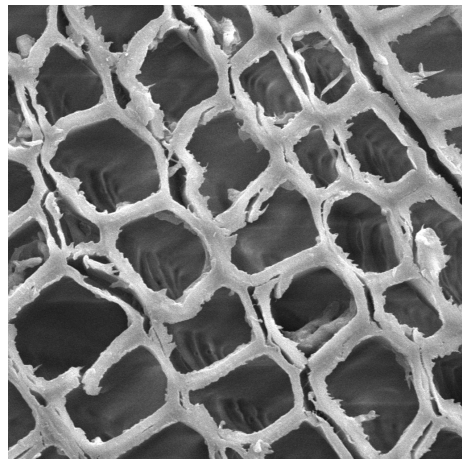


TimberLoop

AP 3: Materialeigenschaften alter tragender Holzbauteile im Hinblick auf ihr Kreislaufpotenzial



Materialeigenschaften alter tragender Holzbauteile im Hinblick auf ihr Kreislaufpotenzial

TimberLoop - Endbericht zum AP3

Projektnummer.: 900315

HFA-Projektnummer.: 52500

Gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Autoren

Dipl.-Ing. Kaspar Albrecht

Dr. Andreas Neumüller

Beteiligte Firmen

WIEHAG Timber Constructions GmbH

Stora Enso Wood Products GmbH

Rubner Holding AG

Ing. Georg Schuh

materialnomaden GmbH

Dipl.-Ing. Thomas Romm

 **Waldfonds
Republik Österreich**

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft, Regionen
und Wasserwirtschaft



FFG
Forschung wirkt.

Wien, April 2025

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	6
2	Stand der Technik	7
2.1	Mechanische Eigenschaften von Altholz	7
2.2	Einflussfaktoren auf die Altholzqualität	7
2.3	Alterungseffekte von Holz	8
2.4	Alterungseffekte von Klebstoffen in Holzbauteilen	9
2.5	Festigkeitssortierung von Altholz.....	10
2.6	Sanierung von tragenden Holzbauteilen	11
3	Material	12
3.1	Altes Massivholz	12
3.2	Altes Brettschichtholz	13
4	Methoden	15
4.1	Festigkeitssortierung von Altholz.....	15
4.2	Materialprüfungen von alten Bauteilen.....	16
4.3	Materialprüfungen von Stablamellen	19
4.4	Materialprüfungen von neuen Bauprodukten aus Altholz.....	21
5	Ergebnisse.....	27
5.1	Festigkeitssortierung von Altholz.....	27

5.2	Materialeigenschaften alter Holzbauteile	28
5.3	Materialeigenschaften von Stablamellen aus Altholz	35
5.4	Materialeigenschaften von Brettsperrholz aus Altholz	41
5.5	Materialeigenschaften von Brettschichtholz aus Altholz	49
6	Diskussion	52
6.1	Altholzsortimente und Sortierklassen.....	52
6.2	Mechanische Eigenschaften rückgebauter Holzbauteile	53
6.3	Verklebungsqualität rückgebauter Holzbauteile	55
6.4	Mechanische Eigenschaften von Stablamellen aus Altholz	56
6.5	Materialeigenschaften neuer Bauprodukte aus Altholz	58
7	Schlussfolgerung und Ausblick	60
8	Literaturverzeichnis.....	61
9	Abbildungsverzeichnis.....	62
10	Tabellenverzeichnis.....	65
11	Begriffsdefinitionen.....	65

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht werden die Materialeigenschaften von rückgebauten tragenden Holzbauteilen und daraus hergestellten Halbfertigprodukten im Hinblick auf ihr Potenzial für eine Kreislaufführung untersucht. Eine Kreislaufführung von Holzbauteilen kann den Verbrauch primärer Holzressourcen verringern, zur langfristigen CO₂-Speicherung über mehrere Lebenszyklen beitragen und Abfallströme reduzieren. Materialprüfungen typischer Altholzsortimente aus Österreich haben gezeigt, dass alte Vollholz- und Brettschichtholzbalken (BSH) Biegefestigkeiten über 24 N/mm² sowie Elastizitätsmodule von über 11000 N/mm² (Vollholz) bzw. 11500 N/mm² (BSH) erreichen und damit die Anforderungen der gängigen Festigkeitsklassen bzw. Hauptsortimente C24 und GL24h auch nach der Erstnutzung erfüllen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die normativen Anforderungen an die Verklebungsqualität auch nach der Nutzung und Alterung alter verklebter Holzbauteile weitgehend erfüllt werden. In wenigen Einzelfällen traten negative Ergebnisse bei Delaminierungs- und Scherprüfungen von Klebefugen auf, die vermutlich durch klimabedingte Feuchtigkeitseinflüsse an exponierten Randbereichen und damit durch bauliche Mängel verursacht wurden. Untersuchungen zur Weiterverarbeitung von altem Brettschichtholz zu neuen Holzbauprodukten zeigten vielversprechende Ergebnisse. Stablamellen, die vertikal zur Klebefuge herausgetrennt wurden, wiesen gute mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Streuung auf. Dies konnte durch die Verteilung von festigkeitsvermindernden Holzeigenschaften und dem daraus resultierenden Homogenisierungseffekt erklärt werden. Zug- und Biegeprüfungen bestätigten, dass die untersuchten Stablamellen aus altem Brettschichtholz weitgehend die Anforderungen der Festigkeitsklasse T14 erfüllten. Hier gilt es zu beachten, dass - wie bei Brettlamellen aus Vollholz - auch die Eigenschaften von Stablamellen je nach Herkunft aus marknahen oder markfernen Bereichen des Ausgangsmaterials variieren. Die Gesamtbetrachtung der Ergebnisse belegt das erhebliche Potenzial der Kreislaufführung alter tragender Holzbauteile. Trotz der insgesamt vielversprechenden mechanischen Eigenschaften bestehen jedoch weiterhin technische Herausforderungen für die zirkuläre Nutzung von tragenden Holzbauteilen. Die Entwicklung eines auf Altholz zugeschnittenen Klassifizierungssystems für die Festigkeitssortierung wird zukünftig notwendig sein, um festigkeitsvermindernde Merkmale, die durch Nutzung und Alterung verursacht werden, zuverlässig identifizieren und die geforderten mechanischen Eigenschaften für die Bemessung sicherzustellen zu können. Zudem müssen chemische Kontaminationen entweder durch eine optische Beurteilung ausgeschlossen oder betroffene Oberflächen vor der Weiterverarbeitung entfernt werden, um rechtliche Schadstoffgrenzwerte einzuhalten. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit effizienter Logistikprozesse für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Altholz. Darüber hinaus sind standardisierte Evaluierungsverfahren und Grenzwerte für Schadstoffe erforderlich, um einheitliche Rahmenbedingungen für die Wiederverwendung und das Weiterverarbeiten von Altholz im konstruktiven Bereich zu schaffen.

ABSTRACT

This project report analyses the material properties of aged load-bearing timber elements, and the semi-finished products derived from them, with a focus on their potential for reuse, repair, and remanufacturing to ensure a circular economy for timber elements. The circular use of timber elements can significantly reduce the consumption of primary wood resources, contribute to long-term CO₂ sequestration over multiple life cycles, and minimize waste streams. Material tests of typical old timber assortments from Austria has shown that aged solid timber and glued laminated timber (GLT) can achieve bending strengths exceeding 24 N/mm², as well as elastic moduli of more than 11000 N/mm² (solid wood) and 11500 N/mm² (GLT), meeting the requirements for the common strength classes and main assortments C24 (solid timber) and GL24h (GLT). Furthermore, the normative requirements for gluing quality were largely met, even after the use and aging of these timber elements during their initial service life. However, in a few cases, negative results in delamination and shear tests of glue lines were observed, likely due to climate-related moisture exposure of exposed sections, possibly caused by construction defects. Attempts to remanufacture old glued laminated timber into new semi-finished products revealed that strip-like laminations exhibited good mechanical properties, with low variance due to the distribution of strength-reducing wood features and a resulting homogenization effect. The strip-like laminations were produced by cutting glued laminated timber across the glue lines into single lamellas, which can then be used as semi-finished product for new building applications. Tensile and bending tests demonstrated that the tested strip-like laminations derived from aged GLT met the requirements of strength class T14, the most processed strength class nowadays. As with solid timber, the properties of strip-like laminations depend on whether they originate from zones near or far from the pith of the source material. The findings highlight the significant potential of remanufacturing old load-bearing timber elements into new construction products, in alignment with the principles of a circular economy in the timber sector. Despite the promising mechanical properties, technical challenges for the circular use of old timber components remain. The development of a strength grading system specifically tailored to aged wood is crucial to reliably identify strength-reducing features from aging and usage, ensuring the required mechanical properties. Additionally, potential chemical contamination must be detected and fully removed prior to further processing. The findings particularly emphasize the need for efficient planning processes for grading and processing aged timber to optimize the reuse of load-bearing components. Moreover, standardized evaluation procedures and limit values for chemical contamination will be essential to ensure material quality and safety, while establishing consistent frameworks for the reuse and remanufacturing of aged timber.

