).

Laut Weiß (2008) entscheidet die Erntestrategie darüber, wie viel Biomasse aus dem Bestand entfernt wird. Idealerweise wird der Baum im Bestand geastet, damit die Nährstoffe aus dem Kronenmaterial dem Bestand nach Zersetzung der Biomasse weiter zur Verfügung stehen. Hinsichtlich des Biomasseentzugs etwas schlechter zu bewerten ist die Entastung, wenn sie sowohl im Bestand als auch auf der Rückegasse vorgenommen wird. Die Entastung auf der Rückegasse ist in diesem Sinne am ungünstigsten zu bewerten, da hier die Biomasse nur auf der Rückegasse abgebaut wird und die darin enthaltenen Nährstoffe hauptsächlich den Gassenrandbäumen zur Verfügung stehen (Borchert et al. (2015); Stutz et al. (2015)).

Die Entastung und Sortimentierung des Baumes außerhalb des Bestandes wäre hierzu noch eine Steigerung und würde dafür sorgen, dass die Nährstoffe dem Bestand gar nicht mehr zur Verfügung stehen. Jedoch kann das anfallende Material wieder in den Bestand hineingebracht und verteilt werden und dann ähnlich wie eine Entastung im Bestand betrachtet werden. Anders zu bewerten wäre eine Nutzung des Kronenmaterials als Energieholz, hierdurch erfolgt ein maximaler Nährstoffentzug.

### *Ergonomie und Arbeitssicherheit*

Die Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) erfasst jährlich Unfallzahlen ihrer Versicherten. Als Arbeitsunfall wird erfasst, wenn als Unfallfolge eine Ausfallzeit von mehr als drei Tagen oder der Tod des Verunfallten eintritt. Im Jahr 2022 verzeichnete die SVLFG bundesweit 4.302 Unfälle im Forstbereich, von denen 33 tödlich endeten (SVLFG (2023)).

Die meisten Unfälle geschehen bei Fällungen, der Holzaufarbeitung und der Holzrückung (Klugmann et al. (2020); SVLFG (2023)). Ein deutlicher Zusammenhang besteht dabei zum Mechanisierungsgrad. Bei der vollmechanisierten Holzernte mit Harvestern und Forwardern sind die Unfallzahlen geringer als beim motormanuellen Holzeinschlag, tödliche Unfälle sind hierbei noch nicht passiert (Klugmann (2018)). Neben den Unfällen und Todesfällen treten jedoch zusätzlich noch andere Belastungen für motormanuell arbeitende Forstwirte und Maschinenführer auf, die sich auf die Gesundheit auswirken können.

### Spezifische Gefährdungen und Belastungen

#### *Physische Belastung*

In der Holzernte zählen zur physischen Belastung unter anderem schweres Heben und Tragen, körperliche Zwangshaltungen, Lärm, Vibrationen und die Abgase von Maschinen (Gruber et al. (2002); DGUV (2011); Morat (2019)). Forstwirte verfügen über persönliche Schutzausrüstung (DGUV (2011); SVLFG (2017)), die im Allgemeinen nur einen begrenzten Schutz gegenüber diesen Belastungen gewährleistet. Viele Kabinen von Forstmaschinen hingegen sind mit einem integrierten Schutzaufbau, der Falling Object Protective Structure (FOPS), ausgestattet, um Krafteinwirkungen von außen abzufangen (Weise und Heubaum (2021)). Eine spezielle Schutzverglasung schützt vor Einschlägen von Objekten wie Baumteilen oder Kettenschüssen. Bis zu einem gewissen Umfang können somit Gefahren abgewehrt werden (Weise und Schmitz (2020)). Zusätzlich bieten die Kabinen Schutz gegen Schall, Vibrationen sowie Witterungsbedingungen (KWF (2016)).

Im Folgenden werden die unterschiedlichen physischen Belastungen und die vorhandene PSA für Forstwirte bzw. Schutzeinrichtungen an Forstmaschinen kurz dargelegt.

#### *Belastung des Herz- Kreislaufsystems*

Die Pulsfrequenz von Forstwirten steigt bei anstrengenden Teilarbeiten, wie dem Keilen, auf bis zu 200 Schläge pro Minute (bpm) an. Das ist deutlich über der von Arbeitsmedizinern als unbedenklich eingestuften Dauerleistungsgrenze von 130 bpm (Kaufmann (2010)). Harvesterfahrer erreichen bei der Arbeit nur einen mittleren Puls von 78 bpm (Mooz (2010)). Während der Nutzung anderer Forstmaschinen, bei denen kein regelmäßiges Ein- und Aussteigen oder Durchführen weiterer Arbeitsschritte während der Tätigkeit vonnöten ist, kann von vergleichbaren Herz-Kreislaufbelastungen wie bei Harvesterfahrern ausgegangen werden. Bei Seilmaschinen kommt hingegen der Seilauszug hinzu, welcher ebenfalls belastend für das Herz-Kreislaufsystem des Maschinenführers wirken kann (Berendt et al. (2020)).

#### *Muskel- und Skelettbelastungen*

Bei Arbeiten mit der Motorsäge wird der Forstwirt überwiegend durch statische Arbeit belastet. Starke Beanspruchungen der Muskeln schränken die Durchblutung ein und führen zu einer schnelleren Ermüdung des Körpers. Durch Zwangshaltungen und ungleichmäßige Belastungen des Körpers beim Heben von Lasten werden die Wirbelsäule und die Bandscheiben stark in Anspruch genommen (Morat (2019)). Forstwirte haben daher ein hohes Risiko für berufsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen, deren Symptome häufig in mehreren Körperteilen auftreten, dabei schwerpunktmäßig im Rücken (38-84 %), den Knien (25-61 %) und den Schultern (28-50 %) (Gallis (2006); Grzywiński et al. (2016); Dimou (2020); Boocock und Parker (2023); Staněk et al. (2023)).

Die Sitzhaltung der Maschinenführer hingegen und deren geringe/seltene Positionsänderungen führen über längere Zeit zu Belastungen im Rücken- und Gelenkbereich. Hinzu kommen die Ganzkörpervibrationen durch die Maschine (DGUV (2023)). Rückenbeschwerden treten daher auch bei diesen Personen auf.

### *Vibrationen und Schwingungen*

Als Vibrationen werden kurzweilige Schwingungen bezeichnet, die meist durch tragbare Geräte verursacht und auf den Anwender, bei Motorsägen betrifft das den Hand-Arm-Bereich, übertragen werden (Morat (2019)). Je leistungstärker eine Motorsäge ist, desto stärker sind ihre Vibrationen und die damit verbundenen Belastungen für den Forstwirt (Bačić et al. (2023)).

Fahrzeuge übertragen ihre Schwingungen auf den ganzen Körper der Maschinenführer (DGUV (2011)). Messergebnisse zeigen, dass diese Ganzkörperschwingungen bei Forstmaschinen regelmäßig den vorgegebenen Auslösewert von  $0,5\text{m/s}^2$  übersteigen (DGUV (2011); Sayn und Göres (2013); Poje et al. (2019); Staněk und Mergl (2022)). Solche deutlich erhöhten Schwingungen treten sowohl während der Maschinenfahrt, als auch der unproduktiven Zeit (Stillstand) und der Aufarbeitung der Stämme auf (Poje et al. (2019); Staněk und Mergl (2022)). Dabei besteht jedoch kein Zusammenhang zwischen dem bearbeiteten Stammvolumen und der Schwingungsintensität (Staněk und Mergl (2022)).

Schettino et al. (2018) fanden heraus, dass Raupenharvester höhere Schwingungen aufweisen als Reifenharvester. Erklärbar ist dies laut Nguyen und Inaba (2011) dadurch, dass die Raupenlaufwerke die anfallenden Schwingungen schlechter oder gar nicht absorbieren können, im Gegensatz zu den elastischeren Reifen. Zudem kommt es durch das Antriebsrad mit den dazugehörigen Rollen und Raupengliedern zu einer Polygonwirkung der Schwingungen.

### *Lärm*

Ein Schalldruckpegel von 85 dB(A) kann zu einer Schädigung des Gehörs führen. Dieser Wert wird sowohl von Motorsägen (bis zu 115 dB(A)) als auch von Schleppern (100 dB(A)) mitunter überschritten (SVLFG (2020)). Ein Unterschied zwischen Harvestern und Forwardern konnte von Poje et al. (2019) nicht festgestellt werden, in ihren Untersuchungen lag die Belastung des Fahrers bei geschlossener Kabine bei unter 85 dB(A).

### *Psychische Belastung*

Die DGUV (2011) nennt schlechte Arbeitsorganisation, Zeitdruck und Monotonie der Tätigkeit als mögliche Ursachen für psychische Belastungen bei der Arbeit. Auch waldbauliche Rahmenbedingungen können psychische Belastungen auslösen. Struktureiche und dichte Bestände (z. B. durch Verjüngung) führen zu schlechteren Sichtverhältnissen, und damit geringerem Überblick über Geländebedingungen und Gefahrenquellen sowie einer erschwerten Orientierung. Zusätzlich sind Laufwege eingeschränkt und akut auftretenden Gefahren kann oftmals erst spät ausgewichen werden. Alt- und Totholz sorgen für Unsicherheit bei den Personen und erfordern zusätzliche Konzentration bei der Arbeit von Forstwirten (Hartfiel (1998); Weinbrenner et al. (2021)). In kombinierten Verfahren kommt gute verfahrens- und sicherheitsrelevante Kommunikation zwischen Forstwirten und Maschinenführern als Belastung hinzu (Hartfiel (1998)).

Spinelli et al. (2020) beobachtete, dass Maschinenbediener für einen strukturreichen Mischbestand mehr Konzentration aufwenden und psychisch angestrengt sind als in gleichaltrigen Reinbeständen. Ein weiteres Problem für diese Personengruppe kann die Arbeit in sozialer Isolation und die resultierende Vereinsamung sein sowie das Bewusstsein, dass gegebenenfalls kein Ersthelfer vor Ort ist. Zusätzlich wirkt eine Überforderung durch Displayarbeit und Technik in der vollmechanisierten Arbeit belastend (Gruber et al. (2002)).

Kosten

Die Kostensätze für Forstwirte, Maschinenführer, Motorsägen und Maschinen werden in folgender Tabelle 1 gemäß des KWF Tagungsführers und der KWF Kalkulationstabelle definiert.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Kostendaten für Personal, Motorsäge und Maschinen

Personal	Kostensatz €/h	Quelle
Forstwirt	38,48	KWF e.V. (2024)
Maschinenführer	43,40	KWF e.V. (2024)

Maschinen	Kostensatz €/MAS	Quelle
Motorsäge, groß	10,30	KWF e.V. (2024)
Harvester, groß (>50 cm BHD)	190,11	KWF e.V. (2024)
Raupenharvester mit Baumhaltezege	200,00	KWF e.V. (2016) <i>Inflationskorrigiert</i>
Klemmbankschlepper	89,30	KWF e.V. (2024)
Forwarder, groß (>13 t Nutzlast)	100,46	KWF e.V. (2024)

Für den wirtschaftlichen Einsatz eines Raupenharvesters wird eine Mindestmenge von 1.500 Fm pro Einsatz kalkuliert. Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h und den Schäden am Wegekörper, die die Raupenlaufwerke verursachen würden, ist ein Umsetzen mit dem Tieflader auch bei kürzeren Distanzen nötig. Dies kann bei weiten Distanzen jedoch 2.000 bis 2.500 € kosten. Bei Radmaschinen hingegen beläuft sich der finanzielle Aufwand zum Umsetzen bei kürzeren Distanzen auf ca. 300 € und bei großen Distanzen können bis zu 1.000 € anfallen (Benker (2015)).

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Verfahren untereinander zu gewährleisten, wird mit den oben genannten Kostensätzen gerechnet.

Leistung

Die tatsächliche Leistung im jeweiligen Bestand und die daraus folgenden Kosten werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst:

- I. Volumen des Einzelbaumes: Das Stück-Volumen-Gesetz beschreibt, dass die Leistung in Holzernteverfahren mit dem Volumen je Stück je Entnahmebaum bis zu einem gewissen Wert steigt und die Stückkosten damit sinken (Sohns (2012)).
- II. Anzahl der Entnahmebäume pro Hektar (Lageson (1997); Eliasson et. al (1999); Hånell, Nordfjell und Eliasson (2000)): Je mehr Bäume pro Hektar geerntet werden sollen, desto geringer sind die Wegezeiten zwischen den Bäumen.
- III. Bestandesstruktur und -dichte sowie die eventuell vorhandene Verjüngung und der Belaubungszustand (Frej (1991); Niemistö et al. (2012); Spinelli und Magagnotti (2013)): Für den Maschinenbediener wird es mit steigender Bestandesstrukturierung und -dichte zunehmend schwerer, markierte Bäume zu erkennen und optimale Fällrichtungen zu wählen.
- IV. Anzahl der Sortimente: Sie hat durch den erhöhten Sortierungsaufwand Einfluss auf die Aufarbeitungszeit sowie die spätere Rückung und Polterung (Sohns (2012); Manner et al. (2013); Morat (2019); Gilge et al. (2020)).
- V. Ausbildungsstand und Erfahrung des eingesetzten Personals, sowohl bei Forstwirten wie auch bei Maschinenführern (Purfürst (2010); Sohn (2012); Morat (2019); Gilge et al. (2020)): Adäquat ausgebildete Fachkräfte arbeiten durch Erfahrung und Übung bestandesschonender, schneller und sicherer.
- VI. Topographische Verhältnisse: Bei zunehmender Hangneigung sind die Leistungen von Forstwirten und Maschinen geringer, die Kosten je Festmeter steigen. Ab bestimmten Hangneigungen sind nur noch speziell angepasste Holzernteverfahren einsetzbar, mitunter sogar nur Spezialtechnik (Strandgard et al. (2015); Strandgard et al. (2017); Holzfeind et al. (2019)). Insbesondere die Schlagordnung im Hang muss dabei angepasst werden: Hier wird das Holz schräg bergauf- oder bergab geschlagen, um es vor Wegrollen zu sichern. Kurzholz ist unter diesen Bedingungen grundsätzlich schwieriger auszuhalten, da es eher zum Wegrollen neigt.
- VII. Ergebnis eines Prozessschrittes als Vorbereitung des Folgenden: Bei z.B. Einhaltung der Schlagordnung lassen sich die Stämme anschließend schneller aus dem Bestand vorrücken (Wolf

- (2019)). Ebenso kann eine sortierte und im richtigen Winkel zur Rückegasse erfolgte Ablage der Stammabschnitte durch den Harvester die Leistung des Forwarders erhöhen (Väätäinen et al. (2006); Manner et al. (2013))
- VIII. Die Leistung beim Rücken wird maßgeblich durch die Rückeentfernung bestimmt (Sohns (2012); Strandgard et al. (2015)).
- IX. Lastvolumen der Forwarder (Kuitto, et al. (1994); McNeel und Rutherford (1994); Brunberg (1997); Gullberg (1997); Nurminen, Korpunen und Uusitalo (2006); Eriksson und Lindroos (2014)). Je mehr der Forwarder pro Lastfahrt rücken kann, desto höher fällt seine Stundenleistung aus.
- X. Klarheit der Arbeitsanweisung (Frej (1991)).
- XI. Fahrer-Assistenzsysteme können den Maschinenführer entlasten und die Produktivität steigern (Pohle (2021)).

In der Literatur werden Leistungsdaten einzelner Holzernteverfahren meist mit größeren Spannen angegeben, die nachstehenden Leistungsdaten in Tabelle 2 generieren also nur einen groben Anhaltspunkt für die einzelnen Arbeitsprozesse der Holzernteverfahren.

*Tabelle 2 Zusammenfassung der Leistungsdaten, des Stundensatzes und der Kosten pro Festmeter*

	Leistung Efm/Std.	Stundensatz €/Std. Maschine inkl. Personal	€/Efm	Quellen
Motormanuell	5 – 8 p.P.	48,78	9,76 – 16,26	Morat et al. (1998); KWF (2012); FVA (2025)
Harvester	22,5 – 33	233,51	7,05 – 10,34	Heindl und Pausch (2007); KWF (2016); FVA (2025)
Kombiniert: -> Zufällen -> Harvester --> Gesamt	19 – 21 p.P. 23 – 33	48,78 233,51	2,32 – 2,56 7,05 – 10,12 9,37 – 12,68	Heindl und Pausch (2007); KWF (2016); FVA (2025)
Raupenharvester mit Baumhaltezange	11 – 32	243,40	7,64 – 22,24	KWF (2012); KWF (2016)
Klemmbankschlepper	20 – 26	132,70	5,56 – 7,23	KWF (2012); KWF (2016); FVA (2025)
Forwarder	16 – 30	143,86	5,12 – 9,60	KWF (2012); FVA (2025)

### *Kategorisierung der Verfahrensarten*

Nach einer Literaturrecherche in den KWF-Tagungsführern und der Datenbank der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA (2025); KWF (1996); KWF (2000); KWF (2004); KWF (2008); KWF (2012); KWF (2016); KWF (2024)) lassen sich die für Kiefern-Starkholz geeigneten Verfahren in die fünf folgenden Verfahrenskategorien einordnen. Die Benennung der Kategorien beruht auf den verfahrensunterscheidenden Maschinen. Die Bedeutung der motormanuellen Arbeitsschritte nimmt mit steigender Kategoriennummer ab.

#### 1. Seilschlepper-Verfahren

Im Starkholz mit Verjüngung und im nicht befahrbaren Gelände ist die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung nach wie vor die Regel. Reine Seilschlepper-Verfahren werden hingegen kaum noch angewandt. Vielfach werden Tragschlepper oder Kranschlepper zusätzlich mit Seilwinden ausgestattet, um seilunterstützte Fällungen oder das Beiseilen der Rohschäfte bei erweiterten Rückegassenabständen zu ermöglichen. Zudem weisen reine Seilschlepper-Verfahren geringe Produktivität auf, weshalb sie vielfach nicht mehr konkurrenzfähig sind. Vorteilhaft ist hingegen die weitestgehende Unabhängigkeit des Verfahrens von den Rückegassenabständen.

#### 2. Tragschlepper (Forwarder)- und Kranschlepper-Verfahren

Jedes der Verfahren dieser Kategorie weist eine Maschine mit Seilwinde auf. Somit kann die Reichweite der Maschinen von der Rückegasse aus deutlich vergrößert werden und die Verfahren auch bei Rückegassenabständen über 20 m sinnvoll eingesetzt werden. Gegenüber den reinen Seilschlepper-Verfahren besitzen alle diese eingesetzten Maschinen zudem einen Kran zur einfacheren, schnelleren und bestandesschonenderen Manipulation der Rohschäfte. Sollten Langholz-Sortimente ausgehalten werden, sind Maschinen mit einer zusätzlichen oder wechselbaren Klemmbank vorteilhaft.

#### 3. Harvester-Kombi-Verfahren

Begrenzende Faktoren für eine vollmechanisierte Holzernte sind über 20 m weite Rückegassenabstände, der maximale Fälldurchmesser des Harvesterkopfes und zu hohe Gewichte der zu entnehmenden Bäume. In diesen Fällen bietet sich eine Kombination motormanueller und vollmechanisierter Holzeinschlagsverfahren an. Es kommen zwei Varianten in Frage:

A) Zufällen der nicht mit dem Kran erreichbaren Bäume vor dem maschinellen Einsatz, wobei die weitere Aufarbeitung in nur einem Fahrdurchgang erfolgt.

B) Zufällen der verbliebenen Bäume nach dem maschinellen Einsatz. Die Befahrungshäufigkeit ist in diesem Fall höher, da der Harvester zweimal auf den Rückegassen fahren muss, um die motormanuell zugefällten Bäume anschließend aufzuarbeiten.

Bei besonderen Anforderungen an die Fällrichtung oder problematischen Fallsituationen (z.B. Rückhänger) wird seilunterstützte Fällung empfohlen.

#### 4. Starkholzharvester-Verfahren

Das Starkholzharvester-Verfahren ist ein vollmechanisiertes Holzernteverfahren. Voraussetzung hierfür ist, aufgrund der begrenzten Kranreichweiten der Harvester (in der Regel rund 10 m), eine systematische Rückegassenerschließung im Abstand von 20 m. Zudem muss die Maschine ausreichend Eigengewicht und Hubkraft besitzen, um die Bäume sicher manipulieren zu können. Bei maximaler Auslage des Krans reicht die Hubkraft jedoch meist nicht aus.

#### 5. Raupenbagger-Verfahren

Dieses sind ebenfalls vollmechanisierte Holzernteverfahren. Aufgrund des sehr hohen Eigengewichtes der Maschine und der Hubkraft, die für den 15 m langen Kranarm ausgelegt ist, sind diese Harvester in der Lage Bäume aus dem Bestand zu heben. Allerdings ist bezüglich der Bodenpfleglichkeit darauf hinzuweisen, dass Wendebewegungen möglichst nicht vorgenommen werden sollten, da diese den Boden erheblich aufwühlen (Kettenlaufwerke) und Rückegassenbreiten von 5 m erforderlich sind.

### *Definition der zu erwartenden Bestandesbedingungen*

Analysen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) haben ergeben, dass drei Bestandescharakteristika in Kiefern-Starkholz-Beständen unterschieden werden können:

1. Einschichtige Bestände (unverjüngt/ nicht unterstanden)
  - Übersichtliches Gelände, daher keine Gefährdungen oder Leistungseinbußen durch Sichtbehinderung oder liegendes Totholz.
  - Keine oder nur wenig Einschränkungen für die Schlagordnung.
  - Langholz kann problemlos manipuliert werden.
2. Zwei- oder mehrschichtige Bestände mit unterer Baumschicht **unter** 2/3 der Bestandeshöhe (verjüngt (Voranbau, Nachanbau, Naturverjüngung) oder mit Unterstand)
  - Durch den Dichtstand und die gegebenenfalls noch vorhandene Bestung, gerade relevant bei Nadelbäumen, ist teilweise maximale Sichtbehinderung anzutreffen. Diese bedeutet eine enorme Gefährdung für motormanuell arbeitende Personen, auch durch Hängenbleiben. Gleichermaßen werden Maschinenführer von Harvestern in ihrer Leistung eingeschränkt, wenn sie nicht den Stammfuß der zu erntenden Kiefern einsehen können.
  - Sollte motormanuell arbeitendes Personal eingesetzt werden, ist eine strikte Schlagordnung einzuhalten, um die Verjüngung möglichst zu schonen und Unfälle zu vermeiden.
  - Langholzaushaltungen sind nicht geeignet aufgrund des eingeschränkten Arbeitsraumes.
3. Zwei- oder mehrschichtige Bestände mit unterer Baumschicht **über** 2/3 der Bestandeshöhe (verjüngt (Voranbau, Nachanbau, Naturverjüngung) oder mit Unterstand). Hier ist der Nachwuchs zu früh eingebracht worden oder eine Nachlichtung im Schirm unterblieben)
  - Durch die erreichte Höhe des nachfolgenden Bestandes ist die Sichtbehinderung am Boden bereits verringert und damit auch potenzielle Gefährdungen und Leistungsverringerungen.
  - Für motormanuell arbeitendes Personal bleibt weiterhin eine Gefährdung durch herabfallendes Totholz, da der Kronenbereich schwer einsehbar ist.
  - Eine Schlagordnung wäre sowohl für den Arbeitsschutz als auch zum Schutz des nachfolgenden Bestandes sinnvoll.
  - Aufgrund der vorhandenen Behinderungen durch den verbleibenden Bestand sind seilziehende Verfahren und Langholzaushaltung hier weitestgehend ungeeignet.

### *Eignungsprüfung der Verfahrensarten für die erwarteten Bestandesbedingungen auf Grundlage der Literaturrecherchen*

Im Folgenden werden die recherchierten Verfahrenskategorien mit ihren Verfahrensschritten kurz dargelegt. Oftmals wurden bei den spezifischen Verfahren innerhalb einer Verfahrenskategorie nur geringe Abweichungen in der Literatur gefunden, sodass ein Leitverfahren definiert werden konnte. Davon abweichend traten aber auch Verfahren auf, die aufgrund besonderer Verfahrensabläufe oder eingesetzter Maschinen als „Sonderfall“ mit aufgeführt und geprüft wurden.

Die Verfahrenskategorien und ihre Sonderfälle wurden dann anhand der oben dargelegten Verfahrensbeurteilung bezüglich Ökologie, Ergonomie und Arbeitssicherheit sowie Ökonomie bewertet. Die Bewertung erfolgte farblich in einem Ampel-Schema mit Grün für positive Bewertungen, über Gelb für mittlere Bewertungen, zu Rot für schlechte Bewertungen. Die Begründungen für die einzelnen Bewertungen sind in der Tabelle zusätzlich schriftlich angegeben. Mit „Wie oben.“ wird aus Gründen der Platzersparnis für die Begründung auf das jeweilige Leitverfahren verwiesen.

Zuletzt erfolgte eine Prüfung der Verfahrenseignung für die drei definierten Bestandesbedingungen. Hierfür wurde ebenfalls das Ampel-System zur farblichen Kennzeichnung verwendet, sowie erläuternder Text zur Entscheidung hinzugefügt.

Die Tabelle kann als Entscheidungsmatrix von Praktikern herangezogen werden, um gemäß der jeweils vorliegenden Bestandesbedingungen und der zur Verfügung stehenden Forsttechnik ein geeignetes Holzernteverfahren in Kiefern-Starkholzbeständen zu identifizieren.

Bewertungskriterium  Verfahrenskategorie	Verfahrensbeschreibung				Verfahrensbewertung			Verfahrenseignung		
	Fällen	Aufarbeiten	Vorrücken	Endrücken	Ökologie	Ergonomie und Arbeitsschutz	Ökonomie	Einschichtige Bestände	Mehrschichtige Bestände unter 2/3 Kiefernhöhe	Mehrschichtige Bestände über 2/3 Kiefernhöhe
<b>Seilschlepper-Verfahren</b>  (Anwendbar bei mehr als 40 m RG-Abstand)	In 2-Personen-Arbeit zwei oder mehr Bäume gemeinsam fällen, dann getrennt aufarbeiten.	Aufarbeitung in 1-Personen-Arbeit. Oberseits bis zur Aushaltungsgrenze entasten, bei gleichzeitiger Längenvermessung. Markieren der Einschnidestellen. Ggf. Transportschnitt führen bzw. Stammholz/ Industrieholz trennen. Stammholzstück fertig entasten.	Vorrücken einzelner Stämme, vorbereitend zum Endrücken mehrerer Stämme für maximale Auslastung der Maschine.	Rohschäfte werden zum Polterplatz gerückt. Vermessen und Sortenschnitte ggf. erst am Polterplatz.	Geringe Bestandes- und Bodenschäden durch Schlagordnung und ggf. seilunterstützte Fällung. Geringer Nährstoffzug durch Aufarbeitung im Bestand.	Hohes Unfallrisiko. Hohe Belastung durch motormanuelle Arbeit. Wahl zwischen verschiedenen Fällrichtungen reduziert Keilarbeit beim Fällen.	Geringer Organisationsaufwand und sehr weiter Einsatzbereich (z.B. Hang, schwieriges Gelände, weite Rückegassenabstände). Jedoch geringe Gesamtleistung.	Aufgrund guter Sichtbedingungen verringertes Unfallrisiko für Forstwirte. Keine Vorrückehinderung. Seilziehende Verfahren können hier förderlich sein zum Aufkommen von Naturverjüngung (Bodenverwundung).	Erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte sowie Orientierungs- und Absprachenaufwand durch Sichtbehinderung. Vorrücken deutlich erschwert durch Unterstand.	Leicht erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte durch schwer anzuprechende Kronenbereiche. Vorrücken mitunter erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand, insb. am Gassenrand.
<b>Trag- und Kranschlepper-Verfahren</b>  (Anwendbar bei 20 m RG-Abstand, mit Seilwinde auch über 40 m RG-Abstand möglich)	Fällen der Stämme, so dass sie von der Rückegasse aus erreichbar sind. Rücksichtnahme auf natürlichen Hang, Nachbarstämme und Naturverjüngung haben Vorrang vor Schlagordnung.	Entasten und Zopfen der Stämme. Markierung der Sortentrennstelle. Trennschnitt an der Markierung dann, wenn der Stamm über die Gasse weit hinausragt und ein langes Rücken nicht schadfrei möglich wäre oder beim Einsatz eines Tragschleppers. Es sollten alle Kurzhölzer vom Kran erreichbar sein.	Beim Vorrücken mit dem Seil ist ein frühestmöglicher Übergang zur Kranarbeit anzustreben.	Rohschäfte werden zum Polterplatz gerückt. Vermessen und Sortenschnitte ggf. erst am Polterplatz.	Geringere Bestandes- und Bodenschäden. Reduzierung der Bestandesschäden aufgrund der besseren Manipulationsmöglichkeiten der gefällten Stämme durch die große Kranreichweite und Kranhubkraft. Geringer Nährstoffzug durch Aufarbeitung im Bestand.	Hohes Unfallrisiko. Hohe Belastung durch motormanuelle Arbeit. Wahl zwischen verschiedenen Fällrichtungen reduziert Keilarbeit beim Fällen.	Geringer Organisationsaufwand und sehr weiter Einsatzbereich (z.B. Hang, schwieriges Gelände, weite Rückegassenabstände). Jedoch geringe Gesamtleistung.	Aufgrund guter Sichtbedingungen verringertes Unfallrisiko für Forstwirte. Keine Vorrückehinderung. Seilziehende Verfahren können hier förderlich sein zum Aufkommen von Naturverjüngung (Bodenverwundung).	Erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte sowie Absprachenaufwand durch Sichtbehinderung. Vorrücken deutlich erschwert durch Unterstand.	Leicht erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte durch schwer anzuprechende Kronenbereiche. Vorrücken mitunter erschwert durch Unterstand, jedoch weniger Schäden am verbleibenden Bestand durch Kranarbeit.
<b>Sonderfall: Gebrochener Transport</b>	Wie oben.	Wie oben.	Vorrücken der Rohschäfte durch eine 6-Rad Maschine mit Bändern bis zum Gasseneingang. Endrücken mit einer 4-Rad Maschine ohne Bänder auf der Waldstrasse.	Geringere Bodenschäden durch Einsatz von angepassten Breitreifen und Bändern auf der Rückegasse. Geringer Nährstoffzug durch Aufarbeitung im Bestand.	Wie oben.	Weiterer Schlepper benötigt. Keine oder geringe Schäden an den Fahrwegen. Hohe Kosten durch zusätzliche Maschine.	Wie oben.	Wie oben.	Wie oben.	

	Fällen	Vorrücken	Aufarbeiten	Endrücken	Ökologie	Ergonomie und Arbeitsschutz	Ökonomie	Einschichtige Bestände	Mehrschichtige Bestände unter 2/3 Kiefernhöhe	Mehrschichtige Bestände über 2/3 Kiefernhöhe
<b>Harvester-Kombi-Verfahren</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 40 m RG-Abstand)</b>	<p>Innerhalb der Kranreichweite werden die zu entnehmenden Bäume vom Harvester gefällt. Außerhalb davon (40 m Rückegassenabstände) fällen Forstwirte motormanuell in die Kranzone des Harvesters zu. Dies kann vor oder nach dem (ersten) Harvesterinsatz geschehen.</p>	<p>Durch das Zufällen der Baumkronen Richtung Rückegasse entfällt das Vorrücken.</p>	<p>Alle Bäume werden an/über der Rückegasse aufgearbeitet, wobei das Kronenmaterial zur Gassenarmierung genutzt wird.</p>	<p>Die Kurzholzabschnitte werden mit einem Tragschlepper zur Waldstraße gerückt und dort sortengetrennt gepoltet.</p>	<p>Durch gezieltes Zufällen durch Forstwirte werden Schlag- und Rückeschäden reduziert. Zudem erlaubt dieses Verfahren erweiterte Rückegassenabstände. Jedoch wird Kronenmaterial für Rückegassenarmierung benötigt.</p>	<p>Erhöhte Anforderungen an Arbeitsorganisation und Einhaltung von Gefahrenbereichen. Weiterhin Unfallrisiko und hohe Belastung für motormanuell arbeitende Forstwirte. Wahl der Fällrichtung wird durch Abstand zur und Erreichbarkeit der Rückegasse bestimmt.</p>	<p>Hohe Flexibilität (Hiebsgrößen, Rückegassenabstände, Lang-/Kurzholzaushaltung möglich) Erhöhter Aufwand bei Arbeitsorganisation und Kommunikation verringert die Leistung.</p>	<p>Verringertes Unfallrisiko für Forstwirte. Keine Vorrückehinderung.</p>	<p>Erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte sowie Orientierungs- und Abspracheaufwand durch Sichtbehinderung. Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester deutlich erschwert durch Unterstand.</p>	<p>Leicht erhöhtes Unfallrisiko für Forstwirte durch schwer anzuschneidenden Kronenzustand. Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten, insb. am Gassenrand.</p>
<b>Sonderfall: Königsbronner-Starkholz-Verfahren</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 40 m RG-Abstand)</b>	<p>Fällen von jeweils zwei bis drei Bäume in Schlaglinien, entgegen der Rückrichtung und spitzwinklig zur Rückegasse. Möglichst großer Teil der Krone auf der Rückegasse, um bereits vorhandene Naturverjüngung zu schonen.</p>	<p>Durch das Zufällen der Baumkronen Richtung Rückegasse entfällt das Vorrücken.</p>	<p>Nach der Fällung, oberseitiges Entasten und Vermessen des Hauptstammes durch Forstwirte. Ggf. werden Abschnitte innerhalb der Kranzone abgetrennt und fertig vermessen, außerhalb verbleiben diese jedoch am Stamm. Der Harvester arbeitet die Stämme fertig auf und trennt die Sorten.</p>	<p>Die Kurzholzabschnitte werden mit einem Tragschlepper zur Waldstraße gerückt und dort sortengetrennt gepoltet.</p>	<p>Durch gruppenweises Zufällen mit den Kronen aufeinander sowie bei Seilunterstützung, können Schlagschäden weiter reduziert werden.</p>	<p>Wie oben. Die Arbeitssicherheit und Wahl der Fällrichtung kann durch Einsatz eines Seilschleppers für Seil unterstützte Fällungen erhöht werden.</p>	<p>Wie oben. Zudem weitere Kosten durch Maschine für seilunterstützte Fällung.</p>	<p>Wie oben. Keine Vorrückehinderung. Vorrücken im Bodenseilzug kann hier förderlich sein zum Aufkommen von Naturverjüngung (Bodenverwundung).</p>	<p>Wie oben. Optionales Vorrücken per Bodenseilzug deutlich erschwert durch Unterstand.</p>	<p>Wie oben. Vorrücken per Bodenseilzug erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten, insb. am Gassenrand.</p>
<b>Sonderfall: Mit Vorrücken aus dem Mittelblock</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 40 m RG-Abstand)</b>	<p>Motormanuelles Zufällen außerhalb der Kranzone, sodass Vollbäume dickkörtig in Richtung der Rückegasse vorgerückt werden können. Innerhalb der Kranzone fällt der Harvester die Bäume selbst.</p>	<p>Anschließend werden die gefällten Vollbäume mit einem Seilschlepper in die Kranzone vorgerückt.</p>	<p>Die vorgerückten Vollbäume werden mit Hilfe eines Harvesters zu fertigen Kurzholzsortimenten aufgearbeitet.</p>	<p>Die Kurzholzabschnitte werden mit einem Tragschlepper zur Waldstraße gerückt und dort sortengetrennt gepoltet.</p>	<p>Durch Seilunterstützung können Schlagschäden weiter reduziert werden.</p>	<p>Wie oben. Die Arbeitssicherheit und Wahl der Fällrichtung kann durch Einsatz eines Seilschleppers für Seil unterstützte Fällungen erhöht werden. Das Belassen der Vollbäume reduziert die unfallträchtige Motorsägearbeit.</p>	<p>Wie oben. Zudem weitere Kosten durch Maschine für seilunterstützte Fällung.</p>	<p>Wie oben. Keine Vorrückehinderung. Vorrücken im Bodenseilzug kann hier förderlich sein zum Aufkommen von Naturverjüngung (Bodenverwundung).</p>	<p>Wie oben. Obligatorisches Vorrücken per Bodenseilzug deutlich erschwert durch Unterstand.</p>	<p>Wie oben. Vorrücken per Bodenseilzug erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten, insb. am Gassenrand.</p>

	Fällen	Aufarbeiten	Endrücken	Ökologie	Ergonomie und Arbeitsschutz	Ökonomie	Einschichtige Bestände	Mehrschichtige Bestände unter 2/3 Kiefernhöhe	Mehrschichtige Bestände über 2/3 Kiefernhöhe
<b>Starkholzharvester-Verfahren</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 20 m RG-Abstand)</b>	Innerhalb der Kranreichweite werden die zu entnehmenden Bäume vom Harvester gefällt. Ggf. müssen mehrere Schnitte geführt werden. Ein gezieltes Fällen der Krone auf eine Rückegasse ist möglich, was die Bestandespfleglichkeit erhöht und die Leistung verringert.	Alle Bäume werden an/über der Rückegasse aufgearbeitet, wobei das Kronenmaterial zur Gassenarmierung genutzt wird.	Die Kurzholzabschnitte werden mit einem Tragschlepper zur Waldstraße gerückt und dort sortengetrennt gepoltet.	Durch gerichtetes Zufallbringen können Schlag- und Rückeschäden reduziert werden, jedoch ist die Auswahl und Einschätzung der geeigneten Fällrichtung mitunter erschwert und Hindernisse/Verjüngungsbereiche werden übersehen.	Aufgrund des Arbeitsplatzes in einer vollklimatisierten und aufprallsicheren Kabine besteht höchster Unfallschutz. Jedoch ergeben sich neue ergonomische Herausforderungen.	Höchste Leistung und geringer Organisationsaufwand. Jedoch auch engere Rückegassenabstände nötig und damit weniger Produktionsfläche vorhanden.	Gute Übersichtlichkeit und zügiges Arbeiten möglich.	Geringes Unfallrisiko. Fällung, Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester deutlich erschwert durch Unterstand.	Geringes Unfallrisiko. Fällung, Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester deutlich erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten, insb. am Gassenrand.
<b>Sonderfall: Direkte Trailer-Verladung</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 20m RG-Abstand)</b>			Hauptsortimente werden direkt an der Waldstraße auf bereitgestellte Trailer geladen und diese durch den Tragschlepper zur Übergabe an einen für Standard-LKW ohne Kran abfahrtechnisch günstigen Ort gezogen. Von dort wird auch ein leerer Trailer zurück an den Bestand gebracht.	Wie oben. Zusätzlich verringert eine zügige Abfuhr des Holzes das Übergreifen biologischer Forstschädlinge.	Wie oben.	Wie oben. Durch direkte Trailer-Verladung kann der Holzabfluss deutlich beschleunigt werden.	Wie oben.	Wie oben.	Wie oben.
<b>Raupenharvester-Verfahren</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 30 m RG-Abstand)</b>	Der Harvester fällt die Entnahmebäume und hebt sie mittels Haltezange senkrecht aus dem Bestand heraus. Die Vollbäume werden zielgerecht auf der Rückegasse zu Fall gebracht.	Die Stämme werden aufgearbeitet, ohne sie in die Verjüngung zu schieben. Die Kurzholzsortimente (wahlweise Langholz) legt der Harvester parallel zur Gasse ab.	Zeitversetzt zur Aufarbeitung wird das Holz mittels Forwarder gerückt. Gegebenenfalls wird ein Klemmbankschlepper für das Langholz eingesetzt.	Durch das Herausheben der Stämme wird der übrige Bestand in höchstem Maße geschont. Allerdings müssen Rückegassen auf mind. 5 m verbreitert und Lenkmanöver sollten vermieden werden.	Aufgrund des Arbeitsplatzes in einer vollklimatisierten und aufprallsicheren Kabine besteht höchster Unfallschutz. Jedoch ergeben sich neue ergonomische Herausforderungen.	Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens hängt aufgrund der sehr hohen Investitionskosten entscheidend vom Erntevolumen des Hiebes ab: Kosten von 2.000-3.000 €/Umsetzen für den Harvester. Es entfallen jedoch Mehrkosten einer Schlagpflege.	Vorteil des Heraushebens der Bäume kommt hier nicht zum Tragen, weshalb die Maschinen- und Umsetzkosten das Verfahren zu teuer machen.	Geringes Unfallrisiko. Hohe Pfleglichkeit durch Herausheben der Bäume. Fällung, Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester nur leicht erschwert durch Unterstand.	Fällung und Herausheben der Bäume erschwert durch eingewachsenen Unterstand. Daher vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten und Verringerung der Leistung.
<b>Sonderfall: Ohne Baumhalte-zange</b>  <b>(Anwendbar bei bis zu 30m RG-Abstand)</b>	Mit Hilfe des Auslegers wird der Baum nach dem Fällschnitt in die gewünschte Fällrichtung gedrückt.	Die hohe Hubkraft des Raupenharvesters ermöglicht es, den gefällten Baum im Zuge der Aufarbeitung anzuheben und freischwebend zur Rückegasse vorzurücken bzw. in diese einzufädeln.		Vorteil des Heraushebens für die Pfleglichkeit ist hier nicht gegeben. Dennoch kann die hohe Hubkraft der Maschine für eine erleichterte Stammmanipulation genutzt werden. Die Nachteile der Maschine bleiben.	Wie oben.	Wie oben. Es können jedoch Mehrkosten einer Schlagpflege anfallen.	Vorteil der starken Maschine kommt hier nicht zum Tragen, weshalb die Maschinen- und Umsetzkosten das Verfahren zu teuer machen.	Geringes Unfallrisiko. Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester deutlich erschwert durch Unterstand.	Geringes Unfallrisiko. Fällung, Vorrücken und Aufarbeitung für den Harvester deutlich erschwert durch Unterstand. Vermehrt Schäden am verbleibenden Bestand zu erwarten, insb. am Gassenrand.

## **Fallstudie: Motormanueller Kiefern-Starkholz-Einschlag unter Verwendung eines rückenentlastenden passiven Exoskelettes**

### *Einleitung*

Die hier zusammengetragenen Holzernteverfahren bedürfen vielfach eines hohen Anteils manueller Motorsägen-Arbeit. Diese Tätigkeit gehört nicht nur zu den physisch und psychisch anspruchsvollsten, sondern auch den unfallträchtigsten Arbeiten im forstbetrieblichen Alltag (KWF Unfallstatistik (2022)). Dabei kommt es immer wieder zu teils schweren Verletzungen und Todesfällen (Klugmann et al. (2020)), die durch körperliche oder geistige Ermüdung mitausgelöst sein können (Lilley et al. (2002)). Langfristig treten Verschleißerscheinungen am Bewegungs- und Stützapparat auf, die bis zur Arbeitsunfähigkeit führen können (Lewark (1990); Rudolph (2013); Liebers et al. (2016)). Neben den Knien ist insbesondere der Rücken von diesen Verschleißerscheinungen betroffen. Auslöser hierfür sind beim motormanuellen Holzeinschlag erzwungene Körperhaltungen, wie das häufige Vorbeugen für die Sägeschnitte bei der Baumfällung aber auch das seitliche herüber beugen beim Entasten liegender Stämme (Gaskin (1990); Harstela (1990); Enez und Nalbantoğlu (2019)). Zwar soll die Motorsäge während des Entastens auf dem Stamm abgelegt werden, trotzdem muss dieses Gewicht auch immer wieder mit leicht ausgestreckten Armen gehoben und bewegt werden, und dies teilweise bei belastenden Rückenhaltungen.

Ein neues Hilfsmittel zur Muskel- und Gelenkentlastung sind passive Exoskelette. In verschiedenen Laborversuchen, aber auch im Praxiseinsatz, haben passive Exoskelette bereits spür- und messbare Reduktionen der Muskelbeanspruchung gezeigt und konnten somit der Muskelermüdung vorbeugen (Bär et al. (2021); Luger et al. (2021)). Es wird daher davon ausgegangen, dass sie langfristig auch dem Gelenkverschleiß entgegenwirken (Herr (2009)).

In einer ersten Fallstudie wurden daher die Nutzbarkeit und die entlastenden Effekte eines passiven Exoskelettes zur Reduktion der durch Werkzeug-Gewichte auftretenden Rückenbelastungen bei der Starkholzernte untersucht.

### *Material und Methoden*

Die Pilotstudie fand in der Revierförsterei Ringelah, Forstort Harmbüttler Holz, Abteilung 2366b im niedersächsischen Forstamt Unterlüß statt. Als Versuchsfläche wurde ein rund 6,3 ha großer und etwa 67-jähriger Kiefernbestand mit starkem Baumholz (> 45 cm BHD) und nahezu keinem Unterstand ausgesucht. In diesem Bestand erfolgten, nach etwa einstündiger Eingewöhnungszeit, Fällungen und Aufarbeitungen von 30 Kiefern durch einen Forstwirt in vergleichenden Messreihen mit und ohne Exoskelett. Der Proband war ein 25-jähriger, ausgebildeter Forstwirt der Niedersächsischen Landesforsten. Er hatte eine Körpergröße von etwa 1,77 m und ein Körpergewicht von 65 kg.

Bei dem Versuch wurde das passive Exoskelett IX Back Air (Abbildung 1), welches vom Hersteller SuitX für den Logistik- und Kommissionierungs-Einsatz angeboten wird (SUITX (2025)), getestet. Dieses Modell besitzt eine Eigenmasse von rund 3 kg und funktioniert nach einem biomechanischen Prinzip: Lose vor der Brust befindet sich eine Platte. Erst wenn sich die Person nach vorne beugt, berührt sie die Platte, wobei die Last über zwei Aluminiumstangen zur Hüfte umgeleitet und dort von Luftdruckkolben abgefedert wird. Von hier findet eine Last-Weiterleitung auf die Oberschenkel statt. Die Besonderheit dieses Designs besteht darin, dass das Exoskelett beim Hinsetzen die Lastübertragung von der Brust auf die Oberschenkel umgeht, sodass dies problemlos möglich ist.

Zur Analyse einer potenziellen Entlastung spezifischer Muskeln durch das passive Exoskelett, wurde ein Elektromyografie (EMG)-Gerät vom Typ NORAXON Ultium EMG (NORAXON, Scottsdale, Arizona, USA) eingesetzt. Die dabei verwendeten Oberflächensensoren erfassen die elektrische Spannung ausgewählter Muskeln und geben Aufschluss über Anspannungsgrad und Relaxion ebendieser während einzelner Arbeitsschritte und über den gesamten Arbeitsprozess hinweg.



Abbildung 1 Passives Exoskelett IX Back Air des Herstellers SuitX.



Abbildung 2 Angebrachte EMG-Elektroden am Rücken des Probanden. Von links oben im Uhrzeigersinn: Linker Thoracis, rechter Thoracis, rechter Lumbar, linker Lumbar.

Während der Versuche waren Sensoren beidseitig der Wirbelsäule auf den Muskeln am unteren (Iliocostalis Lumborum [Lumbar]) und mittleren (Longissimus Thoracis [Thoracic]) Rücken angebracht (Abbildung 2). Die Muskelaktivitäten wurden unter Beachtung der SENIAM Empfehlungen (Roessingh Research and Development BV (1999)) mit einer Rate von 2.000 Hz aufgezeichnet.

Tabelle 3 Liste der definierten Arbeitsablaufabschnitte (AAA).

100	Baumansprache	Von: Aufstellen neben dem Baum und Heben des Kopfes Bis: Beugungsbeginn zum Fällkerbschnitt
110	Anlegen des Fällkerbs	Von: Beugungsbeginn zum Fällkerbschnitt, über Fällkerbsohle und Fällkerbdach sowie Korrekturschnitte Bis: Zurückziehen des Schwertes und kleiner Schritt zurück
120	Splintschnitte führen	Von: Ansetzen des Schwertes am Stamm Bis: Zurückziehen des Schwertes nach dem zweiten Schnitt des Kreuzes (oft waagrecht geführt)
130	Fällschnitt Start	Von: Horizontales Ansetzen der Schwertspitze am Stamm, über Herumführen der Säge im Viertelkreis Bis: Loslassen der Säge
140	Einführen Fällkeil	Von: Loslassen der Säge, über Greifen des Fällkeiles und Einklopfen Bis: Berühren der Säge mit beiden Händen
150	Fällschnitt Ende	Von: Greifen der Säge mit beiden Händen und Betätigen des Gashebels Bis: Loslassen der Säge (Gilt vor und nach Einhämmern des Fällkeiles)
160	Einhämmern Fällkeil	Von: Loslassen der Säge, über Greifen nach dem Fällkeil Bis: Hände verlassen Fällkeil am Gürtel nach dem Wegstecken
170	In Rückweiche Gehen	Von: Aufrichten zum Weglaufen Bis: Ende des Wartens in der Sicherheitszone
180	Beginn Aufarbeitung	Von: Beginn Vorwärtsbewegung, über Einsammeln der Werkzeuge und Anwerfen der Säge Bis: Sägeschwert berührt Baum
190	Waldbart entfernen	Von: Sägeschwert berührt Waldbart Bis: Greifen nach Maßband
200	Maßband anbringen	Von: Berühren des Maßbandes Bis: Hände greifen nach der Säge
210	Stamm entlang gehen	Von: Hände berühren Säge nach Einhängen des Maßbandes Bis: Sägeschwert berührt zu entfernenden Ast
220	Stamm teilen	Von: Säge steht orthogonal zum Stamm und Sägeschwert berührt Borke Bis: Hand verlässt Gashebel (Gilt vor und nach Einholen des Maßbandes)
230	Maßband an neuem Abschnitt anbringen	Von: Hand greift nach Maßband Bis: Hand greift Gashebel
240	Entlang neuem Abschnitt gehen	Von: Hände berühren Säge nach Einhängen des Maßbandes Bis: Sägeschwert berührt zu entfernenden Ast
250	Zopfschnitt	Von: Säge steht orthogonal zum Stamm und Sägeschwert berührt Borke Bis: Hand verlässt Gashebel (Gilt vor und nach Einholen des Maßbandes)
260	Zu Hauptstamm gehen	Von: Umdrehen Richtung Hauptstamm Bis: Berühren des Maßbandes
270	Zu Stammfuß gehen	Von: Hand verlässt Maßband am Stammzopf Bis: Hand verlässt Motorsäge (Gilt vor und nach Messen des Durchmessers)
280	Maße anschreiben	Von: Hand geht zum Kreidestift, über Beschriften des Baumes Bis: Kreidestift ist wieder im Gürtel

Zusätzlich wurde der Proband während der Versuchsreihe mit einer Logitech-Kamera gefilmt, die auf dem Mess-Laptop mitgeführt wurde und deren Stream in der NORAXON-Software eingebunden wurde. Hierdurch konnten anschließend Markierungen in den Datenreihen gesetzt werden, sodass die verschiedenen Arbeitsablauf-abschnitte (AAA) aus Tabelle 3 getrennt werden konnten. Die AAA wurden so gewählt, dass wiederkehrende Bewegungsabläufe enthalten waren, wobei bewusst kurze Sequenzen ausgeschlossen wurden, bei denen die Bewegungen jedes Mal individuell sein würden.

Alle EMG-Daten wurden nach den Versuchen mit einem Butterworth-Filter 6. Ordnung mit Hoch- und Tiefpassfilter (20 Hz/500 Hz) von Störungen bereinigt, gleichgerichtet und mittels eines rollenden Mittelwertes über 100 Messwerte geglättet. Als Referenz für die gemessene Muskelaktivität führte der Proband eine Übung aus und in den gemessenen EMG-Werten wurde die maximale Anspannung ermittelt und über eine halbe Sekunde ein Mittelwert berechnet. Die während der Versuchsreihe erhobenen Muskelaktivitäten wurden mit dieser Referenzanspannung in Bezug gesetzt und bilden die prozentuale Anspannung zur Referenzanspannung ab. Für die weitere Analyse wurden nur Messdurchgänge verwendet, in denen der Proband dieselben AAA ausgeführt hatte und die Messdaten nicht gestört waren. Die verbliebenen Messwerte je Muskel wurden nach den AAA aufgeteilt und die Varianten mit Exoskelett denen ohne Exoskelett gegenübergestellt.

Zum Abschluss der Fällungsversuche wurde der Proband zu seinen Eindrücken zum eingesetzten Exoskelett befragt. Der Fragebogen wurde in Anlehnung an die Fragebögen von Alabdulkarim und Nussbaum (2019) und Smets (2019) erstellt, um neben den objektiven Daten auch subjektive Eindrücke des Anwenders zu Tragekomfort und Nutzen der Exoskelette zu erfassen. Dazu konnte zu jeder Frage auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 für „stimmt gar nicht“ und 5 für „stimmt voll und ganz“ steht, eine Bewertung abgegeben werden. Zusätzlich konnten noch freitextliche Bemerkungen hinzugefügt werden, um die Bewertung zu begründen oder zu ergänzen.