1 Einleitung

Im Vergleich zu anderen Baumaterialien wird Holz aus dem konstruktiven Bereich nach Ablauf des ersten Lebenszyklus und dem anschließenden Abbruch oder Rückbau nur selten wiederverwendet oder zu neuen tragenden Bauteilen weiterverarbeitet. Stattdessen wird Altholz meist als Rohstoff für Span- und Faserplatten aufbereitet oder direkt energetisch genutzt. Die Kaskadennutzung führt mit jedem weiteren Verarbeitungsschritt zu einem erheblichen Verlust des Werts und der Funktionalität der ursprünglichen Bauteile. Zudem führen die weiteren Verarbeitungsschritte zu zusätzlichen Abfallströmen sowie schädlichen Treibhausgasemissionen [1].

Um diesem Ressourcenverlust entgegenzuwirken, verfolgt die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie das Ziel, den stofflichen Materialkreislauf für Holz und andere Baustoffe möglichst vollständig zu schließen [2]. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist die quantitative und qualitative Erfassung der verfügbaren Altholzsortimente mit Wiederverwendungspotenzial. Darüber hinaus müssen technisch realisierbare Konzepte entwickelt und regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden, um eine strukturierte Kreislaufführung von Altholz in tragenden Anwendungen zu ermöglichen.

Für eine effiziente Kreislaufführung im Holzbau ist es notwendig, Holzbauteile so zu gestalten, dass sie nach ihrem ersten Lebenszyklus ohne Verlust an Funktionalität oder Wert demontiert und entweder direkt wiederverwendet, instandgesetzt oder zu neuen tragenden Produkten weiterverarbeitet werden können. Moderne Holzbauprodukte sind jedoch aufgrund komplexer Fertigungstechniken, Bauweisen und der Vielzahl an Verbindungsmitteln häufig nicht für eine direkte Wiederverwendung geeignet. Um diese Herausforderungen zu überwinden, sind innovative, technologisch fundierte Konzepte erforderlich, die eine zirkuläre Nutzung von Holz im Bauwesen ermöglichen und so zur Etablierung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft beitragen.

Neben technologischen Aspekten spielen auch wirtschaftliche, rechtliche und politische Faktoren eine entscheidende Rolle bei der Wiederverwendung, Reparatur und Weiterverarbeitung alter tragender Holzbauteile. Technologisch ist insbesondere sicherzustellen, dass aufbereitete oder weiterverarbeitete Bauteile auch nach ihrer Erstnutzung die statischen Anforderungen ihrer neuen Anwendung erfüllen. Hierfür sind detaillierte Informationen zur Herkunft der Holzbauteile sowie zu möglichen Veränderungen ihrer mechanischen Eigenschaften durch Alterung und Nutzung unerlässlich.

Dieser Forschungsbericht analysiert die Materialeigenschaften typischer Altholzsortimente, die in Österreich bei Rückbau- und Abbrucharbeiten anfallen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Entwicklung von Kreislaufkonzepten für Holzbauteile und liefern orientierende Materialkennwerte für die Bewertung der potenziellen Wiederverwendbarkeit sowie die Optimierung technischer Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozesse.

2 Stand der Technik

2.1 Mechanische Eigenschaften von Altholz

Die mechanischen Eigenschaften von Altholz sind von zentraler Bedeutung für die Bewertung, ob rückgebaute Bauteile für eine Wiederverwendung, Reparatur oder Weiterverarbeitung geeignet sind und erneut tragende Funktionen übernehmen können. Während die Festigkeitseigenschaften von Frischholz durch normierte Sortierverfahren erfasst und in der Weiterverarbeitung berücksichtigt werden, ist bei Altholz häufig unklar, inwieweit es nach Alterung und Erstnutzung weiterhin die erforderlichen mechanischen Kennwerte erfüllt. Alterungsprozesse sowie vorangegangene Nutzungsbedingungen können zu strukturellen Veränderungen im Holz führen, die dessen mechanische Eigenschaften und somit auch die Tragfähigkeit beeinträchtigen. Diese Unsicherheiten erfordern eine systematische Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Altholz, um belastbare Bewertungsgrundlagen für dessen Wiederverwendung zu schaffen und eine sichere Nutzung in tragenden Anwendungen zu gewährleisten.

2.2 Einflussfaktoren auf die Altholzqualität

Bislang gibt es keine allgemein anerkannten Erkenntnisse über den Einfluss der natürlichen Alterung und Nutzung auf die mechanischen Eigenschaften von Holz. Bei Versuchen, Altholz zu charakterisieren, treten Überlagerungseffekte aufgrund natürlicher Wuchsmerkmale auf, die es erschweren, genau zu bestimmen, welche Veränderungen der Eigenschaften ausschließlich durch Alterung und Nutzung verursacht werden und welche durch die Variabilität des Holzes bedingt sind [3]. In vielen Untersuchungen ist zudem nicht eindeutig geklärt, ob Nutzungserscheinungen wie Krieeffekte durch das Langzeitverhalten als Teil der Alterung oder als separate Phänomene der Nutzung betrachtet werden.

Um valide statistische Daten über den Einfluss der Alterung auf die mechanischen Eigenschaften von Altholz zu erhalten, ist es erforderlich, die Überlagerungseffekte von Altholz bei der Charakterisierung zu identifizieren, bevor entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden. Bei der Charakterisierung von Altholz lassen sich mehrere Hauptursachen für Überlagerungseffekte feststellen, die zu erheblichen Streuungen der Ergebnisse und einer Verringerung der charakteristischen mechanischen Kennwerte führen können [3,4]:

- Variabilität innerhalb der Grundgesamtheit
- Variabilität innerhalb der Stichprobe
- Übermäßige statische Belastungen in der ersten Nutzungsphase
- Befall durch holzerstörende Insekten und Pilze
- Mechanische Beschädigungen durch die Demontage

2.3 Alterungseffekte von Holz

Die natürliche Variabilität der mechanischen Eigenschaften von Prüfmaterial aus Holz lässt sich durch einen ausreichend großen Probenumfang und eine hohe Anzahl an Einzelmessungen weitestgehend reduzieren. Es ist jedoch wesentlich schwieriger, Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Altholz eindeutig auf statische Belastungen, mechanische Beschädigungen oder den Befall durch holzerstörende Organismen zurückzuführen [4]. In diesem Kontext stellt die Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl repräsentativer Proben eine besondere Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für Altholz, das oft nur in begrenzter Menge und variierender Qualität zur Verfügung steht. Zudem liegen häufig nur unzureichende Informationen über die Herkunft und die Nutzungsbedingungen des untersuchten Materials vor [3].

Bei der Entnahme von Proben aus einem rückgebauten Bauteil können die lokalen Eigenschaften erheblich variieren, da das Bauteil je nach der Position im Bauwerk unterschiedlichen Belastungen und Umwelteinflüssen ausgesetzt gewesen sein kann. Zusätzlich können auch natürliche Schwankungen innerhalb des Holzes selbst zu erheblichen Unterschieden führen. Daher ist es unerlässlich, jede Einzelprobe vor den Untersuchungen detailliert auf ihre Repräsentativität zu überprüfen, um mögliche Überlagerungseffekte im Vorfeld auszuschließen. Nur durch diese sorgfältige Prüfung können verlässliche Ergebnisse über die mechanischen Eigenschaften von Altholz erzielt werden.

Trotz zahlreicher Forschungsarbeiten gibt es noch keine einheitliche Aussage über die Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch die natürliche Alterung von Holz [5]. Veränderungen durch eine Alterung können sowohl aus chemischer als auch physikalischer Sicht beschrieben werden, wobei die chemische Zusammensetzung gemeinsam mit dem strukturellen Aufbau hauptverantwortlich für die mechanischen Eigenschaften von Holz sind und dadurch auch für Änderungen durch Alterung eine maßgebliche Rolle spielen.

Sonderegger et al. untersuchten die Alterungseffekte der europäischen Holzarten Fichte, Tanne und Eiche. Die Holzproben stammten von Abbrüchen alter rückgebauter Gebäude und variierten im Alter zwischen 90 und 470 Jahren. Es wurde festgestellt, dass sich das Quell- und Schwindverhalten sowie die Biege- und Schlagbiegefestigkeit durch die natürliche Alterung des Holzes nicht oder nur unwesentlich verringert haben. Im Gegensatz dazu zeigte die ermittelte Schlagbiegefestigkeit eine nachweisbare Reduktion [4].

Cavalli et al. verglichen zahlreiche Forschungsergebnisse zur Charakterisierung von Altholz und kamen zu dem Schluss, dass nur die reduzierte Schlagbiegefestigkeit von Altholz ein konsistentes Ergebnis in der vorhandenen Literatur darstellt. Alle anderen technischen Kennwerte in den verschiedenen Literaturquellen widersprechen sich teilweise erheblich. Insbesondere bei der Veränderung der Zugfestigkeit von Altholz finden sich in der Literatur stark abweichende Ergebnisse [5].

Kojima et al. nutzten Röntgenmessungen, um strukturelle Unterschiede zwischen Frisch- und Altholz zu untersuchen. Sie analysierten einen 250 Jahre alten Holzbalken, der aus einer Dachkonstruktion entnommen wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass Zellulose in gealtertem Holz im Vergleich zu frischem Holz verzögert auf Zug- und Druckspannungen reagiert. Unter Druckbeanspruchung stieg die maximale Dehnung der Zellulose und die Variabilität der Faserorientierung nahm signifikant zu. Die Autoren führten dies auf den verringerten Anteil an Hemizellulosen in der Zellwand zurück [6]. Auch Kránitz beschreibt einen reduzierten Gehalt an Hemizellulosen in der chemischen Zusammensetzung von Altholz. Zusätzlich wurde ein Abfall des Gehalts an Extraktstoffen festgestellt [3].

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Literatur, dass die natürliche Alterung von Holz in der Regel keine signifikanten Veränderungen der wichtigsten mechanischen Eigenschaften mit sich bringt, sofern Kriecheffekte und andere durch Nutzung verursachte, festigkeitsvermindernde Merkmale ausgeschlossen werden können. Die einzige Ausnahme bildet die Schlagbiegefestigkeit, die sich gemäß experimentellen Untersuchungen nachweislich durch die natürliche Alterung des Holzes verringert.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde der Schwerpunkt auf die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von tragenden Bauteilen gelegt, insbesondere auf die Kennwerte, die bei der Bemessung für eine zukünftige Nutzung in tragenden Anwendungen relevant sind.

2.4 Alterungseffekte von Klebstoffen in Holzbauteilen

Im modernen Holzbau finden verklebte Holzbauteile aufgrund ihrer optimierten statischen Eigenschaften und des hohen Vorfertigungsgrads breite Anwendung, da sie eine gesteigerte Flexibilität in der Planung und Realisierung von Bauprojekten ermöglichen. Bei der Wiederverwendung, Reparatur und Weiterverarbeitung solcher Bauteile sind nicht nur die mechanischen Eigenschaften des Holzes, sondern auch die Qualität der Verklebung von zentraler Bedeutung. Die mechanischen Eigenschaften und die Langlebigkeit der Bauteile sind maßgeblich von der Verklebungsqualität abhängig, weshalb diese vor einer geplanten Wiederverwendung oder Weiterverarbeitung einer umfassenden und sorgfältigen Untersuchung unterzogen werden muss.

Raknes (1975) stellte fest, dass nach zehn Jahren freier Bewitterung nur phenolresorzinharzverklebte (PRF) Bauteile noch die Anforderungen der norwegischen Leimholzüberwachung (NTI 1975) erfüllten. Nach dreißig Jahren Innenlagerung und zwanzig Jahren geschützter Außenlagerung wiesen sowohl phenolresorzinharzverklebte als auch harnstoffformaldehydverklebte (UF) Bauteile zufriedenstellende Trockenergebnisse gemäß NS 3470 (NSF 1979) auf. Zufriedenstellende Nassfestigkeiten wurden hingegen nur bei modifizierten UF-Klebstoffen und PRF-Klebstoffen festgestellt. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass UF-Klebstoffe langfristig lediglich für Innenanwendungen sowie geschützte

Außenanwendungen geeignet sind, während sich PRF-Klebstoffe sowohl für Innen- als auch Außenanwendungen eignen [7]. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass alte Holzbauteile auch nach jahrelanger Nutzung intakte Klebefugen aufweisen, sofern die klimatischen Bedingungen konstant sind und sich in einem für Holzbauteile geeigneten Bereich befinden.

2.5 Festigkeitssortierung von Altholz

Die Festigkeitssortierung von Holz ermöglicht eine präzise Berechenbarkeit der daraus hergestellten Bauteile und gewährleistet die Einhaltung der Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften. Bei Altholz ist die Festigkeitssortierung jedoch deutlich komplexer als bei Frischholz, da neben den etablierten Kriterien auch Merkmale berücksichtigt werden müssen, die bisher keiner normativen Regelung unterliegen. Die aktuell gültige Norm DIN 4074-1, die für die visuelle Sortierung von Frischholz verwendet wird, kann grundsätzlich auch für die Bewertung festigkeitsrelevanter Merkmale von Altholz, wie Ästen und anderen Holzmerkmalen, herangezogen werden. Jedoch berücksichtigt diese Norm keine spezifischen, für Altholz charakteristischen Faktoren, wie etwa fehlende Querschnitte aufgrund ehemaliger Verbindungselemente, mechanische Beschädigungen wie Risse und Quetschungen sowie das Vorhandensein von Störstoffen wie Nägeln und Schrauben [8]. Darüber hinaus ist Fäule im Anfangsstadium bei Altholz aufgrund von alterungsbedingten Verfärbungen häufig nicht direkt erkennbar, kann jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit und Stabilität der Bauteile haben. Alle genannten Faktoren können die Festigkeit und Eignung von Altholz erheblich beeinträchtigen. Daher sind eine gründliche visuelle Inspektion und Materialprüfungen erforderlich, um die Materialqualität zuverlässig bewerten zu können. Die Beurteilung von Altholz stellt somit eine individuelle Herausforderung dar, die den Bedarf an neuen Klassifizierungsmethoden aufzeigt.

Die Festigkeitssortierung von Bauholz wurde erstmals 1933 in Deutschland durch die DIN 4074 geregelt, die sich anfänglich nur auf Kantholz bezog. Die ÖNORM B 4100-2, erstmalig veröffentlicht in 1951, legte die Sortiervorschrift für die Güteklasse „Gutes Bauholz“ fest, welche auch auf Bretter anwendbar war [9]. Diese Norm führte keine weiteren Differenzierungen zwischen Sortierklassen durch, sondern klassifizierte das Holz lediglich als entweder „Gutes Bauholz“ oder nicht. Die Bemessungsgrundlagen für visuell sortiertes Bauholz dieser Güteklasse beinhalteten eine zulässige Biegespannung von 11,5 N/mm² sowie ein E-Modul von 10000 N/mm².

Mit der Überarbeitung und Übernahme der DIN 4074 im Dezember 1997 wurde die Güteklasse „Gutes Bauholz“ durch die heute gültigen Sortierklassen „S7“, „S10“ und „S13“ ersetzt und eine differenziertere, mehrstufige Beurteilung wurde ermöglicht. Vergleiche zwischen den Anforderungen der historischen Güteklasse „Gutes Bauholz“ und den heute gültigen Sortierklassen gemäß DIN 4074-1 zeigen, dass die alte Sortierklasse „Gutes Bauholz“ je nach Merkmal in etwa den Anforderungen der heute gültigen Sortierklassen „S10“ bis „S13“

entspricht. Die zulässigen Astmaße der Güteklasse „Gutes Bauholz“ sind dabei gleich definiert wie bei der Sortierklasse „S10“ gemäß DIN 4074-1.