## Ergebnisse

Abbildung 3 stellt für die vier Muskeln am mittleren (LThoracic/RThoracic) und unteren Rücken (LLumbar/RLumbar) die gegenübergestellten Mikrovolt in den Durchgängen mit (grüne Boxplots) und ohne (rote

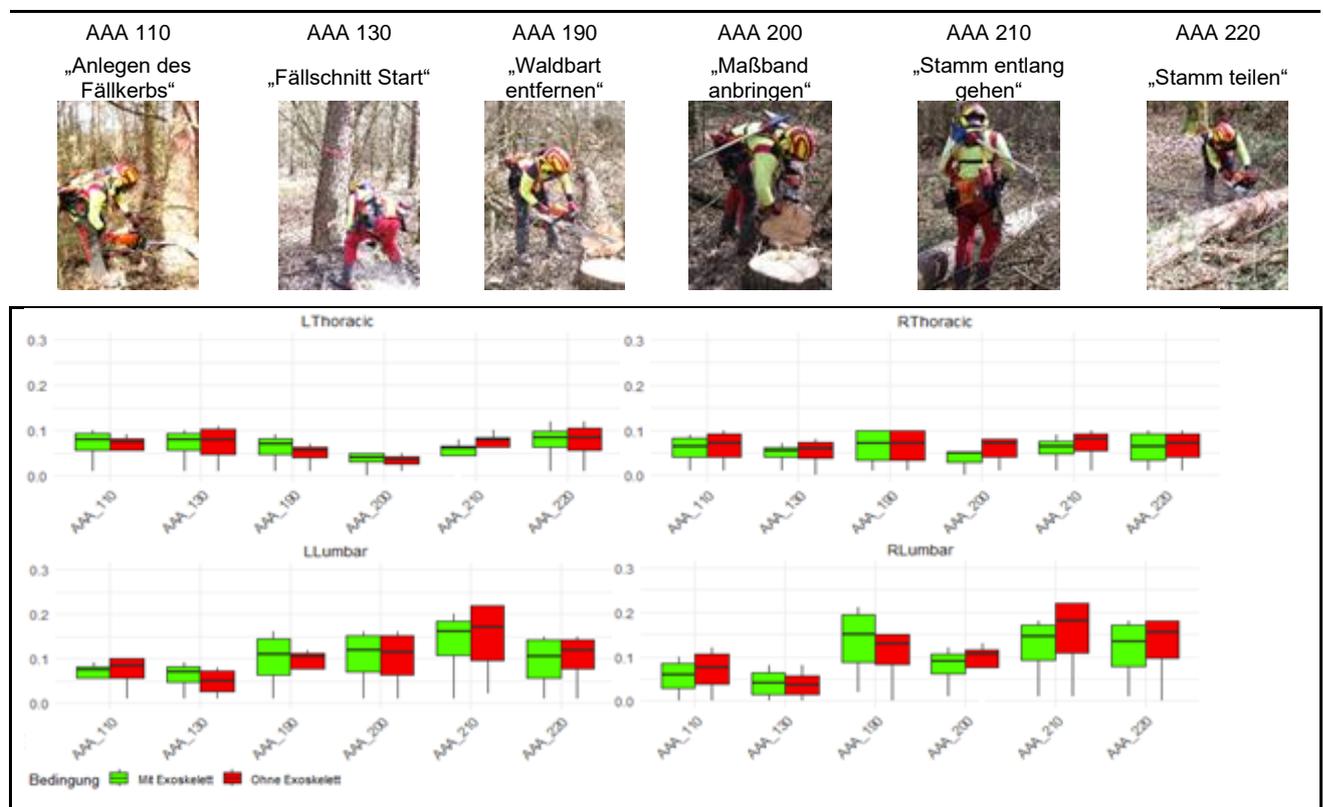


Abbildung 3 Vergleichende Darstellung der Muskelaktivitäten im mittleren Rücken (Thoracic) links und rechts sowie im unteren Rücken (Lumbar) links und rechts der Wirbelsäule, während der sechs AAA, mit (grün) und ohne (rot) Unterstützung des Rückens durch ein passives Exoskelett.

Boxplots) Exoskelett für die sechs dargestellten AAA dar. Zu erkennen ist dabei die höhere Beanspruchung des unteren Rückens im Vergleich zum mittleren Rücken, anhand der deutlich höheren relativen Muskelaktivität.

Zudem lässt sich in einzelnen AAA eine seitenspezifisch höhere Beanspruchung aufgrund seitlicher Neigung und Drehung des Oberkörpers erkennen. Zum Beispiel in den AAA 190 und 220 zeigt der untere Rücken höhere Anspannungen auf der rechten Seite (RLumbar) aufgrund von Beugungen des Oberkörpers auf die linke Seite, sowohl in den Durchgängen mit Exoskelett als auch ohne die Unterstützung. Bei anderen AAA tritt der Effekt zwar ebenfalls auf, jedoch mit geringerer Wirkung.

Darüber hinaus macht der Variantenvergleich je Muskel jedoch deutlich, dass keine Unterschiede in der relativen Muskel-Beanspruchung durch die Nutzung des Exoskelettes bei den untersuchten AAA aufgetreten sind.

Die Befragung des Probanden zur Zufriedenheit mit dem eingesetzten Exoskelett zeigt eine zurückhaltende Bewertung. Mit Verweis auf das niedrige Alter des Probanden wird die Notwendigkeit bzw. der Nutzen des Exoskelettes infrage gestellt. Als Kritik wird die Bewegungsstörung beim Heben des Beines betont.

Skala: 1 Stimmt gar nicht; 5 Stimmt voll und ganz

1. Ich fühle mich durch das Exoskelett entlastet: 3 von 5
2. Es entspricht meinen Bedürfnissen für die Erledigung der Aufgabe: 2 von 5
  - *Die Beweglichkeit der Beine ist durch das Exoskelett teilweise eingeschränkt. Entlastet aber beim Vorbeugen.*
3. Es ist einfach zu benutzen“ (Anlegen, Ablegen, Größeneinstellung, Stärkeregelation, etc.): 5 von 5
4. Es funktioniert so, wie ich es haben möchte“ (Rückenentlastung, Unterstützung im richtigen Moment, etc.): 4 von 5
5. Der Bewegungsspielraum wurde beeinträchtigt: 2 von 5
  - *Trotz der geringen Beeinträchtigung störte das Exoskelett teilweise beim Übersteigen der liegenden Baumstämme.*
6. Das Gleichgewicht wurde beeinträchtigt: 1 von 5
7. Insgesamt arbeite ich lieber mit als ohne es: 2 von 5
  - *Da ich noch relativ jung bin und noch keine großen Probleme mit dem Rücken habe.*
8. Wie lange (Std.) würden Sie das Exoskelett gerne tragen? 4 Std.

## Diskussion

### Elektromyografie

Die Seitenunterschiede der Muskelbeanspruchungen zeigen, dass viele Arbeitsablaufabschnitte (AAA) in einer weniger ergonomischen Haltung bzw. Beugung zur Seite, anstatt nach vorne ausgeführt wurden, unabhängig von der Nutzung des Exoskelettes. Bereits aus ergonomischer Betrachtung wäre ein frontales Arbeiten und Beugen für den Probanden sinnvoll. Dafür spricht, dass Frost et al. (2009) bereits nachweisen konnten, dass eine ergonomische Bewegungsausführung die Rückenbelastung mitunter stärker verringern kann als die Nutzung eines Exoskelettes bei einer weniger ergonomischen Bewegungsausführung.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass Alemi et al. (2020) in einer vergleichenden Hebe-Untersuchung, wobei eine Last entweder frontal (symmetrisch) oder seitlich (asymmetrisch) gehoben werden sollte, herausfanden, dass das eingesetzte Exoskelett von SuitX bei asymmetrischem Heben weniger wirksam war (~11 % Reduktion im Vergleich zur Referenzbelastung bei symmetrischem Heben, gegenüber ~6 % beim asymmetrischen Heben). Sie vermuten, dass die frontale Lastabnahme durch das Exoskelett dafür verantwortlich war, dass es bei seitlichem Beugen schlechter wirken konnte. Dies könnte auch eine Erklärung im vorliegenden Versuch sein, weshalb keine eindeutige Entlastung durch das Exoskelett von SuitX beim Fällen und Aufarbeiten zu erkennen ist.

Der ausbleibende entlastende Effekt des Exoskelettes ist zudem vermutlich auf ein zu geringes Drehmoment zurückzuführen, welches für das frontale Heben nahe am Körper ausgelegt ist. Der Forstwirt arbeitete hingegen oft in einer gebeugten Haltung, wobei die Motorsäge mit einer Masse von etwa 6,5 kg etwas weiter vom Körper weggehalten wurde (siehe Bilder der AAA). Hierdurch erhöht sich der Kraftaufwand, bedingt durch den längeren Hebelarm, bei gleichzeitig nicht optimaler Entlastungswirkung durch das Exoskelett, da das Exoskelett bei einem Winkel von rund 90° bis 120° sein Optimum hat (Madinei et al. (2022)).

In einigen Fällen, hauptsächlich beim Entfernen des Waldbartes (AAA 190), tritt sogar eine Erhöhung der mittleren Muskelbeanspruchung bei Verwendung des Exoskelettes gegenüber der nicht unterstützten Variante auf, wobei die Unterschiede zwischen den Varianten nicht eindeutig sind. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass der Proband aufgrund des Gegendruckes durch das Exoskelett eine veränderte Oberkörperhaltung eingenommen hat, wodurch insbesondere der untere Rücken tendenziell höher beansprucht wurde.

#### Nutzerzufriedenheit

Die gefühlte Entlastung (Frage 1) wurde mit 3 von 5 Punkten bewertet und würde bedeuten, dass im Gegensatz zu den EMG-Daten eine Entlastung vom Probanden festgestellt wurde. Bei den Fragen zur Entsprechung des Exoskelettes zu den Bedürfnissen (Frage 2) und zur Einschränkung des Bewegungsspielraumes (Frage 5) werden zudem Einschränkungen deutlich, die sich auf das Übersteigen von liegenden Baumstämmen beziehen. Dieser Umstand könnte während der motormanuellen Fällung und Aufarbeitung gegebenenfalls zu einer Steigerung der körperlichen Belastung führen und wäre nicht zuletzt eine Herausforderung aus der Perspektive der Arbeitssicherheit. In Frage 4 wird das Exoskelett zwar in seiner Funktionsweise positiv betrachtet, jedoch gibt der Proband bezüglich der bevorzugten Arbeit mit dem Exoskelett (Frage 7) an, lieber ohne dieses zu arbeiten, mit der Begründung, dass er noch relativ jung sei und daher keine Rückenbeschwerden habe. Letztlich wird die gewünschte Tragezeit pro Tag (Frage 8) trotzdem mit rund 4 Stunden angegeben. Insofern scheint die Bewertung des Exoskelettes durch den Probanden nicht ganz konsistent und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Anwesenheit des Studienleiters einen Einfluss auf die Beantwortung der Fragen hatte. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen in diesem Bereich. Bei der durchgeführten Pilotstudie stand die Analyse der Nutzbarkeit und der Effekte eines passiven Exoskelettes beim motormanuellen Starkholzeinschlag im Vordergrund, wobei vorerst nur ein Proband herangezogen wurde. Weitere Studien, mit unterschiedlichen Exoskeletten sollten daher mit größeren Probandenanzahlen durchgeführt werden, um belastbarere Ergebnisse zu erzielen.

#### Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass dieses Exoskelett-Modell für den motormanuellen Holzeinschlag nicht vollumfänglich geeignet ist. Zum einen birgt die Behinderung des Übersteigens von liegenden Stämmen oder anderen Hindernissen möglicherweise ein Unfallrisiko für die nutzende Person. Die Übertragung der Lasten vom Oberkörper mit Hilfe einer rigiden Struktur über ein Gelenk an der Hüfte zu den Oberschenkeln, ist vielen Exoskeletten gemein und kann daher nicht durch andere Modelle umgangen werden. Zudem konnte der entlastende Effekt des Exoskelettes für diese Tätigkeit nicht in jedem Fall beobachtet werden. Hierfür könnte sowohl ein Exoskelett mit mehr Drehmoment zur Entlastung sinnvoll sein, als auch eine längere Eingewöhnungszeit des Probanden, um den Wirkmechanismus des Exoskelettes intuitiv besser zu nutzen.

### **Fallstudie: Kiefern-Starkholzernte mit motormanueller Zufällung bei 20 und 40 m Rückegassenabständen, Aufarbeitung mit einem Harvester und Rückung mit einem Forwarder**

#### *Einleitung*

Die Analyse der zur Verfügung stehenden Holzernteverfahren für Kiefern-Starkholz ergab, dass der Einsatz von Starkholz-Harvestern bezüglich der Bewertungskriterien am geeignetsten ist. Während dieses Verfahren in Fichtenbeständen bereits mehrfach untersucht wurde, fehlen für den Anwendungsfall des Kiefern-Starkholzes jedoch Untersuchungsergebnisse. Zudem ist das Verfahren auf einen Rückegassenabstand von rund 20 m angewiesen und daher nicht im gesamten Projektgebiet zur Anwendung geeignet.

Unter den Verfahren, die für Rückegassenabstände von etwa 40 m infrage kommen, sind kombinierte Holzernteverfahren die sowohl sicherste als auch kostengünstigste Alternative. So wurden beispielsweise für das Königsbronner Starkholzverfahren in mehreren Untersuchungen in Fichtenbeständen die hohe Bestandespfleglichkeit und geringe Kosten nachgewiesen. Jedoch ist der Einsatz dieses Verfahrens bisher noch nicht im Kiefern-Starkholz untersucht worden.

Aus diesem Grund sollten die vollmechanisierte Holzernte mit einem Starkholz-Harvester sowie ein kombiniertes Holzernteverfahren mit motormanuellem Zufällen und vollmechanisierter Aufarbeitung und Rückung, als vielversprechende Lösungen für die Ernte von Kiefern-Starkholz untersucht werden. Aufgrund der Analysen der NW-FVA wurde als Anwendungsfall ein zu früh vorangebauter Kiefernbestand zur Untersuchung vorgesehen. Bei der Fällung sollte der Voranbau geschont werden und darin insbesondere die als Z-Bäume markierten Bestandsglieder. Aus diesem Grund sollten die Kiefern mit der Krone möglichst zielgerichtet auf eine Rückegasse gefällt werden, wobei unterschiedlich weite Rückegassenabstände (20 m und 40 m) auch beim kombinierten Verfahren berücksichtigt wurden. Des Weiteren sollte die Morphologie von

Alt-Kiefern, mit ihrer natürlichen Neigung und dem Kronenschwerpunkt in eine Richtung, und dessen Einfluss auf die Fällrichtung eine gewisse Aufmerksamkeit.

### Material und Methoden

Rund um den Truppenübungsplatz Jägerbrück in Mecklenburg-Vorpommern stocken alte Kiefernbestände, die bereits vor 40 Jahren mit Buchen und Eichen vorangebaut wurden. Dadurch hat sich ein deutlich zweischichtiges Bestandesbild (Abbildung 4 und 5) etabliert, bei dem der vorangebauter Laubholzbestand zur Z-Baum Auswahl vorgesehen ist, während die Kiefer zur Endnutzung ansteht.



Abbildung 4 Aufnahme der Versuchsfäche im Bestand.



Abbildung 5 Aufnahme der Versuchsfäche vom Waldweg.

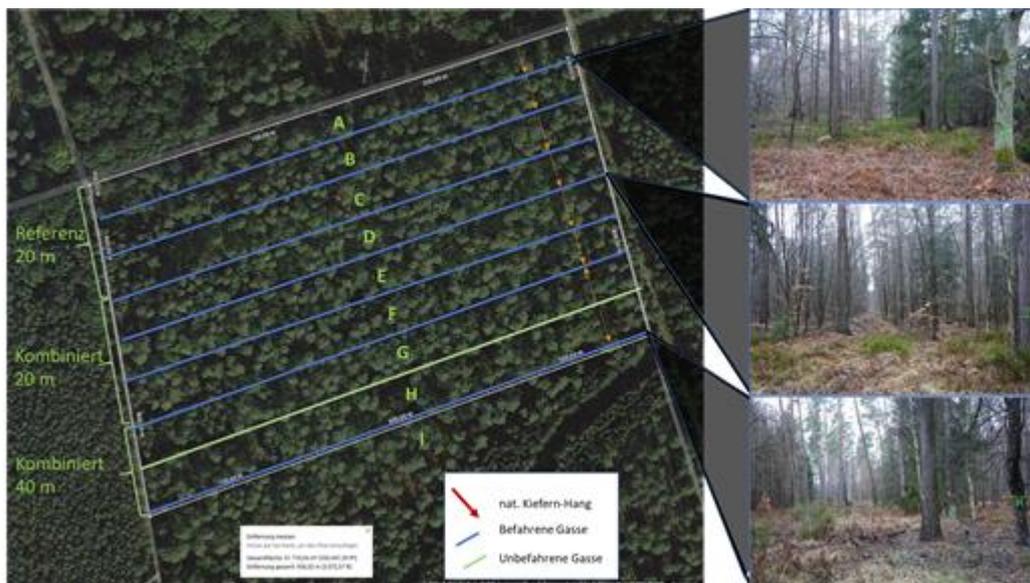


Abbildung 6 Aufteilung und Buchstabierung der Rückegassen für die Versuchsverfahren, sowie befahrene (blau) und unbefahrene (grün) Rückegasse, natürliche Kiefern-Neigung (roter Pfeil) und geplante Fällrichtungen (orange Pfeile). Rechts je Verfahren ein Foto der Bestandesbedingungen vor der Holzerntemaßnahme.

Der Versuch fand in der Abteilung 562a3, im Forstrevier Spechtberg der Bundesforstverwaltung Vorpommern-Strelitz statt. Die Fläche hat eine Größe von insgesamt 7,6 ha, wobei davon lediglich eine Fläche von rund 5,2 Hektar für den Versuch vorgesehen wurde, indem Rückegassen fortlaufend mit Großbuchstaben bezeichnet und als Abgrenzung für die Teilversuche dienen (Abbildung 6).

Die Starkholz-Kiefern hatten mit ihren 120 Jahren eine mittlere Oberhöhe von rund 30 m und einen durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser (BHD) von rund 48,4 cm. Für die vollmechanisierte Holzernte mit 20 m Rückegassenabstand (im Folgenden als Referenz definiert) waren in den Zwischenblöcken A-C insgesamt 79 Kiefern zur Fällung vorgesehen. Für das kombinierte Verfahren bei 20 m Rückegassenabstand waren in den Zwischenblöcken D-F in Summe 92 Kiefern markiert und für das kombinierte Verfahren bei 40 m Rückegassenabstand, wobei hierfür eine bestehende Rückegasse zwischen G und H von der Befahrung ausgenommen wurde, waren insgesamt 84 Kiefern zur Entnahme vorgesehen.

Zusätzlich wurden etwa 43 Z-Bäume pro Hektar unter den etwa 25-jährigen Buchen ausgewiesen. Diese sollten während der Holzerntemaßnahme besonders geschont werden und dienten zur Beurteilung der Bestandespfleglichkeit der Holzerntemaßnahmen. Der BHD des Unterstandes lag im Mittel bei rund 9,3 cm.

Zur Untersuchung standen das kombinierte Verfahren bei Rückegassenabständen von 20 m bzw. 40 m sowie das als Referenzverfahren deklarierte vollmechanisierte Holzernteverfahren. Die eingesetzten Maschinen und Maschinenführer waren für alle drei Varianten identisch. Für das motormanuelle Zufällen wurden vier erfahrene Forstwirte der Bundesforsten in Zweiergruppen aufgeteilt, die während der gesamten Untersuchung fortbestanden.

Die Verfahren verliefen gemäß folgender Prozessschritte:

Kombinierte Holzernteverfahren (bei 20 und 40 m RG-Abstand)	Vollmechanisiertes Holzernteverfahren (Referenz)
1.Schritt, Forstwirte:	-
Beginnen am Ende der Rückegasse mit zielgerichteter Fällung aller Kiefern (auch innerhalb Kranreichweite) mit der Krone auf die Rückegasse, um Bestand und insbesondere Z-Bäume zu schonen. Abtrennen der Krone. In Kranreichweite Abtrennen des unteren Stammabschnittes zur schonenderen Stamm Manipulation durch den Harvester.	-
2.Schritt, Harvester:	1.Schritt, Harvester:
Beginnt zeitlich gelöst mit Aufarbeitung und Vorrückung. Auf der Rückegasse liegende obere Stammteile bzw. Kronen werden zu Kurzholz aufgearbeitet. Hauptstamm wird vorgerückt, entastet und in Abschnitte getrennt.	Fällen, Aufarbeiten und Vorrücken.
3.Schritt, Forwarder:	2.Schritt, Forwarder:
Rückt das Kurzholz nach Abschluss der Fällungs- und Aufarbeitungsmaßnahme an die Polterplätze.	Rückt das Kurzholz nach Abschluss der Fällungs- und Aufarbeitungsmaßnahme an die Polterplätze.

Die zu entnehmenden Starkholz-Kiefern sowie die Z-Bäume wurden vor dem Versuch durch den zuständigen Revierförster mit Sprühfarbe unterschiedlicher Farbe markiert. Die Kiefern wurden daraufhin vom Projektbearbeiter fortlaufend mit Sprühfarbe sichtbar nummeriert und der BHD gemessen. Der Unterstand wurde zudem innerhalb mehrerer, über die Fläche verteilter Stichprobenkreise mit jeweils einem Radius von 12,62 m (500 m<sup>2</sup> Fläche) erfasst.

Alle Arbeiten der Forstwirte und der Maschinen wurden mittels Kameras aufgenommen. Später wurden basierend auf diesem Videomaterial die Zeitstudien erstellt, wobei die AAA jeweils einer Baumnummer zugeteilt wurden, wenn möglich. War die Zuordnung der Arbeitszeit zu einer Baumnummer bei Forstwirten oder dem Harvester nicht mehr möglich, da bspw. die Baumnummer nicht zu erkennen war, wurde der Zeitbedarf in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Der Zeitbedarf der Forstwirte zum Zufällen und Vorbereiten der Stämme bei 20 m Rückegassenabstand wurde gutachterlich mit einem Leistungsfaktor von 0,8 beurteilt. Für den Forwarder konnten die Zeiten des aufgearbeiteten Holzes nicht mehr den Baumnummern zugeordnet werden, weshalb der ermittelte Zeitbedarf auf alle Verfahrensvarianten gleichmäßig aufgeteilt wurde. Die Leistungen der Forstwirte und Maschinen werden ohne Rüst- und Pausenzeiten angegeben. Für die Kostenberechnungen hingegen sind, aus Gründen der Vergleichbarkeit mit der Literatur, Kurzpausen mit bis zu 15 Minuten Dauer im Zeitbedarf enthalten.

Die Fällrichtungen der Starkholz-Kiefern wurden nach der Beendigung der motormanuellen Fällungen mittels Kompass am liegenden Stamm, im Anhalt an der Stammachse ermittelt. Daraus sollte später der Einfluss des natürlichen Kiefern-Hanges auf die Fällrichtung ermittelt werden. Für die Fällung durch den Harvester konnten keine Fällrichtungen ermittelt werden, da die Stämme direkt vorgerückt und aufgearbeitet wurden. Die Unterbrechung dieser Arbeit zur Feststellung der Fällrichtung hätte den Arbeitsfluss des Maschinenführers und damit die Zeitstudie zu stark beeinflusst.

Nach Beendigung der gesamten Holzerntemaßnahme wurden die Schäden an den verbliebenen Starkholz-Kiefern vollständig erfasst und als Anteil alle verbliebenen Starkholz-Kiefern auf der Fläche berechnet. Die Schäden am Unterstand wurden innerhalb von zwei Probekreisen je Zwischenblock erfasst und mit der Gesamtzahl an vorhandenen Bäumen je Probekreis ins Verhältnis gesetzt. Schäden an den Rückegassen wurden optisch eingeschätzt und gegebenenfalls mit einem Messstab vermessen.

Die geerntete Holzmenge wurde durch den zuständigen Revierförster mittels Sektionsraummaßverfahren erfasst und das Ergebnis mit dem Faktor 0,6 ins Festmaß umgerechnet. Beim IS wurde zuvor das Brutto Raummaß mit dem Faktor 0,96 um 4% reduziert auf das Netto Raummaß. Bei LAS und PAL ist demgegenüber ein Längenübermaß von 10 cm vorhanden, sodass das Brutto Raummaß gleich dem Netto Raummaß ist. Beim LAS wurden Vorder- und Rückseite vermessen, alle übrigen Sortimente wurden lediglich von vorne vermessen.

Die Kostenberechnung wurde auf Grundlage der durchgeführten Zeitstudie und verfügbaren Kostensätzen des KWF durchgeführt.

## Ergebnisse

Auf der 5,2 ha großen Untersuchungsfläche belaufen sich die gerückte und vermessene Holzmenge auf: 29,13 Fm Birke-Industrieholz, 97,73 Fm Kiefern-Industrieholz, 59,33 Fm Kiefern-Palette, 285,34 Fm Kiefern-Fixlänge 5 m und 70,11 Fm Kiefern-Fixlänge 4 m, was insgesamt 541,64 Fm gepolterten Holzes ergibt und einem Hiebsvolumen von 104,16 Fm ha entspricht. Die Auflistung zeigt, dass ausschließlich kurze Sortimente aus den durchmesserstarken Kiefern geschnitten wurden.

Die Leistungen je Prozessschritt sind für alle drei Holzernteverfahren in Tabelle 4 dargestellt. Dabei stechen die hohen Leistungen der Forstwirtschaft-Teams und des Harvesters hervor. Für beide muss beachtet werden, dass die gefällten Kiefern ein hohes Stückvolumen besaßen und als reine Arbeitszeit (RAZ) bzw. produktive Maschinenstunde ohne Pausen und Unterbrechungen (PMH0) angegeben sind. Auch der Forwarder zeigt mit 25,1 Efm/Std. eine gute durchschnittliche Leistung.

Tabelle 4 Leistung (Efm/Std.) je Holzernteverfahren.

Holzernteverfahren	Leistung je Verfahrensschritt (Efm/Std.)		
	2x Forstwirte (RAZ)	Harvester (PMH0)	Forwarder (PMH0) rechnerisch
20 m vollmechanisiert	-	37,7	25,1
20 m kombiniert	17,9	35,0	25,1
40 m kombiniert	18,4	41,5	25,1

Die angegebenen Kosten je Verfahrensschritt in Tabelle 5 hingegen sind auf die jeweilige Leistung mit Unterbrechungen bis 15 Minuten Länge bezogen. Hierbei kommt auch der Leistungsfaktor beim Forstwirtschaft-Team im 20 m kombinierten Verfahren zum Tragen, weshalb die Kosten hier niedriger sind, als beim Vergleichsverfahren mit 40 m Rückegassenabstand. Die vergleichsweise hohen Verfahrenskosten von 17,6 €/Efm für das 20 m kombinierte Verfahren ergeben sich dann jedoch aus der Leistung des Harvesters bei dieser Verfahrensvariante.

Tabelle 5 Kosten (€/Efm) je Holzernteverfahren (nach KWF-Kalk.).

Holzernteverfahren	Kosten je Verfahrensschritt (€/Efm)			
	2x Forstwirte (Normalzeit)	Harvester (PMH15)	Forwarder (PMH15) rechnerisch	Gesamt
20 m vollmechanisiert	-	6,4	6,1	12,4
20 m kombiniert	4,7	6,8	6,1	17,6
40 m kombiniert	5,2	5,8	6,1	17,1

Die ermittelten Fällrichtungen der motormanuell gefällten Kiefern sind in Abbildung 4 dargestellt. Die angrenzenden Rückegassen sind zur Orientierung eingetragen und die Kiefern ideell vom selben Ursprung ausgehend in einer 360 Grad-Grafik aufgetragen. Die unbefahrene Rückegasse „G“ wurde in Orange hervorgehoben. Beim Vergleich der Fällrichtungen zwischen den beiden Holzeinschlagsverfahren fällt auf, dass bei 20 m Rückegassenabstand (Gassen C/D/E) die Fällrichtungen im Mittel um etwa 60° nach Osten vom natürlichen Hang der Kiefern (angegeben durch den roten Pfeil) abweichen. Im Gegensatz dazu streuen die Fällrichtungen bei 40 m Rückegassenabstand (Gassen F/H) stärker und näher um den natürlichen Hang der Kiefern nach Osten und Süden. Wo dies nicht möglich war, da die Kiefernkrone ansonsten auf die unbefahrene Gasse G gefällt worden wäre, mussten die Bäume entgegen des natürlichen Hanges nach Nord-Osten gefällt werden, und damit in den Bereich des Vergleichsverfahrens mit 20 m Rückegassenabstand.

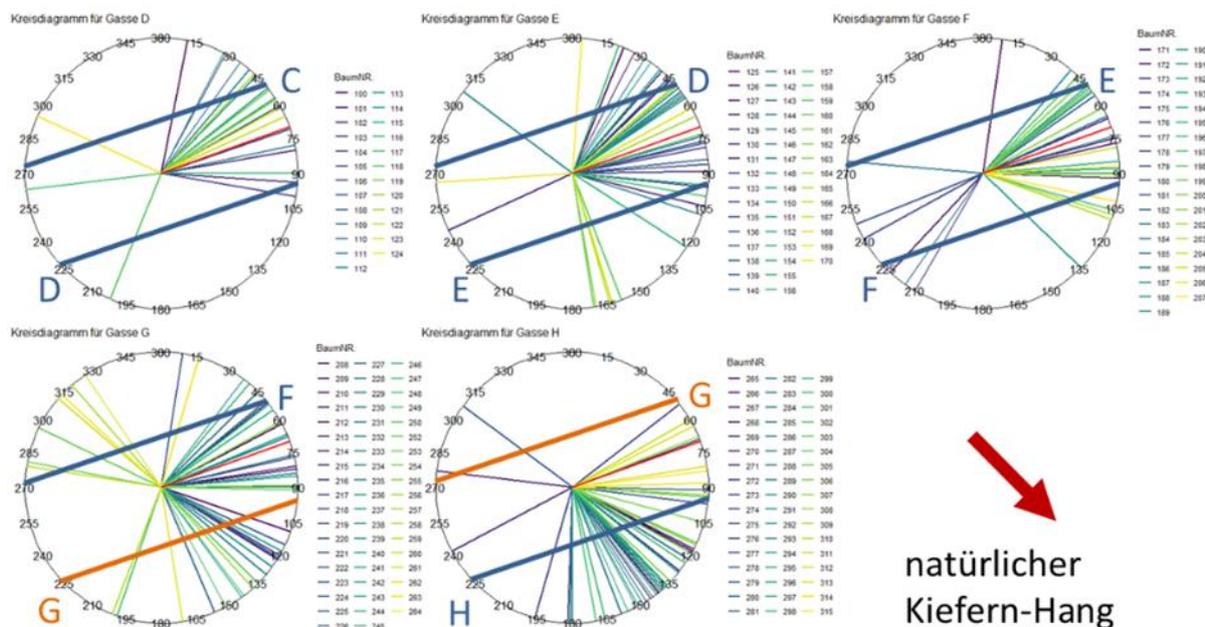


Abbildung 7 Fällrichtungen der motormanuell zugefällten Kiefern in den kombinierten Holzernteverfahren mit 20 m bzw. 40 m Rückegassenabstand.

Die Schäden an den verbliebenen Starkholz-Kiefern im Bestand sind zusammen mit den Schäden an den verbliebenen unterständigen Buchen und den Schäden an den Rückegassen in Tabelle 6 dargestellt. Dabei fällt auf, dass bei keinem der drei Holzernteverfahren die Rückegasse Fahrspuren von mehr als 15 cm Tiefe aufweisen. Sie gelten damit als ungeschädigt.

Tabelle 6 Bestandes- und Rückegassenschäden in Prozent des verbliebenen Bestandes bzw. der Rückegassenlänge je Holzernteverfahren.

Holzernteverfahren	Bestandes- und Rückegassenschäden (des verbliebenen Bestandes bzw. der Rückegassenlänge)		
	Unterstand geschädigt	Verbliebene Kiefern geschädigt	Rückegassen geschädigt
20 m vollmechanisiert	27 %	13 %	0 %
20 m kombiniert	14 %	9 %	0 %
40 m kombiniert	20 %	13 %	0 %

Zudem sind die Schadprozente an den verbliebenen Kiefern bei der vollmechanisierten Holzernte und dem kombinierten Verfahren bei 40 Rückegassenabstand mit 13 % gleich hoch, und damit höher als 9 % beim 20 m kombinierten Verfahren. Das vollmechanisierte Verfahren weist außerdem mit 27 % geschädigtem Unterstand auch hier den höchsten Wert auf.

## Diskussion

### Leistung und Kosten

Die Leistung des Harvesters im vollmechanisierten Holzernteverfahren ist mit 37,7 Efm/Std. ausgesprochen hoch, besonders wenn man kleinere Unterbrechungen bis 15 Minuten mitberücksichtigt. In der Literatur wurde bei der 17. KWF-Tagung 2016 zur Ernte im Kleinprivatwald ein kombiniertes Verfahren im Kiefernstarkholz vorgestellt, wobei auch Leistungsdaten für den Harvester genannt wurden. Hier kamen die Autoren auf 23 und 25 Efm/Std. bei Brusthöhendurchmessern von 55 und 40 cm respektive (KWF 2016). Der Forwarder wird hingegen mit einer Leistung von 23 und 24 Efm/Std. angegeben, was in etwa der Leistung des Forwarders in der vorliegenden Studie entspricht. Zusätzliche Leistungsdaten können der Datenbank der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg entnommen werden, die auf ihrer Website jedoch eine Spannbreite von 22 bis 33 Efm/Std. für dieses Holzernteverfahren angibt (FVA (2025)). Und selbst hier liegt der Harvester unserer Fallstudie noch über dem Wert in der Literatur, die den BHD der einbezogenen Bäume mit „50 cm <“ definiert, was etwa dem BHD in unserer Fallstudie entspricht. Für den Forwarder wurde eine Spannbreite bei der Leistung von 16 bis 30 Efm/Std. angegeben. Beide Beispielf Verfahren kommen auf durchschnittliche Gesamtkosten (Ernte und Bringung) von 15,9 (15,3 – 16,4) bzw. 15,7 €/Efm (11,9 – 19,6) und liegen damit deutlich über den 12,4 €/Efm, die wir in unserer Fallstudie ermittelt haben.

Für ein kombiniertes Verfahren bei 20 m Rückegassenabstand gibt es keine Vergleichswerte in der Literatur, daher wird es, wie die untersuchte Verfahrensvariante mit 40 m Rückegassenabstand, dem Königsbronner Starkholzverfahren (KSV) und dem Königsbronner Harvesterverfahren (KHV) gegenübergestellt, die beide für 40 m Rückegassenabstände konzipiert wurden (FVA (2025)). Das KSV gibt für die Forstwirte eine mittlere Leistung von 6,9 Efm/Std. an und das KHV eine Spannweite von 8 bis 18 Efm/Std. Im Vergleich dazu lagen die Forstwirte dieser Fallstudie pro Person bei Normalleistungen (reine Arbeitszeit zuzüglich allgemeine Zeiten) von 6,7 Efm/Std. (20 m Variante) und 7,6 Efm/Std. (40 m Variante), womit sie etwa im bzw. leicht unter den Werten der Literatur liegen.

Die FVA (2024) gibt beim KSH für den Harvester eine Leistung von 48 Efm/Std. an, was sowohl die Leistung des Harvesters bei 20 m (34 Efm/Std. [PMH15]) als auch bei 40 m (40 Efm/Std. [PMH15]) Rückegassenabstand dieser Fallstudie übertrifft. Ausschlaggebend sind in diesen Verfahren die Vorbereitung der Stämme durch die Forstwirte und die ausgehaltenen Sortimente. In der hier behandelten Fallstudie wurden ausschließlich Kurzholz-Sortimente geschnitten, weshalb der Harvester mehr Aufwand mit der Sortimentierung hatte (Suchen der optimalen Einteilungen und Trennschnittstellen im Stamm und Ausführen von etwa drei Trennschnitten pro Stamm). Zudem waren die Forstwirte angehalten die Stämme nach dem Zufällen einzuschneiden, wenn beide Stammteile dann noch für den Harvester erreichbar waren. Damit sollte die Manipulierbarkeit der Stammteile durch den Unterstand verbessert werden. Da der Harvester bei einem Rückegassenabstand von 20 m jeden Stammabschnitt erreichen kann, wurden hier jedes Mal Trennschnitte von den Forstwirten ausgeführt. Dadurch wurde die Kranarbeit für den Harvesterfahrer jedoch deutlich erhöht, was sich in der niedrigsten der drei ermittelten Harvesterleistungen widerspiegelt. Dem gegenüber erreichte der Harvester seine Höchstleistung bei 40 m Rückegassenabstand infolge des Zufällens und weitestgehend in einem Stück belassen der Kiefern-Stämme durch die Forstwirte in dieser Variante. Dadurch lagen die Kosten für den Harvester bei 6,8 €/Efm (20 m) und 5,8 €/Efm (40 m) gegenüber 4,9 €/Efm beim KSV und 7,1 – 9,3 €/Efm beim KHV.

In dieser Fallstudie lag die Leistung des Forwarders unter der des Forwarders im KSV, jedoch etwa genau im Mittel eines Forwarders im KHV (16 – 30 Efm/Std.). Einflussfaktoren für den Forwarder in der Fallstudie waren wahrscheinlich wieder die Kranarbeit für die zahlreichen Kiefern-Kurzholz-Sortimente sowie die 29 Fm Birken-Industrieholz mit sehr geringem durchschnittlichem BHD, für die gesonderte Rückefahrten notwendig waren. Die Kosten betragen daher in dieser Fallstudie 6,1 €/Efm, während sie im KSV mit 4,5 €/Efm angegeben werden und mit 4,8 – 9,0 €/Efm beim KHV.

In Summe belaufen sich die Kosten für die in den Fallstudien untersuchten Verfahren auf 12,4 €/Efm für die vollmechanisierte Variante, 17,6 €/Efm für die kombinierte Variante mit 20 m Rückegassenabstand und auf 17,1 €/Efm bei 40 m. Somit unterscheiden sich die beiden kombinierten Verfahren trotz der sehr unterschiedlichen Leistung des Harvesters nur geringfügig, bedingt durch die unterschiedliche Leistung der Forstwirte. Im Vergleich zu den kombinierten Verfahren in der Literatur, sind die Kosten vergleichbar mit dem KHV (17,6 €/Efm) und liegen um mehr als zwei Euro über dem KSV (15,0 €/Efm). Das vollmechanisierte Verfahren in der Fallstudie liegt hingegen um 3,3 bzw. 3,5 €/Efm unter den mittleren Kosten der Vergleichsverfahren in der Literatur.

### Fällrichtung und Bestandesschäden

Die Auswertung der Fällrichtungen der motormanuell zugefällten Kiefern zeigt für die Variante mit 20 m Rückegassenabstand, dass eine Abweichung von rund 60° vom natürlichen Hang der Kiefern in vielen Fällen möglich war und damit immer die nächstgelegene Rückegasse mit der Krone erreicht werden konnte. Durch diese freie Wahl der Fällrichtung konnte der verbleibende Unterstand besonders geschont werden, wie der Abgleich mit den Bestandesschäden zeigt. Das Schadprozent liegt zudem nur leicht über oder direkt im Bereich von KHV und KSV, die gemäß Brieger et al. (2018) etwa 6 bis 12 % geschädigter Bäume bei der Langholzernte hinterließen. Allerdings wäre ein geringeres Schadprozent gegenüber KHV und KSV erwartbar gewesen, da in der vorliegenden Fallstudie Kurzholz aufgearbeitet wurde, welches laut Sauter und Nakou (2014) die Pflughöhe des Verfahrens erhöhen müsste. Eine Untersuchung von Sauter und Busmann (1994) weist hingegen auf die Bedeutung der sozialen Stellung der beschädigten Bäume hin, wonach der herrschende Bestand in allen drei untersuchten Ernteverfahren weniger geschädigt wurde, als der Unterstand. Dieser Effekt kann auch durch die Ergebnisse dieser Fallstudie für alle Verfahrensvarianten bestätigt werden. Die allgemein hohen Schadprozente könnten ferner auf die bekanntermaßen (Nill et al. (2011)) erhöhte Schadanfälligkeit der Buche (im Unterstand) und des Kiefern-Spiegelrindenbereiches (herrschender Bestand) zurück zu führen sein.

Durch die weiten Rückegassenabstände in der zweiten Versuchsvariante mit Zufällung zeigt sich jedoch noch deutlicher der Einfluss der Kiefern-Morphologie auf die Schädigung des verbleibenden Bestandes (sowohl Oberstand, als auch Unterstand) trotz des gezielten Fällens der Krone auf eine Rückegasse. Die Länge der zu fallenden Kiefern, von rund 30 m, zwang die Forstwirte dazu möglichst orthogonal zur Rückegasse zu fällen,

um dadurch die übernächste Rückegasse mit der Baumkrone zu erreichen. Teilweise versuchten die Forstwirte sogar, die Bäume entgegen ihres natürlichen Hanges zu fällen, was nur mit zusätzlichen mechanischen Fällhilfen möglich war und zu gefährlichen Situationen führte. Sowohl diese Fällungen entgegen der Baumneigung, als auch der ansonsten bestehende Zwang zum orthogonalen Fällen, führte teilweise zu einem höheren Schadprozent am verbliebenen Bestand.

Bei der vollmechanisierten Holzerntevariante wirkte sich das hohe Arbeitstempo des Harvesters offensichtlich negativ auf die Pfléglichkeit des Verfahrens gegenüber dem verbleibenden Bestand aus. Zwar versuchte der Harvesterfahrer mit geschickten, mehrfachen Schnitfführungen bei der Fällung die Krone auf seine eigene oder die nächstgelegene Rückegasse zu fällen, jedoch mit begrenztem Erfolg. Dies wird insbesondere im Vergleich zur Untersuchung von Sauter und Busmann (1994) deutlich, die für die vollmechanisierte Holzernte Schadprozent in 20-45-jährigen Fichtenbeständen von 7,3 % (3,7 % im Herrschenden und 13,8 % im Unterstand) feststellten, die in der vorliegenden Studie mit einem Schadprozent von 27 % deutlich überschritten wurden. Neben dem hohen Arbeitstempo des Harvesters könnte auch seine Positionierung auf der Rückegasse gegenüber den Forstwirten direkt am zu fällenden Baum einen Einfluss auf die Bestandespfléglichkeit gehabt haben, da die Forstwirte sowohl den Kronenschwerpunkt und damit die Fällrichtung, als auch die Situation im Fällbereich und die Entfernung zur Rückegasse aus ihrer Perspektive besser einschätzen können.

### Schlussfolgerung

Der Vergleich des vollmechanisierten Holzernteverfahrens dieser Fallstudie mit der Literatur hat gezeigt, dass durchaus hohe Leistungen selbst im Starkholz möglich sind und damit auch geringe Holzerntekosten realisiert werden können. Ein Blick auf die Schadprozent dieses Verfahrens zeigt jedoch gleichzeitig, dass dies potenziell zu Lasten des verbleibenden Bestandes erfolgt. Daher sollte die Arbeitsgeschwindigkeit des Harvesters unter diesen Bestandesbedingungen eher reduziert werden oder ein kombiniertes Verfahren, selbst bei 20 m Rückegassenabstand in Erwägung gezogen werden sollte, wenn der nachfolgende Bestand in besonderer Weise zu schonen ist. Bei den kombinierten Verfahren erscheint ein Rückegassenabstand von 40 m aufgrund der natürlichen Baumneigung als wenig geeignet für die Ernte im Starkholz der Kiefer. Dieser provoziert höhere Schadprozent am verbleibenden Bestand oder Situationen die aus Sicht der Arbeitssicherheit kritisch zu bewerten sind. Vorteilhafter hat sich das kombinierte Verfahren mit Zufällung durch Forstwirte, selbst bei 20 m Rückegassenabstand erwiesen. Trotz der hierbei mäßigen Leistung der Forstwirte und des Harvesters könnten die hohen Verfahrenskosten durch geringere Schadprozent in der vorangebauten Bestandesschicht gerechtfertigt werden. Zudem könnten Forstwirte und die Maschinenführer das Führen der Sortenschnitte zur verbesserten Manipulierbarkeit der Stammabschnitte mit einiger Übung optimieren und somit ihre Leistung steigern. Sollte es zudem möglich sein das geerntete Starkholz zu höheren Preisen am Markt abzusetzen, wären die Mehraufwendungen für das pfléglichere Arbeiten dieser Verfahrensvariante aufgewogen.

## **Arbeitspaket 5.1: Identifizierung und Entwicklung von Produkten (Stolze und Militz)**

### **1.5.1 Zielsetzung des Teilvorhabens**

Im Rahmen dieses Teilprojektes sollen mögliche Produkte aus Kiefernstarkholz (KSH) identifiziert bzw. entwickelt werden. Dieses Teilvorhaben ist in die Arbeitsschwerpunkte Massivholz und Furnierwerkstoffe aufgeteilt. Im Arbeitspaket Massivholz wird die Materialqualität des KSH bestimmt und Informationen zur Verarbeitungsmöglichkeit in den aktuell wirtschaftenden Kiefern Sägewerken gesammelt. Hauptaugenmerk liegt auf der Identifizierung von Produkten aus KSH, neuen Absatzmärkten und Eigenschaftsuntersuchungen. Hierbei stehen Produkte im Fokus, die durch die großen Durchmesser und teils intensive waldbauliche Behandlung der Kiefer möglich werden. Geprüft wird hierfür unter anderem, ob sich die starken Kiefern in reine Splintholz- und Kernholzsortimente für verschiedene Produkte und Anwendungen (wie Fenster, Türen, Fassaden, Dielen, Holzbauprodukte, modifizierte Holzprodukte) einteilen lassen. Darüber hinaus wird die Eignung von verschiedenen Holzmodifizierungssystemen für die Kiefer erprobt. Dieses Arbeitspaket wird in enger Zusammenarbeit mit der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), der Abteilung Forstökonomie der Universität Göttingen und mit Unterstützung des Deutsche Säge- und Holzindustrie Bundesverbands e.V. (DeSH) durchgeführt. Das Arbeitspaket Furnierwerkstoffe sieht Eigenschaftsuntersuchungen an modifizierten und verklebten Furnieren vor, um ein Eigenschaftsprofil für die späteren Anwendungen der auf KSH basierenden Furnierwerkstoffe zu erstellen. Zusätzlich werden in diesem Rahmen industrielle Produktionsverfahren getestet. Die Furnierwerkstoffe werden in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) hergestellt und geprüft.

### **1.5.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete**

#### *Arbeitspaket Massivholz*

##### *Festlegung von produktabhängigen Einschnittsmustern*

Verschiedene produktabhängige Einschnittsmuster, die eine möglichst hohe Ausbeute der Zielprodukte ermöglichen, wurden erprobt. Kiefernstarkholz (KSH) vom Standort Görde (Forstamt Görde, Niedersächsische Landesforsten, NLF) und Braunschweig (Stiftung Braunschweiger Kulturbesitz) wurde zu diesem Zweck beschafft. Die Görde Kiefer wurde vom Sägewerk Harling (Celle) 2022 mittels Gatter und Kreissäge eingesägt. Es wurde festgestellt, dass die verwendete Kreissägentechnologie bei gekrümmten und spannungsreichen Kiefernstämmen ihr Leistungsmaximum erreichte. Das Sägewerk Harling hat Ende 2023 zusätzlich eine moderne SAB-Sägelinie in Betrieb genommen, die stärkere Kiefer verarbeiten kann. Ein automatisierter Starkholzeinschnitt ist ebenfalls auf einer SAB-Sägelinie im Sägewerk Vehmeyer (Haselünne) möglich. Die Braunschweiger Kiefer wurde mit der mobilen Bandsäge der Universität Göttingen eingesägt. Die Dimensionen des Schnittholzes orientierten sich an Standardprodukten (modifizierte Terrassendielen und Fassadenbrettern) der Unternehmen Accys (Arnhem, Niederlande) und Kebony (Skien, Norwegen) und wurden gemeinsam mit den Unternehmen festgelegt. Im weiteren Projektverlauf wurde schwerpunktmäßig geprüft, ob sich Kern- und Splintsortimente für verschiedenartige Produkte mittels industrieller Einschnittstechnologie separieren lassen. Hierfür fanden umfangreiche Testeinschnitte im Sägewerk Hegener-Hachmann (Schmallenberg) mittels 2018 installierter EWD-Blockbandsäge statt. Das Sägewerk hatte vor Projektbeginn keinerlei Erfahrung mit der Verarbeitung von Kiefer. Das KSH stammte aus verschiedenen niedersächsischen und nordrhein-westfälischen Beständen. Die Einschnitte erfolgten nach den Vorgaben des Dachflächenfensterherstellers Velux (Hørsholm, Dänemark). Velux wurde im Projekt kontaktiert und äußerte für seine Fenster ein bevorzugtes Interesse am Kiefern Splintholz (gegenseitige Besuche zwischen Sägewerk und Velux wurden im Projekt durchgeführt, um die jeweiligen Prozesse kennenzulernen). Als weitere Produkte der Testeinschnitte wurden niederländische Fenster und Türen, Holz für Restaurationsarbeiten und Paletten identifiziert, die auf Kernholz basieren sollten. Die erzielten Ausbeuten sind bekannt. Die Einschnittstechnologie des Sägewerks Hegener-Hachmann ermöglichte ein hohes Maß an Flexibilität zur optimalen Wertschöpfung des Rohstoffs. Der getrennte Einschnitt von Kern- und Splintholz ist bisweilen keine gängige Praxis und muss vom Bediener der Sägelinie erst trainiert werden. Die Nutzung des gesamten Stamms, also die Akquise von Abnehmern für Haupt- und Koppelprodukte, erwies sich als sehr relevant für die Wirtschaftlichkeit des Kern-/Splint-Einschnitts. In weiteren Gesprächen zum Thema Einschnitt wurde wiederholt auf die Verwendung von Scannertechnologie verwiesen, mit der interne Holzmerkmale von Stämmen erkannt und bewertet werden können. Diese Technologie kann helfen den Sägeeinschnitt zu optimieren und ist mit hohen Anschaffungskosten verbunden. Als Ergebnis der weitergehenden Recherche wurde, festgestellt, dass die Technologie auch genutzt werden kann, um Grenzen von Kern- und Splintholz besser zu erkennen und den Astaufbau der Kiefer (Grobäste und Astquirle), der sich von anderen Nadelhölzern unterscheidet, einzubeziehen (Charpentier et al. 2013). An der Weiterentwicklung solcher CT-basierten Systeme zur Grenzerkennung und Holzsortierung wird laut Mitarbeitern von MICROTEC (Brixen, Italien) fortlaufend gearbeitet (u.a. in Hallin und Samnegard (2023) „Heart- and Sapwood Segmentation on Hyperspectral Images using Deep Learning“). Im Projekt wurden mit Hilfe des Deutsche Säge- und Holzindustrie Bundesverbands e.V. (DeSH) weitere Sägewerke identifiziert, die KSH verarbeiten können. Die Sägewerke sollten in der Lage sein, Kiefernstämmen über 60 cm Durchmesser einzusägen. Die identifizierten Sägewerke (v.a. kleine und mittlere Unternehmen aus dem gesamten Projektgebiet) wurden zur Verarbeitung von KSH mittels

Fragebogen befragt und zusätzlich die Sägewerke HIT/Mercer (Torgau), Holtmeyer (Ottersberg-Narthauen), Hofmann (Cadolzburg) und Max Wagner (Bad Essen) besichtigt und interviewt. Weitere beantwortete Fragebögen liegen von den Unternehmen KiefernBohm (Boitzenburger Land), Heidrich (Deutschneudorf) und Robeta (Milmersdorf) vor. Von den potenziellen KSH-Sägewerken ist ausschließlich das Großsägewerk HIT/Mercer mit CT.LOG-Scanner ausgestattet. Die Kernkompetenz dieses Sägewerks liegt in der Palettenfertigung. Die höchsten Preise bei der Verarbeitung von KSH werden aktuell mit dem Sortiment „astreine Seitenware“ erzielt. Allgemein bestätigen die befragten Sägewerke, dass sich mit KSH höherwertige Produkte herstellen lassen, die mit der meist geringeren Einschnittleistung wirtschaftlich in Einklang zu bringen sind. Die Ausbeuten scheinen sehr von der verwendeten Einschnitttechnologie der Sägewerke abzuhängen. Die Sägewerke Hegener-Hachmann, Harling, Holtmeyer und HIT/Mercer wurden gemeinsam den potenziellen Schnittholzabnehmern Velux und Kebony besucht. Bei Hegener-Hachmann waren zusätzlich Vertreter anwesend, die sich mit dem niederländischen Holzmarkt (insb. Fenster und Türen) gut auskennen. Bei den Testeinschnitten für Velux war eine wichtige Erkenntnis, dass das Sägewerk für eine Ausbeuteoptimierung eher kürzere Stammabschnitte bevorzugt, Velux hingegen in seiner Produktionslinie besser längeres Schnittholz im Rahmen der produktionstechnisch möglichen Abmessungen optimieren kann. Als weitere Sägewerke mit potenzieller Starkholztechnologie wurden HMS Holz (Hagenow), Bulthaup (Melle), Pfeifer (Lauterbach und Uelzen), Krippeit (Elsdorf-Westermühlen) und Hagenah (Bülkau) identifiziert sowie der Holzhändler Gieselmann (Beelen) im Projekt eingebunden.

### Schnittholzsortierung

Zunächst wurde gemeinsam mit der NW-FVA und der Abteilung Forstökonomie der Universität Göttingen ein Überblick zum stehenden und vermarkteten Rohholz (Qualität und Aufkommen) erarbeitet und Gespräche mit Forstbetrieben verschiedener Eigentumsarten geführt. Daraus resultierte, dass das anhand der Waldinventuren erkennbare hohe Potential an KSH augenscheinlich im Missverhältnis zum sehr begrenzten Absatz an KSH steht.