Rückgebaute Holzbauteile, die vor 1997 verarbeitet wurden, erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens die Qualitätsanforderungen der heutigen Sortierklasse „S10“ und können daher der Festigkeitsklasse „C24“ zugeordnet werden, vorausgesetzt, die Bauteile wurden damals vor der Verarbeitung als „Gutes Bauholz“ klassifiziert. Holz, das vor 1951 verwendet wurde, unterlag hingegen keinen normierten Sortiervorschriften. Es ist anzunehmen, dass die Beurteilung von Bauholz in dieser Zeit überwiegend subjektiv erfolgte und Stämme sowie Bretter anhand von Erfahrungswerten und in sorgfältiger Auswahl für die jeweiligen Verwendungszwecke bestimmt wurden.

Der aktuelle norwegische Normenentwurf prNS3691 zur Sortierung von Altholz berücksichtigt bereits festigkeitsrelevante Merkmale, die durch Alterung und Nutzung bedingt sind. Der Ansatz basiert auf der Erweiterung der bestehenden skandinavischen Sortiernorm für Frischholz (DS/INSTA 142). Dabei wird das Altholz zunächst nach den Kriterien der bestehenden skandinavischen Frischholzsortierung beurteilt. Im Anschluss erfolgt eine weitergehende Differenzierung anhand zusätzlicher Sortierkriterien, die speziell für die durch Alterung und Nutzung hervorgerufenen Veränderungen entwickelt wurden. Für die neuen Sortierklassen der Altholzsortierung werden entsprechende charakteristische Kennwerte für die mechanischen Eigenschaften angeführt.

2.6 Sanierung von tragenden Holzbauteilen

Sanierungsmaßnahmen bieten eine Möglichkeit, die Funktionalität alter, beschädigter Bauteile wiederherzustellen. Dabei werden festigkeitsvermindernde Schäden durch gezielte Reparaturen behoben. Da der Umfang von Schäden oft nicht sofort im Detail festgestellt werden kann, ist meist eine gründliche Untersuchung des betreffenden Bauteils erforderlich. Besonders die Rissanierung von Brettschichtholz stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, bestehende Schäden durch die Nutzung und Alterung zu beheben und die Tragfähigkeit des Materials durch eine Reparatur wiederherzustellen.

In einem Forschungsprojekt der Holzforschung Austria zur Rissanierung wurden 4 gebogene Brettschichtholzträger zunächst bis zum Bruch belastet, anschließend saniert und danach erneut bis zum Bruch belastet. Bei diesen 3-Punkt-Biegeprüfungen zeigte sich, dass die maximal aufgenommene Spannung der sanierten Träger, abhängig vom verwendeten Klebstoffsystem und der Ausprägung der ursprünglichen Rissbildung, variierte. Dennoch konnte die ursprüngliche maximale Spannung durch die Sanierungsmaßnahmen weitgehend wieder erreicht werden [10].

Weitere Sanierungsmaßnahmen sind das Einbringen von Querzugverstärkungen, um Querzugschäden auszugleichen sowie das Aufbringen zusätzlicher Materialquerschnitte zur Rissüberbrückung und Wiederherstellung der strukturellen Integrität.

3 Material

Im Rahmen der Untersuchungen von Altholzsortimenten wurden zwei verschiedene Kategorien alter Holzbauteile analysiert:

1. Altholz aus abgerissenen Gründerzeitbauten:

Diese Kategorie umfasst Holz aus historischen Gebäuden, die während der architekturgeschichtlichen Gründerzeit (1840 - 1914) errichtet und kürzlich abgerissen wurden. Untersucht wurden sowohl Kanthölzer als auch Dippelbäume, die zur Zeit ihrer Nutzung in Zwischendecken und Dachstühlen verbaut waren. Neben der Charakterisierung von Kantholzbalken als ganze Bauteile, wurde ein Teil des Materials in Brettlamellen aufgetrennt und in neue Bauprodukte weiterverarbeitet.

2. Alte Brettschichtholzbalken aus Tragkonstruktionen:

Die untersuchten Balken waren je nach Herkunft bis zu 50 Jahre alt und wurden zunächst als ganze Bauteile charakterisiert. Für weiterführende Untersuchungen wurden die Balken entlang der Klebefuge in Blöcke und anschließend vertikal zur Klebefuge in Stablamellen aufgeteilt, die wiederum individuell charakterisiert wurden.

3.1 Altes Massivholz

Das Prüfmaterial zur Charakterisierung von altem Massivholz und die Herstellung von neuem Brettschicht- und Brettsper Holz stammte aus Gebäuden in der Umgebung von Wien. Es umfasste sowohl Kantholzbalken als auch Dippelbäume aus Zwischendecken und Dachstühlen (Abbildung 1). Aufgrund des quadratischen Querschnitts wurden für die Bauteilprüfungen ausschließlich Kantholzbalken verwendet. Für die Weiterverarbeitung zu Brettlamellen für die Fertigung von neuem Brettsper Holz wurden sowohl Kanthölzer als auch Dippelbäume der Holzart Fichte und Kiefer verwendet. Das Alter des Prüfmaterials lag schätzungsweise bei über 100 Jahren.



Abbildung 1: Altes Massivholz während (links) und nach dem Abbruch (rechts)

3.2 Altes Brettschichtholz

Das Prüfmaterial zur Charakterisierung von altem Brettschichtholz sowie zur Herstellung von neuem Brettschichtholz für Verklebungsprüfungen wurde aus drei verschiedenen Bauwerken entnommen. Das untersuchte Probenmaterial variierte hinsichtlich der verwendeten Klebstoffsysteme (PRF- und UF-Klebstoffe), der Geometrie und des Alters, das je nach Herkunft bis zu etwa 50 Jahre betrug.

3.2.1 Brettschichtholzabschnitte für Bauteilprüfungen

Die für die Bauteilprüfungen verwendeten Brettschichtholzträger stammten aus einem 1983 in Wien errichteten öffentlichen Schwimmbad und wurden im Zuge von Sanierungsmaßnahmen im Jahr 2023 ausgebaut (Abbildung 2). Für die Materialprüfungen wurden ausschließlich intakte Brettschichtholzbalken ausgewählt. Bei der ursprünglichen Herstellung der Träger wurde für die Verklebung ein PRF-Klebstoff verwendet, was durch die charakteristische rotbräunliche Färbung und den üblichen Geruch der Klebefugen festgestellt werden konnte. Zudem konnte durch das Vorhandensein einer Plakette des ehemaligen österreichischen Leimholzverbands nachgewiesen werden, dass das untersuchte Material zur Zeit der Herstellung den Qualitätsanforderungen „Technische Vorschriften Holzleimbau“ des österreichischen Leimbauverbandes (ÖLV) entspricht.



Abbildung 2: Alte Brettschichtholzträger im Bestand (links) und herausgetrennte Abschnitte für die Bauteilprüfungen (rechts)

3.2.2 Brettschichtholz für die Herstellung von Stablamellen

Zur Herstellung von Stablamellen aus Brettschichtholz wurden Träger aus drei unterschiedlichen Tragwerken verarbeitet (Abbildung 3):

1. Tragwerk mit PRF-verklebten Brettschichtholzträgern, errichtet etwa 1980 und als Dachtragwerk in einer Produktionshalle für Holzwerkstoffe verwendet
2. Tragwerk mit UF-verklebten Brettschichtholzträgern, errichtet um etwa 1970
3. Tragwerk mit UF-verklebten Brettschichtholzträgern, errichtet um etwa 1990

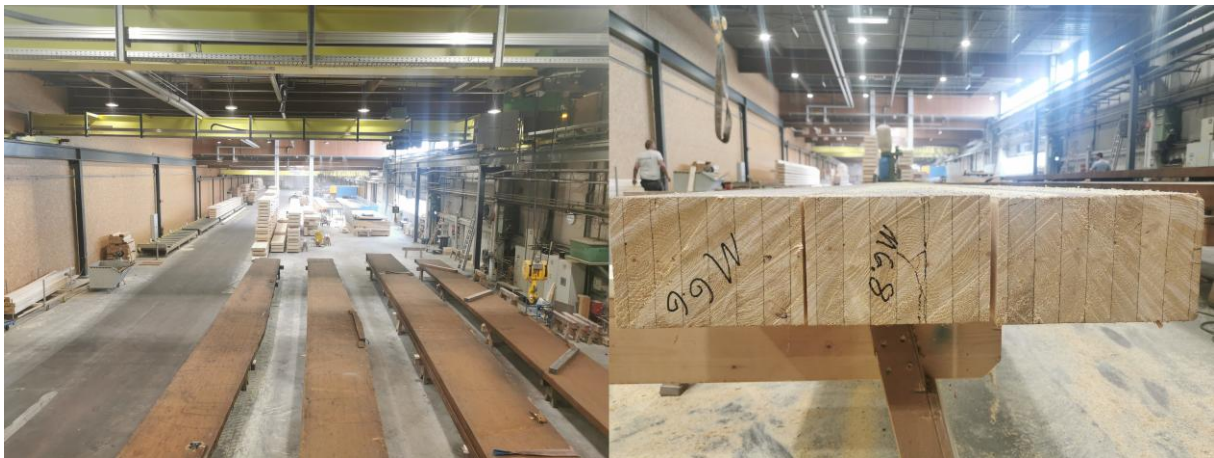


Abbildung 3: Altes Brettschichtholz vor (links) und während (rechts) der Verarbeitung zu Stablamellen

4 Methoden

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Rohmaterialien, Verarbeitungsschritte und Prüfmethode, die zur Charakterisierung der untersuchten Altholzsortimente angewendet wurden. Zunächst wurden Festigkeitsprüfungen durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften der alten Holzbauteile sowie deren Eignung für eine direkte Wiederverwendung zu bewerten. Anschließend wurden aus alten Bauteilen Halfertigprodukte sowie neue Bauprodukte hergestellt und wiederum charakterisiert, um die Möglichkeit einer Weiterverarbeitung zu ermitteln. Neben den mechanischen Eigenschaften des Holzes wurden bei verklebten Produkten auch die Verklebungseigenschaften untersucht. Ziel der Untersuchungen war es, zunächst die Qualität des Altholzes zu bestimmen und auf dieser Basis neue Halfertig- sowie Bauprodukte zu entwickeln, um deren Eignung für die Weiterverarbeitung zu evaluieren.

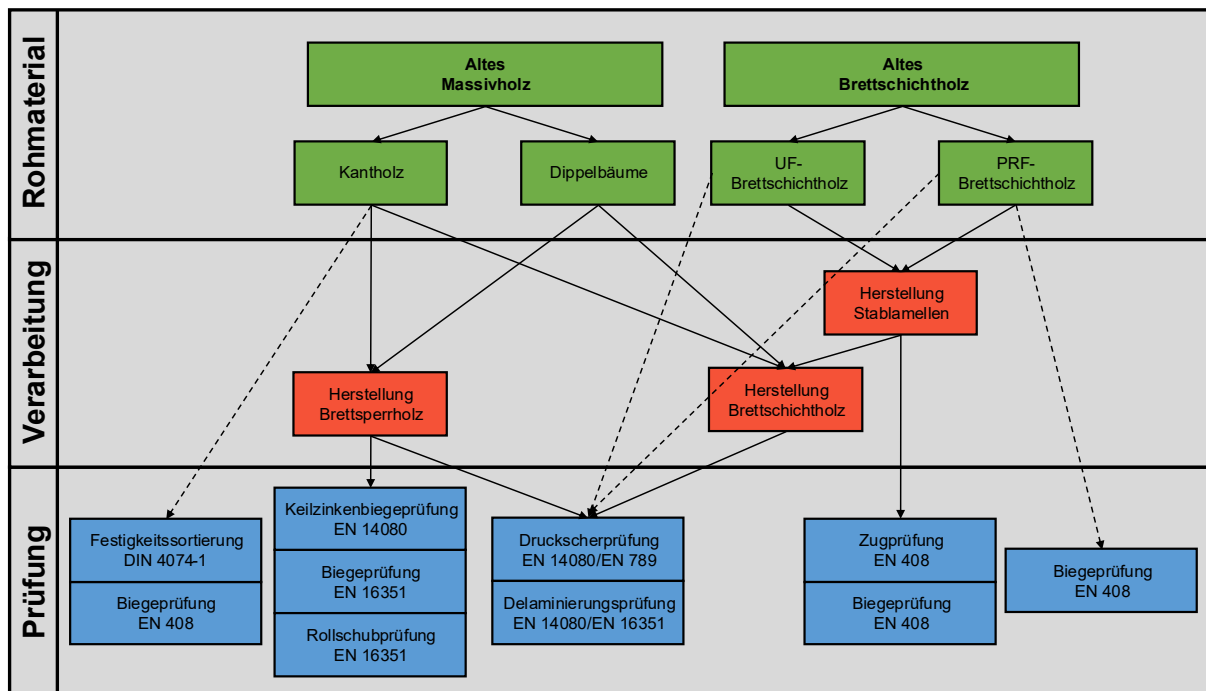


Abbildung 4: Angewandte Methoden zur Charakterisierung verschiedener Altholzsortimente. Die gestrichelten Linien kennzeichnen Bauprodukte, die direkt geprüft wurden, während die durchgängigen Linien Verarbeitungsschritte zu neuen Bauprodukten und deren anschließende Prüfung darstellen.

4.1 Festigkeitssortierung von Altholz

Um die Eignung der Sortierkriterien der DIN 4074-1 für die Klassifizierung von Altholz zu bewerten und die erreichbaren Sortierklassen in gängigen Altholzsortimenten zu ermitteln, wurden 19 Kanthölzer visuell in die Sortierklassen „S7“, „S10“ und „S13“ sortiert (Abbildung 5). Die Kanthölzer stammten aus Abbrüchen von Bauwerken aus der Gründerzeit mit einem

geschätzten Alter von über 100 Jahren und zeigten ähnliche Querschnittsmaße von durchschnittlich 260 x 180 mm bei einer Länge von etwa 5 Metern.



Abbildung 5: Gemäß DIN 4074-1 sortierte Kantholzbalken aus abgebrochenen Gründerzeithäusern

4.2 Materialprüfungen von alten Bauteilen

Bauteile wurden hinsichtlich ihrer verbleibenden Festigkeitseigenschaften nach der Erstnutzung überprüft, um festzustellen, ob durch die Alterung und Nutzung signifikante Festigkeitsverluste aufgetreten sind. Zusätzlich wurden bei den verklebten Brett-schichtholzträgern Untersuchungen zur Verklebungsqualität durchgeführt, um nutzungsbedingte Veränderungen der Klebefugen zu quantifizieren.

Anschließend wurde eine Brettsperrholzplatte aus Altholzlamellen gefertigt, um die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften neuer Produkte aus Altholz zu untersuchen. Zur Bewertung der Verklebungsqualität neuer Klebeverbindungen mit Altholz wurden neue Brett-schichtholzträger aus Altholz hergestellt.

4.2.1 Biegeprüfung von alten Kantholzbalken

Die Biegeprüfung der alten Kantholzbalken erfolgte gemäß der Norm EN 408 [10]. Es wurden insgesamt 10 Prüfkörper aus dem gleichen Gebäude hochkant auf Biegung geprüft. Diese Kantholzbalken waren bei ihrer Erstnutzung in Zwischendecken und Dachstühlen verbaut und wiesen ein Alter von über 100 Jahren auf (Abbildung 6).

Die Prüfkörper wurden nach dem Entfernen aus dem Gebäude trocken gelagert und auf eine definierte Prüflänge zugeschnitten. Der Querschnitt der Prüfkörper war einheitlich und wurde für die Prüfungen nicht angepasst. Vor der Prüfung wurden die Kanthölzer gemäß DIN 4074-1 sortiert. Neben der Biegefestigkeit wurden zusätzlich der Biege-E-Modul und die Dichte der Bauteile ermittelt. Die Prüfungen wurden mit einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick 250 kN durchgeführt.