Kiefernbestände in den Stiftungswäldern des Braunschweiger Kulturbesitzes (02.02.2022, Revierförster Burkhard Röker), in den Forstämtern Fuhrberg (u.a. mit Forstamtsleiter Hans-Martin Roese) und Gührde (Interview mit Forstamtsleiter Uwe Barge) der Niedersächsischen Landesforsten (NLF, 17.-19.01.2023) sowie der Dübener-Heide im Betreuungsforstamt Dessau (26.09.2023, u.a. mit Forstamtsleiter Michael Weninger) wurden besichtigt. Die Bestände der NLF und der Holzlagerplatz der Submission in Oerrel wurde gemeinsam mit Mitarbeiter\*innen von Velux und u.a. Lena Maack, die zuständig für den Holzverkauf in den Kiefernregionen der NLF ist, besichtigt. Das Exkursionsprogramm wurde gemeinsam mit den NLF erarbeitet. Ebenfalls wurde Henry Haase, der Vorgänger von Frau Maack, zum KSH interviewt. Forstamtsleiter Roese wies darauf hin, dass im Forstamt Fuhrberg etwa 2400 ha der 7000 ha Kiefernfläche auf 4 - 6,5 m geastet wurden. Auch der Forstamtleiter Barge berichtete, dass im Forstamt Gührde ein hoher Anteil der Kiefernbestände geastet wurde. Laut Henry Haase sind seit den 1960er Jahren in zahlreichen Kiefernbeständen der NLF (ca. ab Alter 25 bis 35 Jahren) die Zukunftsbäume (200 bis 400, in seltenen Fällen 600 Bäume je Hektar) in der Regel auf 6 m geastet worden. Diese Bestände wachsen aktuell zunehmend in die Zielstärke und damit in die Nutzungsphase dieser Zukunftsbäume ein. Seit ca. 20 Jahren ist diese Astungsaktivität stark zurückgenommen und auf die qualitativ besten Bestände konzentriert worden. Die Recherchen haben ergeben, dass in den ostdeutschen Bundesländern häufig keine Dokumentation zur Astung vorliegt, so dass dort der Anteil geasteter Kiefern wesentlich schlechter geschätzt werden kann. Weiteres Ergebnis der Recherchen war, dass geastetes Kiefernholz nach bisherigen Erkenntnissen nur sehr selten explizit als geastetes Sortiment, beispielsweise auf Submissionen, vermarktet wird. Im Forstamt Gührde wurde im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit das potenzielle und reale Stark- und Wertholzaufkommen bei der Kiefer anhand einer Daten- und Hiebsanalyse untersucht. Die Arbeit wurde von der Abteilung Forstökonomie betreut.

In den Jahren 2022 und 2023 wurden bei der Nadelholzsubmission im niedersächsischen Oerrel die Stirnholzflächen am Stammfuß von 803 Kiefernstämmen und von 53 Kiefernstämmen zusätzlich am Stammzopf digitalisiert (Abbildung 1). Die im Rahmen einer Bachelorarbeit („Untersuchungen des Splint- und Kernholzanteils an KSH-Stämmen der Submission Oerrel der Jahre 2022 und 2023“) untersuchten Kiefernstämmen stammten von 25 Herkunftsorten in Nordostdeutschland und wiesen einen durchschnittlichen Mittendurchmesser von 55 cm auf. Es wurden u.a. die prozentualen Anteile von Kern- und Splintholz und die Exzentrizität der Stämme am Digitalmikroskop bestimmt. Diese Kennwerte waren insbesondere für die Realisierbarkeit des Einschnitts „sortenreiner“ Kern- und Splintsortimente aus KSH von Interesse. Am Stammfuß war der durchschnittliche Kernholzanteil der Submissionsstämme 31 % im Jahr 2022 und 34 % im Jahr 2023. Zwei Drittel der Kiefern hatten einen Kernholzanteil von 20 bis 40 %. Für die untersuchten Stämme wurde kein Zusammenhang zwischen Mittendurchmesser und Kernanteil festgestellt.

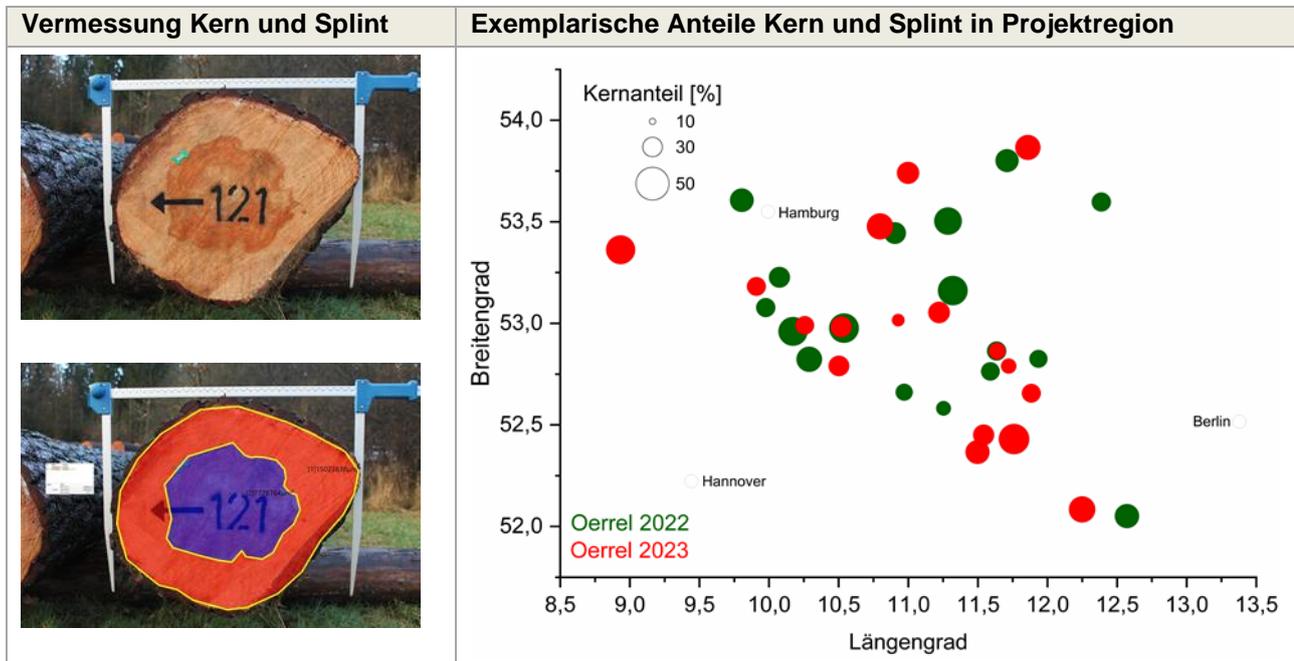


Abbildung 1: Digitalmikroskopische Vermessung der Kern- und Splintanteile an den Stirnflächen von 803 Kiefernstämmen der Submission Oerrel (li.) und prozentuale Kernanteile dieser Kiefernstämme aufgetragen nach ihren Herkünften (re.).

Für Kiefernstämme, deren prozentuale Kern- und Splintanteile an Stammfuß und -zopf bestimmt wurden, wurde festgestellt, dass der Kernholzanteil in Richtung Stammzopf zunimmt. Außerdem wurde im Rahmen einer im Projekt durchgeführten Masterarbeit („Sortierung von Kiefernstarkholz. Qualitätseigenschaften des Schnittholzes und die Möglichkeit der Herstellung von Reinsortimenten“) die Veränderung der Kern- und Splintholzanteile über die Stammlängsachse an einem geringen Probenumfang in engeren Messabständen untersucht. Die Kern- und Splintanteile wurden an 5 m langen und unbesäumten Brettern des gesamten Stammquerschnitts in Abständen von 1,25 m bestimmt. Die Abholzigkeit der Kiefernstämme wirkte sich stärker auf den Splintanteil als auf den Kernanteil aus. Die Abmessungen des Kerns blieben über die Stammlängsachse annähernd gleich, wohingegen die Splintabmessungen mit Reduzierung des Stammdurchmessers in Richtung Stammzopf abnahmen. Dieses Ergebnis ist deckungsgleich mit dem Ergebnis der zuvor vorgestellten Bachelorarbeit. „Sortenreine“ Splintsortimente sind folglich eher mit unteren starken Stammabschnitten realisierbar. Weiterführende Untersuchungen zur Verkernung der Kiefer wurden gemeinsam mit den Bearbeitern des Projekts Adapt-Wald-Holz (FKZ: 033L301A) angedacht. Bei diesem Austausch wurde seitens der HNE Eberswalde angeboten, die Frage der kundenorientierten Sortierung in Abhängigkeit vom Verkernungsgrad im Ständigen Ausschuss RVR einzubringen, um abnehmerseitig einen ersten Überblick dazu zu bekommen. Des Weiteren wurde in der Masterarbeit eine Schnittholzsortierung nach der Tragfähigkeit angelehnt an die DIN 4074 (2012) am KSH aus Góhrde und Braunschweig durchgeführt. Ein Ergebnis der Sortierung war, dass die Merkmale Astigkeit und Risse den größten Einfluss auf die Sortierklasse/Tragfähigkeit zeigten. Die Qualität der Kiefernstämme hat Richtung Stammzentrum (Kernholz tendenziell geringerwertig als Splintholz) und –zopf (Stammzopf tendenziell geringerwertig als Stammfuß) abgenommen. Dies war insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Astgröße und -anzahl sowie Risse von der Stammantelfläche zum Stammzentrum hin, zugenommen haben. Ebenfalls hat die Zunahme der Astigkeit vom Stammfuß in Richtung Stammzopf zu einer Abstufung der Sortierklasse/Tragfähigkeit entlang der Stammlängsachse geführt. Die quirlartig angeordneten Äste der Kiefer (häufig große Astdurchmesser, sog. Grob- und Starkäste) sind problematisch, um für den Baubereich unter aktuell geltenden normativen Sortieranforderungen ausreichende Tragfähigkeiten zu erreichen. Eine hierauf abgestimmte Sortierung und Weiterverarbeitung ist notwendig, um vermehrt Bauprodukte aus Kieferstarkholz herstellen zu können. Bei der Sägewerksbefragung ist zudem ersichtlich geworden, dass größere Sägewerke v.a. mittlere B/C Qualitäten einkaufen. Die Optimierung der Qualität und Ausbeute erfolgt dort durch Scanner- bzw. moderne Einschnitttechnologie. Außerdem wird in diesen Sägewerken häufig Schnittholz für Produkte wie Verpackungshölzer, Palette, vereinzelt Konstruktionsvollholz produziert, in denen bestimmte Holzmerkmale eher toleriert werden. Kleinere Sägewerke kaufen eher eine bessere Rohholzqualität (bevorzugt „Erdstämme“) für Produkte mit hoher Wertschöpfung ein, beispielsweise für Möbel, Fenster oder Fußböden. Für sehr starke Stämme mit geringer Holzqualität wurde der Export als optionaler Vertriebsweg identifiziert. Die Mengen an exportiertem KSH konnten nicht im Projekt ausgewertet werden.

## Identifizierung von Produkten

In diesem Arbeitspaket wurde eng mit der NW-FVA und den Niedersächsischen Landesforsten (NLF) zusammengearbeitet, um eingangs möglichst viel zu den Mengen, Qualitäten, Stärkeklassen, bisherigen Vermarktungswegen etc. des KSH zu erfahren. Die Zusammenarbeit hat ergeben, dass in der Projektregion zum Zeitpunkt der Bundeswaldinventur<sup>3</sup> (BWI, 2012) etwa 24 Mio. m<sup>3</sup> KSH mit einem Brusthöhendurchmesser >50 cm standen. Ein weiterer Anstieg dieser Vorräte wurde bereits durch die BWI<sup>4</sup> (2022), die am Projektende veröffentlicht wurde, aufgezeigt. Der überwiegende Teil der Kiefernbestände (nordostdeutscher Raum) ist nach PEFC zertifiziert und FSC spielt in der Projektregion eine geringe Rolle (FSC vermehrt im südwestdeutschen Raum). Ein Teil des KSH wird exportiert, wie groß der Anteil ist, konnte bisher nicht geklärt werden. China und Indien bzw. weitere asiatische Länder sind genannte Abnehmerländer des Exportholzes. Das Exportholz zeichnet aus, dass es meist geringere Qualität hat und es keine Dimensionsbegrenzung gibt. Es ist bekannt, dass sich die Eigenschaften von Kern- und Splintholz der Kiefer unterscheiden. Das Splintholz ist im Vergleich zum Kernholz häufig feinastiger, weniger harzig, weniger dauerhaft, besser tränkbar, hat eine höhere Holzfeuchte und verblaut im Gegensatz zum Kernholz durch Bläuepilze. Durch diese Eigenschaftsunterschiede ist eine Trennung von Kern- und Splint für verschiedene Produktanforderungen naheliegend, wurde aber bisweilen nur äußerst selten praktiziert. Im Projekt wurde herausgefunden, dass die großen Stammdurchmesser des KSH diese Trennung gegenüber geringeren Stärkeklassen grundsätzlich möglich machen, auch wenn laut befragten Sägewerken eine sortenreine Trennung teils schwer umsetzbar, wirtschaftlich zu diskutieren und für manche Produkte gar nicht notwendig ist. Die im Projekt geführten Gespräche haben ergeben, dass nachweislich geastete Kiefernstämmen bisher nur selten als solche vermarktet werden. Eine höhere Wertschöpfung der geasteten Stämme könnte gegebenenfalls durch eine gezielte, aber auch zeitaufwändigere Sortierung erreicht werden. Zeitaufwändiger, da nur die besten Einzelstämme (bis zu 600 je Hektar in den NLF) und nicht ganze Bestände geastet wurden. Einzelne Sägewerke haben von teils sehr guten Kiefernqualitäten berichtet, die in den Standardsortimenten für minderwertige Produkte mitlaufen. Sägewerke, die Starkholz verarbeiten können wurden identifiziert. Gemeinsam mit den identifizierten Sägewerken wurde geprüft, ob Schnittholzprodukte aus KSH gemäß den Anforderungen potenzieller Abnehmer hergestellt werden können. Laut Henry Haase (NLF) und weiterer Recherchen könnten zusätzliche neue Verwendungsmöglichkeiten des KSH oder die Substituierung anderer Holzarten aufgrund von Verknappung und Nachhaltigkeitsgründen (z.B. Radiata-Kiefer, Teak, Sibirische Lärche oder Fichte) oder Werkstoffe (z.B. Kunststofffenster, konventionelle, fossilbasierte Baustoffe) zusätzliche Absatzmöglichkeiten schaffen. Bei den Bauholzqualitäten wird eine höhere Nachfrage auch nach stärkerem Kiefernholz mit der schwindenden Verfügbarkeit von Fichtenbauholz erwartet. Eike Gehrts, Experte des Verbands Fenster + Fassade für Holz und Holzprodukte in Deutschland, wies darauf hin, dass großes Interesse an KSH-Sortimenten u.a. für den Fensterbau besteht und, dass die Herstellung von Kiefernholz-Fensterkanteln bereits gängige Praxis ist. Er wies darauf hin, dass gemäß Merkblatt HO.06-1 („Holzarten für den Fensterbau – Teil 1: Eigenschaften, Holzartentabelle - Holzarten zur Herstellung maßhaltiger Bauteile“) bei Rohprofilen für die Herstellung von Fenstern (Vollholz oder lamelliert) insgesamt mindestens 50 % des Profilquerschnitts aus Kernholz ausreichender Dauerhaftigkeit (mindestens Dauerhaftigkeitsklasse 3-4) bestehen sollte, insbesondere im Außenbereich des Fensters (mindestens 95 % Kernholz). Im Projekt wurden folgende potenzielle Abnehmer für Schnittholz aus KSH identifiziert und ihre Anforderungen wurden im gemeinsamen Austausch erarbeitet (Tabelle 1). Für Produkte wie Ramppfähle im Hafen- und Wasserbau sowie für Gründungen eignet sich KSH und bessere Qualitäten beispielsweise für hochwertige Säрге, die häufig in Italien gefertigt werden. Da im Projekt keine konkreten Abnehmer für diese Produkte kontaktiert wurden, werden sie nicht weiter erwähnt.

Tabelle 1: Im Projekt identifizierte Abnehmer und Materialanforderungen.

Abnehmer	Beteiligt	Produkte	Sortimente	Anforderungen und Art der Beteiligung
Velux (Dänemark)	Ja	Dachfenster	Splintholz, stellenweise Kernholz	Anforderungskatalog für diverse Produkte liegt vor, bspw. Astabstand für Fixlängen bzw. Keilzinkenware wichtig, keine Bläue, nur FSC oder FSC controlled wood. Kiefer bisher überwiegend aus Polen und Skandinavien, Projektkiefer wurde getestet.
Timmer Selekt Groep (Niederlande)	Ja	Fenster und Türen	Kernholz	Liste an Schnittholzdimensionen für Massivholz-, keilgezinkte und lamellierte Kanteln liegt vor.
Weekmap Deuren (Niederlande)	Ja	Türen	Kernholz	Anforderungskatalog für Tropenhölzer und dauerhafte Nadelhölzer liegt vor, Ersatz bisher verwendeter Tropenhölzer in Türinnenrahmen. Projektkiefer wurde angefragt.
Holz Schiller (Deutschland)	Nein	Fenster	Hoher Kernholzanteil	Ersatzprodukt für sib. Lärche oder Meranti, geringe Wasseraufnahme und höhere Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität der Kernholz-Fensterkanteln „Dura-Kiefer“.

Abnehmer	Beteiligt	Produkte	Sortimente	Anforderungen und Art der Beteiligung
Stora Enso (Schweden)	Nein	Fenster, Rahmen, Pfosten, Sockelleisten, Türen, Pfosten und Schwellen	Hoher Kernholzanteil	Produkt „Woodheart“ aus schwächerer skandin. Kiefer mit hohem Kernholzanteil, meist keilgezinkt, geringe Wasseraufnahme, höhere Dauerhaftigkeit, Dimensionsstabilität werden hervorgehoben.
Accys (Niederlande)	Ja	Modifizierte Fassade, Terrassendielen und Fenster	Splintholz, möglichst geringer Anteil Kernholz	Spezifikationen für Produkte liegen vor, auch mittlere Holzqualität akzeptiert, als Alternative zur bisher verwendeten Radiata-Kiefer, harzige Kiefer unerwünscht, nur FSC oder FSC controlled wood. Projektkiefer wurde getestet.
Kebony (Norwegen)	Ja	Modifizierte Fassade und Terrassendielen	Splintholz, möglichst geringer Anteil Kernholz	Spezifikationen für Radiata-Holz liegt vor, bevorzugt bessere Holzqualität als Alternative zur bisher verwendeten Radiata-Kiefer und skandin. Kiefer, harzige Kiefer unerwünscht, nur FSC oder FSC controlled wood. Projektkiefer wurde getestet.
Steico (Polen)	Ja	Furnierschichtholz LVL	Bevorzugt Splint, ungerne harziges Kernholz	LVL-Produkt ermöglicht es ggfs. auch Kiefernstarkholz mittlerer bis geringerer Qualität zu verwenden, Durchmesser bis 70 cm können geschält werden, gebündelte Mengen als Ergänzung zu polnischer Kiefer. Projektkiefer wurde getestet.
Dinesen und Kai Riisberg (Dänemark)	Nein	Holzfußböden	Splint- und Kernholz	Bevorzugt bessere Kiefernqualitäten, meist von Submissionen, insbesondere für Schlossemielen starke Dimensionen.
Blumenstein (Deutschland)	Nein	Holzleisten	Splintholz	Bevorzugt bessere Kiefernqualitäten, möglichst astfrei und wenig harzig.

Die Verwendung von KSH in Fensterranteln zeichnete sich im Projektverlauf als wichtiger Absatzmarkt ab. Velux hat besonderes Interesse am KiefernSplintholz gezeigt und niederländische Fenster- und Türhersteller am Kernholz. Folglich wurde eine Bachelorarbeit durchgeführt, die sich mit der „Untersuchung ausgewählter Eigenschaften von Fensterranteln aus KiefernKern- und -splintholz“ beschäftigt hat. Die ift-Richtlinie „Massive, keilgezinkte und lamellierte Profile für Holzfenster – Anforderungen, Prüfung, Produktzertifizierung“ wurde angewendet, um die mit drei kommerziellen Klebstoffsystemen verklebten Fensterranteln zu prüfen. Die Harzigkeit des Kiefernholzes wurde bei den Untersuchungen mitberücksichtigt und hat zu Eigenschaftsunterschieden der Fensterranteln geführt. Kernholzkanteln mit höherem Harzgehalt zeigten gegenüber Splintholzkanteln eine wesentlich geringere Wasseraufnahme, was insbesondere im Außenbereich von Vorteil ist, wo mit höherer Feuchtigkeit zu rechnen ist. Außerdem zeigten die Kernholzkanteln nach Lagerung in warm, feuchten Bedingungen entgegen den Splintholzkanteln keine Schimmel- und Bläuebildung. Hingegen führte der höhere Harzgehalt der Kernholzkanteln zu einer weniger leistungsfähigen Verklebung, was die Spaltprüfung und Prüfung der Delaminierungsbeständigkeit hervorbrachten. Bei der Bildung von Kooperationen im Projekt zwischen Sägewerken und Abnehmern stand neben den Holzmerkmalen Rissigkeit, Astigkeit und Bläue, häufig die Harzigkeit der Kiefer für die Ausbeute und Qualität der Produkte im Fokus. Für die Einschätzung der Harzigkeit der Kiefer braucht es neuartige Methoden, um die Harzigkeit bestenfalls schon im Wald bestimmen zu können. Auch der Trocknungsprozess kann die Harzigkeit im Schnittholz beeinflussen. Im Projekt wurde ein harscher Trocknungsprozess erprobt, bei dem ein hoher Harzaustritt aus dem Kernholz beobachtet wurde. Um einer Qualitätsabnahme durch Bläue vorzubeugen, braucht es bei warm feuchten Bedingungen eine schnelle Logistik und Verarbeitung, sprich Einschnitt und unmittelbare Trocknung. Verschiedene Schritte der Produktidentifizierung und -entwicklung werden in Abbildung 2 gezeigt. Beginnend mit der Bestimmung der Qualität, Dimension und Kern- und Splintanteilen des Rohholzes, über die Auswahl des Produkttyps (Massivholz oder Furnierwerkstoff), bis hin zur Produktherstellung (z. B. Verklebung, Beschichtung, Modifizierung) und -prüfung.

Kernholzstamm



Splintholzstamm



Massivholzprodukte



Furnierwerkstoffe



Kernholzkantel



Modifizierte Splintholzprodukte



Abbildung 2. Schritte der Produktidentifizierung und -entwicklung vom Rohholz zum Kiefernstarkholz-Produkt.

### Holzmodifizierungssysteme

Fünf verschiedene und teils industriell etablierte chemische Modifizierungsverfahren wurden erprobt. Ausschließlich die modifizierten Kiefern Bretter der Industriepartner Accsys (Arnhem, Niederlande) und Kebony (Skien, Norwegen) wurden in allen Materialprüfungen berücksichtigt. Als Vergleich wurden DMDHEU-, Phenol- und Sorbitol-Zitronensäure- (SorCa) Modifizierungen herangezogen. Die SorCa-Modifizierungen und -Prüfungen wurden im Projekt ZitroWood (Förderkennzeichen: 2221HV004X) durchgeführt. Die modifizierten Kiefern Bretter bestanden fast ausschließlich aus Kiefern Splintholz, wurden in Gebrauchsdimensionen modifiziert (Untersuchungsziel, da reine Splintsortimente am Markt aktuell nicht zur Verfügung stehen) und stammten von verschiedenen Herkünften. Seitens der Industriepartner Accsys und Kebony sowie seitens der Universität Göttingen wurden Berichte zu den verwendeten Modifizierungsverfahren erstellt. Wesentliche Parameter der Modifizierungsverfahren werden in Tabelle 2 gezeigt. Den Berichten zufolge ließ sich das Splintholz gut modifizieren. Die Beladung des Holzes mittels Modifizierungschemikalie, ausgedrückt als weight percent gain (WPG), entsprach den Anforderungen der Modifizierer. Jedoch wiesen die Berichte der Industriepartner deutlich darauf hin, dass sich Brettbereiche mit enthaltenem Kernholz (Bretter mit erhöhtem Kernanteil wurden gesondert zugesendet) und Bereiche mit höherem Harzanteil nicht nach ihren Anforderungen imprägnieren ließen. Diese Bereiche wiesen wesentlich geringere Beladungsgrade auf, so dass gegebenenfalls nicht die gewünschten Effekte der Modifizierungen (insbesondere Erhöhung der Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit) und nicht das gewünschte optische Erscheinungsbild erzielt werden konnten. Im Rahmen der Prüfung der Materialeigenschaften wurden nur die Bretter herangezogen, die als reine Splintholz Bretter ausgewiesen waren. Neben den Prüfungen, die seitens der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte durchgeführt wurden, wurden weitere Prüfungen seitens Accsys und Kebony u.a. zur Imprägnierbarkeit (Lösungsaufnahme, „Ratio of filling“, WPG etc.), zu mechanischen Eigenschaften und natürliche (Freiland-) und künstliche (QUV-) Bewitterungstests durchgeführt. Die Ergebnisse der Industriepartner werden in diesem Bericht nicht weiter vorgestellt.

Tabelle 2. Untersuchte Modifizierungsverfahren und Eigenschaften der modifizierten Kiefern Bretter.

Abkürzung	Modifizierung	Institution	Brettabmessungen [mm]	Konzentration/ WPG (%)
A	Acetylierung; Essigsäureanhydrit	Accsys, Niederlande	32 x 75 x 2500; 32 x 100 x 2500	-/ 23 % Acetylgehalt und 0,24 % Essigsäuregehalt
D	DMDHEU; 1,3-dimethylol-4,5- dihydroxyethyleneurea	Universität Göttingen	30 x 145 x 1400	25/ 32
P	Phenol; niedermol. PF-Harz	Universität Göttingen	30 x 85 x 2000	17/ 20
S	SorCa; Sorbitol-Zitronensäure	Universität Göttingen	35 x 85 x 1700	30/ 20
K	Furfurylierung; Furfurylalkohol	Kebony, Norwegen	32 x 75 x 2500; 32 x 100 x 2500	-/ 58

Die unterschiedliche Farbgebung der Kiefer nach Anwendung der chemischen Modifizierungsverfahren wird in Abbildung 3 gezeigt.

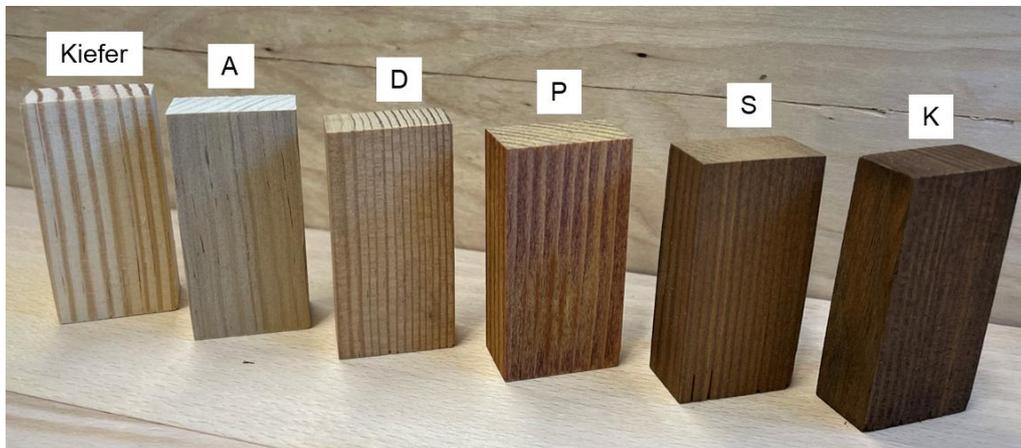


Abbildung 3. Farbgebungen der Kiefern Bretter nach verschiedenen Modifizierungsverfahren, Bezeichnungen in Tabelle 2.

#### Bestimmung der Holzqualität

Bei der chemischen Holzmodifizierung wird das Holz mit reaktiven oftmals biologischen Modifizierungschemikalien im Vakuum-Druck-Prozess und teils unter Verwendung von Katalysatoren imprägniert. Anschließend wird die Modifizierungschemikalie durch Trocknung bei erhöhter Temperatur ausgehärtet und bestenfalls dauerhaft in der Holzzellwand fixiert. Die verwendeten Prozessbedingungen können zur Verminderung der Holzqualität führen. Verformungen und Risse wurden an den modifizierten Brettern bestimmt. Die furfurylierten Bretter (K) wiesen vermehrt Innen- und Hirnrisse auf. Die DMDHEU-modifizierten Bretter (D) zeigten verstärkt Innenrisse und waren häufig verdreht. Dies kann auf zu harsche Aushärtungsbedingungen (hohe Temperaturen/ kurze Trocknungszeiten) hindeuten. Die Verdrehung der DMDHEU behandelten Bretter ist u.a. auf die höheren Brettbreiten und vorwiegend liegende Jahrringe zurückzuführen. Ansonsten zeigten die modifizierten Bretter insgesamt eine hohe Holzqualität.



Abbildung 4. Unvollständig modifiziertes Brett mit Hirnriss.

### Bestimmung der Materialeigenschaften

Ausgewählte Eigenschaften mit hoher Relevanz für die spätere Anwendung der modifizierten Bretter (bspw. als Terrassendiele, Fassadenbrett, Fensterkante) wurden getestet. Da die Bretter in Gebrauchsdimensionen modifiziert wurden, war es wichtig zu prüfen, ob über alle Brettbereiche eine gleichbleibende Modifizierungsqualität erzielt wurde. So wurden für alle Materialprüfungen je Modifizierung mindestens 20 verschiedene Bretter und verschiedene Brettbereiche berücksichtigt. Bei der Dauerhaftigkeitsprüfung und bei der Einordnung der Modifizierungsqualität mittels Anti-Swelling-Efficiency, Auswaschbeanspruchung und Dichteprofilen wurde explizit nach der Lage der Prüfkörper im Brett unterschieden (Abbildung 5).

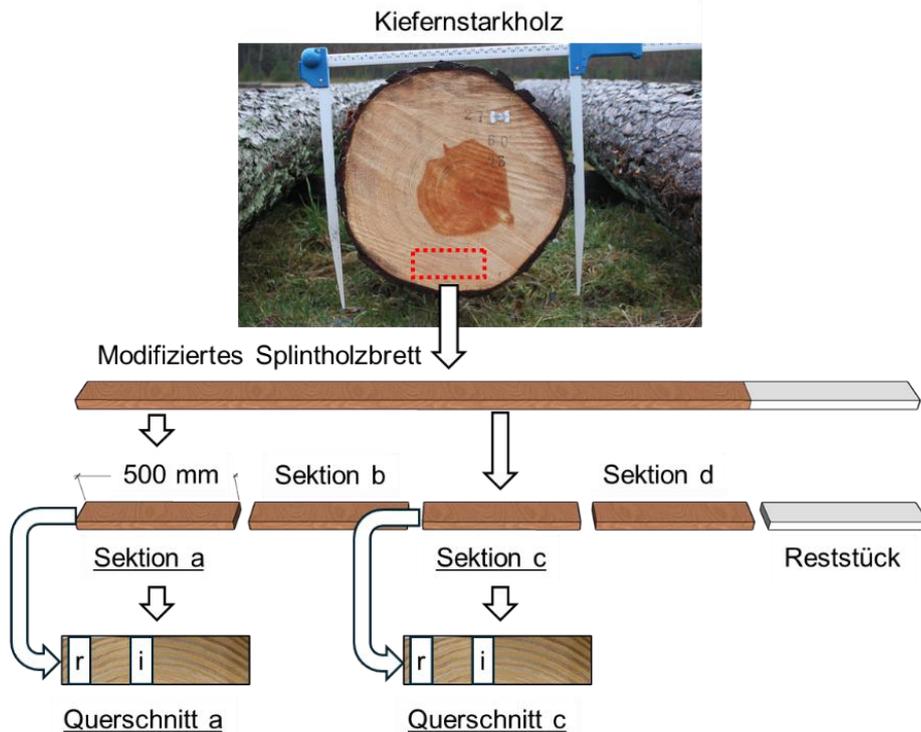


Abbildung 5. Zuordnung von Brettbereichen für verschiedene Eigenschaftsprüfungen; Brettende (Sektion a) vs. Brettmitte (Sektion c) und Brettrand (r) vs. Brettzentrum (i).

Die in Tabelle 3 gezeigten Materialeigenschaften wurden an Prüfkörpern der modifizierten Bretter bestimmt.

Tabelle 3. Untersuchte Eigenschaften der unbehandelten und modifizierten Kiefer und verwendete Methoden.

Prüfungen	Eigenschaften	Modifizierung	Standard	Prüfkörperdim. (mm)
Physikalische Eigenschaften	Rohdichte und Darrdichte	A, K, D, S, P	DIN 52182, EN 84	15 x 25 x 50, 10 x 25 x 25
Feuchteverhalten	Ausgleichsfeuchte	A, K, D, S	EN 13183-1	15 x 25 x 50
Feuchteverhalten	Wasseraufnahme	A, K, D, S	EN 15148	25 x 75 x 75
Dimensionsstabilität	Anti-Swelling-Efficiency (ASE)	A, K, D, S	EN 84	10 x 25 x 25
Mech. Eigenschaften	Biegefestigkeit, Biege-MOE und Biegearbeit	A, K, D, S	DIN 52186	25 x 25 x 450
Mech. Eigenschaften	Brinell-Härte	A, K, D, S	EN 1534	25 x 75 x 75
Mech. Eigenschaften	Schraubenauszugwiderstand	A, K, D, S	EN 320	25 x 75 x 75
Modifizierungsqualität	Auswaschbeanspruchung	A, K, D, S	EN 84	10 x 25 x 25
Modifizierungsqualität	Dichteprofile	A, K, D, S	Densityprofiler, GreCon	30-35 x 50 x 50

Prüfungen	Eigenschaften	Modifizierung	Standard	Prüfkörperdim. (mm)
Modifizierungsqualität	Scans der Chemikalieneindringung	A, K, D, S	Auswertung in ImageJ	30-35 x 75-100 x 50
Dauerhaftigkeit	Dauerhaftigkeit von Holz ggü. Basidiomyceten	A, K, D, S	EN 113-2	15 x 25 x 50
Verklebbarkeit	Keilzinken-Biegefestigkeit	A, K, D, S, P	EN 408	23 x 75 x 450
Verklebbarkeit	Längszugscherfestigkeit, trocken und nass	A, K, D, P	EN 302-1, Behandlung A1 und A2	10 x 20 x 150
Verklebbarkeit	Delaminierungsbeständigkeit	A, K, D, P	EN 14080, Verfahren A	5-lagig, 90 x 75
Beschichtbarkeit	Kontaktwinkel und Grenzflächenspannung	A, K, D, S, P	MSA und DSA, Advance Software, Krüss	Beschichtete Prüfkörperoberflächen
Beschichtbarkeit	Gitterschnittprüfung – Haftfestigkeit	A, K, D, S, P	EN 2409	Beschichtete Prüfkörperoberflächen
Beschichtbarkeit	Abreißversuch - Haftfestigkeit	A, K, D, S, P	EN ISO 4624	Beschichtete Prüfkörperoberflächen
Beschichtbarkeit	Schmissbeständigkeit - Kratzhärte	A, K, D, S, P	Härteprüfstab HPS, mtv messtechnik	Beschichtete Prüfkörperoberflächen

#### Rohdichte, Darrdichte und Ausgleichsfeuchte

In Tabelle 4 werden die Rohdichte, Darrdichte und Ausgleichsfeuchte der modifizierten Prüfkörper gezeigt. Die Rohdichte und Ausgleichsfeuchte wurden nach Einstellen der Gewichtskonstanz im Normklima (20 °C/ 65 % relative Luftfeuchtigkeit) bestimmt. Die Darrdichte wurde bestimmt, nachdem die Prüfkörper einen darrtrockenen Zustand (0 % Holzfeuchtigkeit) nach Trocknung bei 103 °C erreicht hatten. Die Referenz Kiefer ist Kiefersplintholz, das für die Modifizierungen bei Accys und Kebony verwendet wurde.

Tabelle 4. Rohdichte, Darrdichte und Ausgleichsfeuchte der unbehandelten und modifizierten Kiefer.

Modifizierung	Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Darrdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Ausgleichsfeuchte (%)
Kiefer	0,50 (±0,04)	0,48 (±0,04)	11,7 (±0,30)
A	0,52 (±0,03)	0,51 (±0,03)	2,7 (±0,15)
K	0,68 (±0,08)	0,64 (±0,03)	4,2 (±0,46)
D	0,54 (±0,05)	0,54 (±0,06)	10,4 (±0,38)
S	0,59 (±0,03)	0,57 (±0,03)	5,0 (±0,17)
P	0,58 (±0,06)	0,54 (±0,04)	8,3 (±0,22)

Der WPG aus Tabelle 2 spiegelt sich weitestgehend in der Dichteerhöhung und in der reduzierten Ausgleichsfeuchte der modifizierten Hölzer wider. So führte der höchste WPG der furfurylierten Bretter zur höchsten mittleren Dichte. Bei den acetylierten Brettern wurde durch die Modifizierung eine geringfügig höhere Dichte erwartet. Die durchweg reduzierten Ausgleichsfeuchten der modifizierten Kiefer gegenüber der unbehandelten Kiefer deuten auf eine erfolgreiche Modifizierung des Holzes (abhängig von der Modifizierung u.a. Reduzierung freier Hydroxylgruppen, permanente Zellwand-Quellung (Bulking), Vernetzungsreaktionen) hin. Der Effekt wurde v.a. bei den beiden industriell eingesetzten Verfahren (A und K) deutlich, weniger bei der DMDHEU- und Phenol-Modifizierung.

## Wasseraufnahme

Je Modifizierung wurden 12 Prüfkörper angelehnt an die EN 15148 (2018) für 30 Stunden 5 mm tief in Wasser getaucht, so dass die Stirnseiten, an denen vorwiegend die kapillare Wasseraufnahme erfolgt, nur teilweise mit Wasser bedeckt waren. Nach verschiedenen Zeitpunkten wurde die prozentuale Wasseraufnahme bestimmt (Abbildung 6).

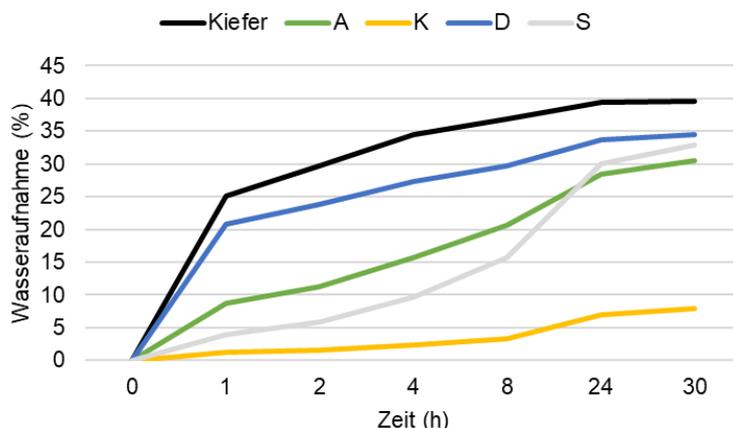


Abbildung 6. Prozentuale Wasseraufnahme teilweise getauchter unbehandelter und modifizierter Kiefer.

Zusätzlich wurde die prozentuale Wasseraufnahme verklebter modifizierter Prüfkörper im Rahmen der Delaminierungsprüfung nach Wasserimprägnierung (Vakuum-Druck-Zyklen) bestimmt. Bei beiden Verfahren (teilweises Eintauchen und Vakuum-Druck-Imprägnierung (VDI)) zeigte sich, dass die Wasseraufnahme der von Kebony furfurylierten Kiefer (ca. 25 % bei VDI) bedingt durch die Hydrophobierung des furfurylierten Materials deutlich geringer war als die der weiteren Modifizierungen (85-95 % bei VDI).

## Anti-Swelling-Efficiency

In der Abbildung 7 ist die Anti-Swelling-Efficiency (ASE) der modifizierten Kiefer dargestellt. Die ASE gibt an, um wie viel Prozent das Quellungsvermögen des modifizierten Holzes im Vergleich zum unbehandelten Holz reduziert wurde. Die Prüfkörper wurden vor dem Versuch einer Auswaschung nach EN 84 (2020) unterzogen. Zu Beginn jedes ASE-Zyklus wurden die Masse und die Dimension der Prüfkörper im darrtrockenen Zustand gemessen. Im Folgenden wurden die Prüfkörper mittels Vakuumimprägnierung, wassergesättigt und die Masse und Dimension im wassergesättigten Zustand gemessen. Im Anschluss an die Wassersättigung folgte eine Rücktrocknung der Prüfkörper. Insgesamt wurden fünf Wassersättigungs- und Rücktrocknungszyklen durchgeführt. Je Modifizierung wurden die Masse- und Dimensionsveränderung von 20 Prüfkörpern bestimmt, wobei 10 der Prüfkörper vom Bretttrand (r, Abbildung 5) und 10 aus dem Brettzentrum (i) stammten.

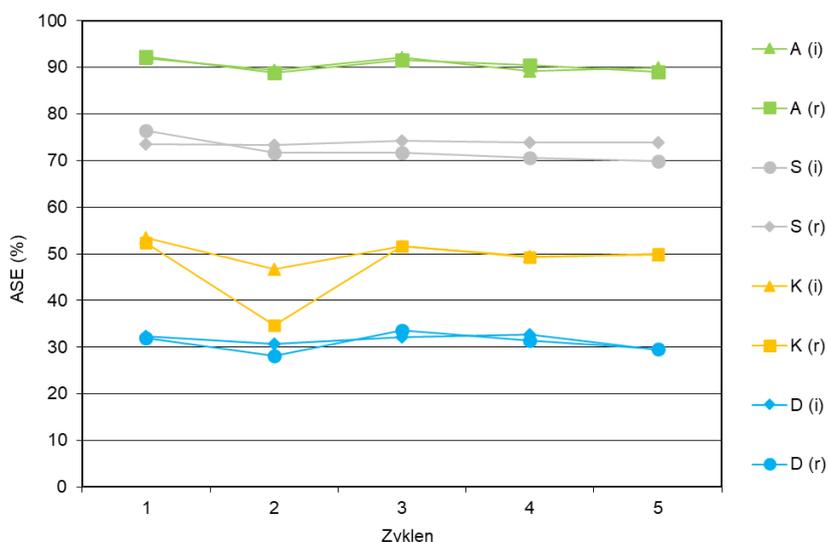


Abbildung 7. Anti-Swelling-Efficiency der modifizierten Kiefer getrennt nach Brettbereichen.

Die Dimensionsstabilität der modifizierten Kiefer wurde wesentlich gegenüber der unbehandelten Kiefer erhöht. Besonders ausgeprägt war die Erhöhung der Dimensionsstabilität bei der acetylierten und SorCa-modifizierten Kiefer. Die ASE hat sich zwischen Brettzentrum (i) und Bretttrand (r) kaum unterschieden, was auf eine vollständige Modifizierung der Bretter hindeutet.

### Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Die Biegefestigkeit ist die maximale Belastung, die ein Material unter Biegebelastung aushalten kann, bevor es bricht. Der Biege-E-Modul (MOE) wird in der Materialprüfung verwendet, um die Steifigkeit eines Materials gegenüber Biegebelastungen zu bewerten. Es ist definiert als das Verhältnis von Biegespannung zur Biegeverformung im elastischen Bereich des Materials.

Die Biegefestigkeit und der Biege-MOE, die im 3-Punkt-Biegeversuch gemäß DIN 52186 (1978) bestimmt wurden, werden in Abbildung 8 gezeigt.

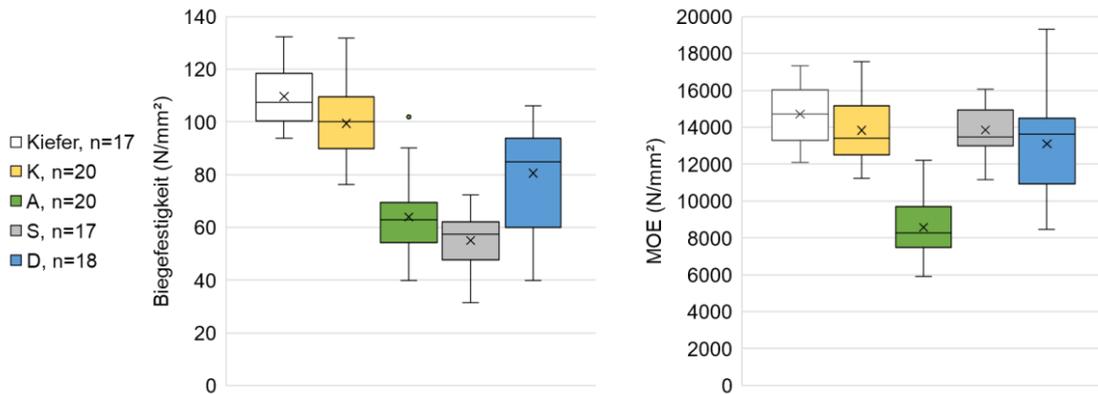


Abbildung 8. Biegefestigkeit und Biege-MOE von unbehandelter und modifizierter Kiefer, n gibt die Prüfkörperanzahl an; die unbehandelte Referenz-Kiefer hatte eine mittlere Rohdichte von 0,61 g/cm<sup>3</sup>.

Zunächst ist anzumerken, dass die unbehandelte Kiefer, die als Referenz herangezogen wurde, eine für Kiefer hohe Rohdichte von 0,61 g/cm<sup>3</sup> hatte und folglich hohe Vergleichswerte erzielte. Die Dichte lag damit teils deutlich oberhalb der modifizierten Varianten (insbesondere über der acetylierten Kiefer mit 0,52 g/cm<sup>3</sup>). Auch unabhängig von der Dichte ist bei der acetylierten, SorCa- und DMDHEU-modifizierten Kiefer eine verringerte Biegefestigkeit und bei der acetylierten Kiefer ebenfalls ein verringerter MOE auf die Modifizierung zurückzuführen. Üblicherweise steigt durch die chemische Holzmodifizierung die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit sinkt, so dass häufig eine gegenüber der Referenz unveränderte Biegefestigkeit (Kombination aus Druck- und Zugfestigkeit) erzielt wird. Mögliche Gründe (bspw. Auswirkungen von Prozessbedingungen) für die teils niedrigeren Biegeeigenschaften der modifizierten Kiefer sind weitergehend zu untersuchen. Trotzdem hat die höhere Dichte der Waldkiefer gegenüber der industriell verwendeten Radiata-Kiefer sich in höheren Biegeeigenschaften widerspiegelt, die durch Prozessanpassungen noch zu steigern sind. Die Biegearbeit (mit geprüft, aber nicht abgebildet) ist ein Maß für die maximal mögliche absorbierte Energie des Holzes bei einer Biegebeanspruchung. Es lassen sich so Aussagen über die Sprödigkeit des Materials treffen. Die Biegearbeit korreliert mit der Schlagzähigkeit (Bruchschlagarbeit). Alle Modifizierungen zeigten im Vergleich zur Referenz eine Versprödung, wobei die Sprödigkeit bei der SorCa-modifizierten Kiefer am stärksten ausgeprägt war.

### Brinell-Härte und Schraubenauszugwiderstand

Der Eindruckwiderstand des Holzes wurde mittels Brinell-Härte-Prüfung gemäß EN 1534 (2020), einem statischen Prüfverfahren, bestimmt. Die Brinell-Härte ist insbesondere für Holzfußböden (z.B. Holzdielen oder Terrassendielen) eine wichtige Eigenschaft. Eine Stahlkugel mit 10 mm Durchmesser wird mit 1000 N für 25 s in das Holz eingedrückt. Die Härte wird anhand des Eindruckes, den die Kugel nach der Entlastung im Holz hinterlässt, bestimmt. Die Prüfkörper wurden so ausgewählt, dass sie vorwiegend eine Jahrringlage von 45 ° aufwiesen.

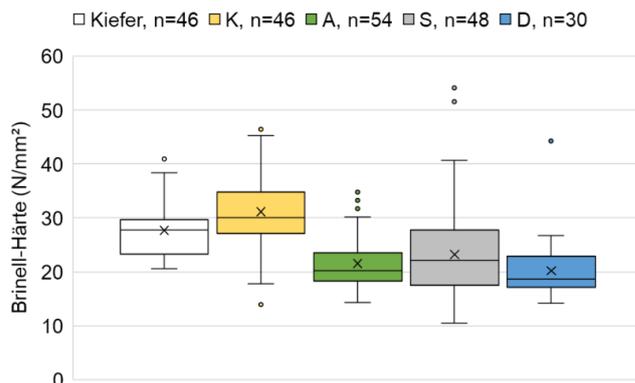


Abbildung 9. Brinell-Härte von unbehandelter und modifizierter Kiefer, n gibt die Prüfkörperanzahl an.

Die furfurylierte Kiefer (höchste Dichte) erzielte im Mittel die höchste Brinell-Härte. Alle weiteren Modifizierungen resultierten in etwas verringerter Brinell-Härte gegenüber der unbehandelten Kiefer.

Die Bestimmung des achsenparallelen Schraubenauszugwiderstands erfolgte gemäß EN 320 (2011), wobei die Kraft gemessen wurde, die erforderlich ist, um eine definierte Schraube aus dem Prüfkörper herauszuziehen. Da sich die Schraubenauszugwiderstände im Bereich der Oberfläche und der Kante der Prüfkörper kaum unterschieden haben, werden sie in Abbildung 10 zusammengefasst dargestellt.

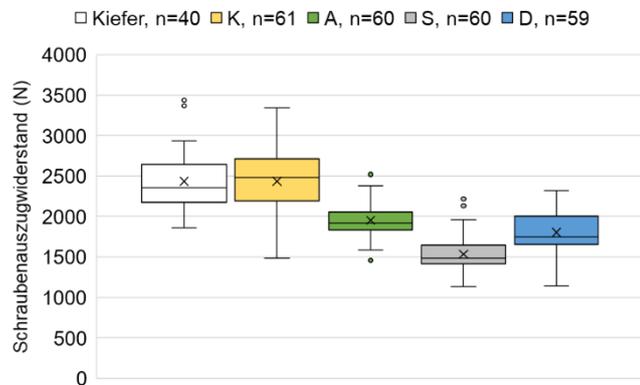


Abbildung 10. Schraubenauszugwiderstand von unbehandelter und modifizierter Kiefer, n gibt die Prüfkörperanzahl an.

Die furfurylierte Kiefer und die unbehandelte Kiefer erzielten einen ähnlich hohen Schraubenauszugwiderstand, wohingegen die weiteren Modifizierungen gegenüber der Referenz einen reduzierten Schraubenauszugwiderstand zeigten.

### Auswaschbeanspruchung

Während seiner Gebrauchsdauer kann mit Schutzmitteln behandeltes Holz Umgebungsbedingungen ausgesetzt sein, die eine Auswaschung und einen Abbau des Holzschutzmittels/ der Modifizierungschemikalie bewirken und dadurch dessen Wirksamkeit verringern können. Die modifizierten Prüfkörper wurden einer beschleunigten Alterung durch eine Auswaschbeanspruchung gemäß EN 84 (2020) ausgesetzt. Die prozentualen Masseverluste wurden bestimmt, um die Fixierung der Modifizierungschemikalien im Holz zu bewerten (Abbildung 11).

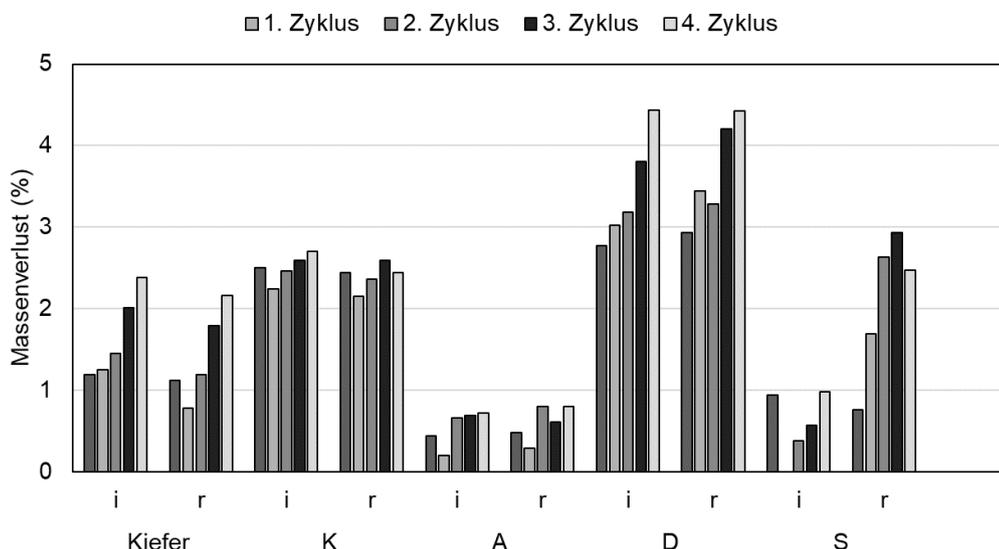


Abbildung 11. Prozentualer Masseverlust von unbehandelter und modifizierter Kiefer durch Auswaschbeanspruchung.