Abbildung 6: Eingespannter Kantholzbalken bei der 4-Punkt-Biegeprüfung

4.2.2 Biegeprüfung von alten Brettschichtholzträgern

Die Biegeprüfung der alten Brettschichtholzträger wurde gemäß EN 14080 [11] durchgeführt. Es wurden insgesamt 10 Prüfkörper, welche aus dem gleichen Gebäude entnommen wurden, hochkant auf Biegung geprüft. Die Träger wurden vor der Prüfung in einzelne Abschnitte unterteilt, auf einen definierten Querschnitt von etwa 220 x 140 mm² zugeschnitten und anschließend trocken gelagert. Neben der Biegefestigkeit wurden auch der Biege-E-Modul und die Dichte der Träger bestimmt. Die Prüfungen wurden mit einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick 250 kN durchgeführt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Eingespannter Brettschichtholzabschnitt bei der 4-Punkt-Biegeprüfung

4.2.3 Verklebungsprüfungen von alten Brettschichtholzträgern

Aus der gleichen Stichprobe von Brettschichtholzträgern, welche für Biegeprüfungen von Bauteilen verwendet wurde (siehe 4.2.2), erfolgte eine Entnahme von Delaminierungsproben und Druckscherproben aus Randbereichen. Diese Proben wurden gemäß EN 14080, Anhang C und Anhang D auf deren Verklebungsqualität geprüft (Abbildung 8 und Abbildung 9).



Abbildung 8: Druckscherprüfung eines Brettschichtholzabschnitts gemäß EN 14080, Anhang D

Die Delaminierungsprüfungen erfolgten nach Verfahren A. Hierbei ist bei den Ergebnissen zu berücksichtigen, dass gemäß EN 14080, Anhang C bei der Prüfung von hanstoffharzverklebten Prüfkörpern grundsätzlich das Verfahren C anzuwenden wäre.

Ergänzend dazu wurden vor der Delaminierungsprüfung mikroskopische Aufnahmen von einzelnen Klebefugen mithilfe eines Auflichtmikroskops (CX 40, Olympus) angefertigt.



Abbildung 9: Proben aus altem BSH vor (links) und nach (rechts) der Delaminierungsprüfung

4.3 Materialprüfungen von Stablamellen

Wird Brettschichtholz durch einen Schnitt quer zur Klebefuge in einzelne Brettlamellen aufgetrennt, entstehen sogenannte Stablamellen. Dieses Verfahren resultiert in einem neuen, brettförmigen Halbfertigprodukt, bei dem der Laminierungseffekt der einzelnen Stäbe und die Homogenisierung des Materials zu homogeneren Eigenschaften führen. Festigkeitsvermindernde Merkmale wie Äste und Faserabweichungen sind bei Stablamellen im Vergleich zu herkömmlichen Brettlamellen gleichmäßiger verteilt, was zu einer Homogenisierung des Materials führt. Dieser Effekt verringert die Streuung der Festigkeitseigenschaften und führt somit zu einer höheren charakteristischen Festigkeit. Durch das Auftrennen der Brettschichtholzträger ergeben sich aus den äußeren Bereichen markferne Stablamellen mit einem höheren Anteil an adultem Holz und aus den inneren Bereichen marknahe Stablamellen mit einem höheren Anteil an juvenilem Holz. (Abbildung 10).

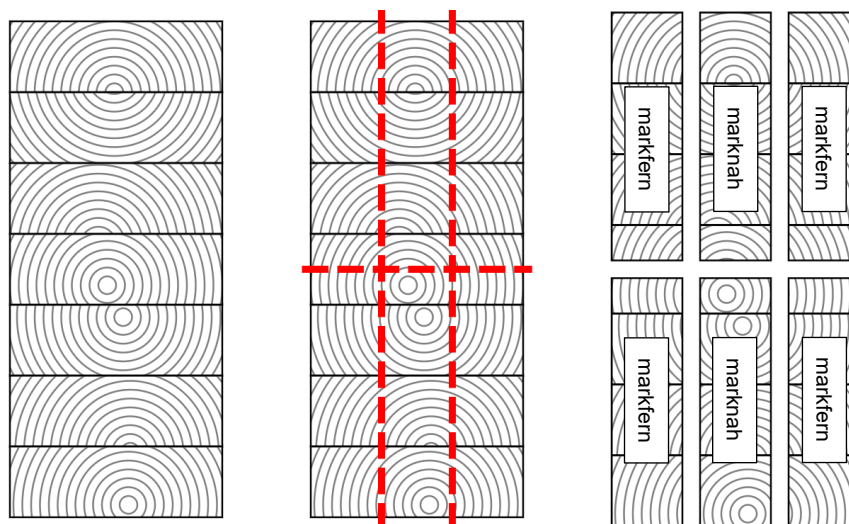


Abbildung 10: Verfahren zur Auftrennung eines Brettschichtholzträgers zu Stablamellen

4.3.1 Herstellung von Stablamellen aus alten Brettschichtholzträgern

Vor dem Auftrennen von alten Brettschichtholzträgern zu Stablamellen wurden sämtliche Verbindungsmittel entfernt und die Oberflächenschichten abgetragen, um eine chemische Kontamination der Stablamellen durch Schutzanstriche oder andere Schad- und Störstoffe zu verhindern sowie eine verklebungsfähige Oberfläche zu schaffen und den Werkzeugverschleiß zu minimieren. Die Stablamellen wurden nach dem Auftrennen entsprechend ihrer Position im ursprünglichen Träger in marknahe und markferne Bereiche unterschieden, um später einen potenziellen Zusammenhang der Position mit den mechanischen Eigenschaften nachvollziehen zu können. Auf Basis einer visuellen Begutachtung konnte jedoch die fachliche Einschätzung getroffen werden, dass es sich um homogen aufgebaute Träger handelt, die der aktuell geltenden Festigkeitsklasse GL24h entsprechen. Für die Herstellung der Stablamellen wurden verschiedene

Brettschichtholzträger als Ausgangsmaterial verwendet, die sich hinsichtlich des Klebstoffsystems (UF- und PRF-Klebstoff) sowie der Geometrie unterscheiden. Diese unterschiedlichen Parameter führten zu Stablamellen mit variierenden Klebefugen, Querschnitten und Stabanzahlen. Breitere Stablamellen wiesen eine höhere Anzahl an Einzelstäben auf, während schmalere Stablamellen eine geringere Stabanzahl enthielten. Insgesamt wurden Stablamellen in drei verschiedenen Breiten geprüft: 100 mm, 170 mm und 210 mm. Die schmaleren Stablamellen (100 mm) enthielten in der Regel drei Einzelstäbe, während die mit einer Breite von 170 mm fünf Stäbe und die mit 210 mm bis zu sieben Stäbe aufwiesen (Abbildung 11).



Abbildung 11: Aus Brettschichtholz herausgetrennte Stablamelle mit 7 verbundenen Einzelstäben

4.3.2 Schwingungsfrequenzmessung von Stablamellen

Vor der Durchführung der Zugprüfung wurde die Schwingungsfrequenz jeder Stablamelle mittels eines Laserinterferometers des Typs Microtec Viscan ermittelt. Auf Grundlage der gewonnenen Schwingungsdaten sowie der gemessenen Dichte und Länge der Stablamellen wurde der dynamische Elastizitätsmodul für jede einzelne Stablamelle bestimmt. Dieser wurde anschließend mit dem statischen Elastizitätsmodul verglichen, um zu überprüfen, ob eine Festigkeitseinstufung, die auf der Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls basiert und bei Frischholz etabliert ist, auch auf Altholz angewendet werden kann.

4.3.3 Zugprüfung von Stablamellen

Die Zugprüfung von Stablamellen aus alten Brettschichtholzträgern erfolgte gemäß EN 408. Neben der Zugfestigkeit wurden zusätzlich der Zug-E-Modul und die Dichte der Stablamellen ermittelt. Die Prüfungen wurden mit einer Zugprüfmaschine des Typs Zwick 1200 kN durchgeführt.

4.3.4 Biegeprüfungen von Stablamellen

Die Stablamellen aus alten Brettschichtholzträgern wurden gemäß EN 408 flachkant auf Biegung geprüft. Neben der Biegefestigkeit wurden zusätzlich der Biege-E-Modul und die Dichte der Stablamellen ermittelt. Die Prüfungen wurden mit einer Zugprüfmaschine des Typs Zwick 100 kN durchgeführt.

4.4 Materialprüfungen von neuen Bauprodukten aus Altholz

4.4.1 Herstellung von Brettsperrholz aus Altholzlamellen

Zur Charakterisierung neuer Holzbauteile aus Altholz wurde eine Brettsperrholzplatte unter Verwendung von alten Brettlamellen in einem industriellen Fertigungsprozess hergestellt. Für die Produktion der Brettsperrholzplatte kamen sowohl Brettlamellen aus Kanthölzern als auch Dippelbäumen zum Einsatz, wobei die Holzarten Fichte und Kiefer ohne Vorsortierung und systematische Positionierung im Endprodukt verarbeitet wurden. Die Abmessungen der Altholzlamellen nach dem Zuschnitt und vor der Weiterverarbeitung wurden mit etwa 4000 x 150 x 45 mm festgelegt (Abbildung 12).

Der Herstellungsprozess begann mit dem Heraustrennen von Brettlamellen aus alten Kantholzbalken mithilfe einer Gattersäge. Vor dem Zuschnitt wurden sowohl die Kantholzbalken als auch die Dippelbäume gründlich auf metallische Fremdkörper und andere Störstoffe überprüft. Hierzu kam ein Hand-Metalldetektor des Typs C.SCOPE Metal Locator zum Einsatz. Identifizierte metallische Einschlüsse wurden sorgfältig entfernt, um Störungen im Produktionsprozess und eine erhöhte Abnutzung der Maschinen zu vermeiden.



Abbildung 12: Aufgetrennte Altholzlamellen aus Altholzsortimenten vor der Weiterverarbeitung

Nach dem Auftrennen wurden die Schwingungsfrequenzen der Brettlamellen mit einem Laserinterferometer des Typs Microtec Viscan im Labor gemessen. Auf Basis dieser Messungen sowie der aufgenommenen Dichte und Geometrie wurde der Elastizitätsmodul

jeder einzelnen Brettlamelle berechnet. Darüber hinaus erfolgte eine visuelle Sortierung der Brettlamellen gemäß DIN 4074-1 mit anschließender Zuteilung in visuelle Sortierklassen. Fehlende Querschnitte und Ausbrüche, die durch zuvor platzierte Verbindungsmittel im Bauteil entstanden sind, wurden bei der Sortierung als Äste bzw. Astansammlungen gewertet. Die Brettlamellen wurden vor der weiteren Verarbeitung sorgfältig trocken gelagert.

Vor der Keilzinkung der Bretter zu Endloslamellen wurde die Holzfeuchte jeder einzelnen Brettlamelle mit einem Holzfeuchtemessgerät des Typs Brookhuis FMI ermittelt. Die Endloslamellen wurden durch Keilzinkenverbindungen der Brettlamellen unter Verwendung des Polyurethanklebstoffs Loctite HB S049 hergestellt. Im Anschluss erfolgte die Verbindung der Endloslamellen zu Einschichtplatten durch Schmalseitenverklebung. Diese Einschichtplatten wurden anschließend mittels Flächenverklebung zu einer dreilagigen Brettsperrholzplatte weiterverarbeitet. Vor der Flächenverklebung wurden die Oberflächen der Einschichtplatten mit Wasser (ca. 10 g/m²) befeuchtet. Die Flächenverklebung erfolgte unter Verwendung des Polyurethanklebstoffs Loctite HB S069 (Abbildung 13).

Nach der Herstellung der dreilagigen Brettsperrholzplatte wurde diese mithilfe einer CNC-Abbandanlage in vier Biegeprüfkörper und vier Rollschubprüfkörper gemäß den Abmessungen in EN 16351, Anhang C, unterteilt. Die verbleibenden Plattenabschnitte der Mutterplatte kamen für Delaminierungsprüfungen nach EN 16351, Anhang A, sowie für Druckscherprüfungen gemäß EN 789, Abschnitt 11, zum Einsatz.



Abbildung 13: Einschichtplatten aus Altholzlamellen vor der Flächenverklebung zu Brettsperrholz

4.4.2 Herstellung von Brettschichtholz aus Altholz

Zur Untersuchung der Verklebungsqualität von neuen Bauprodukten aus Altholzlamellen wurden sowohl alte Massivholzbretter, die aus Kanthölzern und Dippelbäumen gewonnen

wurden, als auch Stablamellen aus altem Brettschichtholz zu fünflagigen Brettschichtholzabschnitten verklebt und anschließend geprüft (Abbildung 14).



Abbildung 14: Altholzlamellen beim Klebstoffauftrag vor dem Verpressen zu neuem Brettschichtholz

Die Stablamellen wurden entsprechend dem ursprünglichen Klebstoffsystem und deren Herkunft differenziert. Auf diese Weise entstanden insgesamt acht verschiedene Varianten von Brettschichtholz. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die hergestellten Brettschichtholzprüfkörper aus Altholz mit deren Eigenschaften.

Tabelle 1: Hergestelltes Brettschichtholz aus Altholz zur Untersuchung der Verklebungsqualität

Variante	Rohmaterial	Herkunft	Klebstoffsystem
1	UF-Stablamelle	1	HENKEL – HB S109
2	UF-Stablamelle	1	AKZO NOBEL – 1255 (Harz) und 7555 (Härter)
3	UF-Stablamelle	2	HENKEL – HB S109
4	UF-Stablamelle	2	AKZO NOBEL – 1255 (Harz) und 7555 (Härter)
5	PRF-Stablamelle	-	HENKEL – HB S109
6	PRF-Stablamelle	-	AKZO NOBEL – 1255 (Harz) und 7555 (Härter)
7	Massivholz	-	HENKEL – HB S109
8	Massivholz	-	AKZO NOBEL – 1255 (Harz) und 7555 (Härter)

Für die Herstellung der neuen Brettschichtholzabschnitte wurden zwei unterschiedliche Klebstoffsysteme verwendet: ein einkomponentiger Polyurethanklebstoff (PUR) des Typs HENKEL HB S109 sowie ein zweikomponentiges Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-System (MUF), bestehend aus den Komponenten AKZO NOBEL 1255 (Harz) und 7555 (Härter). Der Klebstoffauftrag erfolgte im Labormaßstab mit einem Applikationssystem des Herstellers Oest.

Tabelle 2 bietet eine Übersicht über die Einstellungen des Klebstoffauftrags und der Presseinstellungen, die bei der Herstellung der Brettschichtholzabschnitte aus Altholz angewendet wurden.

Tabelle 2: Eingestellte Parameter zur Verklebung von Altholzlamellen zu Brettschichtholz

Prozesseinstellung	PUR	MUF
Typbezeichnung	HENKEL – HB S109	AKZO NOBEL – 1255 (Harz) und 7555 (Härter)
Klima	25°C / 45% rel. LF.	25°C / 45% rel. LF.
Mischungsverhältnis	-	100:130
Auftragsmenge	200 g/m ²	130 g/m ²
Offene Zeit	1-6 min	1-4 min
Wasserbesprühung	10 g/m ²	-
Pressdruck	0,6 N/mm ²	0,8 N/mm ²
Presszeit	20 min	30 min

Für jede der acht Varianten wurden insgesamt zwei Brettschichtholzabschnitte mit einer ungefähren Länge von 1 Meter hergestellt. Aus jedem dieser Abschnitte wurden jeweils zwei Delaminierungsproben sowie Druckscherproben entnommen, die gemäß den Vorgaben der EN 14080, Anhang D und Anhang E, geprüft wurden.

4.4.3 Keilzinkenbiegeprüfungen von Altholzlamellen

Im Zuge der Brettsperrholzfertigung wurden sieben keilgezinkte Lamellen aus dem Herstellungsprozess entnommen und anschließend gemäß EN 14080, Anhang E auf die Keilzinkenbiegefestigkeit geprüft. Die Prüfungen erfolgten mit einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick 100 kN. Vor der Prüfung wurden die entnommenen Lamellen gemäß DIN 4074-1 sortiert.

4.4.4 Biegeprüfungen von Brettsperrholz aus Altholzlamellen

Es wurden 4 Brettsperrholzabschnitte gemäß EN 16351 geprüft. Neben der Biegefestigkeit wurden auch der Biege-E-Modul und die Dichte der Platten bestimmt. Die Prüfungen wurden mit einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick 250 kN durchgeführt (Abbildung 15).