Die geringsten Masseverluste wurden bei der acetylierten Kiefer und bei der SorCa-modifizierten Kiefer im Brettzentrum (i) bestimmt. Dies kann einerseits auf eine gute Fixierung der Modifizierungschemikalien oder andererseits auf eine geringe Beladung des Brettbereichs mit Modifizierungschemikalien hindeuten. Auch die unbehandelte Kiefer hat bei der Auswaschbeanspruchung einen wesentlichen Masseverlust (Holzinhaltstoffe) gezeigt, der teils über den modifizierten Varianten lag. Augenscheinlich war die Modifizierungschemikalie in der DMDHEU-modifizierten Kiefer schlechter fixiert als bei den anderen Modifizierungen, auch weil bei den letzten Zyklen noch eine Erhöhung des Masseverlustes bestimmt wurde.

## Dichteprofile

Dichteprofil-Scans wurden verwendet, um die Verteilung der Chemikalien über den Querschnitt der modifizierten Kiefern Bretter zu untersuchen. Dazu wurden Proben aus der Brettmitte (Abbildung 5, Sektion c) und vom Brettende (Sektion a) mit den Maßen 50 x 32-35 x 50 (ax.) mm<sup>3</sup> geschnitten. Die Messung erfolgte im darrockenen Zustand in einem DAX 6000 Röntgen-Densityprofiler (GreCon GmbH, Alfeld (Leine)). Die Proben wurden so ausgerichtet, dass die Strahlungsrichtung parallel zur Probenlängsachse verlief, so dass das Dichteprofil in radialer Richtung, d.h. über den gesamten Brettquerschnitt, dargestellt wurde. Die Auflösung der Messung (Messintervalle) betrug 0,01 mm bei einer Spannung von 33 kV. Die Graphen bilden die Mittelwerte von mindestens 21 Brettern je Modifizierung ab (Abbildung 12).

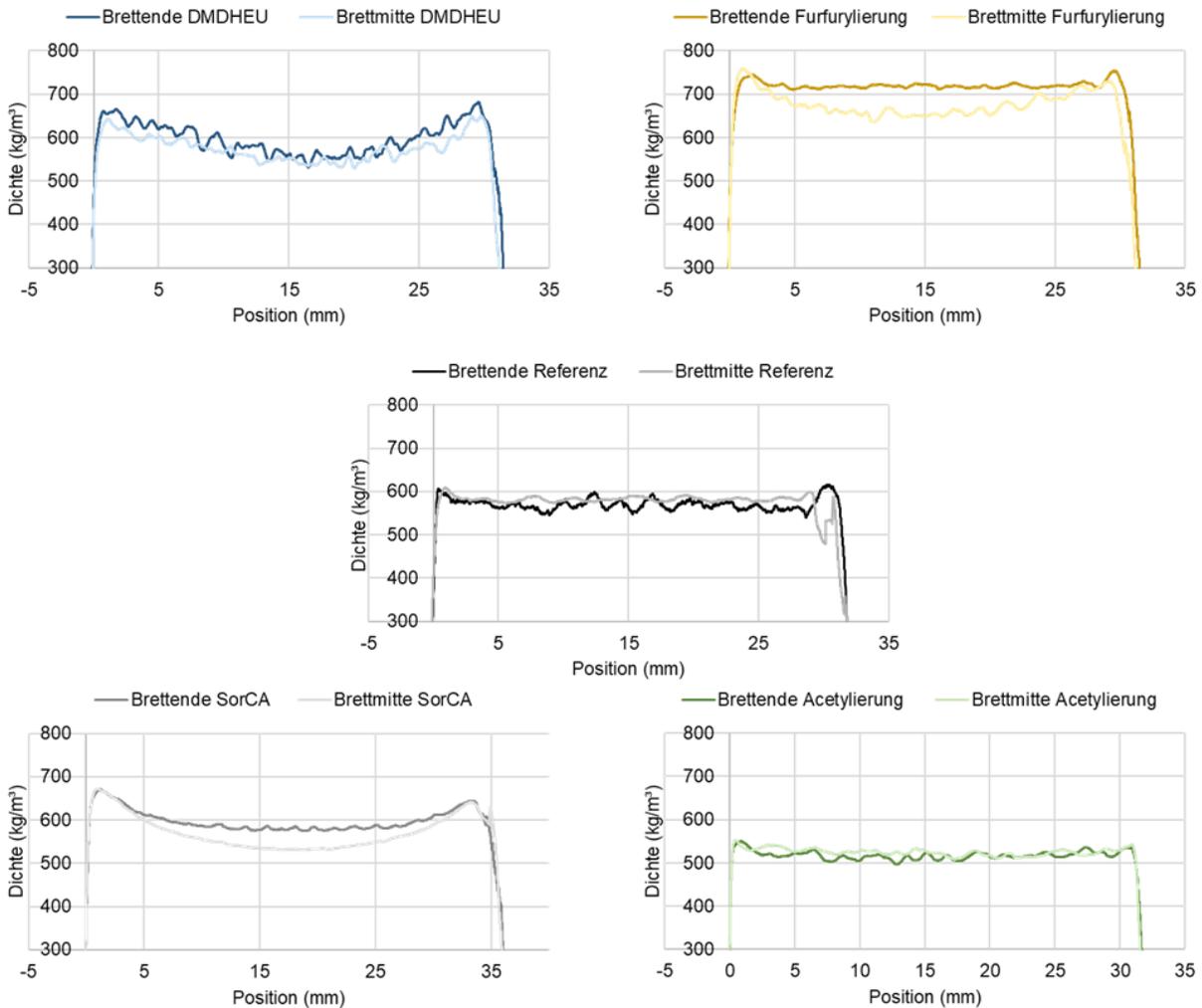


Abbildung 12. Dichteprofile von unbehandelter (Referenz) und modifizierter Kiefer in Abhängigkeit von der Lage im Brett.

Dichtegradienten (chemische Gradienten) wurden bei den furfurylierten (K), DMDHEU- (D) und SorCA- (S) modifizierten Brettern festgestellt. Bei K und S ist die Dichte an den Brettenden zudem höher, was darauf hindeutet, dass einerseits eine Migration in seitlicher Richtung zu den Oberflächen, andererseits aber auch eine Migration in Längsrichtung zu den Brettenden stattgefunden hat.

Scans die von den Brettquerschnitten erstellt (Abbildung 13) und mit der Bildverarbeitungssoftware Image J ausgewertet wurden, haben gezeigt, dass die Chemikalienaufnahme im Bereich von Kernholz und erhöhter Harzigkeit für alle Modifizierungen gehemmt war. Wurden reine Splintbretter ohne erhöhte Harzigkeit modifiziert, so wurde für alle Modifizierungen nach makroskopischer Betrachtung eine vollständige Modifizierung erzielt.

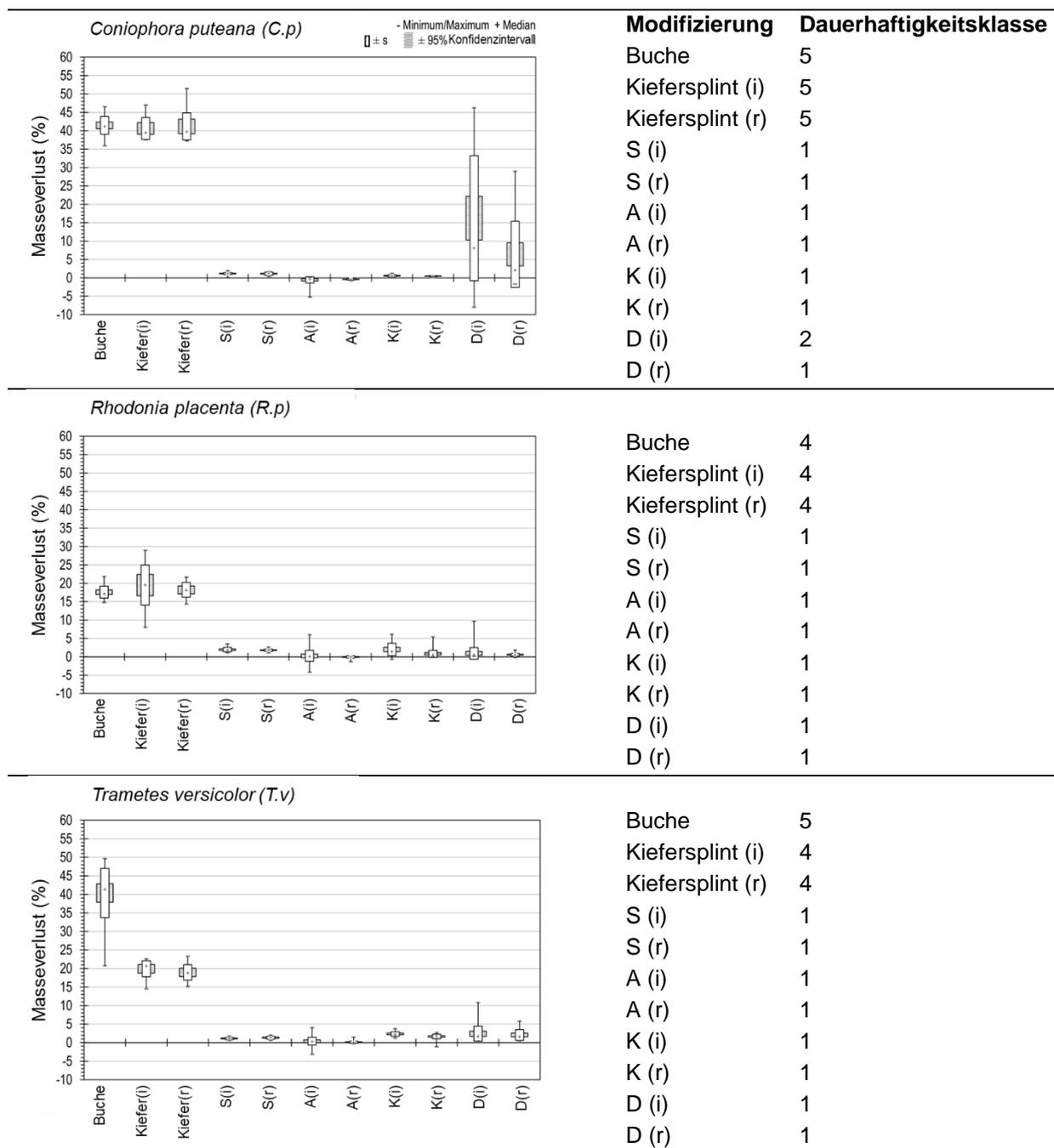


Abbildung 13. Brettquerschnitte mit teilweise unvollständiger Modifizierung (helle Bereiche).

### Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des modifizierten Holzes gegen einen Befall durch biologische, Holz zerstörende Organismen wurde gemäß EN 113-2 (2021) in einem Laborprüfverfahren bestimmt. Die modifizierten Prüfkörper wurden von zwei Braun- (*Coniophora puteana* und *Rhodonía placenta*) und einem Weißfäulepilz (*Trametes versicolor*) für 16 Wochen befallen (getrennt nach Prüfpilz). Der prozentuale Masseverlust des Holzes durch Pilzabbau wurde an 34 Prüfkörpern je Modifizierung und Pilz bestimmt (Tabelle 5). Die Virulenz der Prüfpilze wurde durch Referenzmaterial aus Buche und Kiefersplint nachgewiesen. Wie in vorangegangenen Untersuchungen wurde nach der Lage der Prüfkörper im Brett unterschieden (Abbildung 5). Eine Veröffentlichung mit dem Titel „Investigating the efficacy of established chemical wood modifications on large diameter Scots pine; durability against basidiomycetes“ wurde im Materials Journal am 29. April 2025 eingereicht.

Tabelle 5. Dauerhaftigkeitsklassen von modifizierter Kiefer, getrennt nach Prüfpilz und Lage im Brett; Buche und Kiefersplint als Referenzmaterial.



Der mediane Masseverlust war für alle Modifizierungen (außer D (i)) ≤ 5 %, so dass die modifizierten Kiefernprüfkörper in Dauerhaftigkeitsklasse 1 (hohe Dauerhaftigkeit) nach EN 350 (2016) eingestuft wurden. Die Modifizierungen zeigten demnach den gewünschten Effekt der Dauerhaftigkeitserhöhung.

### Keilzinken-Biegefestigkeit und –MOE

Die modifizierten Kiefernholzer wurden mit einem PVAc Klebstoff der Beanspruchungsgruppe D4 keilgezinkt. Der verwendete Klebstoff ist nicht explizit für tragende Verklebungen zugelassen, zeichnet sich aber durch eine hohe Feuchte- und Temperaturbeständigkeit aus, weshalb er sich grundsätzlich für den Einsatz bewitterter modifizierter Holzprodukte eignet. Die Keilzinkung wurde mittels einer Keilzinkenanlage des Typs Ultra TT (Weinig Grecon GmbH & Co. KG, Alfeld (Leine)) mit einem Keilzinkenfräser (Zinkenlänge 15,3 mm, Zinkenteilung 3,8 mm) für tragende Keilzinkenverbindungen mit vertikaler Zinkenausrichtung ausgeführt. Die Presszeit war 5 Sekunden und der Pressdruck 8 N/mm<sup>2</sup>. Die Biegefestigkeit und der Biege-MOE (VideoXtensometer) wurden im 4-Punkt-Biegeversuch gemäß EN 408 (2012) bestimmt (Abbildung 14).

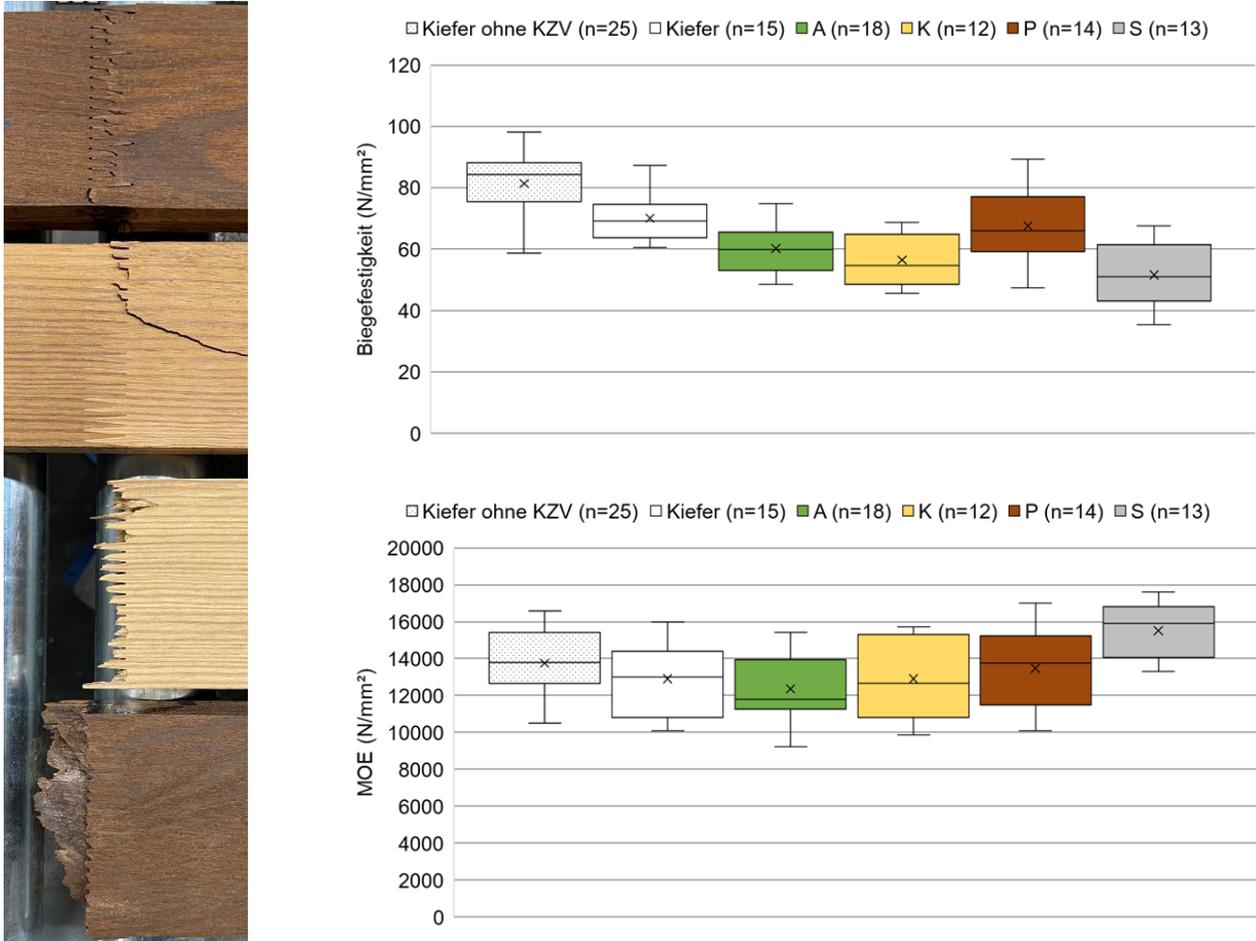


Abbildung 14. Biegefestigkeit- und Biege-MOE keilgezinkter unbehandelter und modifizierter Kiefer, als weitere Referenz Kiefer ohne Keilzinkenverbindung (KZV), n gibt die Prüfkörperanzahl an.

Über alle Modifizierungen wurde nur ein geringes Klebstoffversagen und vorwiegend Holzversagen im Bereich der Keilzinkenverbindung festgestellt. Der Prüfkörperbruch ging häufig vom Zinkengrund der Keilzinkenverbindung aus. Die modifizierten Hölzer zeigten gegenüber der Referenz eher ein sprödes Versagen. Grundsätzlich war der Festigkeitsverlust durch die Keilzinkenverbindung des modifizierten Materials gegenüber der Referenz (unbehandelte Kiefer mit und ohne Keilzinkenverbindung) moderat. Die Steifigkeit lag auf dem Niveau der unbehandelten Kiefer, zum Teil auch leicht darüber (siehe SorCa-Modifizierung).

### Längszugscherfestigkeit

Die Längszugscherfestigkeit wurde gemäß EN 302-1 (2023) im normal-klimatisierten (20°C/ 65 % rel. Luftfeuchte) „trockenen“ Zustand (Behandlung A1) und nach Wasserlagerung im „nassen“ Zustand (Behandlung A2) geprüft (Abbildung 15). Die Prüfkörper wurden mit EPI (Typ I, bis Nutzungsklasse 2 zulässig) und PRF (Typ I, bis Nutzungsklasse 3 zulässig) Klebstoffen verklebt, die für tragende Verklebungen der Holzart Kiefer im Innen- und Außenbereich zugelassen sind. Die Klebstoffe wurden, wie in Tabelle 6 gezeigt, verarbeitet.

Tabelle 6. Klebstoffe und Verarbeitungsbedingungen für die Längszugscherfestigkeits- und Delaminierungs-Prüfung.

Klebstoff	Harz:Härter (GT)	Auftragsmenge (g/m <sup>2</sup> )	Pressdruck (N/mm <sup>2</sup> )	Presstemperatur (°C)	Presszeit (min)
EPI	100:15	400	1	30	12
PRF	100:20	400	1	30	135

Je Modifizierung, Klebstoff und Behandlung (nass, trocken) wurden 20 Prüfkörper getestet.

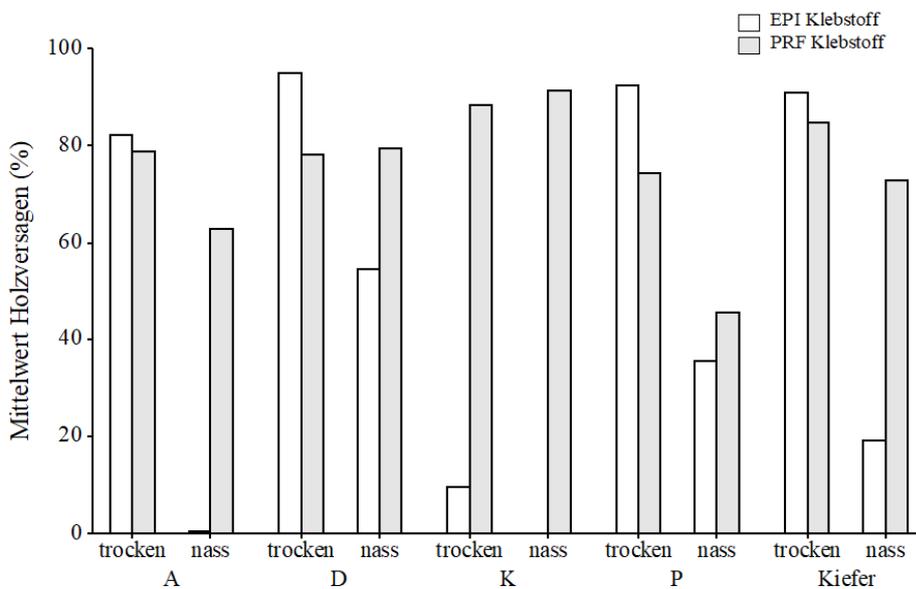
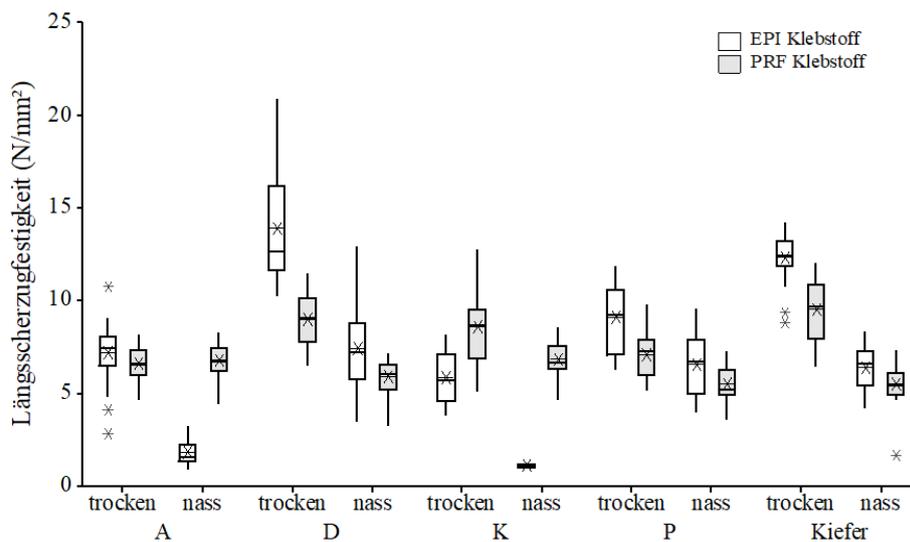


Abbildung 15. Längszugscherfestigkeit und Holzversagen verklebter unbehandelter und modifizierter Kiefer.

Eine geringe Längszugscherfestigkeit und geringes Holzversagen wurden festgestellt, wenn acetylierte und furfurylierte Kiefer mit EPI verklebt und nass geprüft wurden. Auch im trockenen Zustand zeigte die furfurylierte EPI verklebte Kiefer bereits ein vermehrtes Versagen in der Klebefuge. Die PRF-Verklebungen zeigten über alle Modifizierungen eher eine zuverlässige Verklebung im trockenen und nassen Zustand.

## Delaminierungsbeständigkeit

Für die Prüfung der Delaminierungsbeständigkeit wurden die gleichen Klebstoffe und Verklebungsbedingungen verwendet, wie für die Prüfung der Längszugscherfestigkeit (Tabelle 6). Die Delaminierungsbeständigkeit wurde gemäß EN 14080 (2013) (Verfahren A) mittels zwei Prüfzyklen an 12 Prüfkörpern je Modifizierung und Klebstoff getestet (Abbildung 16).

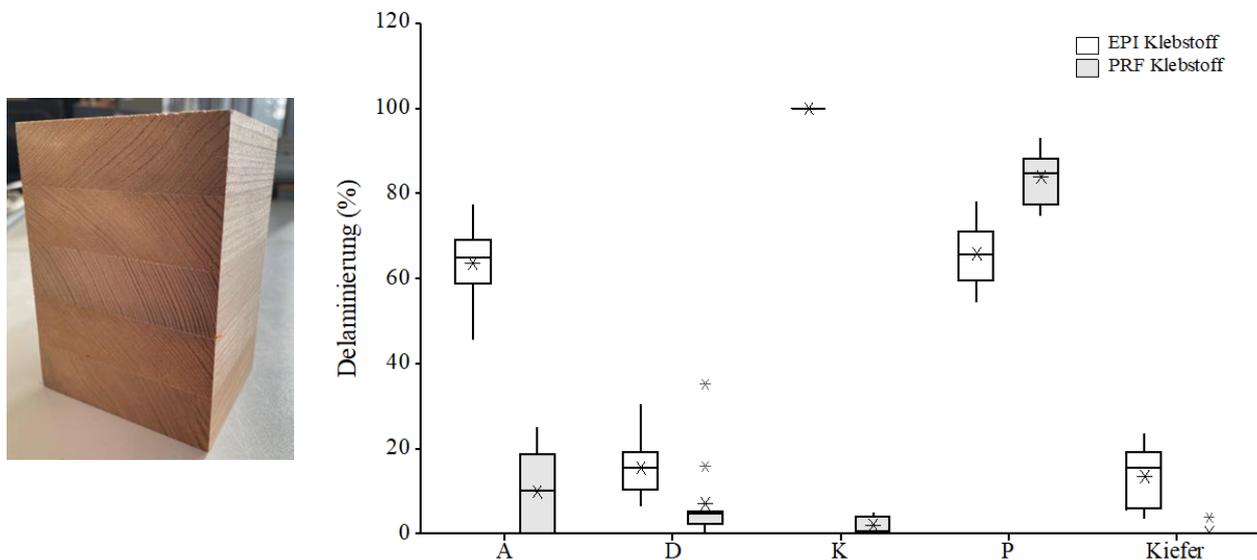


Abbildung 16. Delaminierung von unbehandelter und modifizierter Kiefer nach zwei Prüfzyklen.

Mit Ausnahme der PF-modifizierten Kiefer zeigten die PRF-Verklebungen eine höhere Delaminierungsbeständigkeit als die EPI-Verklebungen. Die geringe Delaminierungsbeständigkeit der EPI-Verklebungen kann in Teilen durch die kurze verwendete Presszeit von 12 min erklärt werden. Die delaminierten EPI-verklebten Prüfkörperoberflächen zeigten eine mangelhafte Klebstoffeindringung, die neben der chemischen Interaktion von Klebstoff und Holz und weiteren Faktoren für eine hohe Verklebungsbeständigkeit wichtig ist. Insbesondere die furfurylierten (K) EPI-verklebten Prüfkörper wiesen eine oberflächliche Klebstoffaushärtung ohne größere sichtbare Klebstoffeindringung auf, was weitestgehend auf die hydrophobe Oberfläche dieses Materials zurückgeführt werden kann. Es wird angenommen, dass ein beidseitiger Klebstoffauftrag und eine längere Presszeit zu einer höheren Delaminierungsbeständigkeit der EPI-Verklebungen geführt hätte. Bastani und Militz (2013) haben bei der Verklebung von PF-modifiziertem Holz (u.a. mit PRF) eine zufriedenstellende Verklebungsqualität erzielt. Sie haben auch für das PF-modifizierte Holz eine reduzierte Klebstoffeindringung festgestellt. Weitergehende Untersuchungen zur Optimierung der Verklebungseigenschaften konnten im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden.

Die Prüfungen zur Bewertung der Beschichtbarkeit der modifizierten Kiefer werden im Folgenden nur kurz thematisiert. Auf die Beschichtbarkeit der modifizierten Kiefer wird in detaillierter Form in den folgenden Veröffentlichungen eingegangen, die im Rahmen vom KiefernStolz Projekt entstanden sind.

- Alade, A. A., Hötte, C., Militz, H. (2024), Coatings adhesion on chemically modified Scots pine (*Pinus sylvestris*, L.) woods, *Forests*, 15(3), 526. <https://doi.org/10.3390/f15030526>.
- Alade, A. A., Stolze, H., Hötte, C., Militz, H., Theoretical coatibility properties of modified woods derived from contact angle, surface energy and surface tension measurements and experimental correlation, *Results in Surfaces and Interfaces*, 100514, <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100514>.

In den Veröffentlichungen wird u.a. auf verschiedene Benetzbarkeitsparameter wie Kontaktwinkel, freie Oberflächenenergie und Adhäsionsarbeit der modifizierten Holzoberflächen mit Wasser (polar), Diiodmethan (dispersiv) und verschiedenen Beschichtungen (polare und dispersive Anteile) eingegangen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Prüfung der Schmissbeständigkeit bzw. Kratzhärte der Beschichtungen auf modifizierter Kiefer vorgestellt. Insgesamt hat sich gezeigt, dass sich die Holzmodifizierung weniger auf die Beschichtungsqualität ausgewirkt hat als die Beschichtung selbst. Zusammengefasst war die modifizierte Kiefer, wie die unbehandelte Kiefer gut beschichtbar. Da es sich beim Versuchsmaterial um Kiefernspinnholz mit geringer Harzigkeit gehandelt hat, wird darauf hingewiesen, dass ein höherer Kernholz- bzw. Harzanteil ggfs. zu abweichenden Ergebnissen geführt hätte.

Die modifizierte Kiefer wurde mit den in Tabelle 7 gezeigten Beschichtungen behandelt. Darunter waren Beschichtungen auf Wasser- und Lösungsmittelbasis mit verschiedenen Bindemitteln, darunter Acrylat, Alkyd, Naturöl und Hybrid-Bindemittel.

Tabelle 7. Verwendete Beschichtungen und ihre Eigenschaften, Abbildung zeigt beschichtete Phenol-modifizierte Kiefer.

Beschichtung	Bezeichnung	Basis	Bindemittel	Dyn. Viskosität (mPa·s)
Wood Color m 6.15 W 100, RAL7016 Anthrazitgrau	AG7016	Wasser	Reinacrylat	2796 bei 30 rpm SP-3
WoodColor m 6.15 W 100, delta glazes 8170 Walnuss	DL8170	Wasser	Reinacrylat	3596 bei 30 rpm SP-3
Holzschutzlasur, KS 7940 Rubingrau	H210	lösemittelhaltig	Alkydharze	77,8 bei 60 rpm SP-1
Leonardo Hydrolasur, KS 7940 Rubingrau	H230	Wasser	Hybrid: Reinacrylate & Alkydharze	10,7 bei 60 rpm SP-1
Hydrostop H <sub>2</sub> O, natürliche Vergrauung, KS 7940 Rubingrau	H320	Wasser	Alkydharze & natürliche Öle	11,4 bei 60 rpm SP-1
Lignolan Wetterschutzfarbe, KS 0275 Schwedenrot	H415	Wasser	Reinacrylate	1556 bei 30 rpm SP-3
Lignolan Schwedenhausfarbe, KS 0275 Schwedenrot	H430	Wasser	Alkydharze	3408 bei 30 rpm SP-3



#### Hafffestigkeit – Gitterschnittprüfung und Abreißversuch

Die Adhäsionseigenschaften einer Beschichtung werden u.a. über die Hafffestigkeit ermittelt. Die Hafffestigkeit wurde mittels Gitterschnittprüfung beurteilt, die nach der in EN 2409 (2020) beschriebenen Methode durchgeführt wurde. Hierbei wird die Hafffestigkeit der Beschichtung rein visuell bewertet. Die Einstufung der Prüfergebnisse ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8. Einstufung der Hafffestigkeit beschichteter unbehandelter und modifizierter Kiefer nach Gitterschnittprüfung.

Beschichtung	Modifizierung				
	Acetyliert	DMDHEU	Furfuryliert	Phenol	Kiefer
AG7016	2	1	1	1	0
DL8170	0	1	0	0	0
H210	0	0	2	0	0
H230	0	1	2	2	0
H320	0	0	0	0	0
H415	2	0	0	0	0
H430	1	1	1	1	1

Bei der Gitterschnittprüfung zeigten die verwendeten Beschichtungen auf den modifizierten Kiefernproben eine gute bis sehr gute Haftfestigkeit (eingestuft als Stufe 0-2 von 5 Stufen). Es wurden vorwiegend glatte Schnittränder ohne Abplatzungen (Stufe 0) oder mit geringfügigen splitterartigen Abplatzungen (Stufe 1) beobachtet. Die abgeplatzten Flächen lagen bei maximal 15 % der Gitterschnittfläche (Stufe 2).

Außerdem wurde die Haftfestigkeit mittels Abreißversuch gemäß EN ISO 4624 (2023), dem sogenannten Dolly-Test, geprüft. Dabei wird die minimale Zugspannung gemessen, die erforderlich ist, um die Beschichtung senkrecht zum Substrat abzutrennen. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Abbildung 17 dargestellt.

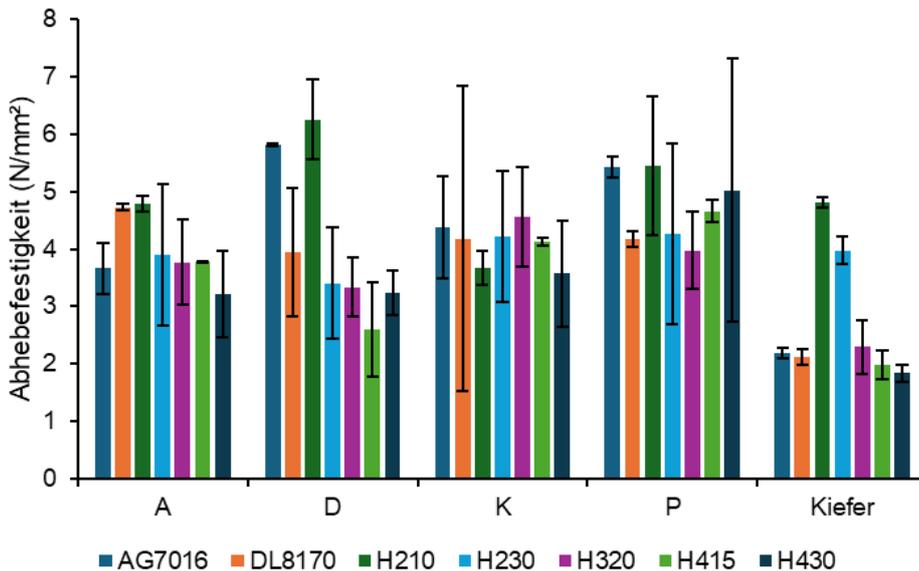


Abbildung 17. Abhebefestigkeit beschichteter unbehandelter und modifizierter Kiefer nach Dolly-Test.

Auf Basis des Dolly-Tests wurde auf den modifizierten Proben eine hohe Haftfestigkeit der Beschichtungen festgestellt. Die Haftfestigkeit war auf dem modifizierten Holz oftmals höher (ausgenommen H210 und H230) als auf dem unbehandelten Kiefernholz. Auf dem unbehandelten Holz haben eher die Beschichtungen versagt, wohingegen für das modifizierte Holz ein wesentlich höheres Holzversagen beobachtet wurde.

### Folgerungen und Ausblick

In diesem Teilprojekt zu Massivholzprodukten waren zahlreiche Partner der Forst und Holzindustrie eng eingebunden, mit dem Ziel neue Kooperationen zu initiieren und die Schlüsselstellen der Wertschöpfungskette für eine vermehrte Nutzung von KSH besser zu verstehen. Die besseren KSH-Qualitäten stoßen seitens der Holzindustrie auf gesteigertes Interesse und sind als Kern-, Splint- und Standardsortimente für diverse hochwertige Produkte geeignet. Die Trennung von Kern und Splint kann eine höhere Wertschöpfung des KSH versprechen, ist aber sehr von der Stammauswahl und Einschnittechnologie abhängig und an die Vermarktbarkeit von Koppelprodukten gebunden. Die Holzmodifizierung von Kiefernspiltholz in Gebrauchsdimensionen führt zu einer für die Anwendung vielversprechenden Modifizierungsqualität und stellt eine nachhaltige und regionale Verwendungsmöglichkeit für KSH dar. Die verstärkte Nutzung des KSH für Massivholzprodukte wird insbesondere durch die Holzmerkmale Grobästigkeit, Risse, Bläue und erhöhte Harzigkeit beeinträchtigt. Um den Einfluss dieser Merkmale steuern zu können braucht es eine enge Abstimmung zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette und technologische Anpassungen an KSH (Logistik, Einschnitt, Trocknung, Sortierung, Verklebung, Vermarktung etc.), denn viele Verarbeiter sind nach wie vor auf Fichtenholz spezialisiert und können KSH nur eingeschränkt nutzen.

### Arbeitspaket Furnierwerkstoffe

#### Grundlegende Untersuchungen im Bereich der Modifizierung von Furnieren mit Kondensationsharzen und im Bereich LVL-Modifizierung

In diesem Arbeitspaket wurde die Möglichkeit untersucht, Kiefernurniere mit dem Kondensationsharz DMDHEU und mittels Acetylierung zu modifizieren. Die modifizierten Furniere wurden für die Herstellung und Prüfung von modifiziertem Kiefern-Furnierschichtholz (Kiefern-LVL) verwendet. LVL ist ein Holzbauprodukt, das z.B. als Stütze oder Träger eingesetzt wird und in der Regel aus parallel zueinander verklebten Furnieren besteht. Durch seinen Lagenaufbau weist es eine höhere Dimensionsstabilität und Tragfähigkeit auf als vergleichbare Massivholzprodukte und ermöglicht neuartige, beispielweise filigrane, weit gespannte Holzkonstruktionen. Die Modifizierung der Furniere hatte zum Ziel die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des verklebten LVL zu erhöhen, so dass es eine Alternative für schutzmittelbehandeltes LVL darstellt und

Anwendungsbereiche erschließt, die eine erhöhte Dauerhaftigkeit und geringe Quell-/Schwindmaße erfordern. Auf der Schälmaschine des Fraunhofer WKI wurden 20-25 mm dicke Furniere aus KSH geschält und diese auf eine Abmessung von 600 x 750 mm<sup>2</sup> formatiert. Insgesamt wiesen die Furniere bedingt durch Schälrisse, ausgefallene Äste, Fraßgänge, Bläue etc. eine mittlere bis geringere Qualität auf. 170 dieser Furniere wurden bei Accsys industriell acetyliert. Der Acetylgehalt dieser Furniere lag zwischen 21,8 % und 23,0 % und der Gehalt an Essigsäuren bei 0,1 % bis 0,2 %. Die splintreichen Furniere ließen sich entsprechend der Accsys-Spezifikationen (Lösungsaufnahme und Modifizierungsgüte) modifizieren. Wie für das Massivholz wurde berichtet, dass sich Bereiche mit Kernholz und höherem Harzanteil nicht nach den Anforderungen von Accsys modifizieren ließen. Nähere Angaben zur Acetylierung der Furniere können aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen nicht bereitgestellt werden. Im Technikum der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte Göttingen wurden 140 Kiefernurniere mit DMDHEU (25 %-iger Lösungskonzentration) im Vakuum-Druck-Verfahren (- 50 mbar Vakuum für 30 min und 8 bar Druck für 30 min) imprägniert. Die Aushärtung der Modifizierungschemikalie erfolgte bei 60°C, 90°C und 120°C jeweils für 24 Stunden. Der WPG der Furniere variierte zwischen 19 % und 30 % und lag im Mittel bei 24,5 %. Die Abweichungen der Lösungsaufnahme (114 %-167 %) und des WPG sind voraussichtlich auf unterschiedliche Anteile an Kern- und Splintholz sowie auf unterschiedliche Harzanteile der Furniere zurückzuführen. Die Acetylierung hat tendenziell zu einer Glättung der Furniere und wie die DMDHEU-Modifizierung zu einer Versprödung der Furniere geführt, die sich u.a. durch verstärkte Rissbildung der Furniere äußerte. Im Anschluss an die Modifizierung wurden die Furniere zu sechslagigem LVL (ausschließlich parallel ausgerichtete Furniere, Furnierabmessungen 750 mm x 400 mm) verklebt (Abbildung 18).

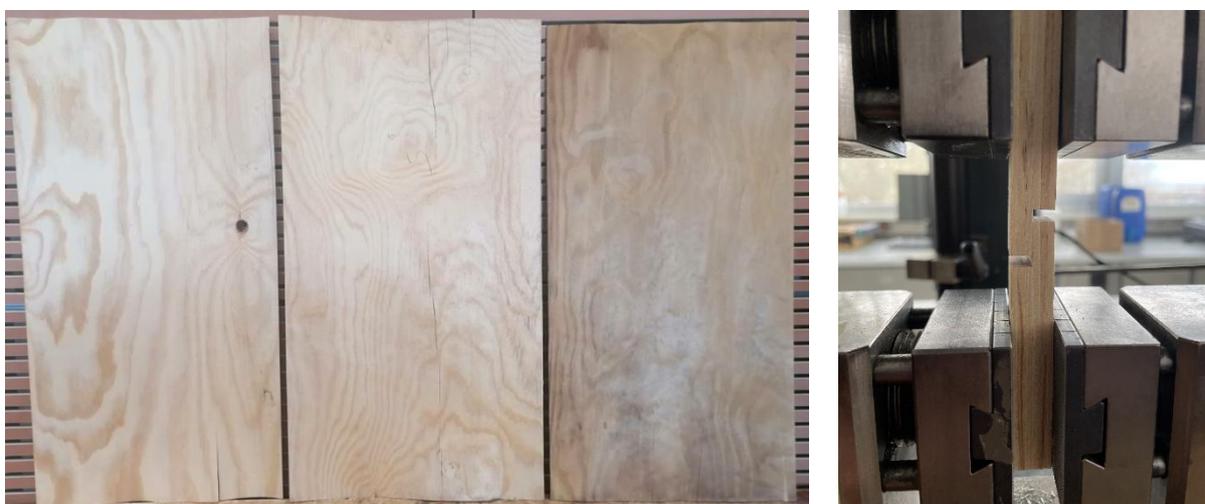


Abbildung 18. Furniere aus Kiefernstarkholz, unbehandelt (links), DMDHEU-modifiziert (Mitte) und acetyliert (rechts); Längszugscherprüfung von sechslagigem Kiefern-LVL.

Für tragende Verklebungen zugelassene PRF- und MUF-Klebstoffsysteme wurden, wie in Tabelle 9 gezeigt verarbeitet.

Tabelle 9. Für die LVL-Herstellung verwendete Klebstoffe und Verarbeitungsbedingungen.

Klebstoff	Harz:Härter (GT)	Auftragsmenge (g/m <sup>2</sup> )	Pressdruck (N/mm <sup>2</sup> )	Presstemperatur (°C)	Presszeit (min)
MUF	100:20	300	1	100	15
PRF	100:20	300	1	100	15

## Bestimmung der Materialeigenschaften

Die in Tabelle 10 gezeigten Materialeigenschaften wurden an modifizierten LVL-Prüfkörpern bestimmt.

Tabelle 10. Untersuchte Eigenschaften des unbehandelten und modifizierten Kiefern-LVL und verwendete Methoden.

Prüfungen	Eigenschaften	Standard	Prüfkörperdim. (mm)	Prüfkörperanzahl
Physikalische Eigenschaften	Rohdichte und Darrdichte	DIN 52182	50 x 50 x Plattendicke (12,5-14 mm)	30 je Variante
Feuchteverhalten	Materialfeuchte	EN 13183-1	50 x 50 x Plattendicke (12,5-14 mm)	30 je Variante
Feuchteverhalten	Wasseraufnahme	EN 15148	50 x 100 x Plattendicke (12,5-14 mm)	12 je Variante
Mech. Eigenschaften	Biegefestigkeit und Biege-MOE	EN 310	50 x 350 x Plattendicke (12,5-14 mm)	30 Kiefer, 48 acetyliert, 48 DMDHEU
Verklebbarkeit	Längszugscherfestigkeit, trocken und nass	EN 302-1, Behandlung A1 und A2	20 x 150 x Plattendicke (12,5-14 mm)	Variiert, mind. 30 je Variante
Verklebbarkeit	Delaminierungsbeständigkeit	Darrtrocknung nach Wasserlagerung	50 x 100 x Plattendicke (12,5-14 mm)	12 je Variante

Für die Dauerhaftigkeit des LVL wird auf die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen am modifizierten Vollholz verwiesen, die eine wesentliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit des modifizierten Vollholzes aufzeigten (Tabelle 5). Da die Furniere vor der Verklebung modifiziert wurden, ist zumindest für die vollständig modifizierten Splintbereiche der Furniere eine wesentliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit gegenüber dem unbehandelten Holz zu erwarten.

### Rohdichte, Darrdichte, Materialfeuchte und Wasseraufnahme

In Tabelle 10 werden die Rohdichte, Darrdichte und Materialfeuchte der LVL-Prüfkörper gezeigt. Die Rohdichte und die Materialfeuchte wurden nach Einstellen der Gewichtskonstanz im Normklima (20 C/ 65 % relative Luftfeuchtigkeit) bestimmt. Die Darrdichte wurde bestimmt, nachdem die Prüfkörper einen darrtrockenen Zustand (0 % Holzfeuchtigkeit) nach Trocknung bei 103 °C erreicht hatten. Die Referenz-Kiefernurniere wurden aus den gleichen Stämmen geschält, wie die modifizierten Kiefernurniere. Die prozentuale Wasseraufnahme nach teilweisem Eintauchen wurde nach 15 min, 1 h, 3 h, 5 h, 20 h, 21,5 h und 24 h bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Wasseraufnahme des acetylierten LVLs wesentlich gegenüber dem unbehandelten und DMDHEU modifizierten LVL reduziert war. Der Wasserstand der Proben war während der Wasserlagerung ggfs. unterschiedlich, weshalb diese Ergebnisse nicht näher vorgestellt werden.

Tabelle 11. Rohdichte, Darrdichte und Materialfeuchte des unbehandelten und modifizierten Kiefern-LVL unterteilt nach verwendetem Klebstoff.

Variante	Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Darrdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Materialfeuchte (%)
Kiefer MUF	0,62 (±0,03)	0,59 (±0,03)	14,6 (±0,8)
Kiefer PRF	0,62 (±0,04)	0,59 (±0,04)	12,9 (±0,5)
Acetyliert MUF	0,62 (±0,02)	0,59 (±0,02)	6,7 (±0,6)
Acetyliert PRF	0,66 (±0,03)	0,64 (±0,03)	5,7 (±0,4)
DMDHEU MUF	0,74 (±0,07)	0,70 (±0,07)	11,0 (±0,9)
DMDHEU PRF	0,77 (±0,11)	0,73 (±0,10)	10,0 (±0,9)

## Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul, die im 3-Punkt-Biegeversuch gemäß EN 310 (1993) bestimmt wurden, werden in Abbildung 19 gezeigt.

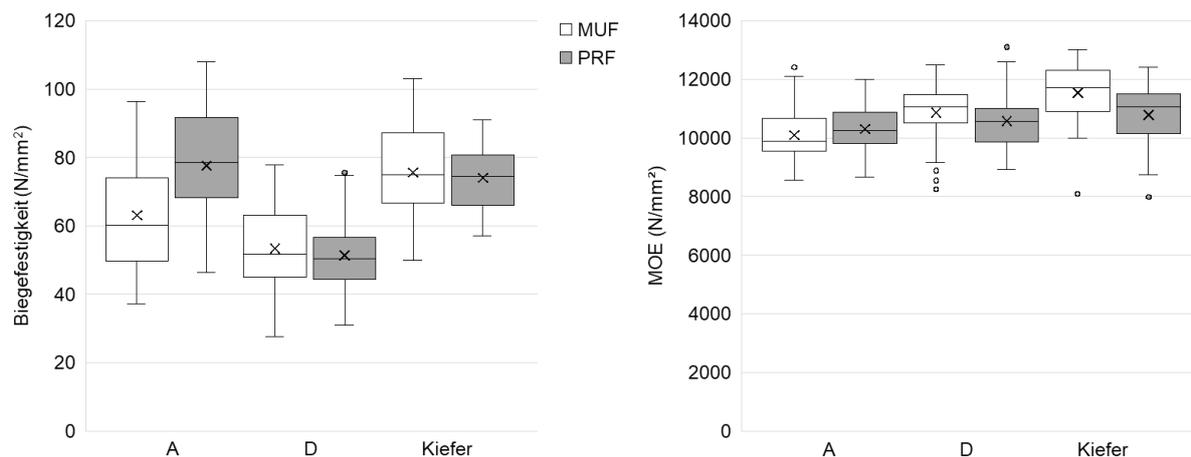


Abbildung 19. Biegefestigkeit und Biege-MOE von unbehandeltem und modifiziertem Kiefern-LVL.

Das acetylierte PRF verklebte LVL hat ähnlich hohe Biegefestigkeiten erzielt wie das unbehandelte LVL. Das DMDHEU modifizierte LVL und das mit MUF verklebte acetylierte LVL zeigten gegenüber der Referenz eine reduzierte Biegefestigkeit. Die Steifigkeiten der LVL-Varianten waren auf ähnlichem Niveau.

## Längszugscherfestigkeit

Die Längszugscherfestigkeit wurde gemäß EN 302-1 (2023) im normal-klimatisierten (20°C/ 65 % rel. Luftfeuchte) „trockenen“ Zustand (Behandlung A1) und nach Wasserlagerung im „nassen“ Zustand (Behandlung A2) geprüft (Abbildung 20). Ein Großteil der aus dem DMDHEU modifiziertem LVL hergestellten Prüfkörper versagten sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand bereits bei ihrer Einspannung in der Prüfmaschine. Die Verklebung erwies sich für beide Klebstoffsysteme als fehlerhaft, so dass ausschließlich die Ergebnisse des unbehandelten und acetylierten LVL vorgestellt werden.

Insgesamt haben die PRF-Verklebungen höhere Längszugscherfestigkeiten und höhere Holzbruchanteile erzielt als die MUF-Verklebungen. Die Kombination von acetyliertem LVL verklebt mit PRF hat im trockenen und nassen Zustand eine hohe Leistungsfähigkeit gezeigt. Das MUF verklebte acetylierte LVL hat gegenüber dem unbehandeltem LVL eine geringere Längszugscherfestigkeit gezeigt.

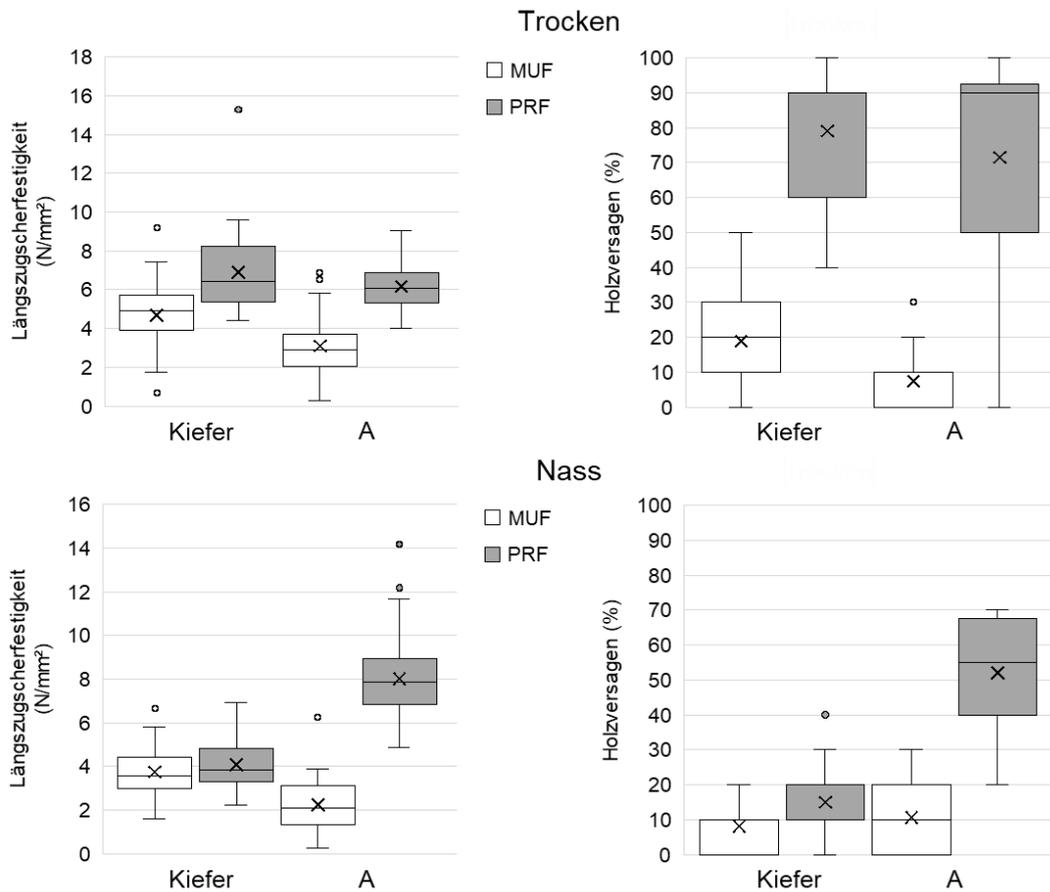


Abbildung 20. Längzugscherfestigkeit und Holzversagen von unbehandeltem und acetyliertem Kiefern-LVL nach unterschiedlicher Vorbehandlung.

### Delaminierungsbeständigkeit

Nachdem die LVL-Prüfkörper nach der Wasseraufnahme-Bestimmung vollständig mit Wasser gesättigt waren, wurden sie für 16 Stunden bei 103°C getrocknet. Direkt nach der Trocknung wurden die delaminierten Klebeugen markiert und anschließend vermessen. Der mittlere prozentuale Anteil delaminierter Klebefugen an der Gesamtklebefugenlänge der Prüfkörper wird in Tabelle 12 gezeigt.

Tabelle 12. Delaminierung von unbehandeltem und modifiziertem Kiefern-LVL.

Variante	Kiefer MUF	Kiefer PRF	Acetyliert MUF	Acetyliert PRF	DMDHEU MUF	DMDHEU PRF
Delaminierung (%)	2,6	0,1	4,9	1,4	27,9	5,6

Die PRF-Verklebungen zeigten eine höhere Delaminierungsbeständigkeit als die MUF-Verklebungen. Das unbehandelte und acetylierte LVL zeigten eine höhere Delaminierungsbeständigkeit als das DMDHEU modifizierte LVL.

## Folgerungen und Ausblick

Sind in der Anwendung von LVL eine erhöhte Dauerhaftigkeit, geringe Quell-/Schwindmaße sowie eine hochwertige Verklebung erforderlich, so hat sich in den Materialprüfungen die Kombination von Acetylierung und PRF-Verklebung der Kiefernurniere als vorteilhaft herausgestellt. Die DMDHEU-Modifizierung hat bei der geringen Furnierqualität und dem gewählten Prozess nicht zu einer Verbesserung der geprüften Eigenschaften gegenüber der Referenz geführt. Da es aktuell keine Hinweise für die mangelhafte Verklebungsqualität des DMDHEU modifizierten LVL gibt und die Verklebung von DMDHEU modifiziertem Vollholz problemlos möglich war, sind zukünftig weitere Untersuchungen durchzuführen. Im Projekt waren die Unternehmen Steico als Furnier- bzw. LVL-Hersteller und Accsys als Holzmodifizierendes Unternehmen eingebunden. Eine Kooperation dieser Unternehmen zur Herstellung von acetyliertem Kiefern-LVL wäre zukünftig vorstellbar, wurde aber bisher nicht weiter konkretisiert. Eine höhere Furnierqualität hätte voraussichtlich zu weiterer Verbesserung der LVL-Eigenschaften geführt. Wie für die Massivholzprodukte wurde deutlich, dass sich für die Herstellung von modifiziertem LVL in besonderer Weise splintreiche, wenig harzige Furniere eignen. Ein besonders leistungsstarkes Klebstoffsystem ist erforderlich, das auf die Anwendung des LVLs und auf die Modifizierungschemikalie abgestimmt ist. Furnierwerkstoffe stellen einen Lösungsansatz für die Verwendung mittlerer und geringwertiger KSH-Sortimente dar, da sie festigkeitsmindernde Holzmerkmale wie Grobäste durch lagenweise Furnierverklebung im Produkt verteilen und somit ihren Einfluss reduzieren.

## **Arbeitspaket 5.2: Verklebbarkeit von furnierbasierten Verbundwerkstoffen auf Basis von Kiefernstarkholz**

### **1.6.1 Zielsetzung des Teilvorhabens**

Im Rahmen dieses Teilprojekts wird die Substitution von konventionellen Klebstoffen zur Herstellung von Furnierwerkstoffen aus Kiefernstarkholz durch angepasste Isocyanat-basierte Systeme für den Außenbereich untersucht. Als klassische Klebstoffe für den Innenbereich sind Weißleime sowie Harnstoff-Formaldehyd-Harze (UF-Harze) bekannt. Für den Außenbereich werden überwiegend Phenol-Formaldehyd-Harze (PF-Harze) und Melamin-Harnstoff-Harze (MUF-Harze) eingesetzt, da sie eine höhere Hydrolysebeständigkeit aufweisen. Bei den besagten Klebstoffsystemen handelt es sich um wasserbasierte Klebstoffe, die spröde aushärten. Ein Nachteil dieser Systeme besteht in der möglichen Abgabe von Formaldehyd während des Gebrauchs, da dieses als gesundheitsschädlich gilt. Darüber hinaus gilt deren Haftung an metallischen Oberflächen als nur schwach. Isocyanat-basierte Klebstoffe, wie beispielsweise Polymeres Diphenylmethandiisocyanat (pMDI) und Polyurethane (PUR), sind nicht wasserbasiert, formaldehydfrei und härten beim Kontakt mit Wasser aus. Sie bilden helle und elastische Klebfugen aus und haften an einer Vielzahl anorganischer Materialien. Aufgrund ihrer Hydrolysestabilität sind sie für den Einsatz unter Außenbedingungen geeignet. Eine besondere Herausforderung bei der Verklebung von Kiefernstarkholz ergibt sich durch das Vorhandensein größerer Mengen an Extraktstoffen sowie dem teils hohen Harzgehalt insbesondere im Kernholz der Kiefer. Im Rahmen der Untersuchung wird der Einfluss von Splint- und Kernholz auf die Festigkeit der Verklebung analysiert. Darüber hinaus wird die Verklebbarkeit von Kiefernstarkholz mit anderen Materialien, wie Metallen oder Armierungsfasern, erforscht. In diesem Zusammenhang wird auch die Anwendbarkeit von Oberflächenmodifizierungen der nicht-hölzernen Materialien mit Primern untersucht. Aus prozesstechnischer Sicht werden Klebstoffmengen, offene Presszeiten sowie Pressbedingungen (Temperatur, Druck) erprobt.

Um die Güte der Verklebungen sowie Festigkeitsänderungen der Sperrhölzer aufzuzeigen, werden vor allem Scherzugfestigkeiten der Lagenhölzer nach DIN EN 314<sup>1</sup> und Scherzugfestigkeiten an Vollholzverklebungen nach DIN EN 302<sup>2</sup> durchgeführt. Der Einfluss auf die Festigkeit wird durch Biegeprüfungen nach DIN EN 310<sup>3</sup> sowie Zugprüfungen in Anlehnung an DIN 52377<sup>4</sup> untersucht. Die vorliegende Untersuchung ist in einer engen Kooperation mit dem Teilprojekt 4 (WKI) zu verstehen.

### **1.6.2 Ergebnisse der untergeordneten Arbeitspakete**

#### *Untersuchungen an ausgehärteten Klebstoffproben*

Zielsetzung dieses Projektes ist die Entwicklung eines MDI-basierten 1-Komponenten-Klebstoffsystems bzw. spezieller Urethanpolymere und deren Optimierung zur Herstellung von Furnierlagenwerkstoffen und Werkstoffverbunden. Als Ausgangspunkt der Untersuchungen dient eine Klebstoffauswahl an sechs verschiedenartigen Isocyanat-basierten Produkten sowie einem Phenol-Formaldehyd-Harz (PF) und einem Melamin-Urea-Formaldehyd-Harz (MUF) als Referenzklebstoffe. Die Auswahl der Klebstoffe auf Isocyanatbasis erfolgt vor dem Hintergrund, ein breites Spektrum betreffend der Viskosität und Reaktivität abzudecken. Es sollen sowohl Polyurethan- (PUR) als auch Klebstoffe auf Basis von polymerem Diphenylmethandiisocyanat (pMDI) angewendet werden. Diese Variationen besitzen vor allem aufgrund des Polymerisationsgrades der Polymere deutliche Unterschiede in der Anwendung und den Eigenschaften. Bereitgestellt wurden die pMDI Klebstoffsysteme durch die Firma Huntsman (Huntsman Corporation, Salt Lake City, USA). Die PUR Klebstoffe wurden von der Firma Jowat (Jowat SE, Detmold, Deutschland) zur Verfügung gestellt. Wichtige Faktoren sind insbesondere die Herausforderungen beim Auftragen der Klebstofftypen mit höherer Viskosität als auch der teils sehr schnelle Reaktionsablauf. Zudem unterschieden sich die Klebstoffe in Bezug auf die Benetzungseigenschaften und das Eindringvermögen in die Furnieroberfläche. Die durchgeführten Untersuchungen an ausgehärteten Klebstoffproben zeigen, dass deutliche Unterschiede bezüglich der mechanischen Eigenschaften vorliegen. Es wurden sowohl Zugbelastungen bis zum Versagen der Proben aufgebracht, als auch definierte zyklische Wechselbeanspruchungen durchgeführt, anhand derer das elastische Verhalten genauer charakterisiert werden konnte. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der eingestzten PUR- und pMDI-Klebstoffe.

Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten PUR- und pMDI-Klebstoffe

Eigenschaft	Einheit	Huntsman Suprasec			Jowat Jowapur		
		MDI-Prepolymer	MDI-Prepolymer	MDI-Prepolymer	PUR-Prepolymer	PUR-Prepolymer	PUR-Prepolymer
		Suprasec 2144	Suprasec 2244	Suprasec 2944	Jowapur 685.30	Jowapur 685.33	Jowapur 687.22
		pMDI1	pMDI2	pMDI3	PUR1	PUR2	PUR3
Viskosität, dyn	mPas	1850	2100	2500	4000 (+600)	5900 (+600)	8750 (+1050)
Reaktivität / Schäumungsverhalten	-	gering	mittel	hoch	mäßig	mäßig	stark
offene Wartezeit	min	240	60	10	30 (+5)	27,5 (+2,5)	18 (+2)

Um das elasto-mechanische Verhalten der reinen Klebstoffproben zu untersuchen, wurden 4 mm dicke Rahmen mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm gefertigt, in denen die Klebstoffe mittels einer Furnierpresse ausgehärtet wurden. Auf der Ober- und Unterseite der Rahmen befand sich Presspapier, um eine gute Trennung zu ermöglichen. Jede Variante wurde doppelt hergestellt. Im Anschluss an das Aushärten wurden jeweils sechs Probekörper mit den Maßen 50 mm x 10 mm x 4 mm mittels einer Mikrokreissäge und einer ungezahnten Trennschreibe für die Mikrozugprüfung präpariert, von denen drei Prüfkörper für den quasi-statischen Standardzugversuch und drei für den zyklischen Zugversuch verwendet wurden. Die genauen Abmessungen und das Gewicht aller Proben wurden nach der Herstellung ermittelt, um das Ergebnis auf die jeweilige Dichte normiert darstellen zu können. In Bezug auf die erzeugte Dichte der ausgehärteten Klebstoffe gab es jedoch nur geringfügige Abweichungen zwischen den verschiedenen PUR- und pMDI-Varianten. Bei der eingesetzten Mikroprüfvorrichtung handelt es sich um ein Modul der Fa. Kamrath&Weiss, welches auch in Kombination mit diversen Mikroskopen eingesetzt werden kann. Neben der Möglichkeit zyklische Versuche programmieren zu können, erlaubt diese Technik auch das Einstellen von sehr geringen Prüfgeschwindigkeiten, sodass die Versuche quasi-statisch durchgeführt werden konnten. Die gewählte Prüfgeschwindigkeit lag bei 4 µm pro Sekunde. Eine Abbildung des verwendeten Mikrozugmoduls ist im zweiten Zwischenbericht zu sehen. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der dichtebezogenen Zugfestigkeiten und des dichtebezogenen Zug-Elastizitätsmoduls der geprüften Klebstoffproben.

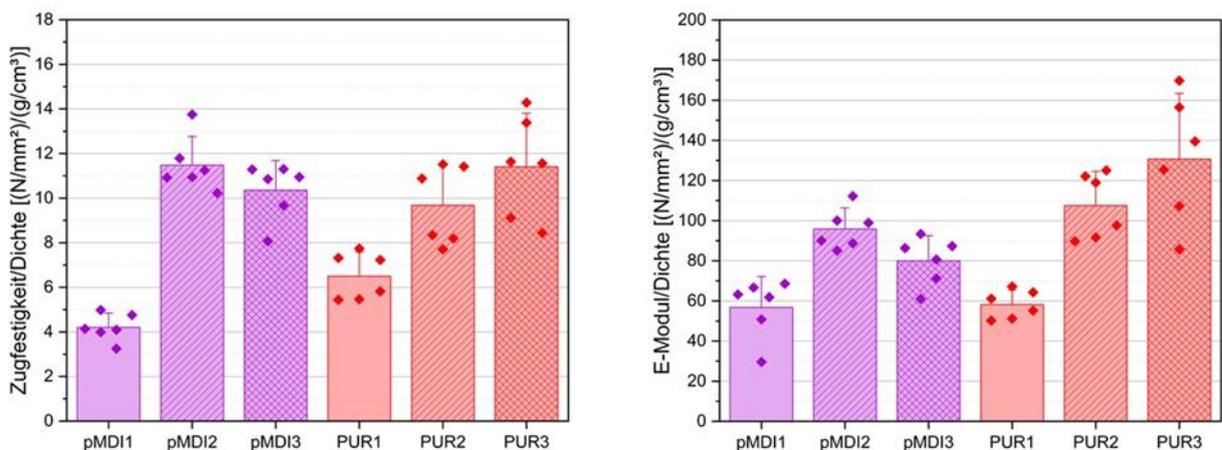


Abbildung 1: links: Dichtebezogene Zugfestigkeit; rechts: Dichtebezogenes Zug-Elastizitätsmodul

Es ist zu beachten, dass für den Klebstofftyp PUR1 die Festigkeit bei maximal möglicher Verformung (80% der Einspannlänge der Prüfkörper) angegeben wird und daher unterhalb der tatsächlichen maximalen Festigkeit liegt. Dies liegt daran, dass die Dehnbarkeit dieses Klebstofftyps die maximal mögliche Prüflänge des Prüfmoduls überschreitet. Wie zu erwarten war, ist eine starke Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit zu beobachten. Auffällig ist die geringe Festigkeit des Klebstofftyps pMDI1. Auch bei den PUR-Klebstoffen zeigt sich, dass der Klebstoff PUR1, welcher in dieser Gruppe die geringste Viskosität und

Reaktivität besitzt, die geringste Zugfestigkeit aufweist. Die Vermutung, dass mit zunehmender Viskosität und Reaktivität auch die Festigkeit im ausgehärteten Zustand steigt, wird für die PUR-Klebstoffe bestätigt, trifft im Fall der betrachteten pMDI-Klebstoffe jedoch nicht zu. Bei den pMDI-Klebstoffen ist die Festigkeit und Steifigkeit von pMDI2 am höchsten. Auffällig ist, dass das Elastizitätsmodul für die pMDI-Varianten pMDI2 und pMDI3 geringer ausfällt als das E-Modul, welches für PUR2 und PUR3 festgestellt wird, während das Elastizitätsmodul der Variante pMDI1 und PUR1 auf einem ähnlichen Niveau liegt. Dies spricht für eine stärkere dreidimensionale Vernetzung der PUR Klebstoffe gegenüber den pMDI-Klebstoffen. Hinsichtlich der Festigkeit liegt zwischen dem Mittelwert der PUR1 Variante und dem Mittelwert der PUR3 Varianten ein Faktor von fast zwei. Werden die Elastizitätsmodule miteinander verglichen, so kann sogar ein Faktor von annähernd drei festgestellt werden. Der Verleich zwischen den Festigkeits-Mittelwerten der zugschwächsten Variante pMDI1 und den pMDI-Varianten 2 und 3 ergibt einen Faktor von ungefähr 2,5, wohingegen der Faktor zwischen den jeweiligen Elastizitätsmodulen unterhalb von 2 liegt.

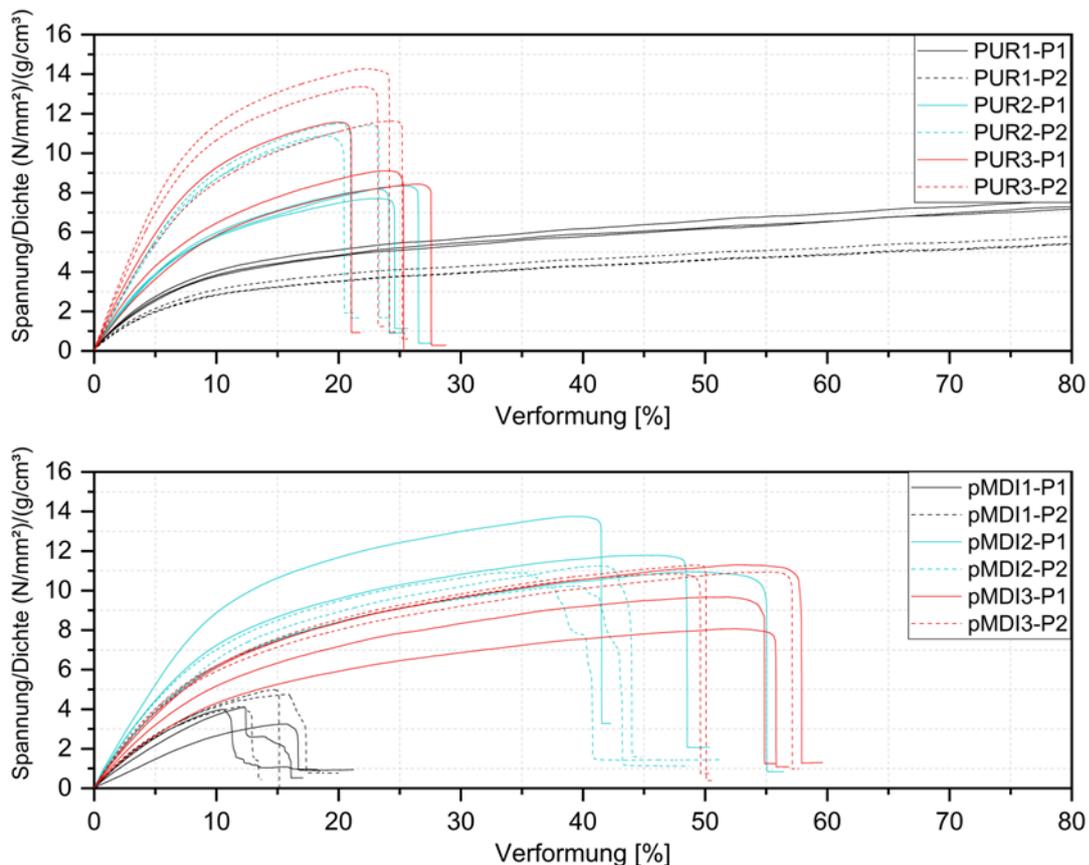


Abbildung 2: Dichtebezogene Spannungs-Dehnungsverläufe der PUR- und pMDI-Klebstoffvarianten

Abbildung 2 zeigt die entsprechenden dichtebezogenen Spannungs-Dehnungs-Kurven der Messungen. Daraus lässt sich neben der Elastizität im linear-elastischen Bereich und der dichtebezogenen Bruchfestigkeit auch die mögliche Verformbarkeit bis zum Versagen abschätzen. Es ist erkennbar, dass das rein reversible linear-elastische Verhalten für alle Klebstofftypen im Bereich unterhalb von 10 % der Gesamtverformung liegt. Vergleicht man die beiden Klebstoffe pMDI1 und PUR1, die die geringsten Festigkeiten aufweisen, so wird deutlich, dass große Unterschiede in der absoluten Verformbarkeit bestehen. Während die Zugproben des Klebstoffs pMDI1 nur um 10 bis 15 % der Einspannlänge gedehnt werden können, erreichen die Proben des Klebstoffs PUR1 eine Dehnung von über 80 % der Einspannlänge, ohne zu versagen. Hier wird auch deutlich, dass zwischen den Klebstofftypen PUR2 und PUR3 im Vergleich zu pMDI2 und pMDI3 große Unterschiede hinsichtlich der maximal möglichen Dehnung bestehen. Die erstgenannten PUR-Proben erreichen Verformungen, die im Bereich von etwa 20 bis 30 % der Einspannlänge liegen. Die letztgenannten pMDI-Proben lassen sich bis zum Versagen deutlich weiter auf Verformungen im Bereich von etwa 40 bis 60 % der Ausgangslänge dehnen. Die dichtebezogene Zugfestigkeit liegt trotz der stark unterschiedlichen Dehnbarkeit auf einem vergleichbaren Niveau.

Es ist bekannt, dass bei Werkstoffen mit elastomerem Verhalten unter zyklischer Wechselbeanspruchung die Festigkeit des Werkstoffes bei gleicher Verformungslänge abnimmt. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wurde ein zyklisches Versuchsschema mit Be- und Entlastungsphasen entwickelt. Nach diesem Schema wurden alle Probekörper über den linear-elastischen Bereich hinaus auf 80 % ihrer maximalen

Dehnung gedehnt und anschließend 30 Sekunden auf dieser Dehnung gehalten, um plastische Formänderungen zu erreichen. Nach der Haltezeit wurde die Dehnung wieder zurückgenommen und ein neuer Belastungszyklus analog zu diesem Schema gestartet. Aufgezeichnet wurden jeweils der Kraft-Zeit-Verlauf sowie die resultierende Kraft-Weg-Hysterese (siehe Bild 8, links). Aus den einzelnen Kraft-Weg-Zyklen wurde über das resultierende Flächenintegral die in der Belastungsphase aufgebrauchte Verformungsarbeit pro Lastzyklus für die ersten 8 Lastzyklen berechnet (siehe Abbildung 3, rechts). Dargestellt ist der elastischste Klebstofftyp PUR1 im Vergleich zu den wenig elastischen Typen PUR3 und pMDI3.

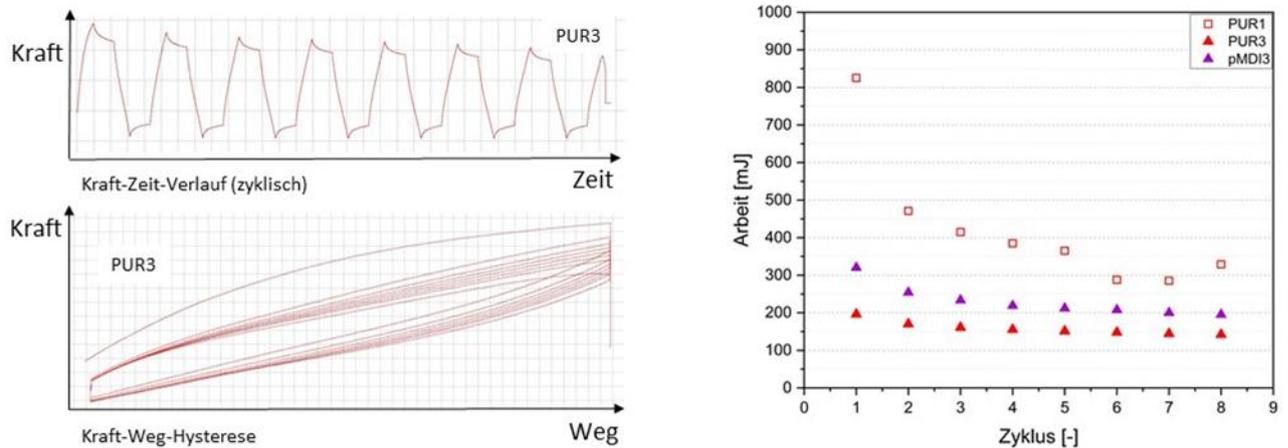


Abbildung 3: links: Kraft-Zeit-Verlauf und Kraft-Weg-Hysterese; rechts: Verrichtete Arbeit je Zyklus

Es wird deutlich, dass die zu verrichtende Arbeit während der ersten Belastungszyklen stark abnimmt und sich dann einem konstanten Wert annähert. Dies gibt Aufschluss über die Anteile der reversiblen und irreversiblen Verformung der verschiedenen Klebstoffe mit deren charakterischem elastomeren Materialverhalten. Die hohe Verformbarkeit, insbesondere von PUR1 (vgl. Abbildung 2), ist daher auf einen hohen Anteil irreversibler plastischer Verformung zurückzuführen. Eine Belastung über den linear-elastischen Bereich hinaus führt daher zu einer irreversiblen Dehnung der Probe. Der Verformungswiderstand des Klebstoffes ohne Vorbelastung entspricht also nicht dem Verformungswiderstand nach einer zyklischen Wechselbelastung, wenn das Material über den rein reversiblen elastischen Bereich hinaus belastet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Struktur des Polymers durch molekulare Entschlafungen mit jedem Zyklus ändert.

### Voruntersuchungen an 5-lagigen Sperrhölzern basierend auf 2 mm starken Kiefernspinhholz-Furnieren

Alle Grunduntersuchungen, bei denen der Lagenaufbau nicht variiert wurde und keine Modifizierungsmaterialien in den Verbund eingebracht wurden, basieren auf 5-schichtigem Sperrholz aus 2 mm dicken Schäl furnieren aus dem Splint von Kiefernstarkholz. Die Prüfkörper enthielten drei Längs- und zwei Querlagen. Alle in dieser Untersuchung verwendeten Schäl furniere wurden vom Fraunhofer WKI für Holzforschung hergestellt. Die Auswahl der benötigten Starkholzkiefern erfolgte durch eigene Begutachtung, anschließende Stammvermessung und Datenauswertung (siehe AP 5.1).

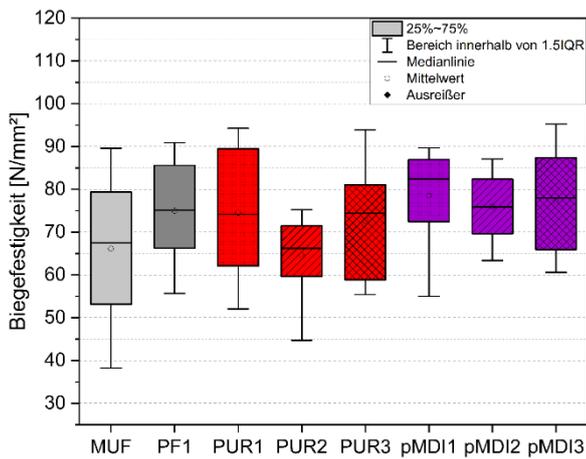


Abbildung 4: Biegefestigkeit, Sperrholz 5-lagig,  $T=140^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1,0\text{ N/mm}^2$ ,  $t=20\text{ min}$ ,  $M=120\text{ g/m}^2$ ,  $n=24$

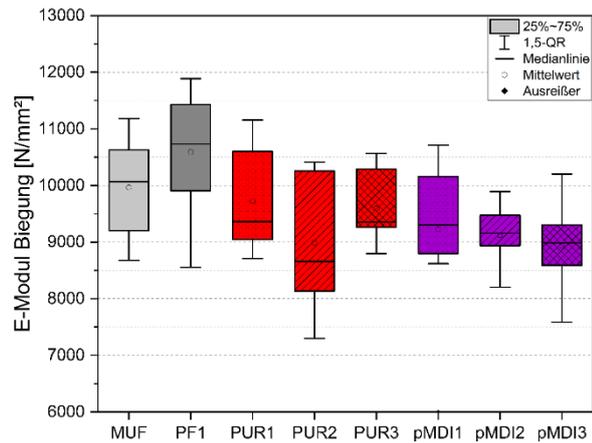


Abbildung 5: Biege-Elastizitätsmodul, Sperrholz 5-lagig,  $T=140^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1,0\text{ N/mm}^2$ ,  $t=20\text{ min}$ ,  $M=120\text{ g/m}^2$ ,  $n=24$

In Abbildung 4 und 5 sind die Ergebnisse der Biegeprüfungen nach DIN EN 310 an unbehandelten Prüfkörpern (trocken) dargestellt. Die Prüfungen erfolgten an einer 10 kN Universalprüfmaschine der Firma Zwick-Roell. Anhand von Abbildung 5 ist zu erkennen, dass beim Einsatz aller Isocyanat-basierten Systeme im Vergleich zu den Referenzklebstoffen im Mittel niedrigere Biege-Elastizitätsmodule vorliegen. Eine Erklärung hierfür könnte in den elastischeren Leimfugen, einem Eindringen in die Holz Zellwände oder in der stärkeren Kompression der Holzfurniere bei der Verwendung von wasserbasierten Leimsystemen wie PF- und MUF-Harzen liegen. Die erreichten Biegefestigkeiten liegen mit Ausnahme der Klebstoffe MUF und PUR2 auf vergleichbarem Niveau, wobei alle Messreihen große Streuungen aufweisen (vgl. Abbildung 4). Die großen Streuungen der Werte können auf den hohen Grad der Inhomogenität sowie auf die hohe Anzahl von Astlöchern in den Kiefernstarkholz-Furnieren zurückgeführt werden.

Der Einfluss der verschiedenen Klebstoffe auf die Biegefestigkeit wurde in einem weiteren Versuch untersucht, bei dem auch die Klebstoffmenge variiert wurde. Verwendet wurden die Klebstoffe PUR1 und pMDI1 sowie die beiden Referenzklebstoffe MUF und PF. Zu jeder Einstellung wurden jeweils drei Platten mit den Klebstoffmengen  $80\text{ g/m}^2$ ,  $120\text{ g/m}^2$  und  $160\text{ g/m}^2$  hergestellt. Der Feststoffanteil der wasserbasierten Referenzklebstoffe PF und MUF lag jeweils bei 66 %.

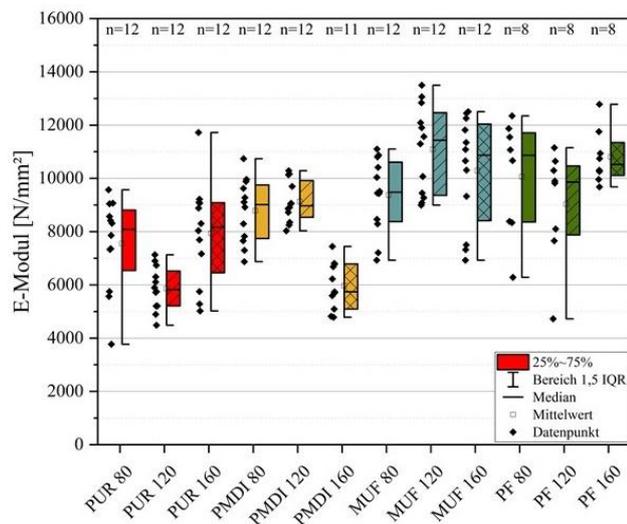
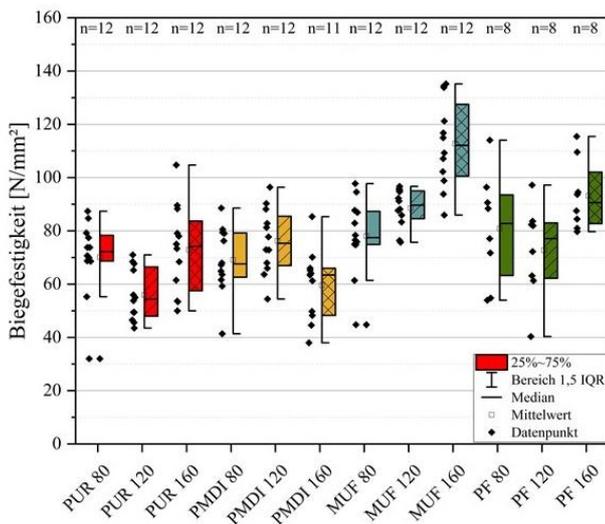


Abbildung 6: links: Biegefestigkeit bei Variation der Klebstoffmenge (ohne Vorbehandlung), Sperrholz 5-lagig,  $T=140^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1,0\text{ N/mm}^2$ ,  $t=20\text{ min}$

Die Ergebnisse der Biegeprüfungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Es fällt auf, dass die wasserbasierten Klebstoffe MUF und PF bei der höchsten Klebstoffmenge ( $160\text{ g/m}^2$ ) deutlich höhere Biegefestigkeiten als die Isocyanat-basierten Klebstoffe PUR1 und pMDI1 aufweisen, während die Festigkeiten bei den Klebstoffmengen  $80\text{ g/m}^2$  und  $120\text{ g/m}^2$  nur geringfügig über denen der Isocyanat-basierten Klebstofftypen liegen. Bezüglich der eingesetzten Klebstoffmenge und der resultierenden Biegefestigkeit der hergestellten Sperrholzplatten kann kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Die Betrachtung des Biege-Elastizitätsmoduls zeigt für die Isocyanat-basierten Systeme ein ähnliches Muster wie bei der Biegefestigkeit.

Es besteht eine Korrelation zwischen Festigkeit und Elastizität. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Biegefestigkeiten liegen die ermittelten Biege-Elastizitätsmoduln für die Klebstoffe MUF und PF bei den Klebstoffmengen 80 g/m<sup>2</sup> und 120 g/m<sup>2</sup> über den Biege-E-Moduln der mit PUR und pMDI verleimten Sperrholzproben. Wie zuvor in Abbildung 5 zu erkennen, liegen die festgestellten Steifigkeiten für die wasserbasierten Systeme oberhalb derer der Isocyanat-basierten Systeme (vgl. Abbildung 6, rechts).

Um die Qualität der Verklebungen bei Verwendung unterschiedlicher Klebstofftypen und Klebstoffmengen zu überprüfen, wurden neben den beschriebenen Biegeprüfkörpern auch Scherzugprüfkörper nach DIN EN 314 hergestellt und nach unterschiedlichen Konditionierungsbedingungen wie zum Beispiel Wasserlagerung bei Raumtemperatur oder Lagerung in kochendem Wasser geprüft. Die genauen angewandten Lagerbedingungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Vorbehandlung und Prüfkondition nach DIN EN 314 (Scherzugversuche)

Vorbehandlung	Prüfkonditionen
Keine	Klimatisiert auf Normklima (20° C, 65 % rel. Luftfeuchte), trocken
24 Stunden Wasserlagerung bei 20 °C Wassertemperatur, auf Normklima rückklimatisieren	Klimatisiert auf Normklima (20° C, 65 % rel. Luftfeuchte), trocken
4 Stunden in Wasser kochen, 18 Stunden bei 60 °C trocknen, 4 Stunden in Wasser kochen, auf Normklima rückklimatisieren	Klimatisiert auf Normklima (20° C, 65 % rel. Luftfeuchte), trocken
24 Stunden Wasserlagerung bei 20 °C Wassertemperatur, auf Normklima rückklimatisieren, 24 Stunden Wasserlagerung bei 20 °C Wassertemperatur	Oberflächenwasser entfernt, nass
4 Stunden in Wasser kochen, 18 Stunden bei 60 °C trocknen, 4 Stunden in Wasser kochen, auf Normklima rückklimatisieren, 24 Stunden Wasserlagerung bei 20 °C Wassertemperatur	Oberflächenwasser entfernt, nass

Zur Beurteilung der Verklebungsqualität wurden die Bruchflächen nach dem Scherzugversuch auf den jeweils entstandenen Holzbruchanteil untersucht. Ein hoher Holzbruchanteil deutet auf eine hohe Verklebungsqualität hin, während ein reiner Klebstoffbruch auf eine weniger gute Verklebung schließen lässt. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die Beurteilung des Holzbruchanteils an mit PF verleimten Prüfkörpern, wobei der Holzbruchanteil von links (reines Klebfugenversagen) nach rechts (reines Holzversagen) zunimmt. Die Einteilung des Holzbruchanteils erfolgte in fünf Klassen (0 % = reines Klebfugenversagen, 25 % = Überwiegendes Klebfugenversagen, 50 % = Holz-Klebfugenversagen, 75 % = Überwiegendes Holzversagen und 100 % = reines Holzversagen).

1. Klebfugenversagen (0 %)
2. Überwiegendes Klebfugenversagen (25 %)
3. Holz-Klebfugenversagen (50 %)
4. Überwiegendes Holzversagen (75 %)
5. Holzversagen (100 %)



Abbildung 7: Bestimmung des Holzbruchanteils (von links nach rechts)

Das Ergebnis der Scherzugfestigkeiten und der dazu gehörenden Holzbruchanteile der ausgewerteten Proben ohne Vorbehandlung wird in Abbildung 8 dargestellt.

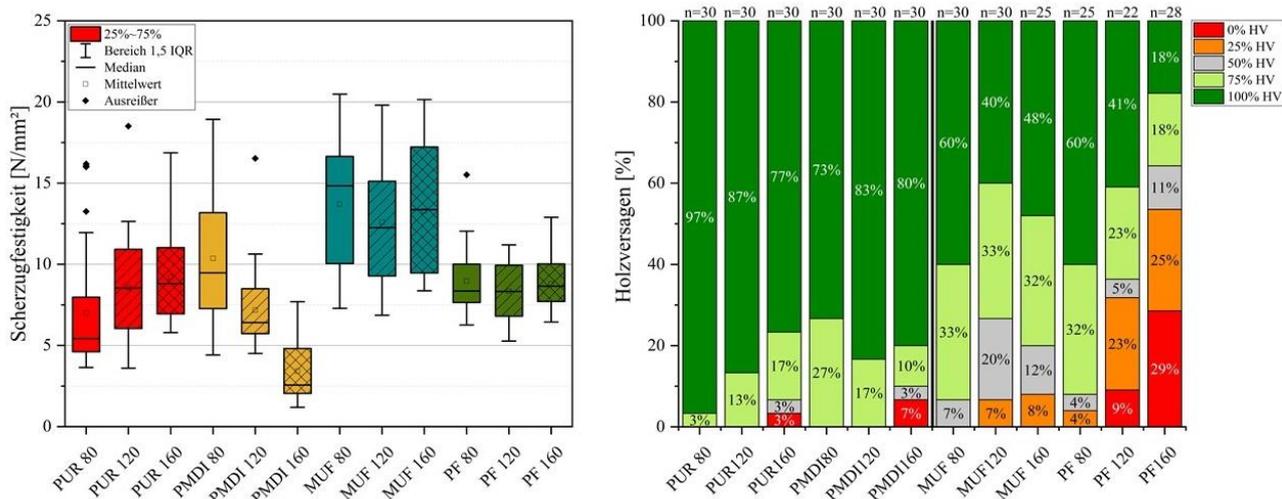


Abbildung 8: Scherzugfestigkeit und Holzbruchanteil (ohne Vorbehandlung)

Es zeigt sich, dass der wasserbasierte Referenzklebstoff MUF unabhängig von der Klebstoffauftragsmenge vergleichsweise hohe Scherzugfestigkeiten erreicht. Die Scherzugfestigkeit des ebenfalls wasserbasierten Referenzklebstoffs PF liegt unter der von MUF und auf ähnlichem Niveau wie die der Varianten PUR 80, PUR 160 sowie pMDI 80. Es zeigt sich bei den mit PUR verklebten Sperrhölzern ein Anstieg der Scherzugfestigkeit mit steigender Klebstoffmenge, während die mit pMDI verarbeiteten Sperrhölzer eine starke Abnahme der Scherzugfestigkeit mit zunehmender Klebstoffmenge aufweisen. Das gegenläufige Verhalten bei einer Änderung der Klebstoffmenge dieser sehr ähnlichen Klebstoffsysteme kann bisher nicht erklärt werden. Das rechte Diagramm in Abbildung 8 zeigt die entsprechenden Holzbruchanteile der untersuchten Prüfkörper. Entgegen den Erwartungen wurde bei den mit Isocyanat-basierten Klebstoffen hergestellten Brett-schichthölzern ein signifikant höherer Holzversagensanteil festgestellt. Bei den wasserbasierten Klebstoffen PF und MUF waren dagegen die Versagensanteile in der Leimfuge deutlich höher. Es wird vermutet, dass auch dieses Ergebnis durch die höhere Verdichtung der Furniere bei Verwendung wasserbasierter Systeme erklärt werden kann. Das Ergebnis der Scherzugprüfungen unter den strengsten Lagerbedingungen wird in Abbildung 9 gezeigt. Aus Gründen des Berichtsumfanges wird auf die Darstellung der Ergebnisse für die drei anderen Lagerungsbedingungen verzichtet.

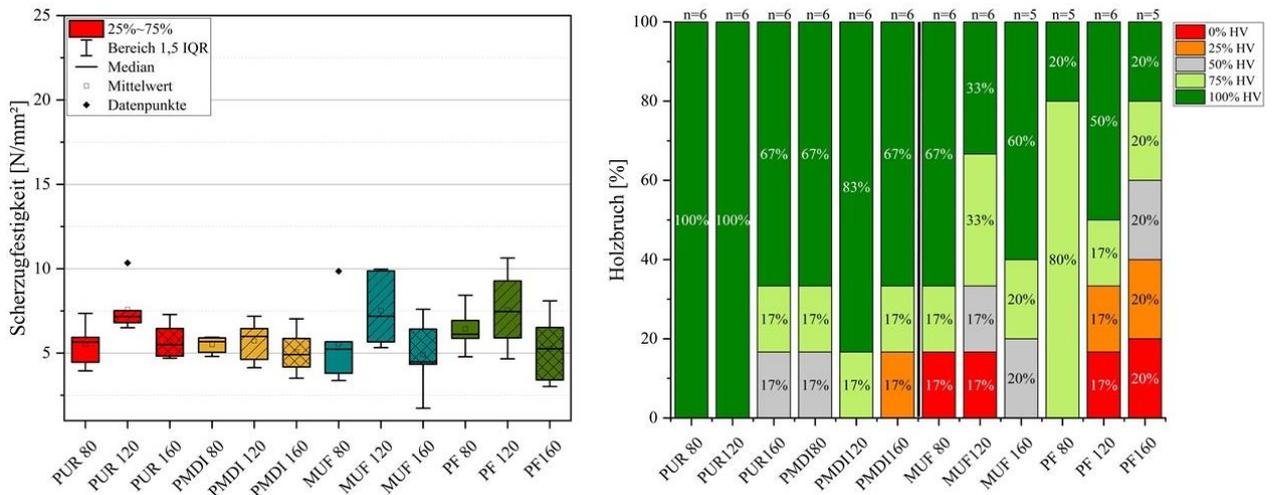


Abbildung 9: Scherzugfestigkeit und Holzbruchanteil (mit Vorbehandlung: 4 Stunden in Wasser kochen, 18 Stunden bei 60 °C trocknen, 4 Stunden in Wasser kochen, auf Normalklima rückklimatisieren, 24 Stunden Wasserlagerung bei 20 °C Wassertemperatur)

Das linke Diagramm mit den ermittelten Scherzugfestigkeiten nach dem durchgeführten Lagerungsschema zeigt, dass die thermische und hygrische Belastung bei den Referenzklebstoffen PF und MUF zu einer deutlichen Abnahme der Scherzugfestigkeiten führt. Auch die Isocyanat-basierten Systeme erreichen nicht mehr die hohen Festigkeiten ohne zuvor durchgeführtes Lagerungsschema. Mit Ausnahme des PUR-Klebstoffs mit einer Auftragsmenge von 120 g/m<sup>2</sup> liegen die Werte auf einem ähnlichen Niveau. Nach dem Lagerungsschema werden Scherzugfestigkeiten von über 10 N/mm<sup>2</sup> von keinem Klebstoff mehr erreicht. Betrachtet man die Variation der Klebstoffmenge unabhängig vom Klebstofftyp, so zeigt sich, dass die mittlere Einstellung (120 g/m<sup>2</sup>) jeweils die höchste Scherzugfestigkeit aufweist. Auch nach der Lagerung ist bei dieser Klebstoffmenge zu erkennen, dass die Referenzklebstoffe höhere Mittelwerte der Scherzugfestigkeit erreichen. Auffällig ist auch, dass sich die enormen Streuungen der Messwerte bei der Durchführung der Prüfung ohne Vorbelastung verringert haben. Die Auswertung der Holzbruchanteile im Versuch nach Lagerung zeigt ein ähnliches Bild wie im Versuch ohne Lagerung. Auch hier ist zu erkennen, dass der Holzbruchanteil bei den mit Isocyanat-haltigen Klebstoffen (PUR 80, PUR 120) hergestellten Sperrhölzern höher ist und bis zu 100 % beträgt.

### Verklebung von Splint- und Kernholz

Eine besondere Herausforderung an die Klebstoffsysteme stellt das Kernholz der Kiefer dar. Durch die größeren Dimensionen der Kiefernstarkholzstämmen fallen vermehrt reine Kernholzurniere an. Der hohe Harzgehalt kann zum einen bei der Verpressung dazu führen, dass austretendes Harz die Entgasung der Platten während der Klebstoffaushärtung behindert. In der Folge kann es sowohl durch den entstehenden Wasserdampf im Fall der wasserbasierten PF- / MUF-Harze als auch durch das bei der Reaktion des Isocyanats entstehende CO<sub>2</sub> zum Aufplatzen der Furniere kommen. Zum anderen kann der höhere Gehalt an Extraktstoffen im Kernholz die Benetzung sowie das Eindringen der Klebstoffe in die Furnieroberfläche als auch die Aushärtung der Klebstoffe beeinflussen. Abbildung 10 zeigt die Problematik des austretenden Harzes an den Seiten einer Sperrholzplatte. In diesem Bereich wird die Entgasung des bei der Aushärtung von pMDI- und PUR-Klebstoffen freigesetzten CO<sub>2</sub> behindert und es kann zum Abplatzen der Furniere kommen. Auch bei der Verwendung der wasserbasierten Referenzklebstoffe besteht die Gefahr des Aufplatzens, da in diesen Fällen der Wasserdampfdruck zu einem Bersten führen kann. Ein weiterer Makel, der durch unterschiedlich harzreiche Furnierbereiche entsteht, zeigt sich auf der Plattenoberfläche. Diese weist zwei optisch und haptisch unterschiedliche Bereiche auf.



Abbildung 10: links: seitlich austretendes Harz; rechts: Sperrholzoberfläche bei Heißverpressung harzreicher Furniere

Um den Einfluss des Kernholzes im Vergleich zum Splintholz auf die Verklebung zu untersuchen, wurden neben reinen Kernholz furnieren auch Probekörper aus Vollholz nach DIN EN 302 hergestellt (vgl. Abbildung 11) und in einer speziell angefertigten Form verpresst. Die Presstemperatur betrug 140 °C, der Pressdruck 0,8 N/mm<sup>2</sup> bei einer Presszeit von 20 Minuten. Das verwendete Rundholz enthielt sowohl im Splint als auch im Kernholz nur geringe Harzmengen.

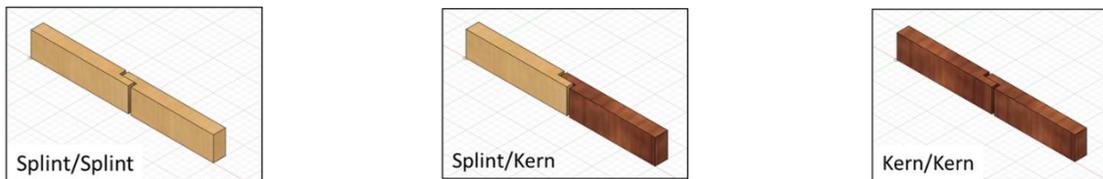


Abbildung 11: Probekörper nach DIN EN 302 aus Vollholz

Das Ergebnis der Prüfung der Zugscherfestigkeit ist in Abbildung 12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass alle mit dem MUF-Harz verklebten Proben hohe Scherzugfestigkeiten und eine geringe Streuung der Werte aufweisen. Auch die mit dem PUR-Klebstoff verklebten Splintholzproben weisen hohe Festigkeitswerte bei geringer Streuung der Werte auf. Sowohl die aus Splintholz und Kernholz als auch die aus Kernholz und Kernholz verklebten Proben zeigten einen deutlichen Abfall der erreichten Scherzugfestigkeiten, wenn sie mit dem PUR-Klebstoff verklebt wurden. Die Auswertung der Bruchflächen ergab bei der überwiegenden Anzahl dieser Proben nur einen sehr geringen Holzbruchanteil, was mit den ermittelten Festigkeiten in Einklang steht. Es ist daher davon auszugehen, dass die Inhaltsstoffe des Kernholzes die Verklebung mit dem hier gewählten PUR-Klebstoff negativ beeinflussen.

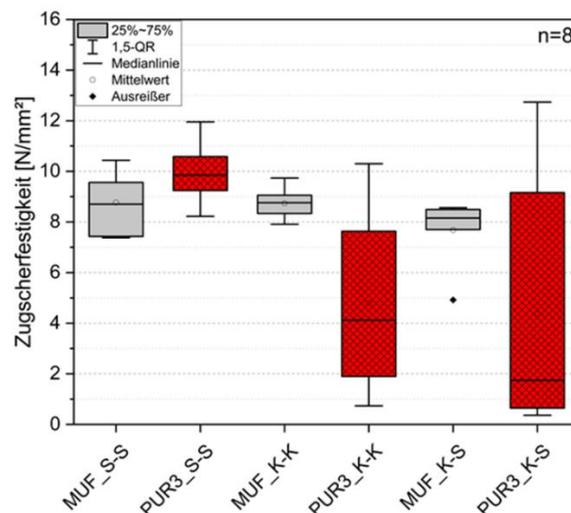


Abbildung 12: Zugscherfestigkeit Splint- Kernholzverklebung nach DIN EN 302

Die reine Zugfestigkeit von Sperrholz aus dem Splint- und Kernbereich von Kiefernsperrholz wurde ebenfalls untersucht. Dazu wurden 5-schichtige Sperrholzplatten aus 2 mm dicken Furnieren aus dem reinen Splint- und Kernbereich von Kiefernsperrholz hergestellt. Als Pressparameter wurden eine Presstemperatur von 140°C, ein Pressdruck von 1,0 N/mm<sup>2</sup> und eine Presszeit von 20 Minuten verwendet. Aus den Sperrholzplatten wurden Zugproben in Anlehnung an DIN 52337 hergestellt und mit einer 100 kN Universalprüfmaschine der Firma Zwick-Roell unter reiner Zugbelastung geprüft. Die Länge der Probekörper betrug 200 mm, die Abmessungen in der Mitte des Probekörpers waren 12 mm breit und etwa 10 mm dick (Plattendicke). Die

Form des Prüfkörpers wird in Abbildung 13 dargestellt. Zur präzisen Herstellung der Prüfkörper wurde die institutseigene Portal-CNC-Fräse der Firma Haase mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,015$  mm eingesetzt.

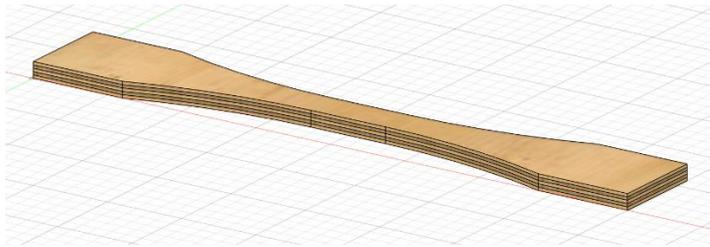


Abbildung 13: Geometrie der verwendeten Zugstäbe in Anlehnung an DIN 52337

Die gemessenen Zugfestigkeiten sind in den Abbildungen 14 und 15 als Maximalkraft sowie als querschnittsbezogene Festigkeit dargestellt. Aus beiden Darstellungen wird deutlich, dass bei der Verklebung mit dem PUR-Klebstoff eine geringere Kompression - insbesondere bei den Kernholzfurnieren – stattfand, da die Festigkeit in Relation zur Maximalkraft geringer war. Bezogen auf die Maximalkraft liegen die reinen Zugfestigkeiten bei Verwendung von Kernholz bei allen Klebstoffen höher. Die auf den Querschnitt bezogenen Zugfestigkeiten der reinen Splint- und Kernhölzer liegen jedoch beim PUR-Klebstoff auf einem ähnlich hohen Niveau. Die Mittelwerte der Zugfestigkeiten der mit Splintholzfurnieren hergestellten Sperrholzplatten liegen unabhängig vom verwendeten Klebstoff bei ca. 40 N/mm<sup>2</sup>. Die mit Kernholzfurnieren hergestellten Sperrholzproben erreichten bei Verwendung des MUF-Klebstoffes eine mittlere Festigkeit von 45 N/mm<sup>2</sup> und bei Verwendung des PF-Harzes sogar etwa 48 N/mm<sup>2</sup>.

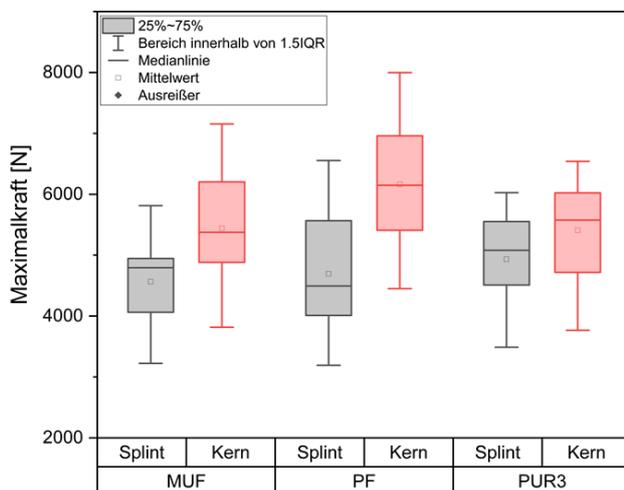


Abbildung 14: Maximalkraft im Zugversuch, 5-lagiges Sperrholz Splint und Kern

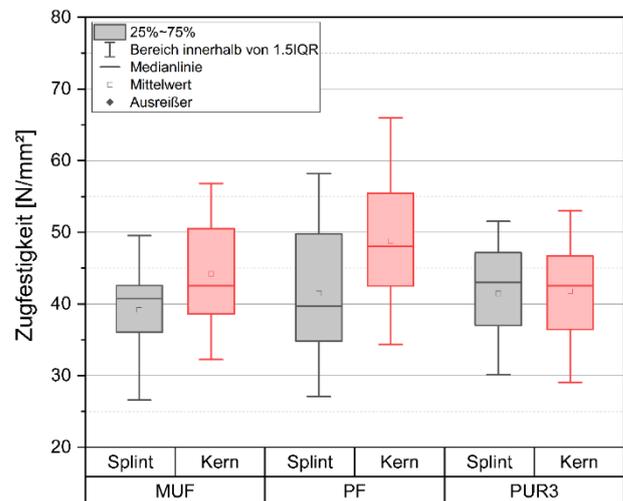


Abbildung 15: Zugfestigkeit im Zugversuch, 5-lagiges Sperrholz Splint und Kern

Der Versuch zeigte aufgrund der Probengeometrie und des Belastungsszenarios sowie aufgrund von Inhomogenitäten und wachstumsbedingten Materialfehlern in den Furnieren eine große Streuung der Werte. So erreichten die schwächsten Proben nur Zugfestigkeiten von unter 30 N/mm<sup>2</sup>, während die höchsten Zugfestigkeiten über 60 N/mm<sup>2</sup> lagen. Die höhere Festigkeit des Kernholes kann vermutlich auf eine höhere Dichte des Kernholzes zurückgeführt werden.

### *Einfluss des Lagenaufbaus auf die Zug- und Biegefestigkeit*

Der Lagenaufbau von Sperrholz hat einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, da das Verhältnis von Längs- zu Quernurnieren sowie die Anzahl der Leimfugen variiert. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Lagenaufbauten zu untersuchen, wurden ein, zwei und drei Millimeter dicke Furniere aus dem Splintbereich der Kiefer geschält und vom Fraunhofer WKI in Braunschweig zur Verfügung gestellt. Anschließend wurden unter Variation der Lagenstärken Sperrholzplatten mit einer Zieldicke von 9 mm hergestellt. Als Klebstoff wurde PUR2 verwendet. Es wurden sowohl die Zugfestigkeit in Anlehnung an DIN 52337 als auch die Biegefestigkeit nach DIN EN 310 bestimmt. Das Ergebnis wird jeweils einerseits in Form der gemessenen Rohwerte und andererseits, zum Vergleich, mit dem Anteil an längsgerichtetem Furnier gewichtet angegeben. Die relativen Anteile an Längs- zu Quernurnier der zehn untersuchten Kombinationen werden in Tabelle 3 wiedergegeben.

Tabelle 3: Relative Anteile an längs- und quergerichtetem Furnier

Lagenaufbau [mm]	Anteil längsgerichtet	Anteil quergerichtet
1-1-1-3-1-1-1	0,44	0,55
1-1-2-1-2-1-1	0,66	0,33
2-1-1-1-1-1-2	0,66	0,33
3-1-1-1-3	0,77	0,22
1-1-1-1-1-1-1-1-1	0,55	0,44
3-3-3	0,66	0,33
1-2-3-2-1	0,55	0,44
1-3-1-3-1	0,33	0,66
2-2-1-2-2	0,55	0,44
2-1-3-1-2	0,77	0,22

Abbildung 16 zeigt zunächst die Darstellung der Werte der absoluten Zugfestigkeiten (linkes Diagramm) und der mit den Längs- zu Queranteilen gewichteten Zugfestigkeiten (rechtes Diagramm). Die ermittelten Zugfestigkeiten und gewichteten Zugfestigkeiten zeigen, dass einige der Schichtaufbauten geringere Zugfestigkeiten als der Mittelwert aller Aufbauten aufweisen (Gesamtmittelwert Zugfestigkeit: 45,4 N/mm<sup>2</sup>; Gesamtmittelwert gewichtete Zugfestigkeit: 17,2 N/mm<sup>2</sup>). Auffallend niedrige Werte zeigte die Kombination 3 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 3 mm (längs). Hier wurde nur etwa die Hälfte der mittleren gewichteten Zugfestigkeit aller Varianten erreicht. Auch die Variante mit dem Lagenaufbau 2 mm (längs), 1 mm (quer), 3 mm (längs), 1 mm (quer), 2 mm (längs), die aufgrund ihres hohen Anteils an längsgerichtetem Furnier bei den absolut gemessenen Zugfestigkeiten die höchsten Werte aufwies, lag bei den gewichteten Werten unter dem Gesamtmittelwert. Mittelwerte der gewichteten Zugfestigkeit über 20 N/mm<sup>2</sup> wurden bei den Varianten mit 1 mm (längs), 2 mm (quer), 3 mm (längs), 2 mm (quer), 1 mm (längs) Furnieraufbau sowie mit 1 mm (längs), 3 mm (quer), 1 mm (längs), 3 mm (quer), 1 mm (längs) Furnieraufbau erreicht. Erwartungsgemäß zeigte der Aufbau mit 3 mm (längs), 3 mm (quer), 3 mm (längs) Furnier deutlich höhere absolute Zugfestigkeiten als der Aufbau mit neun Furnieren à 1 mm Dicke.

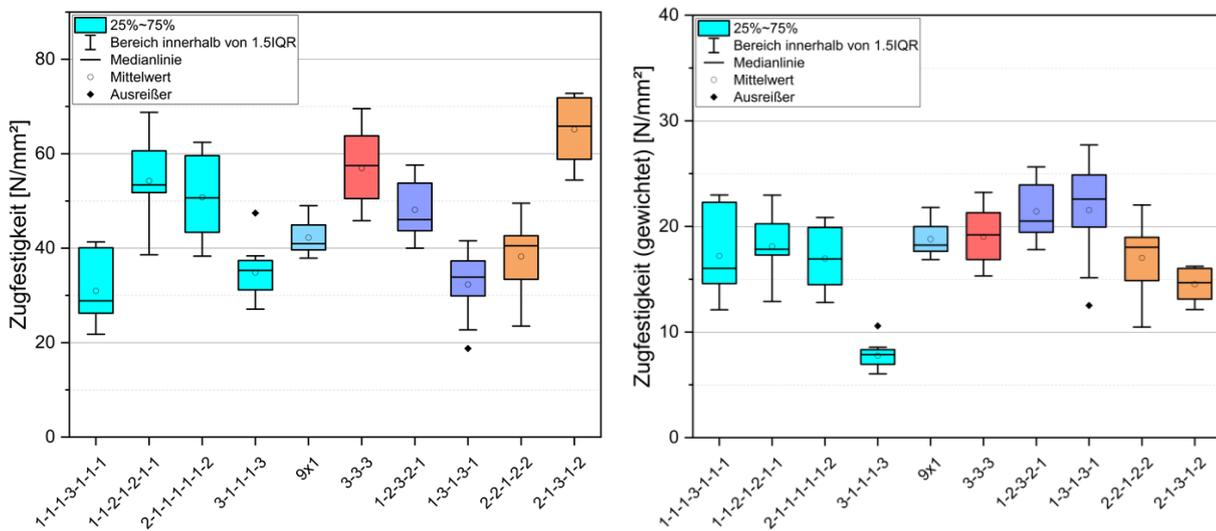


Abbildung 16: Zug- und gewichtete Zugfestigkeit von 9mm starken Sperrhölzern mit unterschiedlichem Lagenaufbau (Klebstoff: PUR2), die Beschriftung auf der horizontalen Achse gibt den Aufbau mit der Lagendicke in Millimetern an, die außenliegenden Furniere sind in der Prüfung jeweils längsgerichtet, n=8

Werden jedoch die gewichteten Werte betrachtet, so zeigt sich, dass beide Aufbauten annähernd auf dem gleichen Niveau liegen. Der Lagenaufbau mit den meisten Furnieren (9) mit je 1 mm Dicke ergab die geringste Streuung der Werte (Abbildung 17, links). Entgegen den Erwartungen zeigten die Lagenaufbauten mit 1 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 3 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs) sowie 2 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 2 mm (längs) hohe Streuungen der Werte. Dies ist ungewöhnlich, da die hohe Anzahl von Furnieren (7) bei diesen Aufbauten erwartungsgemäß zu einer besseren Homogenisierung der Materialeigenschaften und damit zu einer geringen Streuung der Werte führen sollte. Das Ergebnis der analog durchgeführten Biegeversuche ist in Abbildung 17 dargestellt.

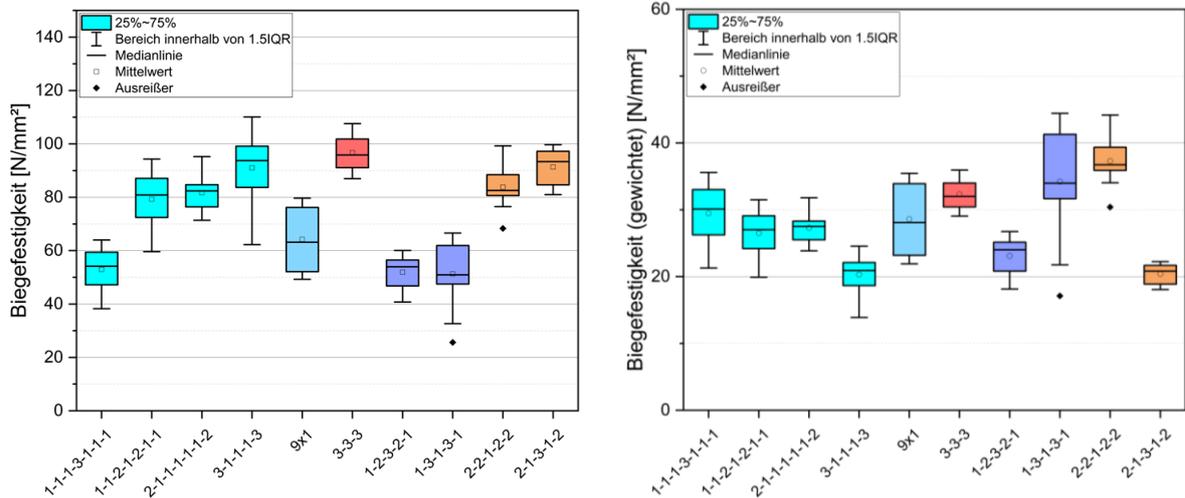


Abbildung 17: Biege- und gewichtete Biegefestigkeit von 9mm starken Sperrhölzern mit unterschiedlichem Lageraufbau (Klebstoff: PUR2), die Beschriftung auf der horizontalen Achse gibt den Aufbau mit der Lagendicke in Millimetern an, die außenliegenden Furniere sind in der Prüfung jeweils längsgerichtet, n=8

Die Betrachtung der Absolutwerte zeigt, dass die Konstruktion mit 3 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 3 mm (längs), die bei der Zugbelastung nur geringe Werte erreicht, zu den Varianten mit den höchsten Werten im Biegefall gehört. In diesem Lastfall zeigte sich die hohe Wirkung gegen eine Biegebelastung der äußeren 3 mm Längsfurniere. Die Varianten mit Furnierlageraufbau 3 mm (längs), 3 mm (quer), 3 mm (längs) sowie die Aufbauten mit 2 mm (längs), 2 mm (quer), 1 mm (längs), 2 mm (quer), 2 mm (längs) und 2 mm (längs), 1 mm (quer), 3 mm (längs), 1 mm (quer), 2 mm (längs) erreichten ebenfalls hohe Werte. Betrachtet man jedoch die gewichteten Werte, so zeigt sich, dass die letztgenannte Konstruktion zu denjenigen mit der geringsten relativen Biegefestigkeit gehört. Ebenfalls niedrige Werte der gewichteten Biegefestigkeit haben die Kombinationen mit 1 mm (längs), 3 mm (quer), 1 mm (längs), 3 mm (quer), 1 mm (längs) Furnierlagen und der unter Zugbelastung nur geringe Werte erreichende Aufbau mit 3 mm (längs), 1 mm (quer), 1 mm (längs), 1 mm (quer), 3 mm (längs) Furnierlagen. Hinsichtlich der Beanspruchung ergibt sich im Biegebeanspruchungsfall für die Varianten mit den Aufbauten 3 mm (längs), 3 mm (quer), 3 mm (längs) und 9 Furnieren mit je 1 mm Dicke ein gegenüber der Zugbeanspruchung umgekehrtes Bild. Hier zeigt der erstgenannte Aufbau deutlich geringere Streuungen der Werte als der letztgenannte Aufbau. Die gewichteten Biegefestigkeiten dieser beiden Konstruktionen liegen wie im Zuglastfall nahezu auf vergleichbarem Niveau, wobei die Biegefestigkeit des Aufbaus mit 3 mm (längs), 3 mm (quer), 3 mm (längs) geringfügig höher liegt.

### Einbau von Modifizierungslagen

In den 5-schichtigen Sperrholzaufbau aus 2 mm dicken Furnieren wurden verschiedene Modifizierungsschichten eingebaut, um eine Änderung der Materialeigenschaften oder ein festigkeitssteigerndes Ergebnis zu erreichen. Der Einbau der Lagen erfolgte immer unterhalb der äußersten Furnierlagen. Der Grund dafür bestand darin, durch einen möglichst großen Abstand von der neutralen Faser eine möglichst hohe Wirkung im Biegebelastungsfall zu erzielen und gleichzeitig die Holzoberfläche des Sperrholzes zu erhalten. Als Modifizierungsmaterialien wurden Basaltfasermatten, Aramidfasergewebe, Kohlefasergewebe, Glasfasergewebe sowie Jutefasergewebe eingesetzt. Außerdem wurden verschiedene Kunststoffschichten aus dem 3D-Druckverfahren getestet. Die innerhalb dieser Untersuchung erprobten Materialien werden in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Eingesetzte Modifizierungsmaterialien

Material	Abkürzung
Basaltfasermatten	Bas
Aramidfasergewebe	AR
Kohlefasergewebe	CF
Glasfasergewebe	GF
Jutefasergewebe	JU
Thermoplastisches Urethan	TPU
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS
Polyamid 6	PA6
Polyamid 6 mit 25 % Kohlefaseranteil	PA6-CF25

Als Klebstoffe wurde der Polyurethan-Klebstoff PUR2 sowie der auf polymerem Diphenylmethandiisocyanat basierende Klebstoff pMDI1 verwendet (vgl. Tabelle 1). Grundsätzlich konnten die Modifizierungslagen gut in

oder zwischen das Splintholz der Kiefer eingepresst und verklebt werden. Schwierigkeiten ergaben sich bei den 3D-gedruckten Lagen aus Polyamid, bei denen es zu Lücken in der Fügezone kam. Bei den anderen Materialien wurden überwiegend gut ausgebildete und geschlossene Leimfugen erzielt. Die Verpressung in der Heißpresse erfolgte bei einer Temperatur von 140°C und einem Druck von 1 N/mm<sup>2</sup>. Die Presszeit betrug 20 Minuten. Abbildung 18 zeigt beispielhaft eine Basaltfasermatte (links) sowie unterschiedlich stark vergrößerte mikroskopische Schnittaufnahmen durch das fertig verpresste Sperrholz (mitte und rechts).

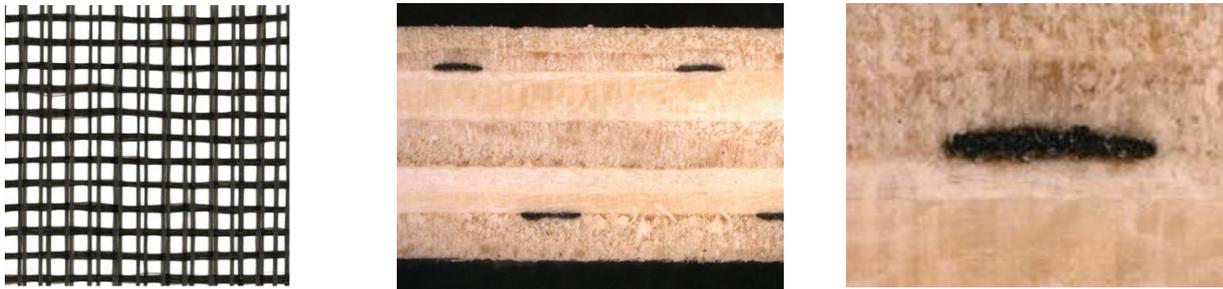


Abbildung 18: Basaltfasermatte (links); mikroskopische Schnittaufnahme von Sperrholz mit eingepresster Basaltfasermatte (mitte) und (rechts)

Die vergrößerte Schnittaufnahme des mit Basalt modifizierten Sperrholzes zeigt deutlich, dass sich die Basaltfasern in die parallel verlaufenden Holzfasern eindrücken. Senkrecht zur Holzfaser sind sie nicht eingedrückt und liegen auf. Das Holz wird also bei der Verarbeitung lokal und abhängig vom Faserverlauf stark verformt. Dies könnte zu einer Schädigung oder zu einer Verminderung des festigkeitssteigernden Potenzials der Basaltfasern führen. Andererseits sind die Leimfugen durch das vollständige Eindrücken der Basaltfasern in die parallel-laufenden Holzfasern geschlossen und weisen keine Lücken oder Hohlräume auf. Das Ergebnis der Prüfungen der Zug- und Biegefestigkeiten ist in Abbildung 19 dargestellt. Als Referenzklebstoffe werden die wasserbasierten PF- und MUF-Harze sowie der für die Verklebung der Modifizierungsschichten verwendete Klebstoff PUR2 angegeben.

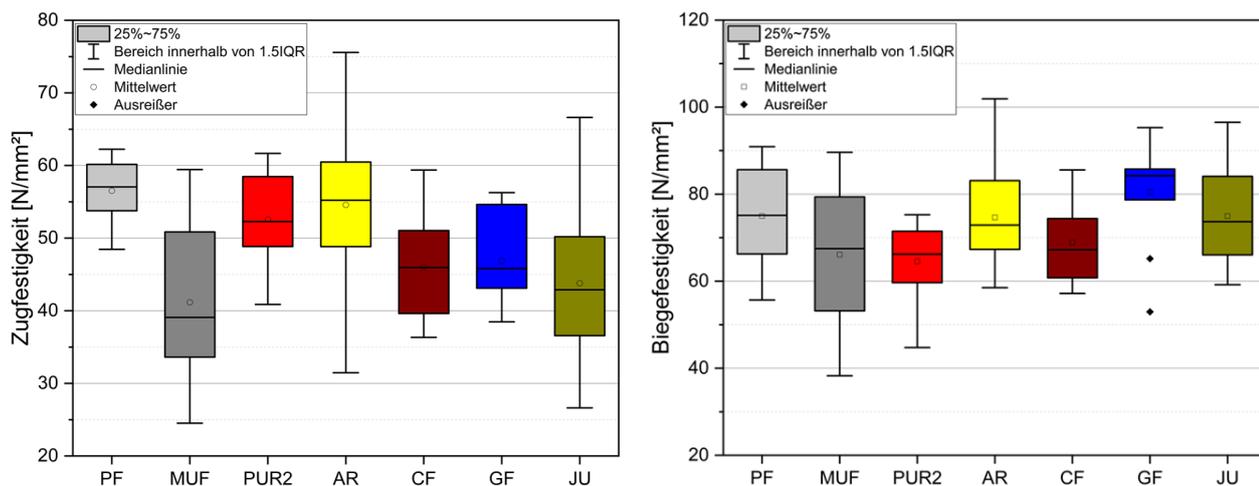


Abbildung 19: Zug- und Biegefestigkeit, 5-lagiges Sperrholz mit 2 mm Furnieren und Modifizierungsschichten, PUR2 (n=24)

Hinsichtlich der Zugfestigkeit zeigt sich, dass nur die mit Aramidfasern modifizierten Sperrhölzer einen geringfügig höheren Wert aufweisen als die mit dem Referenzklebstoff PUR2 hergestellten Sperrhölzer. Die Streuung der Zugfestigkeiten der mit Aramidfasern modifizierten Proben ist jedoch sehr groß. Die mit Kohlefaser, Glasfaser und Jutefaser modifizierten Sperrholzproben wiesen eine geringere Festigkeit als die PUR-Referenz auf. Eine verstärkende Wirkung der Lagen konnte nicht festgestellt werden, im Gegenteil, die mittlere Zugfestigkeit nahm mit Ausnahme der Aramid-modifizierten Proben ab. Der Grund für die Abnahme der Zugfestigkeit könnte darin liegen, dass die Modifizierungsschichten zu dickerem Sperrholz führen, ohne eine wesentliche Verstärkung unter reiner Zugbelastung zu bewirken, so dass die auf den Querschnitt bezogene Zugfestigkeit geringer ist als die des Referenzmaterials aus reinen Kiefernurnieren. Im Biegefall ergibt sich ein anderes Bild. In diesem Lastfall wirken die Lagen verstärkend und die Biegefestigkeit aller Modifikationen liegt hier oberhalb der Referenz. Insbesondere die mit Glasfasergewebe modifizierten Proben ergaben mittlere Festigkeitswerte von etwa 80 N/mm<sup>2</sup>. Dies entspricht einer Steigerung der Biegefestigkeit von ungefähr 20 % gegenüber der Referenz. Die Festigkeitssteigerung durch die Aramidmodifikation sowie durch die naturfaserbasierte Modifikation mittels Jutegewebe lag im Bereich von etwa 10 %.

Abbildung 20 zeigt das Ergebnis des Biegeversuchs für die Modifikation mit 3D-gedruckten Kunststoffstrukturen und Basaltfaserplatten. Als Referenzklebstoff für die Verklebung der Varianten wurde in

dieser Versuchsreihe der Isocyanat-basierte Klebstoff pMDI1 verwendet. Zusätzlich sind die beiden wasserbasierten Referenzklebstoffe PF und MUF dargestellt.

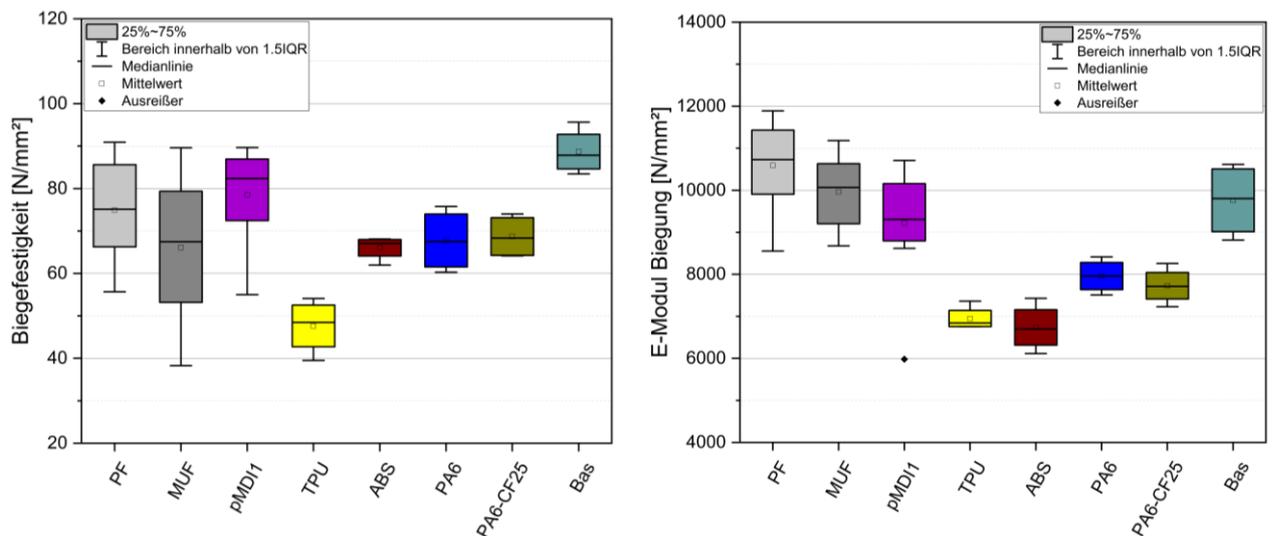


Abbildung 20: Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul, 5-lagiges Sperrholz mit 2 mm Furnieren und Modifizierungsschichten, pMDI1 (n=10)

Es wird deutlich, dass alle Varianten auf Basis der 3D-gedruckten Kunststoffstrukturen - auch der reißfeste technische Kunststoff PA6 mit 25 % Kohlefaseranteil geringere Biegefestigkeiten aufweisen als die pMDI-Referenz, die nur Holz furnier enthält. Die geringsten Biegefestigkeiten weist erwartungsgemäß die Variante mit Lagen aus thermoplastischem Urethan (TPU) auf. Dieses Material ist in seinen elasto-mechanischen Eigenschaften und in Bezug auf die Festigkeit mit den ausgehärteten Klebstoffen auf Isocyanatbasis selbst vergleichbar. Auffallend ist, dass die Variante mit ABS ähnlich hohe Biegefestigkeiten wie die PA6-Varianten aufweist, die mit ABS modifizierten Proben jedoch hinsichtlich der Elastizität im Bereich der TPU-Varianten liegen. Eine Erhöhung der Biegefestigkeit wurde nur durch die wesentlich steiferen Basaltfasern erreicht. Hier wurden die höchsten Biegefestigkeiten gemessen. Die mittlere Biegefestigkeit lag bei einem Wert von etwa 90 N/mm<sup>2</sup> bei gleichzeitig geringer Streuung der Werte. Dies entspricht einer Erhöhung der Festigkeit um >10 % im Vergleich zur Referenz. Diese Werte liegen auch über denen der mit Glasfasergewebe und PUR2 verklebten Sperrhölzer. Interessant ist, dass das Elastizitätsmodul der Basaltfaservariante nur geringfügig über dem der pMDI-Referenz aus reinem Holz furnier lag.

### Verklebung von Holz mit Metall

Isocyanat-basierte Klebstoffe bieten ein großes Potential zur Verklebung von Holz mit Metallen, da sie einerseits chemisch gut auf metallischen Oberflächen haften und andererseits eine hohe Elastizität im ausgehärteten Zustand erreicht werden kann (vgl. Abschnitt 1). Neben der Anforderung an den Klebstoff, eine starke chemische Bindung (zwischenmolekulare Kräfte) mit der Substratoberfläche einzugehen, bestehen nach der Verklebung hohe mechanische Anforderungen, da die Metallschichten während der Abkühlung schrumpfen. Gleichzeitig verliert das Holz während des Pressvorgangs Feuchtigkeit, die sie beim Abkühlen wieder über die Luftfeuchtigkeit der Umgebung aufnimmt. Das Holz beginnt nach dem Pressvorgang zu quellen und dehnt sich aus. Metall und Holz verändern ihre Dimension in entgegengesetzter Richtung, was zu Spannungen in der ausgehärteten Klebefuge führt, die zum Lösen der Klebverbindung, zu Mikrorissen im Holz und in der Folge zu geringeren Festigkeiten führen kann. Um die Verklebung von Holz mit metallischen Oberflächen zu untersuchen, wurden Probekörper nach DIN EN 302 gefertigt (vgl. Abbildung 22, links). Auf diese Weise kann gezielt die Holz-Metall-Klebefuge belastet und geprüft werden und ein qualitatives Ergebnis erzielt und ausgewertet werden.

Um eine feste Klebverbindung erreichen oder höhere Haftfestigkeiten der Metall-Holz-Klebung zu erzielen zu können, wurden in diesem Zusammenhang zwei unterschiedliche Primersysteme erprobt. Abbildung 21 zeigt das Applikationsprinzip eines Primers. Der Primerfilm kann über die vorhandenen Silane Bindungen mit der Metalloberfläche eingehen, während die Klebstoffmoleküle an die freien funktionellen Gruppen des Primers andocken können. Als Klebstoffe wurden der Polyurethan-Klebstoff PUR3 sowie der früher verwendete Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff (MUF) als wasserbasierter Referenzklebstoff eingesetzt. Die verwendeten Primer Silquest A-1110 und Silquest A-1524 stammen von der Firma Momentive (Momentive Performance Materials Company GmbH). Es handelt sich um Systeme auf Silanbasis. Erstgenanntes Primersystem enthält funktionale Aminogruppen, das letztgenannte Primersystem enthält funktionale Harnstoffgruppen. Auf diese Weise ist es möglich Bindungen mit den jeweiligen funktionalen Gruppen der Klebstoffe einzugehen.

Alle Prüfkörper wurden CNC-gefräst und die Metallkomponenten vor dem Primerauftrag mit einem Kaltreiniger gereinigt. Die Heißverpressung erfolgte in einer selbstgebauten Pressvorrichtung, die ein Verrutschen der Proben verhinderte (vgl. Abbildung 22, rechts).

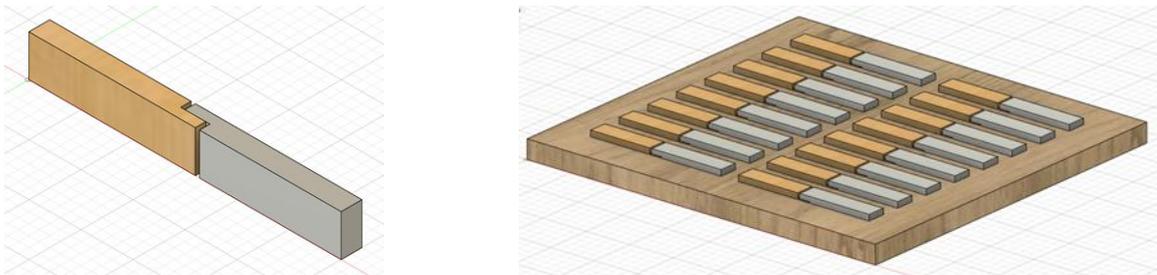
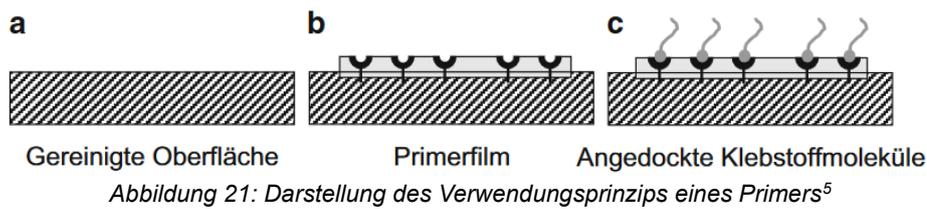


Abbildung 22: links: Holz Aluminium Zugscherprüfkörper, rechts: Prüfkörper-Pressvorrichtung

Abbildung 23 zeigt das Ergebnis der Zugscherfestigkeiten von Holz-Aluminium-Klebungen, die in Anlehnung an DIN EN 302 geprüft wurden.

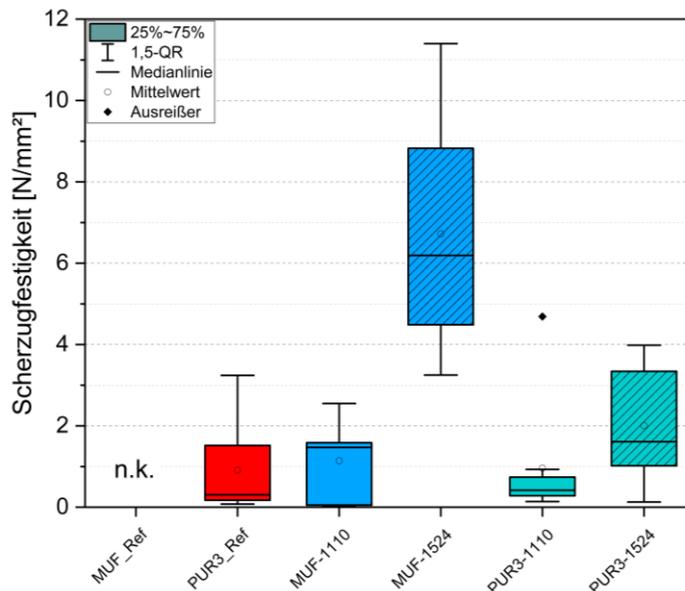


Abbildung 23: Zugscherfestigkeit Holz-Aluminium-Klebungen unter Verwendung von Primern (n.k. = nicht klebbar), n=8

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine einfache Verklebung nur auf Basis des MUF-Klebstoffs (MUF\_Ref) nicht möglich war. Mit dem PUR-Klebstoff war jedoch eine Verklebung zwischen Holz und Aluminium ohne die Anwendung eines Primer möglich. Diese Verklebungen erreichten jedoch nur geringe mittlere Festigkeiten. Ähnlich hohe mittlere Festigkeiten wurden mit Silquest A-1110 in Kombination mit MUF erreicht. Die Verwendung von PUR3 mit Silquest A-1110 ergab etwas niedrigere Festigkeiten. Durch den Einsatz des Primers Silquest A-1524 konnten die Ergebnisse bei beiden Klebstoffen deutlich gesteigert werden. Dies galt insbesondere für den MUF-Klebstoff. Die mittlere Scherfestigkeit des PUR-Klebstoffes konnte durch die Zugabe des Primers etwa verdoppelt werden, liegt aber deutlich unter der mittleren Festigkeit der MUF/Silquest A-1110-Klebung. Es zeigt sich also, dass insbesondere die Harnstofffunktionalität in Kombination mit dem harnstoffhaltigen Klebstoff zu höheren Verbundfestigkeiten führt. Dieses Ergebnis kann auch anhand der Holzreste auf der Aluminiumoberfläche nachvollzogen werden (Abbildung 24).

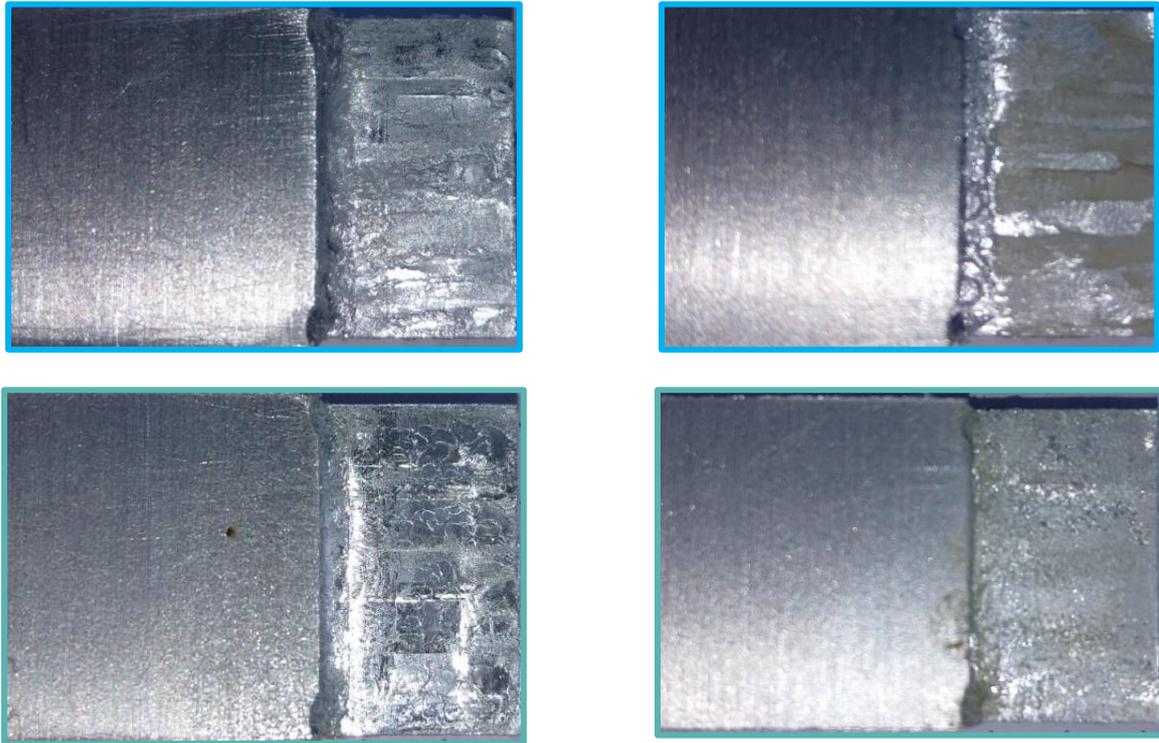


Abbildung 24: Bruchflächen bei der Verklebung mit MUF (oben) und PUR3 (unten), links: Silquest 1110, rechts: Silquest 1524

In Abbildung 24 sind die Bruchflächen bei der Verklebung mit MUF und PUR3 mit den beiden unterschiedlichen Primern dargestellt. Das obere linke Bild zeigt eine Bruchfläche bei Verwendung des Aminosilan-Primers, das obere rechte Bild zeigt eine Bruchfläche bei Verwendung des Ureasilans jeweils in Kombination mit dem MUF-Klebstoff. Die beiden unteren Bilder zeigen analog dazu ein repräsentatives Versagensbild bei der Verklebung von PUR3 mit beiden Primern. Auf den fotografierten Metalloberflächen ist deutlich zu erkennen, dass bei der Verwendung des Ureasilan-Primers (Silquest A-1524) im Vergleich zum Aminosilan-Primer (Silquest A-1110) in Kombination mit dem Klebstoff MUF ein deutlich höherer Anteil an Holzbruch festzustellen ist. Diese Beobachtung korreliert mit den gemessenen hohen Festigkeitswerten bei der Verwendung von Silquest A-1524 in Kombination mit MUF. Auf der Metalloberfläche der PUR3 Klebung mit Silquest A-1110 befinden sich der ausgehärtete Primerfilm, jedoch nahezu keine Klebstoffanhaftungen. Demgegenüber zeigt die Metalloberfläche der PUR3-Klebung mit Silquest A-1524 deutliche Klebstoffanhaftungen, jedoch ohne Holzbruchanteile. Die Beobachtungen der Bruchbilder passen zu den gemessenen Scherzugfestigkeiten.

#### Offene Zeit

Um die möglichen Verarbeitungszeiten vor der Heißverklebung der Furniere mit den Herstellerangaben zu vergleichen, wurden ein PUR-Klebstoff mit niedriger Reaktivität (PUR1) und ein PUR-Klebstoff (PUR3) mit hoher Reaktivität eingesetzt. Die offene Zeit des Klebstoffes PUR1 wird nach Hersteller mit  $30 \pm 5$  Minuten und die des Klebstoffes PUR3 mit  $18 \pm 2$  Minuten angegeben. Nach dem Klebstoffauftrag wurden die Furniere zunächst gelagert, bevor sie zu Sperrholz bei  $140^\circ\text{C}$ ,  $0,8 \text{ N/mm}^2$  für 20 Minuten heiß-verpresst wurden. Die Festigkeit der Verklebung wurde an von Probekörpern nach DIN EN 314 geprüft. Abbildung 25 zeigt das Ergebnis der ermittelten Scherzugfestigkeiten.

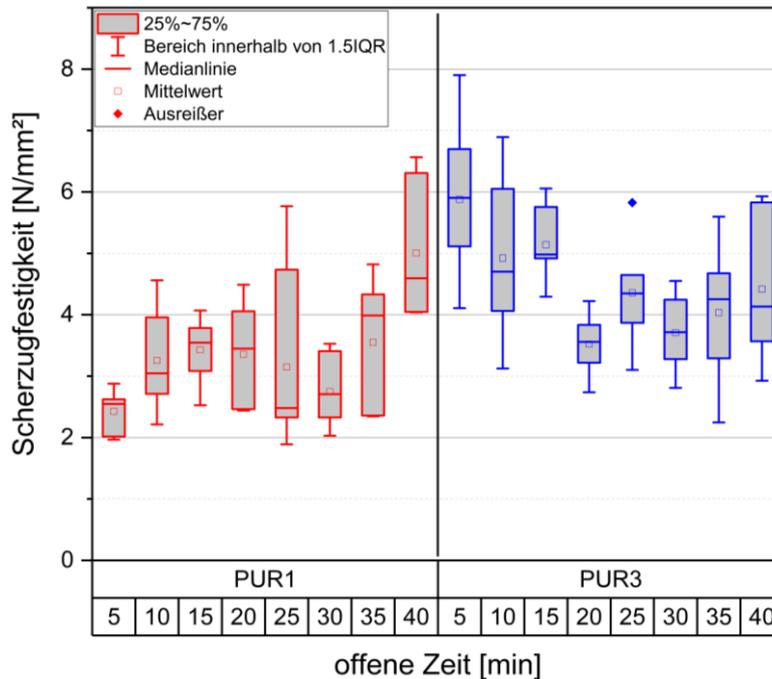


Abbildung 25: Offene Zeit, PUR1: geringe Reaktivität, PUR3: hohe Reaktivität, n=7

Die mittleren Scherzugfestigkeiten zeigen, dass das reaktionsträge System PUR1 bei der kürzesten offenen Zeit (5 Minuten) die geringsten Festigkeitswerte liefert. Im Bereich von 10 bis 35 Minuten liegen die Festigkeitswerte auf ähnlichem Niveau. Die höchsten Festigkeitswerte werden bei der längsten offenen Zeit (40 Minuten) erreicht. Das wesentlich schneller reagierende System PUR3 erreicht die höchsten Festigkeitswerte bei Offenzeiten bis 15 Minuten. Eine Überschreitung dieser Zeit führt zu einem deutlichen Festigkeitsabfall der Klebung. Das Ergebnis zeigt für diese beiden Klebstoffe, dass die Herstellerangaben zur offenen Wartezeit sinnvoll sind und insbesondere bei einem sehr reaktiven Klebstoffsystem diese Angaben keinesfalls überschritten werden sollten.

#### Untersuchung der Prozessparameter Presstemperatur und Pressdruck

Um den Einfluss der Prozessparameter Presstemperatur und Pressdruck zu untersuchen, wurde ein zweidimensionaler Versuchsplan erstellt, der den relevanten Versuchsbereich untersucht (vgl. Tabelle 5). Als Klebstoff wurde PUR2 verwendet. Um den Einfluss von Presstemperatur und Pressdruck auf die Festigkeit besser sichtbar zu machen, wurde ein 7-schichtiger Sperrholzaufbau mit 1,1 mm dicken Buchenfurnieren gewählt. Der Grund für die Verwendung von Buchenfurnieren anstelle von Kiefernstarkholzfurnieren liegt darin, dass deutlich weniger Äste bzw. Astlöcher oder andere Furnierfehler vorhanden sind. Die daraus hergestellten Sperrhölzer weisen geringere Streuungen der mechanischen Kennwerte auf, so dass der Einfluss der Prozessparameter statistisch aussagekräftiger untersucht werden kann. Aus dem gleichen Grund der Streuungsminimierung wurden 7 statt 5 Furnierlagen mit geringerer Dicke verwendet. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Ergebnis nicht ohne weiteres auf Kiefernstarkholz übertragbar ist, da der Einfluss der Prozessparameter und die daraus resultierenden Wechselwirkungen stark von der Holz Anatomie, der Holzchemie sowie den physikalischen Eigenschaften der Holzart abhängen. Darüber hinaus wurden durch eine strenge Vorsortierung fehlerhafte Furniere aussortiert, um möglicherweise dadurch entstehende Ausreißer zu vermeiden. Der Versuchsplan enthält vier kubische Punkte (vgl. Abbildung 27, blau), vier axiale Punkte (vgl. Abbildung 27, rot) und einen zentralen Punkt (vgl. Abbildung 27, grün). Tabelle 5 gibt die genaue Lage der codierten Versuchspunkte sowie die tatsächlichen Presstemperaturen und Pressdrücke wieder. Die Extremwerte für die Presstemperatur liegen bei 43°C und 157°C, der Bereich für den Pressdruck liegt zwischen 0,52 N/mm<sup>2</sup> und 1,08 N/mm<sup>2</sup>. Das Zentrum liegt bei 100°C und 0,8 N/mm<sup>2</sup>. Die Presszeit wurde konstant gehalten und lag bei 20 Minuten. Jeder Prüfpunkt wurde 8-mal wiederholt - es wurden jeweils zwei Platten hergestellt, von denen jeweils 4 Proben entnommen wurden. Die Biegefestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 310 geprüft.

Tabelle 5: Zwei-faktorielles Versuchsdesign, Presstemperatur und Pressdruck

Versuch-Nr.	Wiederholungen	Presstemperatur		Pressdruck	
		kodiert	real	kodiert	real
1	8 (2 Platten x 4 Proben)	-1	60	-1	0,6
2		1	140	-1	0,6
3		-1	60	1	1,0
4		1	140	1	1,0
5		0	100	0	0,8
6		-1,41	43	0	0,8
7		1,41	157	0	0,8
8		0	100	-1,41	0,52
9		0	100	1,41	1,08

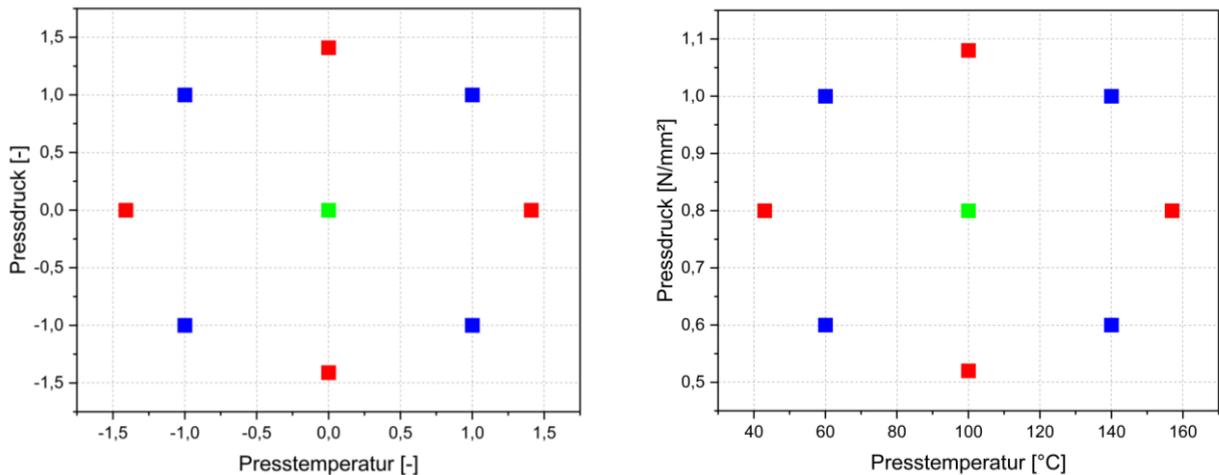


Abbildung 26: Lage der Versuchspunkte, links: kodierte Werte, rechts: reale Werte

Abbildung 28 zeigt das Ergebnis der Versuchsauswertung anhand der berechneten Antwortflächen. Das linke Diagramm basiert auf einer linearen Ansatzfunktion, das rechte Diagramm auf einer quadratischen Ansatzfunktion. Es lässt sich an beiden Modellansätzen erkennen, dass die Kombination aus niedriger Presstemperatur und niedrigem Pressdruck zu geringeren Biegefestigkeiten führte. Außerdem wird für die hier gewählte Spannweite der Faktoren deutlich, dass der Faktor Temperatur einen größeren Einfluss hat als der Faktor Druck. Die relative Differenz zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Wert des Modells für die Festigkeit beträgt etwas weniger als 10 %. Die Güte der Modelle kann numerisch anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  sowie grafisch anhand von Residuenplots beurteilt werden. Die Prüfung auf Signifikanz der Faktoren und Faktor-Wechselwirkung wurde mittels einer ANOVA durchgeführt. Sowohl der lineare als auch der quadratische Ansatz liefern keine hohe Modellgüte ( $R^2_{lin.} \approx 0,11$  und  $R^2_{quad.} \approx 0,16$ ) wobei der quadratische Ansatz einen höheren Anpassungsgrad als der lineare Ansatz zeigt. Die Werte für das vorausgesagte Bestimmtheitsmaß ( $R^2_{pred.}$ ), aus dem hervorgeht, wie gut die Modelle neue Daten vorhersagen können, liegen wesentlich höher ( $R^2_{lin.,pred.} \approx 0,48$  und  $R^2_{quad.,pred.} \approx 0,46$ ). Die Varianzanalyse (ANOVA) zeigt, dass nur der Faktor Presstemperatur auf dem vorgegebenen Konfidenzniveau von 95 % signifikant ist. Die Wirkung des Faktors Pressdruck ist gegen dieses Vertrauenslevel nicht signifikant.

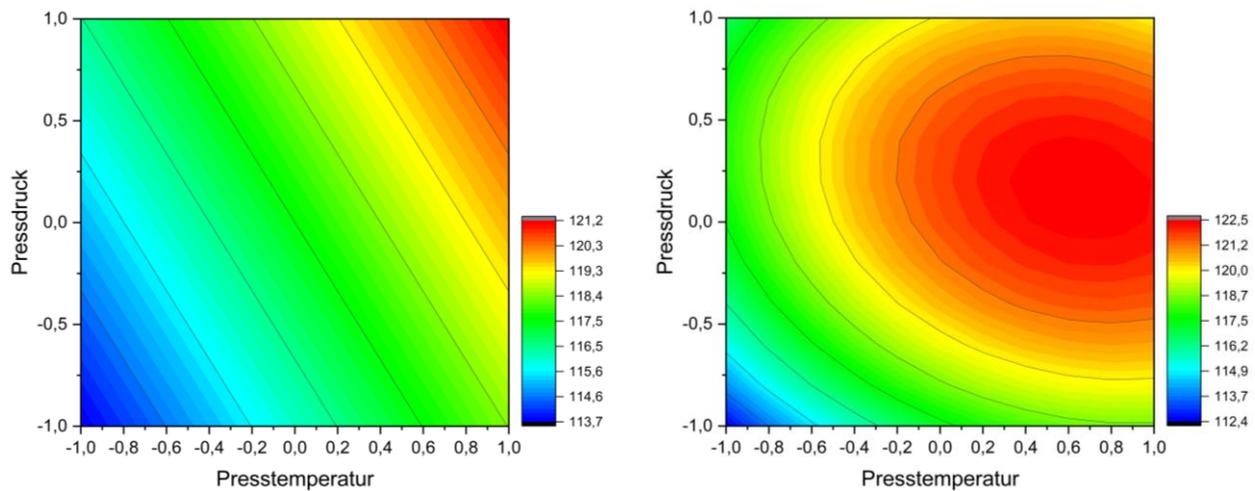


Abbildung 27: Antwortflächen, links: linearer Ansatz, rechts: quadratischer Ansatz

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Verklebung von Kiefern-Starkholzurnieren mit Isocyanat-basierten Klebstoffen war erfolgreich und die Anforderungen an die erforderliche Festigkeit der Verklebung nach DIN EN 314 wurden erreicht. Dies war auch dann der Fall, wenn vor der Prüfung eine hygrische und/oder thermische Belastung der Furniere erfolgte. Im Vergleich zu den Referenzklebstoffen ergaben sich bei der Verwendung von PUR und pMDI geringere Elastizitätsmodule. Bei der Verklebung von Kernholzurnieren traten aufgrund der teilweise hohen Harzgehalte im Kiefern Kern vermehrt Dampfblasen auf, die eine weitere Verwendung der Produkte nicht zuließen. Scherversuche an Kernholz-Kernholz- und Kernholz-Splintholz-Verleimungen zeigten, dass mit PUR geringere Festigkeiten als mit dem Referenzklebstoff MUF erreicht wurden. Die Verklebung von Holz und Metall konnte mit einem Klebstoff auf Isocyanatbasis ohne Verwendung eines Primers erreicht werden. Die Verwendung eines Primers führte zu einer Erhöhung der Klebfestigkeit. Die Überprüfung der möglichen offenen Zeit an einem hochreaktiven und einem reaktionsträgen PUR-Klebstoff zeigte, dass die Herstellerangaben sinnvoll sind und eingehalten werden sollten. Hinsichtlich der Prozessparameter Druck und Temperatur konnte an Buchenfurnieren festgestellt werden, dass höhere Festigkeiten bei höheren Pressdrücken und Temperaturen erreicht werden. Insbesondere die Presstemperatur hat einen signifikanten Einfluss. 1. *DIN EN 314-1, Sperrholz - Qualität Der Verklebung - Teil 1: Prüfverfahren.* (1993).

2. *DIN EN 302-1.* (1992).
3. *DIN EN 310, Holzwerkstoffe - Bestimmung Des Biege-Elastizitätsmoduls Und Der Biegefestigkeit.* (1993).
4. *DIN 52377.* (1978).
5. Pröbster, M. *Elastisch Kleben: aus der Praxis für die Praxis.* (Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013).

## **Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Es wurden im Zuge des Vorhabens keine Erfindungen gemacht, daher erfolgten keine Schutzrechtsanmeldungen. Das Vorhaben hatte keine Entwicklung von Produkten, Verfahren, Anwendungen oder Systemen zum Gegenstand.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Das Vorhaben hatte keine Entwicklung von technischen Produkten, Verfahren, Anwendungen oder Systemen zum Gegenstand.

Die aufgezeigten forstökonomischen Einblicke und Analysemodelle verbessern das Verständnis der ökonomischen Implikationen von Bewirtschaftenden und Waldbesitzenden, womit sie das Potential aufweisen, die Wettbewerbsfähigkeit der Rohholzbereitstellung in Deutschland zu unterstützen. Selbiges gilt für das entwickelte Durchforstungsmodell.

Entsprechende Erkenntnisse wurden in Fach- und berufsständischen Zeitschriften veröffentlicht (Knocke u. a. 2022, 2023, 2025), sowie im Rahmen von Präsentationen vor Anwendern (Forstverwaltungen von Bund und Ländern, Vertretern der Holzverarbeitenden Industrie, forstliche Fachverbände) präsentiert.

Mit verschiedenen Unternehmen der Holzverarbeitenden Unternehmen wurden die Potentiale, die im Bereich Kiefernstarkholz aufkommen diskutiert und Verwertungsmöglichkeiten erarbeitet. Zu nennen ist hier der Industrierversuch durch Steico SE, bei dem nordeutsche Kiefer qualitätsmäßig als Rohstoffquelle eingeschätzt wurde und die Förderung einer Trennung von Kiefernplint- und -kernholz in technologisch entsprechend ausgestatteten Sägewerken. Erste Ansätze wurden bereits in der Praxis umgesetzt. Durch Netzwerkarbeit gilt es hier eine bessere Bündelung des Starkholzsortiments anzustreben und zwischen Verarbeitern und Kunden Kontakte herzustellen, wo schwerpunktmäßige Verwendung von Splint- und Kernholz im Geschäftsmodell integrierbar sind.

Die Akteure der Forst-, Holz- und Naturschutzbranche können nach der ertragskundlich-waldbaulichen Potenzialabschätzung, die räumlich explizit erfolgte, das Ressource- und Habitatangebot der Kiefer besser beurteilen. Insbesondere ist es möglich, Wirtschaftsstandorte auszubauen oder starkholzabhängige Holzbearbeitungsbetriebe anzusiedeln.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Im Rahmen des Projektes ist eine forstökonomische Dissertationsschrift in Arbeit. Im Zuge dieser sind, basierend auf ergänzenden Auswertungen, weitere Erkenntnisse zur Thematik der ökonomischen Implikationen der Kiefernstarkholzproduktion zu erwarten.

Drei Promotionen standen im direkten Zusammenhang mit diesem Projekt. Darüber hinaus wurden mehrere Abschlussarbeiten in Zusammenhang mit diesem Projekt erstellt. Der somit im Rahmen dieses Projektes ausgebildete forstliche Nachwuchs befindet sich mittlerweile in Anschlussverwendung oder konsekutivem Studium. Somit findet bereits ein Praxistransfer statt.

Die vorliegenden Waldentwicklungs-Simulationen unter besonderer Berücksichtigung von Standort und Sterblichkeit verwenden einen detaillierten, klimadynamischen bottom-up Ansatz, der auf Waldentwicklungstypen zurückgreift. Damit können sie dazu dienen, die planmäßige Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung der Bundesregierung weiterzuentwickeln.

### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Das im Rahmen dieses Projektes initiierte Abschlusstreffen (Februar 2025) liefert eine Basis für den zukünftige Austausch der Akteure der Starkholzproduktion und dessen Absatz. Dieses wurde von den Akteuren intensiv zum Austausch über die Forschungsergebnisse aber auch über bestehende und zukünftige Kooperationen genutzt. Ein gemeinsamer Artikel hierzu ist bereits veröffentlicht (Knocke u. a. 2025).

Des Weiteren zeigte sich bei der Fallstudie zur Verwendung eines passiven Exoskelettes bei der motormanuellen Baumfällung und Aufarbeitung, dass dieses prinzipiell im forstbetrieblichen Kontext eingesetzt werden kann, wenn auch nicht mit messbarem Effekt auf die untersuchte Rückenmuskulatur. Weitere Studien zur Verwendung dieses Exoskelettes in anderen forstlichen Anwendungsgebieten auf der einen Seite wären ebenso sinnvoll, wie die Untersuchung weiterer Exoskelette für den motormanuellen Holzeinschlag auf der anderen Seite.

Nach den erfolgten Waldentwicklungs-Simulationen wäre im Anschluss eine erneute Prognose mit neu emulierten Waldbaukonzepten auf Basis der vierten Bundeswaldinventur notwendig.

## e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten

Eine Analyse von Absatzwegen wurde durch die Auswertung des Holzabsatzes nach verschiedenen Absatzgruppen erzielt. In diesem Zuge wurde auch die überproportional fragmentierte Absatzstruktur für Kiefernstarkholz im Vergleich zum Massensortiment ermittelt.

Die Erkenntnisse aus dem in einer Kalkulationstabelle angewandten EPWP sowie dem entwickelten Durchforstungsmodell ermöglichen Forstbetrieben eine Verbesserung der mittelfristigen Betriebsplanung, insb. da erstellte Modelle sensitiv gegenüber betriebsindividuellen Annahmen (z.B. Überlebensrisiken, Begründungskosten) sind. Zudem lässt sich das optimale Produktionsprogramm als Heuristik für Erntedimension oder Standraum ermitteln

Im Rahmen und angelehnt an das Projekt wurden vier forstökonomische Abschlussarbeiten betreut. Zudem führten die forstökonomischen Projektergebnisse auf wissenschaftlichen Tagungen (Forstökonomische Kolloquien 2023 und 2024, Doktorandenkolloquium der Forstökonomie 2024, Risikoworkshops 2023 und 2024) zum Austausch mit dem Fachpublikum.

### Erkenntnisse von Dritten

Die wissenschaftlichen Arbeiten wurden durch einen intensiven Austausch zwischen laufenden Forschungsprojekten zum Thema Kiefernbewirtschaftung begleitet. Der Austausch fand interpersonell sowie im Rahmen der Abschlusspräsentation statt. Entsprechende Ergebnisse daraus wurden in das Projekt eingearbeitet. Die Ergebnisse sind komplementär zu den hier dargestellten Ergebnissen und stehen nicht in Konkurrenz mit diesen.

### Veröffentlichungen

*Veröffentlichungen Teilvorhaben 2:*

- Knocke H (2022): Forschungsprojekt Kiefernstolz - Kiefernstarkholz nachhaltig nutzen. AFZ/Wald 77(14): 14
- Knocke HC, Dirks H, Kopetzky M, Stolze H (2023) Waldumbau und Holznutzung der Kiefer bundeslandübergreifend fördern – Climate-Smart Forestry. BDFaktuell 64(3):10-15. [https://www.bdf-online.de/fileadmin/user\\_upload/www\\_bdf-online\\_de/pdf/bdf\\_aktuell/2023/Artikel-Langversion/BDFaktuellKiefernStolz\\_lang.pdf](https://www.bdf-online.de/fileadmin/user_upload/www_bdf-online_de/pdf/bdf_aktuell/2023/Artikel-Langversion/BDFaktuellKiefernStolz_lang.pdf). Accessed 1 March 2024
- Knocke HC, Hansen J, Nagel R-V, Albert M (2023) Conception of a scenario funnel for simulating climate- & site-sensitive forest development by the example of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Lower Saxony. Proc Sect For Yield 51:95–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10682658>
- Knocke H, Rabe P (2023) Waldbau und Wertschätzung: Einsatzplan für organisierte Forstleute. BDFaktuell 64(3):28–29
- Knocke H (2024) Auf der anderen Seite des Globus: Neuseeländische Forstpartie zwischen Baum und Borke. proWALD 18(1):14–15
- Knocke H, Nagel R-V, Albert M (2024) Gute Reise, liebe Kiefer! Ausblick auf die Waldzusammensetzung Hessens im Jahr 2062. ImDialog 20(2):8–11
- Knocke HC, Axer M, Hamkens H, et al (2024) *Quo vadis* Scots pine forestry in northern Germany: How do silvicultural management & climate change determine an uncertain future? Eur J For Res 143(5):1477–1497. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01701-0>
- Knocke HC, Hansen J, Nagel R-V, Albert M (2024) Climate-adapted silvicultural strategies for harvest cuts of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Northern Germany. IUFRO Abstr Book 26:841
- Knocke HC, Axer M, Hamkens HF, Sennhenn-Reulen H, Husmann K, Zeppenfeld T, Fischer C, Nagel RV, Albert M (2024) Hope for the best, expect the worst: Including disturbances in simulations as tree- or stand-wise mortality increases uncertainty for north German Scots pine forestry. Stoch Environ Res Risk Assess 39 (10) <https://doi.org/10.1007/s00477-025-03060-7>
- Knocke HC, Schick J, Nagel R-V, et al (2024) Simulationsbasiertes Anwenden von Mortalitätsrisiken auf die Entwicklung des niedersächsischen Landeswaldes unter besonderer Berücksichtigung der Kiefer. Proc Sect For Yield 52:109–120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14643508>
- Knocke H, Axer M, Nagel R-V (2024) Kiefernwaldbau am Computer – mit Prognosen in die Zukunft. Modellieren von Waldentwicklung und Holzaufkommen für Mecklenburg-Vorpommern unter Klimawandel. immergrün 23(2, suppl. ‚forschung‘):18–23

- Knocke HC, Sennhenn-Reulen H, Zeppenfeld T, Axer M, Langer GJ, Nagel RV, Albert M (2025) Contributing to the disturbance ecology of Scots pine in Northwest Germany: Analyzing practitioners' reports on damage severities *Trees For People* 20: 100895. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100895>
- Knocke H, Dirks H, Krenn T, Kopetzky M, Stolze H, Gurnik M (2025) Technologie- und Rohstoff-Offenheit empfohlen. Ergebnisse des Forschungsprojektes »Nachhaltige Nutzungspotenziale für Kiefernstarkholz« für die Praxis. *Holz Zbl* 151(11):145-146
- Knocke HC (2025) Unsicherheit zukünftiger Waldentwicklung unter besonderer Berücksichtigung von Standort und Sterblichkeit der Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) in Norddeutschland. Dissertation, Georg-August Universität Göttingen

#### *Veröffentlichungen Teilvorhaben 3:*

##### Vorträge

- Dirks, H., und B. Möhring. 2024a. An Analytical Approach to the Study of Scots Pine in the Northwestern Region of Germany. in Göttingen.
- Dirks, H., und B. Möhring. 2024b. Analyseansätze der Ausscheidenswahrscheinlichkeiten von Kiefernstarkholz i.A. verschiedener Faktoren. in Lohr a.M.
- Dirks, H., und B. Möhring. 2023a. Das risikoadjustierte Weiserprozent in Abhängigkeit verschiedener Holzsortimente. in Lohr a.M.
- Dirks, H., und B. Möhring. 2024c. Ökonomische Implikationen der Kiefern(starkholz-)wirtschaft. in Freiburg im Breisgau.
- Dirks, H., und B. Möhring. 2023b. Ökonomische Perspektiven der Kiefernbewirtschaftung in Norddeutschland - Eine Analyse der Kiefernstarkholzwirtschaft. in Dresden.

##### Abschlussarbeiten

- Brandt, S. 2023. Analyse des Marketings von Kiefernholz in der Möbelwirtschaft am Beispiel IKEA. Bachelorarbeit, Universität Göttingen, Göttingen. 47 S.
- Bürgel, L. 2024. Entwicklung der Kiefernwirtschaft über die Zeit - Eine Literaturanalyse. Bachelorarbeit, Universität Göttingen, Göttingen. 39 S.
- Meyer, M. 2024. Ökonomische Analyse des Zuwachses und der Wertleistung von dimensionsstarken Kiefern im NFA Sellhorn. Bachelorarbeit, Universität Göttingen, Göttingen. 38 S.
- Schade, K. 2024. Ökonomische Analyse einer Kiefern-Dürrständersituation - Ein Fallbeispiel aus dem Raum Jena. Bachelorarbeit, Universität Göttingen, Göttingen. 42 S.

#### *Veröffentlichungen Teilvorhaben 4:*

##### Vorträge

- Kopetzky, M., Sengpiel, A., Brokmeier, H., Jaeger, D. (2024), Passive Exoskelette bei forstbetrieblichen Arbeiten, KWF-Tagung 2025, in Schwarzenborn.
- Kopetzky, M. (2025), Holzernteverfahren im Kiefern-Starkholz – Eine Fallstudie bei unterschiedlichen Rückegassenabständen, Forstwissenschaftliche Tagung 2025, in Freiburg i.B.

##### Publikationen

Flyer zu Verfahrensoptionen in Kiefern-Beständen (Zusammen mit Projekt ADAPT-Wald-Holz der HNEE)

##### Abschlussarbeit

- Busche, C. (2024), Analyse und Bewertung von Holzernteverfahren zur Ernte von Kiefern-Starkholz anhand ökologischer, ergonomischer und ökonomischer Beurteilungskriterien und Zuordnung der optimalen Einsatzcharakteristika und Zielsortimente, Bachelorarbeit.

#### *Veröffentlichungen TV 5.1.:*

##### Publikationen

- Alade, A. A., Hötte, C., Militz, H. (2024), Coatings adhesion on chemically modified Scots pine (*Pinus sylvestris*, L.) woods, *Forests*, 15(3), 526. <https://doi.org/10.3390/f15030526>.

- Alade, A. A., Stolze, H., Hötte, C., Militz, H., Theoretical coatability properties of modified woods derived from contact angle, surface energy and surface tension measurements and experimental correlation, Results in Surfaces and Interfaces, 100514, <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100514>.
- Martin, L., Hötte, C., Stolze, H., Militz, H., Investigating the efficacy of established chemical wood modifications on large diameter Scots pine; durability against basidiomycetes, eingereicht am 29.04.2025, Materials Journal, Manuscript ID: materials-3644789

#### Vorträge

- Stolze, H. (2023), KiefernStolz Projekt – Verwendung von Kiefernstarkholz, Vortrag auf der Jahrestagung der Sektion Waldbau im DVFFA, in Bad Schmiedeberg.
- Stolze, H. (2021-2024), Diverse Vorträge zum KiefernStolz Projekt vor im Projekt eingebundenen Partnern der Forstwirtschaft und Holzindustrie.

#### Abschlussarbeiten

- Holle, L. (2023), Sortierung von Kiefernstarkholz. Qualitätseigenschaften des Schnittholzes und die Möglichkeit der Herstellung von Reinsortimenten, Masterarbeit.
- Fassbender J. und v. Ahn, N. (2025), Entwicklung eines Beileimungssystems und Untersuchungen zur Keilzinkung von modifiziertem Kiefernholz, Projektarbeit.
- Kaiser, H. (2023), Untersuchungen des Splint- und Kernholzanteils an Kiefernstarkholzstämmen der Submission Oerrel der Jahre 2022 und 2023, Bachelorarbeit.
- Hermans, J. P. (2023), Untersuchung ausgewählter Eigenschaften von Fensterkanteln aus Kiefern kern- und –splintholz, Bachelorarbeit.
- Windhorst, I. (2024), Untersuchung der Modifizierungs- und Trocknungsqualität von Schnittholz der Holzart Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) nach unterschiedlichen chemischen Modifizierungen, Bachelorarbeit.
- Havermeier, L. (2024), Untersuchung ausgewählter Eigenschaften von modifiziertem Schnittholz der Holzart Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Bachelorarbeit.
- Haarstick, L. (2024), Untersuchung ausgewählter Materialeigenschaften von modifiziertem Kiefern furnierschichtholz (LVL), Bachelorarbeit.

#### Veröffentlichungen TV 5.2.

#### Abschlussarbeiten

1. Mayer, X. Herstellung von Lagenhölzern aus Kiefernstarkfurnieren unter Verwendung von MDI- und PUR-basierten 1-KomponentenKlebstoffsystemen, Masterarbeit. (2023).

# ANHANG

## Teilvorhaben 1: Furnierbasierte 2d- und 3d-Verbundwerkstoffe für lasttragende Anwendungen

### Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das vermehrte Aufkommen von Starkholz der Kiefer eröffnet neue Nutzungsmöglichkeiten. Ein höherer Anteil an Starkholz, ist auch für die Furnierholzproduktion interessant, da höhere Ausbeuten je Stamm erreicht werden können. Durch das Verkleben von Furnierlagen können mechanische Festigkeiten erzielt werden, die über denen von Vollholz liegen. Teilvorhaben 1 untersuchte die Herstellung von Furnierschichtholz (LVL) aus Kiefer und identifizierte spezifische Herausforderungen und Optimierungsmöglichkeiten. Es wurden Referenzwerte und die Einflüsse von Prozessparametern der Furnierherstellung ermittelt, sowie das Leistungsverhalten bei Einsatz verschiedener Klebstoffsysteme beurteilt. Die Furnierqualität typischer Kiefernbestände wurde analysiert und das Verhalten als geformter Werkstoff untersucht.

### Bearbeitete Arbeitspakete

*Arbeitspaket Furnierherstellung aus Kiefernstarkholz unterschiedlicher Güteklasse unter Variation der Aufschlussbedingungen:*

Die Plastifizierung bei 70 °C ist eine Standardbedingung in der Furnierherstellung. Die Durchwärmung erhöht die Wasseraufnahmefähigkeit des Stammes, wobei der Kiefern Kern aufgrund seiner anatomischen Eigenschaften schwerer Wasser aufnimmt, was zu Feuchteunterschieden von 30 % bis 40 % zwischen Splint und Kern führt. Thermographische Aufnahmen zeigen eine Temperaturdifferenz von etwa 20 °C zwischen Kochertemperatur und Holzkerntemperatur während des Schälvorgangs. Die Qualität des Furniers hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab, wobei Probleme wie Riefen durch fehlerhafte Messerbehandlung entstehen können. Um die Messerqualität zu verbessern, ist der Anschliff einer Mikrophase am Furniermesser sinnvoll. Ein Kreuzversuch mit Steico SE zur Eignung von Kiefernbeständen bestätigte, dass die besten Furnierqualitäten bei Stämmen aus dem unteren Stammbereich erzielt werden. Insbesondere die astfreie Ausbeute mit besseren mechanischen und optischen Eigenschaften ist hier entscheidend, während das Furniermaterial von oberhalb der Astungsgrenze visuelle schlechtere Ergebnisse erzielt hat, obwohl es für innere Furnierlagen als geeignet eingestuft wurde. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede zwischen Stammfußmaterial und Material oberhalb der Astungsgrenze, wobei die Holzqualität stark von Standort und waldbaulicher Behandlung abhängig ist.

*Arbeitspaket Herstellung plattenförmiger (2d) und geformter (3d) Referenzbauteile unter Variation der „Furnierherkunft“, des Lagenaufbaus, der Furniervorbehandlung und des Klebstoffsystems:*

Es wurden Starkholzabschnitte von der Stiftung Braunschweiger Kulturbesitz verarbeitet, um Furniermaterial für Verklebungsversuche zu gewinnen. Hierbei wurde ein Polyurethan-Klebstoff und ein Phenol-Formaldehyd-Kleber verwendet, um plattenförmige und umgeformte Furnierwerkstoffe herzustellen. Die Platten wurden auf Biege- und Druckeigenschaften sowie Scherfestigkeit getestet. Die Herstellung erfolgte unter definierten Bedingungen, wobei die Plastifizierungstemperatur und Furnierqualität variiert wurden.

Die Tests zeigten, dass eine höhere Plastifizierungstemperatur (90 °C) die mechanischen Eigenschaften der Furnierplatten verbessert, insbesondere die Biegefestigkeit und Scherfestigkeit. Bei Vorversuchen zu umgeformten Furnierwerkstoffen wurde festgestellt, dass im Vakuumpressverfahren mehrlagige Varianten mit PU-Klebstoff gut verarbeitbar waren und auch um Äste keine oberflächlichen Risse auftraten.

Es wurden auch spezifische Festigkeiten in Beziehung zur Dichte berechnet, was zeigte, dass die bei 90 °C plastifizierten und mit PF-gebundenen LVL-Platten die besten Ergebnisse in Bezug auf die axiale Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul erzielten. Die Zugfestigkeit wurde ebenfalls analysiert, wobei festgestellt wurde, dass die Vorbehandlungstemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit von Einzelfurnierstreifen hatte. In diesem Zusammenhang wird das unterschiedliche Bildungsverhalten von Schälrisse bei den Vorbehandlungsvarianten und das Vermögen von Klebstoffen diese Risse zu verfüllen für die anisotropische Verbesserung der mechanischen Eigenschaften als entscheidend angesehen.

Die optischen und mechanischen Qualitätsuntersuchungen zielten darauf ab, die Eignung von Kiefernbeständen für die Furnierproduktion zu bewerten und Materialschwankungen zu minimieren. Die

Ergebnisse deuten darauf hin, dass das untersuchte Kiefernholz für die Herstellung von Furnierschichtholz geeignet ist, insbesondere wenn eine Sortierung nach Astigkeit durchgeführt wird, um hohe Qualitätsanforderungen tragender Bauteile zu gewährleisten.

### *Arbeitspaket Überprüfung des Werkstoffverhaltens bei kraftfreien und kraftinduzierten Belastungen*

XX

Die Maßhaltigkeit von umgeformten Platten ist entscheidend für deren Verwendung, die sie anfällig für Verformungen aufgrund interner Spannungen und veränderter Radien sind. Es wurden verschiedene Prozessparameter wie Klebstofftyp, Aushärtungszeit und Lagenaufbau untersucht, um deren Einfluss auf das Verformungsverhalten von Kiefern furnierwerkstoffen zu bewerten.

Es kamen Phenolformaldehyd- und Polyurethan-Klebstoffe zum Einsatz, um die Auswirkungen auf den Springback als Verformung nach dem Pressvorgang zu analysieren. Platten wurden unter verschiedenen Bedingungen hergestellt und einem Klimazyklus unterzogen, um die Verformungen zu messen. Die Ergebnisse zeigten, dass PU-gebundene Platten weniger Verformung aufwiesen als PF-gebundene, besonders bei trocken-heißen Bedingungen. Die Rückkühlung nach dem Pressen reduzierte das Springback, jedoch traten bei PF-Varianten während der heißen Lagerung signifikante Verformungen auf. Die PU-Varianten zeigten zunächst geringere Verformung und begannen erst bei höherer Luftfeuchtigkeit eine deutliche Änderung der Form.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Kiefern furnier für die Herstellung von Formteilen geeignet ist, jedoch eine Vorsortierung nach Eigenschaften wie Harzigkeit und die Verwendung von PU-Klebstoffen empfohlen werden, um die Maßhaltigkeit zu optimieren. Die Überwachung der Prozessparameter und darauffolgender Lagerungsbedingungen und die Berücksichtigung der Gebrauchsfeuchte ist unerlässlich, um unerwünschte Quell- und Schwindbewegungen zu minimieren.

### **Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Eine Steigerung der Vorbehandlungstemperatur von Kiefernstämmen im Furnierschälprozess von 70 °C auf 90 °C erzielte in Abhängigkeit der untersuchten Belastungsrichtung eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der axialen Biegefestigkeit. Eine so erreichte Verbesserung der Festigkeit konnte im untersuchten Material auch visuell geringwertigeres Furnier aus Stammabschnitten jenseits der 6 m Ästungsgrenze auf ein Festigkeitsniveau bringen, das mit astfreierem Material aus Erdstammstücken vergleichbar war. Eine solche Anpassung des Vorbereitungsprozesses muss in Abhängigkeit des herzustellenden Produkts gegen seinen energetischen Mehraufwand aufgewogen werden. Während das Steigern der Holzfeuchte während der Stammvorbereitung bereits einen Schälprozess ermöglicht, ist in Versuchen eine Temperaturdifferenz von bis zu 10 °C zwischen Kochereinstellung und Holzkerntemperatur festgestellt worden. Eine tatsächliche Plastifizierung des Lignins in der Holzzellwand ist erst bei höheren Temperaturen über 85 °C zu erwarten. Dieser Grenzwert ist abhängig von der Holzfeuchte und sinkt, wenn die Feuchte steigt. Für Kiefernholz wurden im Kernholz Holzfeuchten von 40-60 % gemessen. Tiefere Schälrisse mit Einfluss auf die Durchdringung der Furnierlage mit Klebstoff wurden erst bei der Vorbehandlungstemperatur von 90 °C beobachtet. Dies hat insbesondere für die Biegeeigenschaften in axialer Richtung signifikante Auswirkungen. Geringere Dichten und stärkere Astigkeit konnten durch eine Erhöhung der Vorbehandlungstemperatur teilweise ausgeglichen werden. Bei der Formteilherstellung aus Kiefern furnier wurden Polyurethan-Klebstoffe als aussichtsreicheres System identifiziert, da sie bereits unabhängig eines zusätzlichen Rückkühlungsschrittes im Pressvorgang durch ihr geringeres Schwindverhalten eine signifikant höhere Formstabilität aufwiesen. Die Kontrolle der Furnierfeuchte hat sich im Zusammenhang mit dem Wasser-bindenden Aushärteverhalten des Polyurethan-Klebstoffs als signifikanter Faktor erwiesen. Geringe Holzfeuchten begünstigen bei Polyurethan-Einsatz im Gebrauch eine Quellungsbewegung des Formteils, während Phenolformaldehyd-Einsatz zu Schwindbewegungen neigte. Die hohen Ausbeuten und hohen astfreien Anteile in Kiefernstarkholz rechtfertigen eine Bündelung von Rohholz in einem entsprechenden Sortiment, um gezielt Furnier-schälende Betriebe zu bedienen zu können.

## Literaturverzeichnis

DIN EN 635-3 1995 Sperrholz – Klassifizierung nach dem Aussehen der Oberfläche Teil 3 Nadelholz. Deutsche Fassung. DIN Media GmbH

Duriot, R., Rescalvo, F. J. Pot, G., Denaud, L., Girardon, S., Frayssinhes, R. **2021** An insight into mechanical properties of heartwood and sapwood of large French Douglas-fir LVL. *Construction and Building Materials* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123859>

US PS1-95 1995 Construction and Industrial Plywood. Voluntary Product Standard by the National Institute of Standards and Technology. Reproduced by the Engineered Wood Association 2002

Venn, T. J., McGavin, R. L., Ergashev, A. 2020 Accommodating Log Dimensions and Geometry in Log Procurement Decisions for Spindleless Rotary Veneer Production. *Bioresources* 15(2) 2385-2411, DOI: 10.15376/biores.15.2.2385-2411

## **Teilvorhaben 2: KiefernStolz Waldbau**

### **Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Vorhaben zielt darauf ab, die nachhaltige Nutzung von Kiefernstarkholz in Deutschland zu optimieren. Durch eine umfassende Analyse aktueller und zukünftiger Bestände sollen waldbauliche Strategien entwickelt werden, die wirtschaftliche Wertschöpfung mit ökologischer Nachhaltigkeit verbinden.

### **Bearbeitete Arbeitspakete**

#### *Arbeitspaket 2.1: Potentialabschätzung gegliedert nach Stärkeklassen und Qualitäten*

Auf Basis der dritten Bundeswaldinventur wird die künftige Waldentwicklung zugunsten einer Abschätzung des Holzaufkommens modelliert. Die Altersstruktur verschiebt sich durch das Einwachsen von etwa 80-jährigen Aufforstungen in die Zielstärkeklasse, wodurch die Starkholzvorräte zunehmen. Gleichzeitig bergen Trockenstress und Schädlingsbefall Sterberisiken, die in aussagekräftigen Prognosen einfließen müssen.

#### *Arbeitspaket 2.2: Fortschreibung und Schätzung des Kiefernholzaufkommens für die nächsten 50 Jahre*

Ein weiterentwickeltes Prognosemodell, das klimawandel- und standortssensitives Wachstum und Absterben berücksichtigt, simuliert verschiedene Nutzungsszenarien und bewertet deren Einfluss auf Holzangebot, Umbaufortschritt und Nachhaltigkeit. Um dem unausgeglichene Altersklassenaufbau entgegenzuwirken, werden aktuelle waldbauliche Konzepte nachempfunden, die eine kontinuierliche Holzversorgung und klimastabile Bestände sichern. Dazu dient eine Prognose (Simulation mittels der WaldPlaner-Software) ohne Störungseinfluss bis 2062.

#### *Arbeitspaket 2.3: Waldbauliche Konzepte und deren Evaluierung*

Besonderes Augenmerk liegt auf der Integration standortgerechter Mischbaumarten in Kiefernwälder im Rahmen eines Waldumbaus bei klimawandelbedingter Standorts-Drift. Schirmschlagartige Hiebe und gestreckte Ernteverfahren fördern lichtbedürftige und schattertragende Baumarten gleichermaßen, wodurch Biodiversität und Klimastabilität erhöht werden. Die gegenwärtige Gestalt des Störungsregimes von Kiefernbeständen in Nordwestdeutschland wird analysiert, um einer folgenden, zweiten Prognose bis 2062 mit Störungseinfluss zwei unterschiedliche Schweregrade von Mortalitätsereignissen zu untersuchen.

Durch die enge Verzahnung von waldbaulichen, ökonomischen und holztechnologischen Analysen soll das Projekt dazu beitragen, langfristige Nutzungskonzepte für Kiefernstarkholz zu entwickeln. Diese sollen Forstbetrieben und der Holzindustrie helfen, auf sich verändernde Marktbedingungen und klimatische Herausforderungen proaktiv einzustellen.

### **Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Die Modellierung der Waldentwicklung der BWI<sup>3</sup> 2012 bis zum Jahr 2062 zeigt eine starke Zunahme der Starkholzvorräte >50 cm BHD. Während sich die Alters- und Stärkeklassenverteilung nach rechts verschiebt, bleibt die Struktur unausgeglichene. In den sechs Norddeutschen Flächenländern (BB, HE, MV, NI, SH, ST) nimmt der Gesamtvorrat der Kiefer unter Risiko zwischen 20 und 26 % ab; und zwar auch wenn Kiefernwälder, wo empfohlen, wieder in Kiefer verjüngt werden. Der Vorratsabbau ist bei einer Verjüngung hin zu Schattbaumarten geringer, weil hier längere Überschirmungszeiträume praktiziert würden.

Die Umwandlung von Reinbeständen schreitet unterschiedlich voran: Kiefernflächen werden 2062 zu etwa 50 – 70 % umgebaut sein, während Laubholzreinbestände langsamer und Fichtenbestände schneller in andere Bestockungstypen wechseln. Die Modelle zeigen, dass eine verstärkte Durchforstung und rechtzeitige Ernte die Umbaurate um 20 % steigern könnte.

Unter Klimaveränderungen könnte sich die Wahrscheinlichkeit für Kiefern, das Alter 100 zu erreichen, von derzeit etwa 70 % auf zukünftig nur noch 50 % verringern. Dennoch verfünffachen sich die Starkholzteile auch unter Risiko, während der Kiefern-Schwachholzvorrat fast halbiert wird. Ein Drittel der Holznutzung

könnte künftig auf Kalamitätsereignisse zurückzuführen sein. Bestandesweise Störungen fördern den Bestockungswechsel, während baumweise Mortalität dazu tendiert, den Waldumbau zu hemmen.

Ein modifizierter Waldumbau muss standortspezifisch erfolgen. Eine differenzierte Nutzung mit Zielstärken von 40–60 cm BHD kann zum Ausgleich von Alters- und Stärkeklassen beitragen und Wälder klimafest machen. Bei einer diversifizierten Bewirtschaftung mit früherem Fokus auf die Ernte und längeren Verjüngungsfenstern, kann für die Forstbetriebe eine nachhaltige Ertragsperspektive eröffnet, Holz für die Industrie kontinuierlich angeboten, Risiken vermindert, und die ökologische Resilienz der Wälder erhöht werden.

## Literaturverzeichnis

Albert M, Nagel J, Schmidt M, et al (2024) Eine neue Generation von Ertragstabellen für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer in Nordwestdeutschland [A new generation of yield tables for sessile and pedunculate oak, European beech, Norway spruce, Douglas-fir and Scots pine in Northwest Germany]. *Beitr NW-FVA* 22:1–112. <https://doi.org/10.17875/gup2024-2636>

Archambeau J, Ruiz-Benito P, Ratcliffe S, et al (2020) Similar patterns of background mortality across Europe are mostly driven by drought in European beech and a combination of drought and competition in Scots pine. *Agric For Meteorol* 280:107772. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107772>

Assmann E (1970) *The Principles of Forest Yield Study*. Pergamon, Oxford. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01587-3>

Axer M, Hamkens H, Nagel R-V, Böckmann T (2023) Entscheidungsunterstützung zur Priorisierung von Waldumbauflächen abgeleitet aus Fernerkundungsdaten. *Proc Sect For Yield* 51:36–40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10683494>

Bartsch N, von Lüpke B, Röhrig E (2020) *Waldbau auf ökologischer Grundlage*, 8th edn. Ulmer, Stuttgart. <https://doi.org/10.36198/9783838587547>

Bauhus J (2022) Die Anpassung der Wälder an den Klimawandel – eine waldwirtschaftliche Perspektive. *Nat Landsch* 97:318–324. <https://doi.org/10.19217/NuL2022-07-01>

BGR (ed) (2005) *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5)*, 5th edn. E. Schweizerbart, Stuttgart

Blickensdörfer L, Oehmichen K, Pflugmacher D, et al (2022) Dominant Tree Species for Germany (2017/2018). <https://doi.org/10.3220/DATA20221214084846>

Blickensdörfer L, Oehmichen K, Pflugmacher D, et al (2024) National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. *Remote Sens Environ* 304:114069. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>

BMEL (ed) (2016) *Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052*. Bonifatius, Paderborn

Böckmann T, Dröge H-H, Thiel B, Hüsing F (2000) Konzept für die Betriebskarte mit Strukturelementen - Beispiel aus der Niedersächsischen Landesforstverwaltung. *Forst Holz* 55:145–148

Böckmann T, Hansen J, Hauskeller-Bullerjahn K, et al (2019) Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. *Aus dem Walde* 61:1–141

Bolte A (2022) Die Verfügbarkeit an Rohholz [The availability of raw wood]. In: *Forum Holzbau* (ed) *Bauen mit Holz im urbanen Raum [Building with timber in urban areas]*. Biel, pp 261–265. <https://forum-holzwissen.com/document/secure/bc2b7672-651f-427d-a859-39859b325565>. Accessed 1 April 2024

Bolte A, Höhl M, Hennig P, et al (2021) Zukunftsaufgabe Waldanpassung [Future task of forest adaptation]. *AFZ/Wald* 76 (4):12–16

Bösch B, Kändler G, Polley H, et al (2016) *Fachkonzept zur Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung WEHAM 2012. Version 2.1. Modelle und Algorithmen*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)

Bösch M, Elsasser P, Rock J, et al (2017) Costs and carbon sequestration potential of alternative forest management measures in Germany. *For Policy Econ* 78:88–97. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.005>

Brandl S, Paul C, Knoke T, Falk W (2020) The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *For Ecol Manage* 458:117652. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117652>

- Braunschweiger D, Ohmura T, Schweier J, et al (2024) Preferences for proactive and reactive climate-adaptive forest management and the role of public financial support. *For Policy Econ* 169:103348. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103348>
- Büntgen U, Urban O, Krusic PJ, et al (2021) Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nat Geosci* 14:190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>
- del Río M, Bravo-Oviedo A, Pretzsch H, et al (2017) A review of thinning effects on Scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. *For Syst* 26:eR03S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11325>
- Döbbeler H, Spellmann H (2002) Methodological Approach to Simulate and Evaluate Silvicultural Treatments under Climate Change. *Forstw Cbl* 121 (suppl. 1):52–69
- Ehwald E (1949) Standortsbedingte Freiheit und Gebundenheit im Waldbau als Problem der forstlichen Standortskartierung. *Forstw Cbl* 68(7/8):438–445. <https://doi.org/10.1007/BF01947202>
- Fahrmeir L, Kneib T, Lang S, Marx B (2013) *Regression: Models, Methods and Applications*. Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9>
- Fuchs JM, Hittenbeck A, Brandl S, et al (2022) Adaptation strategies for spruce forests - economic potential of bark beetle management and Douglas fir cultivation in future tree species portfolios. *Forestry* 95 (2):229–246. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab040>
- Fuchs JM, Husmann K, von Bodelschwingh H, et al (2023) woodValuationDE: A consistent framework for calculating stumpage values in Germany (technical note). *Allg Forst- Jagdztg* 193:16–29. <https://doi.org/10.23765/afjz0002090>
- Gerhardt E (1923) Beitrag zur Hiebsatz-Herleitung durch Massenverfahren [Contribution to the derivation of prescribed yield through organization by volume methods]. *Z Forst- Jagdwes* 55 (1):28–38
- Guimpel F (1819) Vorschrift zu Zeichnung der Forst-Karten [Regulation for drawing forest maps]. In: Hartig GL (ed) *Neue Instructionen für die Königlich-Preußischen Forst-Geometer und Forst-Taxatoren* [New instructions for the Royal Prussian Forest Surveyors and Forest Taxators], 1st edn. Kummer, Berlin, p 119
- Hamkens H, Nagel R-V, Spellmann H (2022) Baumartenwahl im Klimawandel [Tree species selection in climate change]. *Proc Sect For Yield* 50:121-125. [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/publikationen/pdf/hamkens\\_2022\\_baumartenwahl\\_im\\_klimawandel.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/publikationen/pdf/hamkens_2022_baumartenwahl_im_klimawandel.pdf). Accessed 1 March 2024
- Hansen J, Nagel J (2014) Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS [Forest growth software systems based on TreeGrOSS]. *Beitr NW-FVA* 11:1–224. <https://doi.org/10.17875/gup2014-757>
- Hartard B, Schramm E (2009) Biodiversität und Klimawandel in der Debatte um den ökologischen Waldumbau - eine Diskursfeldanalyse. *BiK-F Know Flow Pap* 1:1–18
- Hentschel R, Möller K, Degenhardt A, Bilke G (2019) Risikominimierung durch den Waldumbau von Kiefernreinbeständen. *Ebersw Forstl Schr Reihe* 67:65–72
- Hübener H, Bülow K, Fooker C, et al (2017) ReKliEs-De Ergebnisbericht. Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland [Final report. Regional climate ensemble projections for Germany]. HLNUG, Kassel. [https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe\\_Ergebnisbericht](https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht)
- Jactel H, Brockerhoff E, Duelli P (2005) A Test of the Biodiversity-Stability Theory: Meta-analysis of Tree Species Diversity Effects on Insect Pest Infestations, and Re-examination of Responsible Factors. In: Scherer-Lorenzen M, Körner C, Schulze E-D (eds) *Forest Diversity and Function*. Springer, Berlin, pp 235-262. [https://doi.org/10.1007/3-540-26599-6\\_12](https://doi.org/10.1007/3-540-26599-6_12)
- Knocke H, Axer M, Nagel R-V (2024a) Kiefernwaldbau am Computer – mit Prognosen in die Zukunft. Modellieren von Waldentwicklung und Holzaufkommen für Mecklenburg-Vorpommern unter Klimawandel. *immergrün* 23(2, suppl. 'forschung'):18–23
- Knocke H, Dirks H, Krenn T, et al (2025) Technologie- und Rohstoff-Offenheit empfohlen. Ergebnisse des Forschungsprojekts »Nachhaltige Nutzungspotenziale für Kiefernstarkholz« für die Praxis. *Holz-Zbl* 151(11):145–146
- Knocke H, Nagel R-V, Albert M (2024b) Gute Reise, liebe Kiefer! Ausblick auf die Waldzusammensetzung Hessens im Jahr 2062. *ImDialog* 20(2):8–11
- Knocke HC, Axer M, Hamkens H, et al (2024c) *Quo vadis* Scots pine forestry in northern Germany: How do silvicultural management and climate change determine an uncertain future? *Eur J For Res* 143(5):1477–1497. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01701-0>

- Knocke HC, Hansen J, Nagel R-V, Albert M (2023) Conception of a scenario funnel for simulating climate- and site-sensitive forest development by the example of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Lower Saxony. Proc Sect For Yield 51:95–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10682658>
- Knocke HC, Schick J, Nagel R-V, et al (2024d) Simulationsbasiertes Anwenden von Mortalitätsrisiken auf die Entwicklung des niedersächsischen Landeswaldes unter besonderer Berücksichtigung der Kiefer. Proc Sect For Yield 52:109–120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14643508>
- König A (1999) Risikoorientierter Waldbau. Forstl Forsch.ber München 176:136–144
- Kraft G (1884) Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Klindworth, Hannover
- Krings J (2023) Vehmeyer und Voshaar stellen Weichen für Zukunft. Holz-Zent.bl 149(17):263
- Lembcke G, Knapp E, Dittmar O (1975) DDR-Kiefern-Ertragstafel 1975 [GDR pine yield table 1975]. Institute for Forest Sciences, Eberswalde
- Markowitz HM (1991) Foundations of Portfolio Theory. J Financ 46:469–477. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1991.tb02669.x>
- Mason WL, Löf M, Pach M, Spathelf P (2018) The Development of Silvicultural Guidelines for Creating Mixed Forests. In: Bravo-Oviedo A, Pretzsch H, del Río M (eds) Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests. Springer, Cham, pp 255–270
- Mayer-Wegelin H (1936) Ästung. Schaper, Hannover
- MLUK (ed) (2022) Empfehlungen zur Mischung von Baum- und Straucharten im Wald. Die Baumartenmischungstabelle. Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft, Potsdam
- Mortzfeldt JESU (1896) Über horstweisen Vorverjüngungsbetrieb. Z Forst- Jagdwes 28:2–31
- Muys B, Messier C (2023) Climate-smart forest management caught between a rock and a hard place. Ann For Sci 80 (1):43. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01208-5>
- Nuske R, Staupendahl K, Albert M (2022) et.nwfv: Forest Yield Tables for Northwest Germany and their Application. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7207596>
- Nyland RD, Kenefic LS, Bohn KK, Stout SL (2016) Silviculture: concepts and applications, 3rd edn. Waveland Press, Long Grove
- Offer A, Staupendahl K (2009) Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis. Forst Holz 64(5):16–25
- Rigling A, Dobbertin M, Bürgi M, et al (2006) Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. Forum Wiss 16:23–33
- Rosenkranz L, von Arnim G, Englert H, et al (2023) Alternative forest management strategies to adapt to climate change: an economic evaluation for Germany. vTI Work Pap 219:1–32. <https://doi.org/10.3220/WP1691499012000>
- Schall P, Ammer C (2013) How to quantify forest management intensity in Central European forests. Eur J For Res 132:379–396. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0681-6>
- Schick J, Schmidt M, Nuske R, Zeppenfeld T (2023) cssi: Implementation of calibratable and climate sensitive site index models. Intern R-Package
- Schirrmeister F, Ahrends B, Meesenburg H (2023) Vorschätzung der forstlichen Standortstypen für nicht kartierte Flächen des niedersächsischen Privatwaldes. Proc FowiTa 12:305. <https://doi.org/10.25368/2024.36>
- Schmidt M (2020) Standortsensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel [Site-sensitive, calibratable site index curves: The growth potential of important tree species under climate change]. Allg Forst- Jagdztg 190 (5/6):136–160. <https://doi.org/10.23765/afjz0002043>
- Schmidt M (2002) Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation, Georg-August-Universität
- Schmidt W, Stüber V, Ullrich T, et al (2015) Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beitr NW-FVA 12:1–136. <https://doi.org/10.17875/gup2015-797>
- Schröder J, Grüll M, Degenhardt A, et al (2023) Aus BZT wird BMT - waldbauliche Empfehlungsgrundlagen für den Wald in Brandenburg. Ebersw Forstl Schr Reihe 72:5–12
- Schulze G, Kopp D, Wirner M (2013) Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95, 4th edn. Schwerin

- Sohn JA, Hartig F, Kohler M, et al (2016) Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. *Ecol Appl* 26:2190–2205. <https://doi.org/10.1002/eap.1373>
- Sutmöller J, Schönfelder E, Meesenburg H (2021) Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft [Perspectives of applying projections of climate change in forestry]. *promet* 104:47–53. [https://doi.org/10.5676/DWD\\_PUB/PROMET\\_104\\_07](https://doi.org/10.5676/DWD_PUB/PROMET_104_07)
- Thurm E, Wirner M (2023) Bestockungszieltypen im Klimawandel für die Wälder des Landes Mecklenburg-Vorpommern, 2nd edn. Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin
- Turmukhametova NV, Bedova PV, Vorobeva IG (2020) Structure peculiarities of *Pinus sylvestris* L. consortium. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 548:042035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/4/042035>
- Vacchiano G, Garbarino M, Borgogno Mondino E, Motta R (2012) Evidences of drought stress as a predisposing factor to Scots pine decline in Valle d'Aosta (Italy). *Eur J Forest Res* 131:989–1000. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0570-9>
- WBW (ed) (2019) Risikovorsorge und der Umgang mit Extremereignissen in der Forstwirtschaft: Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL. BMEL, Berlin
- Weller A, Böckmann T, Noltensmeier A (2022) Betriebssicherheit der Hauptbaumarten [Operational safety of the main tree species]. *Holz-Zbl* 148(5):79–81
- Wiedemann E (1943) Die Ertragstabeln für mäßige Durchforstung. In: Wiedemann E (1948) (ed) Die Kiefer 1948. Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen. Verlag M. & H. Schaper, Hannover, pp 12–40
- Wiedemann E (1948) Die Kiefer 1948. Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen [The pine 1948: silvicultural and yield studies]. Schaper, Hannover
- Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R (eds) (2019) Störungsökologie, 1st edn. utb GmbH, Stuttgart. <http://dx.doi.org/10.36198/9783838550183>
- Yachi S, Loreau M (1999) Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proc Natl Acad Sci USA* 96:1463–1468. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1463>

## **Teilvorhaben 3: Analyse der Wertschöpfungspotentiale von Kiefernstarkholz in Nordwestdeutschland**

Georg-August-Universität Göttingen, bis 09/2023 Abteilung Forstökonomie (FORECON), ab 10/2023 Abteilung Forstökonomie und nachhaltige Landnutzungsplanung (FELAP)

### **Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Die betriebswirtschaftliche Erklärung für den Trend zu höheren Erntedimensionen ist bisher unzureichend, da das im stehenden Holz gebundene Kapital erheblichen Risiken wie Kalamitäten oder Holzentwertung unterliegt. Ein Bestand oder Einzelbaum sollte nur erhalten bleiben, wenn sein Wertzuwachs die entsprechenden Kosten, einschließlich Risikokosten, übersteigt. Dieses Teilprojekt untersucht daher für typische Kiefernbestände in Nordwestdeutschland die ökonomischen Implikationen der Starkholzproduktion unter Berücksichtigung von Volumen- und Wertzuwachs, Opportunitätskosten sowie standörtlichen Unterschieden in Wuchsdynamik und Holzqualität. Zudem werden leistungsstärkere Nachfolgebestände (wie Douglasie oder Kiefern höherer Bonität) in das Kalkül gezogen. In Anlehnung hieran werden Einzelbäume untersucht.

Zur Bestimmung der optimalen Erntedimension von Kiefernbeständen wird das Pressler'sche Weiserprozent um waldbauliche und risikobezogene Faktoren erweitert, um praxisnahe Ernteentscheidungen zu fundieren. Neben der forstlichen Produktion wird auch die Rohholzabnehmerseite analysiert, um Märkte für Starkholzqualitäten zu identifizieren.

### **Bearbeitete Arbeitspakete**

*Arbeitspaket 1: Analyse des qualitätsabhängigen optimalen Erntezeitpunktes bzw. der optimalen Erntedimension unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten und Risikokosten*

Die Arbeitspakete wurden vollumfänglich bearbeitet. Die technisch maximale Erntedimension ist durch die Holzerntetechnologie oder die Einschnittstechnologie der verarbeitenden Betriebe bestimmt und wurde so in Zusammenarbeit mit den weiteren Teilvorhaben ermittelt. Die ökonomisch optimale ergibt sich wiederum aus der Anwendung des erweiterten Pressler'schen Weiserprozentes. Entsprechende Ergebnisse wurden mehrfach auf Fachtagungen vorgestellt.

*Arbeitspaket 2: Analyse von Fallstudien in unterschiedlichen Teilregionen Nordwestdeutschlands inkl. der Analyse von Absatzmärkten*

Es wurden 2 Fallstudien durchgeführt: Zum einen wurde die Holzeinnahme des dominanten Kiefernrohholzbereitstellers in Nordwestdeutschland ausgewertet. So wurde die Struktur der Absatzmärkte für verschiedene Starkholzqualitäten ermittelt. Eine differenziertere Auswertung der Absatzmärkte konnte aufgrund der Anonymisierung der Daten nicht erfolgen. Mittels eines Durchforstungsmodells wurde der Produktionsprozess von Starkholz analysiert sowie der Überhaltbetrieb als ökonomisch rationales Produktionsprogramm identifiziert. Somit ist die Bearbeitung des Arbeitspaketes abgeschlossen. Aktuell lassen sich Erlöspotentiale vorwiegend in den höheren Starkholzqualitäten identifizieren.

Zum anderen wurde die Betriebsinventur der zwei größten nordwestdeutschen Forstbetriebe ausgewertet. In Analysen wurden aus empirischen Daten errechnete Wertzuwächse im Untersuchungsgebiet bestimmt. Erstmals konnte ein aktualisiertes spezifisches Bild der Leistungsfähigkeit von dimensionsstarken Kiefern aufgezeigt werden. Diese Ergebnisse wurden ebenso via Fachtagungen kommuniziert.

*Arbeitspaket 3: Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse*

Wie aufgezeigt konnten die Ergebnisse beider Arbeitspakete zusammengeführt werden. Das bedeutendste Beispiel stellt die theoretische Herleitung geringerer optimaler Erntedimensionen aus dem erweiterten Pressler'schen Weiserprozent dar, welche durch die Wiederantreffenswahrscheinlichkeiten sowie die Struktur des Absatzmarktes bestätigt werden konnten. Zukünftige Absatz- und Erlöspotentiale hängen wesentlich von den Preisrelationen von Starkholz zu den Massensortimenten ab. Diese Zusammenführung wurde über Artikel und Vorträge Bewirtschaftern, Holzverarbeitern und Waldbesitzenden dargestellt.

### **Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Mithilfe des erweiterten Pressler'schen Weiserprozents wurden optimale Umtriebszeiten und Erntedimensionen für nordwestdeutsche Kiefern ermittelt. Unter statischen Bedingungen ergibt sich eine optimale Erntedimension von 45 bis 50 cm BHD für die stärksten Bäume. Dynamische Annahmen, wie zukünftige Marktveränderungen oder standörtliche Entwicklungen, können jedoch zu abweichenden Ergebnissen führen.

Die wirtschaftliche Bewertung berücksichtigt neben den natürlichen Wachstumsprozessen auch Opportunitäts- und Risikokosten. Dabei wurde deutlich, dass die Starkholzproduktion insbesondere im

Überhaltbetrieb ökonomisch sinnvoll sein kann. In diesen Fällen sind Zielstärken von etwa 65 cm BHD für die stärksten Stämme möglich, sofern ausreichende Wertzuwächse erzielt werden.

Auf Basis der „Betriebsinventur Niedersachsen“ wurden natürliche Kenngrößen und ökonomische Rahmenbedingungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass dimensionsstarke Kiefern auf geeigneten Standorten wirtschaftlich tragfähige Wertzuwächse erzielen können.

Eine Analyse der Holzeinnahmen der Niedersächsischen Landesforsten verdeutlichte, dass Starkholz bisher nur einen geringen Anteil am Gesamtabsatz hat, jedoch für spezialisierte Abnehmer von hoher Bedeutung ist. Die Nachfrage konzentriert sich auf wenige Marktsegmente, wodurch sich Absatzpotenziale gezielt erschließen lassen, während die Marktstruktur für Starkholz jedoch fragmentiert ist.

## Literaturverzeichnis

Albert, M., J. Nagel, M. Schmidt, R.-V. Nagel, und H. Spellmann. 2022. Eine neue Generation von Ertragstafeln für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer. Online abrufbar unter: <https://zenodo.org/record/6343906>; Zuletzt zugegriffen 9. Februar 2024.

Albert, M., J. Nagel, M. Schmidt, R.-V. Nagel, und H. Spellmann. 2024. Neue Ertragstafeln für Nordwestdeutschland: Kiefer. Online abrufbar unter: <https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/common/unterstuetzen/pdf/Kieferntafel.pdf>; Zuletzt zugegriffen 5. Februar 2024.

Albert, M., R.-V. Nagel, R. Nuske, J. Suttmöller, und H. Spellmann. 2017. Tree Species Selection in the Face of Drought Risk—Uncertainty in Forest Planning. *Forests*. 8(10):363.

Baader, G. 1941. *Der Kiefernüberhaltbetrieb. Eine ertragskundliche und betriebswirtschaftliche Untersuchung*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.

Bauhus, J., M. Dieter, N. Farwig, A. Hafner, R. Kätzel, B. Kleinschmit, F. Lang, u. a. 2021. *Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel: Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.

Bergel, D. 1987. *Massentafeln für Nordwestdeutschland. Teil 3: Douglasie, Fichte, Kiefer, Europäische Lärche*. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.

v. Bodelschwingh, H. 2018. *Ökonomische Potentiale von Waldbeständen: Konzeption und Abschätzung im Rahmen einer Fallstudie in hessischen Staatswaldflächen*. J.D. Sauerländer's Verlag, Bad Orb. 241 S.

Borchert, H. 2002. *The economically optimal amount of timber cut in forests: an approach by control theory*. Sauerländer, Frankfurt am Main. 183 S.

Chang, S. J., und P. Deegen. 2011. Pressler's indicator rate formula as a guide for forest management. *JFE*. 17(3):258–266.

Döbbeler, H., M. Albert, und J. Nagel. 2002. *BWINPro – Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur Version 6.1*. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum, Göttingen.

Döbbeler, H., und H. Spellmann. 2002. Methodological Approach to Simulate and Evaluate Silvicultural Treatments under Climate Change. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 121(Suppl. 1):52–69.

Döring, P., L. Giesecking, und U. Mantau. 2020. *Sägeindustrie 2018 - Einschnitt- und Produktionsvolumen - Rohstoffmonitoring Holz*. INFRO e. K. - Informationssysteme für Rohstoffe, Hamburg.

Fischer, C., und A. Mölder. 2017. Trend to increasing structural diversity in German forests: results from National Forest Inventories 2002 and 2012. *Ann. For. Sci.* 74(4):80–90.

Fisher, I. 1930. The Theory of Interest, as determined by Impatience to Spend Income and Opportunity to Invest it. S. 61–98 in *The Theory of Interest*, Macmillan, New York.

Frey, N. 1909. Die Erziehung hochwertigen Kiefern-Nutzholzes. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 31(12):609–615.

Fuchs, J. M., K. Husmann, H. v. Bodelschwingh, R. Koster, K. Staupendahl, A. Offer, B. Möhring, und C. Paul. 2023. woodValuationDE: A consistent framework for calculating stumpage values in Germany (technical note). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. 193. Jahrgang(1/2):16–29.

Halbritter, A. 2020. An economic analysis of thinning intensity and thinning type of a two-tiered even-aged Forest stand. *Forest Policy and Economics*. 111:102054.

Hansen, J., und J. Nagel. 2014. *Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung und theoretische Grundlagen*. Univ.-Verl. Göttingen, Göttingen. 224 S.

Heinsdorf, M. 1994. Hinweise zur Kiefern naturverjüngung. *Der Wald*. 44(10):336–339.

- Heshmatol Vaezin, S. M., J.-L. Peyron, und F. Lecocq. 2009. A simple generalization of the Faustmann formula to tree level. *Can. J. For. Res.* 39(4):699–711.
- Hilmers, T., L. Mehtätalo, K. Bielak, G. Brazaitis, M. Del Río, R. Ruiz-Peinado, G. Schmied, E. Uhl, und H. Pretzsch. 2025. Towards resource-efficient forests: Mixing species changes crown biomass allocation and improves growth efficiency. *Plants People Planet.* 7(1):117–132.
- Jacobsen, J. B., F. Jensen, und B. J. Thorsen. 2018. Forest Value and Optimal Rotations in Continuous Cover Forestry. *Environ Resource Econ.* 69(4):713–732.
- Jaeger, K. 1974. Kiefernüberhalt im Privatwald zwischen Elbe und Weser. *Der Forst- und Holzwirt.* 29(Nr. 3):57–60.
- Kändler, G. 2008. Vorräte und Nutzungsmöglichkeiten von starkem Laub- und Nadelholz - Ergebnisse europäischer Waldinventuren. S. 19–27 in *Starkholz - Premiumprodukt oder Problemsortiment? Chance und Herausforderung für Produktion, Bereitstellung und Vermarktung*, Ber. Freibg. Forstl. Forsch. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Freiburg.
- Knocke, H. C., M. Axer, H. F. Hamkens, C. Fischer, J. H. Hansen, R.-V. Nagel, und M. Albert. 2024. Quo vadis Scots pine forestry in northern Germany: How do silvicultural management and climate change determine an uncertain future? *Eur J Forest Res.* Online abrufbar unter: <https://link.springer.com/10.1007/s10342-024-01701-0>; Zuletzt zugegriffen 27. Juni 2024.
- Koster, R., und J. M. Fuchs. 2022. Opportunity costs of growing space – an essential driver of economical single-tree harvest decisions. *Forest Policy and Economics.* 135:102668.
- Maack, L., und F. Hofheinz. 2024. Holzeinnahme und -ausgabe der NLF.
- Mason, W. L., und R. Alía. 2000. Current and future status of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in Europe. *Forest Systems.* 9(1):317–335.
- ML. 2013. *WBR 2014 - Waldbewertungsrichtlinien - Niedersachsen - Vom 18. Dezember 2013 (Nds. MBl. Nr. 2 vom 15.01.2014 S. 38 aufgehoben) Gl.-Nr.: 79100 - Tabelle 1.6 vgl. WBR 2014 Nr. 8 - Bestandessortentafel Kiefer.*
- Möhring, B. 2014. Gibt es einen „richtigen“ Zinssatz bei der forstlichen Wertermittlung? *Wertermittlungsforum.* (2):72–78.
- Möhring, B. 1994. *Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen: ein Beitrag zur Förderung des entscheidungsorientierten Ansatzes der forstlichen Betriebswirtschaftslehre.* Sauerländer, Frankfurt am Main. 217 S.
- Möhring, B. 2009. Wie gelingt der Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis bei den ökonomischen Hiebsreifekriterien? *Forstarchiv.* 80(4):109–118.
- Möhring, B., und H. v. Bodelschwingh. 2016. Betriebswirtschaftliche Aspekte der Starkholzproduktion. *AFZ - Der Wald.* (19):29–32.
- Möhring, B., U. Rüping, und M. v. Blomberg. 2017. *Bewertungskonzept für forstliche Nutzungsbeschränkungen.* 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main. 54 S.
- Möhring, B., U. Rüping, G. Leefken, und M. Ziegeler. 2006. Die Annuität – ein „missing link“ der Forstökonomie? *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung.* 177. Jahrgang(2):21–29.
- Möllmann, T. B., und B. Möhring. 2017. A practical way to integrate risk in forest management decisions. *Annals of Forest Science.* 74(4):75.
- Morin, X., M. Toigo, L. Fahse, J. Guillemot, M. Cailleret, R. Bertrand, E. Cateau, u. a. 2025. More species, more trees: The role of tree packing in promoting forest productivity. *Journal of Ecology.* 113(2):371–386.
- Nagel, R.-V. 2016. Nutzungsstrategien für Nadelstarkholz. *AFZ - Der Wald.* 71(19):37–40.
- NFP. 2023. Betriebsinventur Niedersachsen.
- NFP. 2009. *BI-Gesamtanweisung.* Niedersächsische Landesforsten - Niedersächsisches Forstplanungsamt, Wolfenbüttel.
- NLF, Hrsg. 2021. *Entscheidungshilfen zur Behandlung und Entwicklung von Kiefernbeständen.* Letzte Änderung 13.4.2021. Niedersächsische Landesforsten (NLF).
- NLF, L. Maack, und F. Hofheinz. 2024. Holzeinnahme NLF 2011-2023 Kiefer.
- Nuske, R., K. Staupendahl, und M. Albert. 2022. et.nwfva: Forest Yield Tables for Northwest Germany and their Application. Online abrufbar unter: <https://zenodo.org/record/7207596>; Zuletzt zugegriffen 24. Januar 2024.

- Offer, A., und K. Staupendahl. 2009. Neue Bestandessortentafeln für die Waldbewertung und ihr Einsatz in der Bewertungspraxis - New stand assortment tables for forest valuation and their application in valuation practice. *Forst und Holz*. 64(5):16–25.
- Ohlin, B. 1921. Concerning the Question of the Rotation Period in Forestry. *Journal of Forest Economics (1995, Englische Übersetzung des schwedischen Originals)*. 1:89–114.
- Petersen, R. 2001. Kiefern naturverjüngung unter Schirm im NFA Fuhrberg. *Forst und Holz*. 56(7):220–225.
- Pressler, M. R. 1860. Zur Verständigung über den Reinertragswaldbau und sein Betriebsideal: Zweiter Artikel. Aus der Holzzuwachslehre. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. 36:173–191.
- Pretzsch, H. 2010. *Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model*. 1. softcover print. Springer, Berlin Heidelberg. 664 S.
- Price, C. 1989. *The theory and application of forest economics*. B. Blackwell, Oxford (Vereinigtes Königreich). 402 S.
- Rämö, J., und O. Tahvonen. 2017. Optimizing the Harvest Timing in Continuous Cover Forestry. *Environ Resource Econ*. 67(4):853–868.
- Reed, W. J. 1984. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management*. 11(2):180–190.
- Reich, P. B., und J. Oleksyn. 2008. Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north. *Ecology Letters*. 11(6):588–597.
- Saarinen, N., V. Kankare, S. Huuskonen, J. Hynynen, S. Bianchi, T. Yrttimaa, V. Luoma, u. a. 2022. Effects of Stem Density on Crown Architecture of Scots Pine Trees. *Front. Plant Sci*. 13:817792.
- Schober, R. 1995. *Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. 4. Aufl. Sauerländer, Frankfurt am Main. 166 S.
- SHLF und NW-FVA, Hrsg. 2021. *Merkblatt Kiefer. Entscheidungshilfen zur Behandlung und Entwicklung von Kiefernbeständen in den Schleswig-Holsteinischen Landesforsten AöR*. Schleswig-Holsteinische Landesforsten (SHLF), Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA). Online abrufbar unter: [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/SH\\_Merkblatt\\_Kiefer\\_2021.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/veroeffentlichen/merkblaetter/SH_Merkblatt_Kiefer_2021.pdf).
- Spellmann, H., und C. Fischer. 2016. Starkholz – Potenziale und Verfügbarkeiten. *AFZ - Der Wald*. 71(19):16–20.
- Thommen, J.-P., A.-K. Achleitner, D. U. Gilbert, D. Hachmeister, S. Jarchow, und G. Kaiser. 2020. *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. Online abrufbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-27246-3>; Zuletzt zugegriffen 17. März 2025.
- Viitala, E.-J. 2016. Faustmann formula before Faustmann in German territorial states. *Forest Policy and Economics*. 65:47–58.

## **Teilvorhaben 4: Sichere sowie umwelt- und bestandesschonende Starkholzernte / Abbildung der gesamten Prozesskette**

### **Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Im Rahmen dieses Teilprojektes sollten mögliche Verfahrensketten zur Bereitstellung von Kiefernstarkholz identifiziert, modelliert und anhand wichtiger Einsatzparameter (Bestandes- und Eingriffscharakteristika) kategorisiert, (ggf.) auf ihre Übertragbarkeit auf die Versuchsregion bzw. Anwendung im Kiefernstarkholz hin analysiert und verglichen werden. Letzteres sollte anhand ökonomischer (Kosten, Durchlaufzeiten), ergonomischer (Belastungen, Arbeitssicherheit) und ökologischer (Bestandes- und Bodenpfleglichkeit, Ökobilanz, Nährstoffentzug) Gesichtspunkte erfolgen, wobei jeweils die gesamte Prozesskette Berücksichtigung findet. In Abstimmung mit den Projektpartnern sollten drei Fallstudien in charakteristischen Beständen bei zu erwartenden Eingriffsszenarien untersucht werden, wodurch nach Möglichkeit ein möglichst großer Anteil der zu erwartenden Einsatzbedingungen abgedeckt werden sollte. Auf den Erkenntnissen des Projektes basierend sollte eine Entscheidungshilfe abgeleitet werden, um jeweils das optimale Verfahren nach ökonomischen, ökologischen und ergonomischen Gesichtspunkten in Abhängigkeit der Bestandes- und Eingriffscharakteristika (inklusive der Sortimentierung) unter Berücksichtigung der Kombinierbarkeit unterschiedlicher Verfahren identifizieren zu können.

### **Bearbeitete Arbeitspakete**

*Arbeitspaket 1: Vorbereitung eines Vergleichs bestehender Verfahren für die Starkholzernte in der Kiefer*

- a) Literaturübersicht zur Identifizierung potenziell in Frage kommender Arbeitsverfahren unter Berücksichtigung der gesamten Verfahrenskette
- b) Kategorisierung der identifizierten Verfahren u.a. nach Bestandes- und Eingriffscharakteristika
- c) Bewertung der Übertragbarkeit der Verfahren vor dem Hintergrund der zu erwartenden Rahmenbedingungen
- d) Identifizierung geeigneter Kriterien zur Bewertung der unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und ergonomischer Gesichtspunkte

*Arbeitspaket 2: Modellierung, Analyse und Bewertung der identifizierten Prozessketten auf Grundlage von Literaturrecherchen*

- a) nach ökologischen, ökonomischen und ergonomischen Gesichtspunkten
- b) unter Berücksichtigung der Bereitstellung unterschiedlicher Zielsortimente (inkl. Bereitstellung von Energieholz) in Abstimmung mit TV 1 und TV 6
- c) unter Aufzeigen der optimalen Einsatzbedingungen sowie Einsatzgrenzen

*Arbeitspaket 3: Fallstudien zu den vielversprechendsten Verfahrensketten für untersuchungsregionsspezifische Bestandes- und Eingriffsszenarien in unterschiedlichen Teilregionen Norddeutschlands in Abstimmung mit den anderen TV*

- a) Identifizierung charakteristischer Bestandes- und Einsatzszenarien
- b) Durchführung von Außenversuchen zur Analyse der Durchlaufzeiten (Zeitstudien)
- c) Analyse der Bestandes- und Bodenpfleglichkeit
- d) Kalkulation der Prozesskosten (für die einzelnen Prozesse)
- e) Berechnung der Ökobilanz der Prozessketten
- f) Analyse des Nährstoffentzugs bei der Bereitstellung unterschiedlicher Sortimente

*Arbeitspaket 4: Ableitung einer Entscheidungshilfe zur Identifizierung der optimalen Verfahrenskette nach ökologischen, ökonomischen und ergonomischen Aspekten unter Berücksichtigung der Kombinierbarkeit unterschiedlicher Verfahren und der Zielsortimente*

- a) Ableitung von Verfahrensempfehlungen für charakteristische Einsatzbedingungen unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und ergonomischer Aspekte

- b) Zusammenführung der Ergebnisse in einem Entscheidungsmodell zur Identifizierung der geeigneten Verfahren anhand von Bestandes- und Eingriffscharakteristika
- c) Ableitung einer dynamischen Entscheidungsmatrix u.a. in Abhängigkeit der Sortimentierung
- d) Erstellen der Abschlussdokumentation

### **Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab eine Auswahl von rund 31 möglichen Holzernteverfahren für Kiefern-Starkholz, welche in sechs Verfahrenskategorien eingeordnet werden können: Seilschlepper-Verfahren, Tragschlepper- und Kranschlepper-Verfahren, Harvester-Kombi-Verfahren, Starkholzharvester-Verfahren sowie Raupenbagger-Verfahren. Die Benennung der Kategorien beruht auf den Verfahrensunterscheidenden Maschinen. Durch eine angepasste Erarbeitung von Kriterien zur Verfahrensbeurteilung, konnten diese 31 Verfahren auf ihre Eignung für die zu erwartenden Bestandes- und Eingriffscharakteristika hin geprüft werden. Als Ergebnis zeigten sich Vor- und Nachteile der Verfahren innerhalb der Verfahrenskategorien, sodass die Vorteilhaftigkeit teilmechanisierter Holzernteverfahren deutlich wurde.

Es folgte ein Praxisversuch teilmechanisierter Verfahren bei 20 m und 40 m Rückegassenabständen, in Anlehnung an das Königsbronner Starkholzverfahren. Hierbei wurde deutlich, dass unter den nicht unüblichen Gegebenheiten eines dichtschlüssigen, nachfolgenden Bestandes unter den Starkholz-Kiefern bei 20 m Rückegassenabständen ein motormanuelles Zufällen der Entnahmebäume sinnvoll sein kann, wenn der nachfolgende Bestand besonders vor Holzernteschäden geschont werden soll.

In den Verfahrensanalysen zeigte sich ferner, dass der Einsatz motormanuell arbeitender Forstwirte häufig von Nöten ist, insbesondere wenn der Rückegassenabstand im Erntebestand 20 m überschreitet. Für diese Einschlüge sind besonders schwere Motorsägen und weitere Gerätschaften (z.B. Funk-ferngesteuerte Fällkeile und Fällheber) von den Forstwirten mitzuführen, wodurch eine erhöhte Belastung für das Muskel-Skelett-System der Arbeitskräfte besteht. Ausdiesem Grund wurde ein weiterer Praxisversuch durchgeführt, bei dem der Einsatz eines passiven Rücken entlastenden Exoskelettes beim motormanuellen Starkholz-Einschlag getestet wurde. Mit dem ausgewählten Modell konnte jedoch keine erkennbare Entlastung des unteren oder mittleren Rückens gemessen werden. Nichtsdestotrotz sind weitere Untersuchungen mit anderen biomechanischen Wirkweisen angeraten, um die Gesundheit der Forstwirte präventiv zu erhalten und damit dem drohenden Fachkräftemangel in der Forst-Branche frühzeitig zu begegnen.

### **Literaturverzeichnis**

Alemi, M.; Madinei, S.; Kim, S.; Srinivasan, D.; Nussbaum, M. (2020): Effects of Two Passive Back-Support Exoskeletons on Muscle Activity, Energy Expenditure, and Subjective Assessments During Repetitive Lifting. In: Human factors 62 (3), S. 458–474. DOI: 10.1177/0018720819897669.

Bačić, M.; Pandur, Z.; Šušnjar, M.; Šporčić, M.; Landekić, M. (2023): Daily Vibration Exposure in the Context of State and European Legislature: A Case Study among Chainsaw Operators in Croatia. In: Forests 14 (5), S. 929. DOI: 10.3390/f14050929.

Bär, M.; Steinhilber, B.; Rieger, M.; Luger, T. (2021): The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton - A systematic review and meta-analysis. In: Applied ergonomics 94. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103385.

Benker, K. (2015): Über ganz kleine und die größten Maschinen in unseren Wäldern. In: Forsttechnik-Newsletter 01. Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/forsttechnik/104220/index.php>.

Berendt, F.; Hoffmann, S.; Jaeger, D.; Prettin, S.; Schweier, J. (2020): Application of spiroergometry to determine work metabolism related strain in the course of cable work with a mini forestry crawler. In: International Journal of Forest Engineering. DOI:10.1080/14942119.2020.1735198.

Boocock, M.; Ashby, L.; Parker, R. (2023): Musculoskeletal and work practice survey of chainsaw users in the New Zealand forest industry. In: Physical Ergonomics and Human Factors 103. S. 70-77. DOI: 10.54941/ahfe1003036

Borchert, H.; Blaschke, M.; Metan, M. (2008): Wurzelverletzungen unter Raupe und Rad. In: LWF aktuell 67.

- Borchert, H.; Kremer, J.; Matthies, D. Wolf, D. (2012): LWF Merkblatt 22: Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz.
- Borchert, H.; Huber, C.; Göttlein, A.; Kremer, J. (2015): Nutrient Concentration on Skid Trails under Brush-Mats - Is a Redistribution of Nutrients Possible? In: Croatian journal of forest engineering 36 (2). S. 243-252
- Bort, G.; Mahler, G.; Pfeil, C. (1993): Mechanisierte Holzernte. Wechselwirkungen von Erschließungsdichte, Pfléglichkeit und Betriebserfolg. In: FTI 11, S. 121–124.
- Brieger, F.; Goedecke, A.; Sauter, F.; Sauter, U. (2018): Neue Entwicklungen bei der Nadelstarkholzernte: Königsbronner Starkholzverfahren (KSV). In: FVA-einblick 22 (3). S. 11-16.
- Brunberg, T. (1997): Basic productivity norms for single-grip harvesters in thinning. In: The Forestry Research Institute of Sweden 8.
- Butora, A.; Schwager, G. (1986): Holzernteschäden in der Durchforstung. Bericht der eidgen. Anstalt f. d. forstl. Versuchswesen. Birmensdorf.
- DGUV (2011): DGUV Regel 114-018 Waldarbeiten. Unter Mitarbeit von Fachgruppe "Forsten". Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Hg.).
- DGUV (2023): DGUV Information 208-033 „Muskel-Skelett-Belastungen - erkennen und beurteilen“. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Hg.).
- Dimitri, L. (1983): Die Wundfäule nach Baumverletzungen in der Forstwirtschaft: Entstehung, Bedeutung und die Möglichkeiten der Verhütung. In: Forstw. Cbl. 102, S. 68–79.
- Dimou, V.; Malesios, C.; Pispas, S. (2020): Assessing forestry-related musculoskeletal symptoms in specific body areas. In: International Journal of Forest Engineering 31(3). S. 233-241
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5. stark veränderte und verbesserte Auflage. Stuttgart: Ulmer., S. 363-379
- Eliasson, L.; Bengtsson, J.; Cedergren, J.; Lageson, H. (1999): Comparison of single-grip harvester productivity in clear and shelterwood cutting. Journal of Forest Engineering 10(1). S. 43-48.
- Enez, K.; Nalbantoğlu, S. (2019): Comparison of ergonomic risk assessment outputs from OWAS and REBA in forestry timber harvesting. In: International Journal of Industrial Ergonomics 70, S. 51–57. DOI: 10.1016/j.ergon.2019.01.009.
- Eriksson, M.; Lindroos, O. (2014): Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. International Journal of Forest Engineering 25(3). S. 179-200. DOI: 10.1080/14942119.2014.974309.
- Erler, J. (2000): Forsttechnik. Verfahrensbewertung. Stuttgart: Ulmer.
- Feller, S.; Weixler, H. (1998): Hannibal ante portas! In: LWF aktuell 11.
- FNR (2021): Bodenschutz im Wald. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.). Gülzow-Prüzen. 1. Auflage
- Frej, J. (1991): Cleaning technology and methods. The Forest Operations Institute of Sweden. Schweden. Projektbericht.
- Frey, B.; Lüscher, P. (2008): Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. Bodenmikroorganismen wirken als Zeiger für stark verdichtete Fahrspuren. In: LWF aktuell 67. S. 5–7.
- Frost, D.; Abdoli-E, M.; Stevenson, J. (2009): PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. In: Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology 19 (6). DOI: 10.1016/j.jelekin.2008.12.002.
- FVA (2025). Online verfügbar unter <https://www.fva-bw.de/daten-tools/tools/holzernteverfahren/holzernteverfahren>, zuletzt aktualisiert am 30.04.2025, zuletzt geprüft am 30.04.2025.
- Gallis, C. (2006): Work-related prevalence of musculoskeletal symptoms among Greek forest workers. In: International Journal of Industrial Ergonomics 36(8). S. 731-736. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.05.007
- Gaskin, J. E. (1990): An ergonomic evaluation of two motor-manual delimiting techniques. In: International Journal of Industrial Ergonomics 5, S. 211–218.
- Gilge, H.; Grulich, H.; Pfeiffer, G.; Sandler, J.; Spreitzhofer, J.; Stadlmann, H. (2020): Waldwirtschaft heute. 15. überarbeitete und erweiterte Auflage. München: avBuch.

- Glöde, D.; Sikström, U. (2001): Two Felling Methods in Final Cutting of Shelterwood, Single-Grip Harvester Productivity and Damage to the Regeneration. In: *Silva Fennica* 35(1). S. 71-83.
- Granhus, A.; Fjeld, D. (2001): Räumliche Verteilung von Verletzungen an Fichtenvortrieb nach Selektionsernte. In: *Canadian Journal of Forest Research* 31, S. 1903–1913.
- Gruber, H.; Hartenbach, M.; Hartfiel, J.; Heil, K.; Hochuli, H.; Koch, G. et al. (2002): Gefährdungen bei forstlichen Tätigkeiten. Beurteilung und Dokumentation. In: *InfoMediaVerlag* 1. Auflage.
- Grzywiński, W.; Wandycz, A.; Tomczak, A.; Jelonek, T. (2016): The prevalence of self-reported musculoskeletal symptoms among loggers in Poland. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 52, S. 12–17. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.07.003.
- Gullberg, T. (1997): A deductive time consumption model for loading shortwood. In: *Journal of Forest Engineering* 8(1). S. 35-44.
- Han, H.; Kellogg, L. (2000): Damage characteristics in young Douglas-fir stands from commercial thinning with four timber harvesting systems. In: *Western Journal of Applied Forestry* 15. S. 27–33.
- Hånell, B.; Nordfjell, T.; Eliasson, L. (2000): Productivity and costs in shelterwood harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15. S. 561-569.
- Harstela, P. (1990): Work postures and strain of workers in Nordic forest work: A selective review. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 22 (3), S. 219–226. DOI: 10.1016/0003-6870(91)90180-P.
- Hartfiel, J. (1998): Auswirkungen naturnaher Waldbewirtschaftung auf die Arbeitssicherheit. In: *FTI* 1+2, S. 4–7.
- Heindl, U.; Pausch, R. (2007): Nadelstarkholz erwünscht. In: *LWF aktuell* 59. S. 6-7
- Herr, H. (2009): Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. In: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 6. DOI: 10.1186/1743-0003-6-21.
- Holzfeind, T. (2017): Produktivitätsevaluierung des seilgestützten Forwarders John Deere 1110E. Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur. Wien. Masterarbeit.
- Kaufmann, U. (2010): Im Wald geht der Puls hoch. Schwere Arbeit kann den Bewegungsapparat schädigen. In: *WALD HOLZ* 91, S. 33–35.
- Klugmann, K. (2018): Technikeinsatz schützt Menschenleben. In: *SVLFG | Prävention | Wertschöpfung als Zukunftssicherung des Clusters Forst & Holz*.
- Klugmann, K.; Löwer, M.; Sarferaz, E. (2020): Unfälle bei motormanuellen Fällarbeiten - Ergebnisse der Sondererhebung 2018/ 2019. In: *Soziale Sicherheit in der Landwirtschaft* 2, S. 5–22.
- Kolb, E.; Göttlein, A. (2012): Regionale Bewertung erntebedingter Nährstoffentzüge. In: *AFZ DerWald* 15, S. 4–7.
- Kölling, C.; Göttlein, A.; Rohe, A. (2007): Energieholz nachhaltig nutzen. Biomasseentzug und Nährstoffentzug. In: *LWF aktuell* 61.
- Korten, S. (2004): Holzernteschäden an Fichten-Buchen-Verjüngung – Ausmaß, Verteilung, Prognose und Bewertungsansätze. Dissertation.
- Kremer, J. (2008): Regenerationsvermögen befahrungsbedingter strukturveränderter Böden. In: *LWFaktuell* 67, S. 13–15.
- Kuitto, P.; Keskinen, S.; Lindroos, J.; Oijala T.; Rajamäki, J.; Räsänen, T.; Terävä, J. (1994): Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Mechanized cutting and forest haulage. In: *Metsäteho Report* 410
- KWF (1996): Forsttechnik für naturnahe Waldwirtschaft. Tagungsführer zur 12. KWF-Tagung 1996 in Oberhof / Thüringen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF (2000): Forstwirtschaft im Einklang von Mensch, Natur, Technik. Tagungsführer zur 13. KWF-Tagung 2000 in Celle / Niedersachsen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF (2004): Prozessorientierung in der Forstwirtschaft – neue Technik, neue Partner, neues Denken. Tagungsführer zur 14. KWF-Tagung 2004 in Groß-Umstadt / Hessen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF (2008): Holz heiß begehrt - eine Branche macht mobil. Tagungsführer zur 15. KWF-Tagung 2008 in Schmallenberg / Nordrhein-Westfalen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).

- KWF (2012): Faszination Forstwirtschaft – Durch Zusammenarbeit gewinnen. Tagungsführer zur 16. KWF-Tagung 2012 in Bopfingen / Baden-Württemberg. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF (2016): Forstwirtschaft erleben. Tagungsführer zur 18. KWF-Tagung 2016 in Schwarzenborn / Hessen. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF (2024): Wälder - Menschen - Märkte, Forstwirtschaft nutzt natürlich. Tagungsführer zur 17. KWF-Tagung 2016 in Roding / Bayern. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (Hg.).
- KWF Unfallstatistik (2022). Online verfügbar unter <https://unfallzahlen.kwf-online.de/>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2022, zuletzt geprüft am 27.03.2025.
- Lageson, H. (1997): Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. In: *Journal of Forest Engineering* 8, S. 7–14.
- Lewark, S. (1990): Arbeitssicherheit und Frühinvalidität bei Waldarbeitern. In: *Forstarchiv* 61, S. 99–102.
- Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U. (Hg.) (2016): Berufsspezifisches Risiko für das Auftreten von Arbeitsunfähigkeit durch Muskel-Skelett-Erkrankungen und Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems - Bestimmung von Berufen mit hoher Relevanz für die Prävention. Forschung Projekt F 2255. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund, Berlin, Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Lilley, R.; Feyer, A.-M.; Kirk, P.; Gander, P. (2002): A survey of forest workers in New Zealand - Do hours of work, rest, and recovery play a role in accidents and injury? In: *Journal of Safety Research* 33, S. 53–71.
- Limbeck-Lilienau, B. (1984): Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. In: *Southern Journal of Applied Forestry* 8, S. 109–112.
- Luger, T.; Bär, M.; Seibt, R.; Rimmel, P.; Rieger, M. A.; Steinhilber, B. (2021): A passive back exoskeleton supporting symmetric and asymmetric lifting in stoop and squat posture reduces trunk and hip extensor muscle activity and adjusts body posture - A laboratory study. In: *Applied ergonomics* 97. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103530.
- Lüscher, P.; Borer, F.; Blaser, P. (2009): Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: THEES, O. & LEMM, R. (Hg.): *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Beiträge aus einem Forschungsprogramm für die Schweizer Waldwirtschaft.* vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 261–270.
- Lüscher, P.; Frutig, F.; Sciacca, S.; Spjevak, S.; Thees, O. (2019): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. In: *WSL: Merkblatt für die Praxis* 45.
- Madinei, S.; Kim, S.; Park, J.; Srinivasan, D.; Nussbaum, M. (2022): A novel approach to quantify the assistive torque profiles generated by passive back-support exoskeletons. In: *Journal of biomechanics* 145. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2022.111363
- Manner, J.; Nordfjell, T.; Lindroos, O. (2013): Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. In: *Silva Fennica* 47(4). DOI: 10.14214/sf.1030.
- McNeel, J.; Ballard, T. (1992): Analysis of site stand impacts from thinning with a harvesterforwarder system. In: *Journal of Forest Engineering* 4, S. 23–29.
- McNeel, J.; Rutherford, D. (1994): Modelling harvester-forwarder system performance in a selection harvest. In: *Journal of Forest Engineering* 6(1). S. 7-14.
- Mooz, T. (2010): Untersuchung des autonomen Nervensystems bei Harvesterfahrern unter Arbeitsbedingungen. Dissertation, S. 46–51.
- Morat, J.; Forbrig, A.; Graupner, J. (1998): Holzernteverfahren – Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland. KWF-Bericht 25. S. 66-69
- Morat, J. (2019): *Beruf Forstwirt. 7., aktualisierte Auflage.* Stuttgart: Ulmer.
- Neruda, J.; Radomir, U. (2004): Forschung der negativen Einflüsse des Betriebes von schweren Forstmaschinen auf Forstbestände. In: *Proceedings – Symposium on Forestry Mechanization (FORMEC)*
- Niemistö, P.; Korpunen, H.; Laurén, A.; Salomäki, M.; Uusitalo, J. (2012): Impact and productivity of harvesting while retaining young understory spruces in final cutting of downy birch. In: *Silva Fennica* 46(1). S. 81-97.
- Nill, M.; Kohnle, U.; Sauter, U. (2011): Rindenschäden mit mutmaßlichem Bezug zur Holzernte im Spiegel der Betriebsinventuren in Baden-Württemberg. In: *Forstarchiv* 82(6).

- Nguyen, V.; Inaba, S. (2011): Effects of tire inflation pressure and tractor velocity on dynamic wheel load and rear axle vibrations. In: *Journal of Terramechanics* 48(1), S. 3–16.
- Nurminen, T.; Korpunen, H.; Uusitalo, J. (2006): Time consumption and analyses of the mechanized cut-to-length system. In: *Silva Fennica* 40(2). S. 335-363.
- Pohle, C. (2021): Bedeutung von Maschinenausstattung und Assistenzsystemen für Effizienzsteigerungen bei der vollmechanisierten Holzbringung. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie, Georg-August-Universität. Göttingen. Masterarbeit.
- Poje, A.; Grigolato, S.; Potočnik, I. (2019): Operator Exposure to Noise and Whole-Body Vibration in a Fully Mechanised CTL Forest Harvesting System in Karst Terrain. In: *Croatian journal of forest engineering* 40(1), S. 139–150.
- Preuhsler, T.; Jakobi, K. (1996): Auswirkungen eines Schutzholzeinschlags auf die natürliche Verjüngung. In: *Forst Holz* 51, S. 205–211.
- Purfürst, T. (2010): Learning curves of harvester operators. In: *Croatian Journal of Forest Engineering* 32(2). S. 89-97.
- Rakel, T. (2021): Praxisversuche zur forsttechnischen Befahrbarkeit des Feinerschließungssystems bei der Holzurückung Reifen vs. Bänder -6-Rad vs. 8-Rad- drohnenunterstützte Gassenaufnahme. In: *AFZ DerWald* 13.
- Roessingh Research and Development BV (1999): European recommendations for surface ElectroMyoGraphy. Results of the SENIAM project. Enschede: Roessingh Research and Development (SENIAM, 8).
- Rudolph, S. (2013): "Fit im Forst". Göttingen: Göttingen University Press. Dissertation.
- Sayn, D.; Göres, B. (2013): Ganzkörper-Vibrationen in horizontalen Richtungen- ein noch ungelöstes Problem. In: *VDI-Berichte Nr. 2190*, S. 395–400.
- Sauter, U.; Busmann, C. (1994): Bestandesschäden bei der Durchforstung von Fichtenbeständen mit Kranvollerntern unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rückegasseabstände. In: *FTI* 12, S. 137–141.
- Sauter, U.; Hehn, M.; Pfeil, C.; Herbst, P. (2004): Verfahren zur Mobilisierung von Nadelstarkholz. Mobilisierung von Nadelstarkholz- Aufarbeitung und Bereitstellung in kurzer Form. In: *Holz-Zentralblatt* 46, S. 613–614.
- Sauter, U.; Nakou, A. (2014): Mal mehr. mal weniger Rindenschäden, warum? In: *AFZ-DerWald* 24, S. 12–14.
- Schettino, S.; Minette, L.; Caçador, S.; Reboleto, I. (2018): Assessment of Occupational Vibration on Tire x Track Harvesters in Forest Harvesting. In: *IEA 2018: Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association*, S. 31–40.
- Sikström, U.; Glöde, D. (2000): Schädigung der Regeneration von *Picea abies* nach dem letzten Schneiden von Schutzholz mit Ein- und Zweigriff-Harvestersystemen. In: *Scandinavian Journal of Forest Research*, S. 274–283.
- Smets, M. (2019): A Field Evaluation of Arm-Support Exoskeletons for Overhead Work Applications in Automotive Assembly. In: *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7(3-4), S. 192–198. DOI: 10.1080/24725838.2018.1563010.
- Spinelli, R.; Magagnotti, N. (2013): The effect of harvest tree distribution on harvesting productivity in selection cuts. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(7). S. 701-709.
- Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Labelle, E. (2020): The Effect of New Silvicultural Trends on the Mental Workload of Harvester Operators. In: *Croatian journal of forest engineering* 41(2), S. 177–190.
- Sohns, H. (2012): *Moderne Holzernte*. 31 Tabellen. Stuttgart: Ulmer, S. 31
- Staněk, L.; Mergl, V. (2022): Whole Body Vibrations during Fully Mechanised Logging. In: *Forests* 13(4). DOI: 10.3390/f13040630.
- Staněk, L.; Neruda, J.; Nevrkla, P. (2023): The Magnitude of Fatigue Recorded in Individual Body Parts of Chainsaw Operators after Work. In: *Forests* 14(10). DOI: 10.3390/f14102023.
- Strandgard, M.; Alam, M.; Mitchell, R. (2014): Impact of slope on productivity of a self-levelling processor. *Croatian Journal of Forest Engineering* 35(2). S. 193–200.

- Strandgard, M.; Mitchell, R.; Acuna, M. (2017): Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. In: *Journal of Forest Science* 63(7). S. 324–330. DOI: 10.17221/10/2017-JFS
- Stutz, K.; Schack-Kirchner, H.; Kändler, G.; Lang, F. (2015): Phosphorus in accumulated harvest residues on skidtrails. In: *Forest Ecology and Management* 356. S. 136–143.
- SUITX (2025): Online verfügbar unter <https://www.suitx.com/de/produkte/ix-back-air-exoskelett>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2025, zuletzt geprüft am 27.03.2025.
- SVLFG (2017): Waldarbeit. Aktuelles zu Sicherheit und Gesundheitsschutz. Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) (Hg.). Kassel (B 10).
- SVLFG (2020): Körperschutz. Aktuelles zu Sicherheit und Gesundheitsschutz. Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) (Hg.). Kassel (B 06).
- SVLFG (2023): Sicher. Gesund. Leben. Präventionsbericht 2022. In: Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) (Hg.). Kassel.
- TMLNU (2008): Bodenschutz und Holzernte. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft Naturschutz und Umwelt (TMLNU) (Hg.). Hohenleuben.
- Uhl, E.; Ohrner, G.; Matthies, D.; Kremer, H.; Wolf, B. (2003): Rad- oder Raupe, die Qual der Wahl. Einsatzempfehlungen für Rad- und Raupenfahrwerke. Ergebnisse von Boden- und Wurzeluntersuchungen. In: *LWF aktuell* 39, S. 11–14.
- Väätäinen, K.; Ala-Fossi, A.; Nuutinen, Y.; Röser, D. (2006): The effect of single grip harvester's log bunching on forwarder efficiency. In: *Baltic Forestry* 12(1). S. 64-69.
- Waas, S. (2017): LWF Merkblatt 38: Feinerschließung-Rückegassen und Rückewege.
- Weis, W.; Göttlein, A. (2012): Nährstoffnachhaltige Biomassenutzung. Bei der Nutzung von Biomasse ist Vorsicht geboten: Nicht jeder Waldstandort verträgt den erhöhten Nährstoffentzug. In: *LWF aktuell* 90, S. 44–47.
- Weise, G.; Heubaum, F. (2021): Über die FOPS-Prüfung von Fahrerkabinen in totholzreichen Zeiten. Wie gut schützt die Kabine einen Maschinenführer gegen herabfallende Gegenstände? In: *FTI* 5, S. 4–8.
- Weise, G.; Schmitz, J. (2020): Kabinenschutzverglasungen — Schutz gegen Kettenschüsse und andere Einschlagkörper. In: *FTI* 2, S. 10–17.
- Weinbrenner, H.; Bonadio, S.; Bethmann, S.; Kaulfuß, S.; Sauter, U (2021): Eine Frage der Unternehmenskultur- Multimethodische Analyse von Unfällen bei der Waldarbeit. In: *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 191(11/12), S. 262–272.
- Weiß, M. (2008): Entwicklung eines flächenbezogenen Entscheidungsunterstützungssystems für Holzernteverfahren unter Berücksichtigung der Wertvorstellungen des Waldbesitzers. Dresden: TUDpress.
- Wolf, M. (2019): LWF Merkblatt 13: Holzernte in steilen Hanglagen.
- Ziesak, M. (2004): Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Dissertation.

## Teilvorhaben 5.1: Identifizierung und Entwicklung von Produkten (Stolze und Militz)

### Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Dieses Teilvorhaben ist in die Arbeitsschwerpunkte Massivholz und Furnierwerkstoffe aufgeteilt. Im Arbeitspaket Massivholz wird die Materialqualität des Kiefernstarkholzes (KSH) bestimmt und Informationen zur Verarbeitungsmöglichkeit in den aktuell wirtschaftenden Kiefern-Sägewerken gesammelt. Hauptaugenmerk liegt auf der Identifizierung von Produkten aus KSH, neuen Absatzmärkten und Eigenschaftsuntersuchungen. Hierbei stehen Produkte im Fokus, die durch die großen Durchmesser und teils intensive waldbauliche Behandlung der Kiefer möglich werden. Geprüft wird hierfür unter anderem, ob sich die starken Kiefern in reine Splintholz- und Kernholzsortimente für verschiedene Produkte und Anwendungen (wie Fenster, Türen, Fassaden, Dielen, Holzbauprodukte, modifizierte Holzprodukte) einteilen lassen. Darüber hinaus wird die Eignung von verschiedenen Holzmodifizierungssystemen für die Kiefer erprobt. Dieses Arbeitspaket wird in enger Zusammenarbeit mit der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), der Abteilung Forstökonomie der Universität Göttingen und mit Unterstützung des Deutschen Säge- und Holzindustrie Bundesverbands e.V. (DeSH) durchgeführt. Das Arbeitspaket Furnierwerkstoffe sieht Eigenschaftsuntersuchungen an modifizierten und verklebten Furnieren vor, um ein Eigenschaftsprofil für die späteren Anwendungen der auf KSH basierenden Furnierwerkstoffe zu erstellen. Zusätzlich werden in diesem Rahmen industrielle Produktionsverfahren getestet. Die Furnierwerkstoffe werden in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) hergestellt und geprüft.

### Bearbeitete Arbeitspakete

<b>Arbeitspakete (AP)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Bearbeitungszeitraum</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
<i>Massivholz - Festlegung von produktabhängigen Einschnittmustern und Schnittholzsortierung</i>	11/2021 bis 11/2022	Festlegung von Einschnittmustern, Einschnitt von Kiefernstarkholz und Schnittholzsortierung, Charakterisierung von Schnittholz aus Kiefernstarkholz
<i>Massivholz - Identifizierung von Produkten</i>	04/2022 bis 11/2023	Identifizierung von möglichen Produkten aus Kiefernstarkholz und Eigenschaftsuntersuchungen, Eigenschaftsprofil von Kiefern-Sortimenten für den Fensterbau
<i>Massivholz - Holzmodifizierungssysteme</i>	04/2022 bis 11/2023	Holzmodifizierung von KiefernSplint mit Kondensationsharzen, Eigenschaftsprofil von modifiziertem Kiefern-Splintholz in Gebrauchsdimensionen
<i>Furnierwerkstoffe - Grundlegende Untersuchungen im Bereich der Modifizierung von Furnieren mit Kondensationsharzen</i>	02/2022 bis 09/2024	Eigenschaftsuntersuchungen und Erstellung eines Eigenschaftsprofils von modifizierten Furnieren und modifiziertem Kiefern-LVL
<i>Furnierwerkstoffe - Grundlegende Untersuchungen im Bereich LVL-Modifizierung</i>		

### Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Potential und die Nutzung von Kiefernstarkholz (KSH) stehen derzeit im Missverhältnis, wobei eine zunehmende Knappheit an Fichtenholz und hohe Transportkosten die Kiefern-Nachfrage in Zukunft beeinflussen könnten. KSH ist in großen Mengen verfügbar und weist ein großes Qualitätsspektrum auf. Bis heute gibt es wenig regionale Nutzungsanreize für KSH, sodass große Anteile dieses Sortimentes im Wald verbleiben. Die geringe Nutzung wird nicht zuletzt daran deutlich, dass nur wenige holzverarbeitende Betriebe in den Kiefernregionen technisch dazu in der Lage sind, KSH zu verarbeiten. Zuletzt hatten jedoch einige norddeutsche Säger zugunsten eines Starkholzeinschnittes aufgerüstet. Während die besseren Qualitäten bereits vorher regional genutzt wurden, können Massivholzprodukte aus KSH durch Grobastigkeit, Risse, Bläue und erhöhte Harzigkeit in ihrer Qualität beeinträchtigt werden. Die großen Stammdimensionen des KSH bieten gegenüber normal-dimensionierten Stämmen Chancen, sodass eine kundenspezifische Sortierung von

Kern- und Splintholz opportun sein kann. Durch das „Filetieren“ von Kern und Splint kann aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften produktabhängig eine höhere Wertschöpfung erzielt werden: Während der Splint am Erdstammstück vermehrt eine höhere Holzqualität hat und folglich höhere Festigkeiten erzielen kann, ist der Kern durch die Kerninhaltsstoffe zwar dauerhafter, aber durch hohe Harzgehalte in seiner Verwertung anspruchsvoller (z. B. schwieriger zu verkleben, beschichten und imprägnieren). Die Realisierbarkeit der Kern-Splint-Trennung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes mit interessierten Akteuren des Clusters Forst und Holz erprobt. Durch gezielte Auswahl der KSH-Stämme, eine besonders flexible Einschnitttechnologie sowie klare Formulierung der Sortieranforderungen konnten hochwertige Produkte hergestellt und ihre Eigenschaften bestimmt werden. Dazu gehören z. B. modifiziertes KiefernSplintholz für Terrassendielen und Fassaden, Fensterkanteln aus Kern- und Splintholz sowie Furnierwerkstoffe aus KSH. Die Ergebnisse der Untersuchungen stimmen hoffnungsvoll, dass bei Offenheit für den Rohstoff KSH zukünftig alle Akteure des Clusters Forst und Holz profitieren.

## Literaturverzeichnis

- Bastani, A., und H. Militz. „Bondability of phenol formaldehyde modified beech wood glued with phenol resorcinol formaldehyde and polyvinyl acetate adhesives“. In Characterization of modified wood in relation to wood bonding and coating performance. COST FP0904, herausgegeben von S. Medved und A. Kutnar, 52–60, 2013.
- Charpentier, P., A. Chubinsky, V. Bombardier, F. Longuetaud, F. Mothe, A. Tambi, und M. Bakhshieva. „Study on wood species identification by using computedtomography“. Actes Forêts de l'Academie technique Saint-Petersbourg. Universite de Lorraine, France, 2013. <https://hal.science/hal-00833428v2>.
- Hallin, S., und S. Samnegard. „Heart- and Sapwood Segmentation on Hyperspectral Images using Deep Learning“. Master thesis. Linköping University, Sweden, 2023. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1774136/FULLTEXT01.pdf>.
- DIN 52182:1976-09, Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte. DIN Media GmbH, 1976. <https://doi.org/10.31030/1260135>.
- DIN 52186:1978-06, Prüfung von Holz; Biegeversuch. DIN Media GmbH, 1978. <https://doi.org/10.31030/1260171>.
- DIN EN 310:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN\_310:1993. DIN Media GmbH, 1993. <https://doi.org/10.31030/2526436>.
- DIN EN 13183-1:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz\_- Teil\_1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN\_13183-1:2002. DIN Media GmbH, 2002. <https://doi.org/10.31030/9199967>.
- DIN EN 320:2011-07, Spanplatten und Faserplatten\_- Bestimmung des achsenparallelen Schraubenausziehewiderstands; Deutsche Fassung EN\_320:2011. DIN Media GmbH, 2011. <https://doi.org/10.31030/1770944>.
- DIN 4074-1:2012-06, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit\_- Teil\_1: Nadelschnittholz. DIN Media GmbH, 2012. <https://doi.org/10.31030/1887004>.
- DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke\_- Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz\_- Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN\_408:2010+A1:2012. DIN Media GmbH, 2012. <https://doi.org/10.31030/1905080>.
- DIN EN 14080:2013-09, Holzbauwerke\_- Brettschichtholz und Balkenschichtholz\_- Anforderungen; Deutsche Fassung EN\_14080:2013. DIN Media GmbH, 2013. <https://doi.org/10.31030/1936211>.
- DIN EN 350:2016-12, Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten\_- Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff; Deutsche Fassung EN\_350:2016. DIN Media GmbH, 2016. <https://doi.org/10.31030/2414889>.
- DIN EN ISO 15148:2018-12, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten\_- Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO\_15148:2002\_+ Amd\_1:2016); Deutsche Fassung EN\_ISO\_15148:2002\_+ A1:2016. DIN Media GmbH, 2018. <https://doi.org/10.31030/3002895>.
- DIN EN 84:2020-10, Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten\_- Beschleunigte Alterung von behandeltem Holz vor biologischen Prüfungen\_- Auswaschbeanspruchung; Deutsche Fassung EN\_84:2020. DIN Media GmbH, 2020. <https://doi.org/10.31030/3117732>.
- DIN EN 1534:2020-03, Holzfußböden und Parkett\_- Bestimmung des Eindruckwiderstands\_- Prüfmethode; Deutsche Fassung EN\_1534:2020. DIN Media GmbH, 2020. <https://doi.org/10.31030/3103133>.
- DIN EN ISO 2409:2020-12, Beschichtungsstoffe\_- Gitterschnittprüfung (ISO\_2409:2020); Deutsche Fassung EN\_ISO\_2409:2020. DIN Media GmbH, 2020. <https://doi.org/10.31030/3171026>.
- DIN EN 113-2:2021-02, Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten\_- Prüfverfahren in Bezug auf Holz zerstörende Basidiomyceten\_- Teil\_2: Bewertung der natürlichen oder verbesserten Dauerhaftigkeit; Deutsche Fassung EN\_113-2:2020. DIN Media GmbH, 2021. <https://doi.org/10.31030/3181029>.
- DIN EN 302-1:2023-05, Klebstoffe für tragende Holzbauteile\_- Prüfverfahren\_- Teil\_1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung EN\_302-1:2023. DIN Media GmbH, 2023. <https://doi.org/10.31030/3403278>.

DIN EN ISO 4624:2023-09, Beschichtungsstoffe\_- Abreißversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit (ISO\_4624:2023); Deutsche Fassung EN\_ISO\_4624:2023. DIN Media GmbH, 2023.  
<https://doi.org/10.31030/3475823>.

## Teilvorhaben 5.2: Verklebbarkeit von furnierbasierten Verbundwerkstoffen auf Basis von Kiefernstarkholz

### Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

In diesem Teilprojekt wird die Möglichkeit untersucht, konventionelle Klebstoffe bei der Herstellung von Furnieren aus Kiefern-Starkholz für den Außenbereich durch speziell entwickelte isocyanatbasierte Systeme zu ersetzen. Bisher wurden im Innenbereich vor allem Weißleime und Harnstoff-Formaldehyd-Harze eingesetzt, während im Außenbereich Phenol-Formaldehyd-Harze und Melamin-Harnstoff-Harze wegen ihrer höheren Hydrolysebeständigkeit bevorzugt wurden. Diese Harze sind wasserbasiert, neigen jedoch zu brüchigen Leimfugen und können gesundheitsschädliches Formaldehyd freisetzen. Außerdem ist ihre Haftung auf Metallen begrenzt. Isocyanat-basierte Klebstoffe wie polymeres Diphenylmethandiisocyanat (pMDI) und Polyurethane (PUR) bieten hier Vorteile: Sie sind formaldehydfrei, nicht wasserbasiert und härten durch Feuchtigkeit aus. Sie zeichnen sich durch helle, elastische Klebfugen und eine gute Haftung auf verschiedenen anorganischen Materialien aus, was sie für den Einsatz im Außenbereich geeignet macht. Eine besondere Herausforderung bei der Verklebung von Kiefernstarkholz liegt in den Inhaltsstoffen des Holzes – den hohen Anteilen an Extraktstoffen und dem oft hohen Harzgehalt im Kernholz. Im Rahmen der Untersuchung wird daher der Einfluss von Splint- und Kernholz auf die Verklebungsfestigkeit analysiert. Darüber hinaus wird die Verklebbarkeit von Kiefernstarkholz mit anderen Materialien wie Metallen und Armierungsfasern untersucht, wobei auch die Verbesserung der Haftung durch Vorbehandlung der Metalloberflächen mit Primern geprüft wird. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die Ermittlung der optimalen Klebstoffmengen, Presszeiten und Pressbedingungen (Temperatur und Druck) von Bedeutung.

### Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
<i>Verklebung von Furnieren mit allen Klebstoffsystemen; Fokus auf neuartige Isocyanatsysteme/ Einfluss von Splint- und Kernholz</i>	01/2022 bis 12/2022	Es wurden Sperrhölzer mit Furnieren aus dem Kern- und Splintbereich mit den unterschiedlichen Klebstoffsystemen hergestellt und auf Zug- und Biegebelastung getestet. Darüber hinaus wurden Scherprüfkörper aus Vollholz mit Splint/Splint-, Kern/Kern- und Splint/Kern-Verklebungen gefertigt und ihre Scherfestigkeit ermittelt.
<i>Verklebung von Holz auf metallische Substrate</i>	06/2022 bis 06/2023	Die Firma Huntsman hat die isocyanat-basierten Klebstoffsysteme Suprasec 2144, Suprasec 2244 und Suprasec 2944 bereitgestellt. Die Firma Jowat hat drei verschiedene Polyurethan-Klebstoffe bereitgestellt: Jowapur 685.30, Jowapur 685.33 und Jowapur 687.22. Mit den genannten Klebstoffen wurden verschiedene Versuche im Bereich der Holz-Metall-Klebung durchgeführt und insbesondere durch Primeranwendungen Optimierungspotentiale aufgezeigt.
<i>Einfluss von Primern zur Oberflächenmodifizierung auf die Holz-Metall-Verklebung</i>	01/2022 bis 09/2023	Die Holz-Metall-Klebung zur Scherzugprüfung fanden an Scherzugprüfkörpern aus Aluminium statt. Bei der Verklebung mit Metallen kamen Primer zum Einsatz.
<i>Einfluss der Verklebung bei Verwendung verschiedener Armierungsfasern</i>	06/2023 bis 06/2024	In die äußersten Furnierlagen wurden Armierungsgewebe aus Aramidfasern, Glasfasern, Carbonfasern, Basaltfasern und Jutefasern eingearbeitet. Zusätzlich fanden Modifizierungen mit 3D-gedruckten Lagen aus thermoplastischen Kunststoffen sowie das Einarbeiten von Drahtgittern und Blechen statt.
<i>Einfluss von Primern zur Oberflächenmodifizierung auf die Wirkung von Armierungsfasern</i>	03/2024 bis 09/2024	Der Einfluss von Primern zur Oberflächenmodifizierung wurde aufgrund von Zwischenergebnissen an metallischen Oberflächen erprobt.

## **Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Die Verklebung von Kiefern-Starkholz Furnieren mit isocyanatbasierten Klebstoffen war erfolgreich und die Anforderungen an die erforderliche Festigkeit der Verklebung nach DIN EN 314 wurden erreicht. Dies war auch dann der Fall, wenn vor der Prüfung eine hygrische und/oder thermische Belastung der Furniere erfolgte. Im Vergleich zu den Referenzklebstoffen ergaben sich bei der Verwendung von PUR und pMDI geringere Elastizitätsmodule. Bei der Verklebung von Kernholz furnieren traten aufgrund der teilweise hohen Harzgehalte im Kiefern Kern vermehrt Dampfblasen auf, die eine weitere Verwendung der Produkte nicht zuließen. Scherversuche an Kernholz-Kernholz- und Kernholz-Splintholz-Verleimungen zeigten, dass mit PUR geringere Festigkeiten als mit dem Referenzklebstoff MUF erreicht wurden. Die Verklebung von Holz und Metall konnte mit einem Klebstoff auf Isocyanatbasis ohne Verwendung eines Primers erreicht werden. Die Verwendung eines Primers führte zu einer Erhöhung der Klebfestigkeit. Die Überprüfung der möglichen offenen Zeit an einem hochreaktiven und einem reaktionsträgen PUR-Klebstoff zeigte, dass die Herstellerangaben sinnvoll sind und eingehalten werden sollten. Hinsichtlich der Prozessparameter Druck und Temperatur konnte an Buchenfurnieren festgestellt werden, dass höhere Festigkeiten bei höheren Pressdrücken und Temperaturen erreicht werden. Insbesondere die Presstemperatur hat einen signifikanten Einfluss.

## **Literaturverzeichnis**

DIN EN 314-1, Sperrholz - Qualität Der Verklebung - Teil 1: Prüfverfahren. (1993).

DIN EN 302-1. (1992).

DIN EN 310, Holzwerkstoffe - Bestimmung Des Biege-Elastizitätsmoduls Und Der Biegefestigkeit. (1993).

DIN 52377. (1978).

Pröbster, M. Elastisch Kleben: aus der Praxis für die Praxis. (Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013).

[Obj]