Abbildung 15: Brettsperrholzplatte aus Altholzlamellen bei der 4-Punkt-Biegeprüfung

4.4.5 Rollschubprüfungen von Brettsperrholz aus Altholzlamellen

Es wurden 4 Brettsperrholzabschnitte gemäß EN 16351 geprüft. Neben der Rollschubfestigkeit wurden auch der Schubmodul und die Dichte der Platten bestimmt. Die Prüfungen wurden mit einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick 250 kN durchgeführt (Abbildung 16).



Abbildung 16: Brettsperrholzplatte aus Altholzlamellen bei der 4-Punkt-Rollschubprüfung

4.4.6 Verklebungsprüfungen von Brettsperrholz aus Altholzlamellen

Aus den verbleibenden Abschnitten der Mutterplatte für die Biege- und Rollschubprüfkörper wurden zusätzlich Delaminierungsproben sowie Druckscherproben (zur Ermittlung der Rollschubfestigkeiten) entnommen und gemäß EN 16351, Anhang A und EN 789, Abschnitt 11 auf die Verklebungsqualität geprüft (Abbildung 17). Aufgrund sichtbarer Anzeichen auf biologischen Abbau der Holzsubstanz sowie Verfärbungen in Trocknungsrisse, die auf einen Wassereintritt hindeuteten, wurden stichprobenartig mikroskopische Untersuchungen an den Bruchflächen von den geprüften Scherproben durchgeführt. Dabei kam ein Rasterelektronenmikroskop (Prisma E SEM, Thermo Fisher Scientific) zum Einsatz.

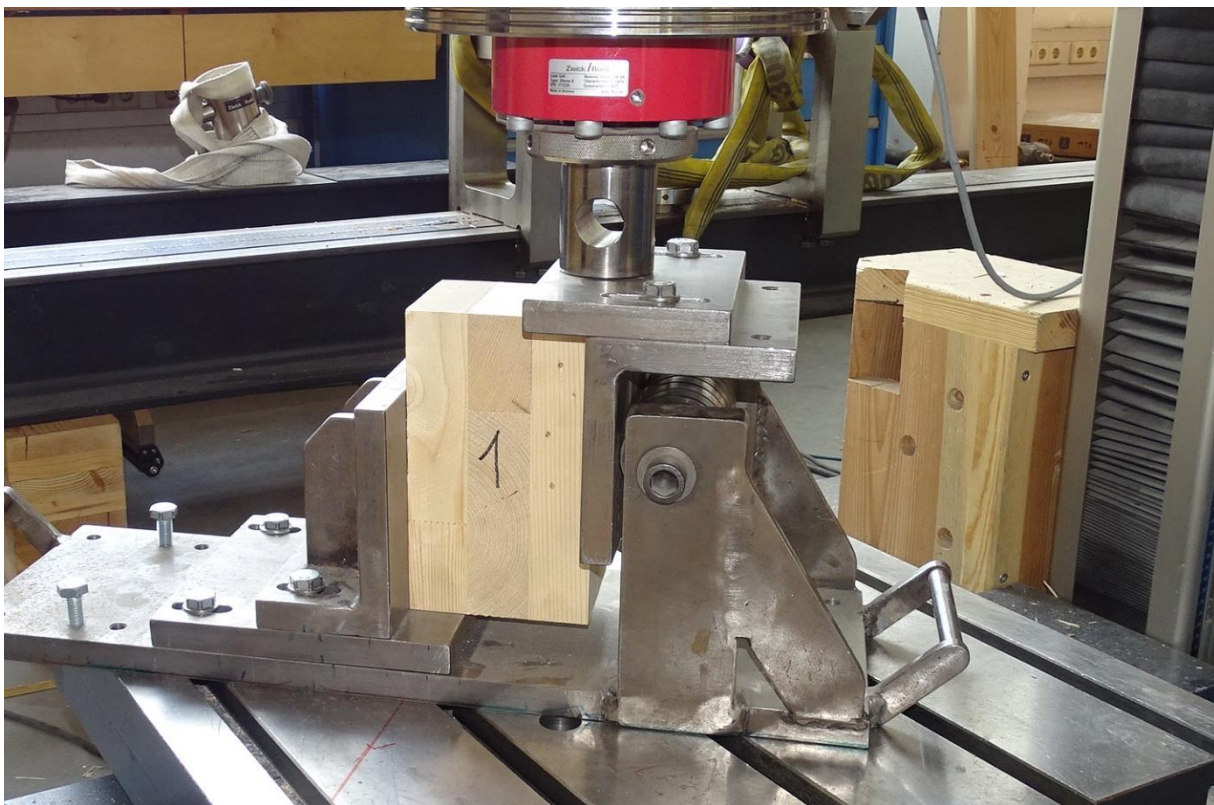


Abbildung 17: Druckscherprüfung an Brettsperrholz aus Altholz zur Feststellung der Rollschubfestigkeit

5 Ergebnisse

5.1 Festigkeitssortierung von Altholz

Bei der Festigkeitssortierung von 19 Altholzbalken eines repräsentativen Altholzsortiments gemäß der Kantholzsortierung DIN 4074-1, Tabelle 2 konnten acht Kanthölzer der Sortierklasse „S13“ und sechs Kanthölzer der Sortierklasse „S10“ zugeordnet werden. Fünf Kanthölzer erfüllten die Kriterien für keine Sortierklasse und wurden daher als Ausschuss klassifiziert. Keiner der untersuchten Kantholzbalken wurde der Sortierklasse „S7“ zugeteilt. Der Ausschussanteil betrug insgesamt 26 %, was auf die Sortierkriterien wie Faserneigung, Jahrringbreite, Risse, Baumkante und Fäule zurückzuführen war (Abbildung 18).

Würden variable Merkmale wie Risse, Krümmungen, Fäule und Insektenfraß, die möglicherweise durch Alterung und Nutzung entstanden sind und zum Zeitpunkt der Verarbeitung nicht vorhanden waren, unberücksichtigt bleiben, würde sich der Ausschussanteil auf 18 % reduzieren. In diesem Fall müssten nur noch drei Kanthölzer als Ausschuss klassifiziert werden.

Probe	Äste	Faserneigung	Markröhre	Jahrringbreite	Risse*	Baumkante	Krümmung*	Fäule*	Druckholz	Insektenfraß*	Endklassifizierung
1	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
2	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
3	S13	S13	S13	S10	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S10
4	S13	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS
5	S13	S10	S13	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S13	S10
6	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
7	S13	S13	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S10
8	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
9	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
10	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
11	S13	S13	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S10
12	S10	AUSSCHUSS	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS
13	S13	S10	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S10
14	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
15	S13	S10	S13	S10	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S10
16	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS	S13	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS
17	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13
18	S13	AUSSCHUSS	S13	AUSSCHUSS	AUSSCHUSS	S13	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS
19	S13	S13	S13	S13	S13	S13	S13	AUSSCHUSS	S13	S13	AUSSCHUSS

Abbildung 18: Sortierte Kantholzbalken gemäß DIN 4074-1 (durch Alterung und Nutzung veränderliche Merkmale sind durch die Markierung „*“ gekennzeichnet)

5.2 Materialeigenschaften alter Holzbauteile

5.2.1 Alte Kantholzbalken aus Gründerzeithäusern

Die Ergebnisse der Biegeprüfungen zeigten, dass alte Kantholzbalken nach ihrer Erstnutzung noch Biegefestigkeiten im Bereich von 23 N/mm² bis zu 52 N/mm² aufweisen (Abbildung 19). Die mittlere Biegefestigkeit der zehn geprüften Kantholzbalken lag bei 36 N/mm². Acht von zehn Prüfkörper wurden gemäß DIN 4074-1, Tabelle 2 in die Sortierklasse „S10“ und zwei davon in die Sortierklasse „S13“ eingestuft. Der gemessene E-Modul der Prüfkörper lag im Bereich zwischen 10864 N/mm² bis 14315 N/mm², mit einem Mittelwert von 11798 N/mm². Die mittlere Dichte der entnommenen Kleinproben aus den Querschnitten der Prüfkörper betrug 420 kg/m³. Die Proben der Sortierklasse „S13“ zeigten im Vergleich zu den Proben der Sortierklasse „S10“ keine deutlichen Unterschiede in den Festigkeiten und Steifigkeiten und ordneten sich in den mittleren Bereich der Prüfwerte ein. Es konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,3 ein geringer linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Biegefestigkeit und dem E-Modul beobachtet werden.

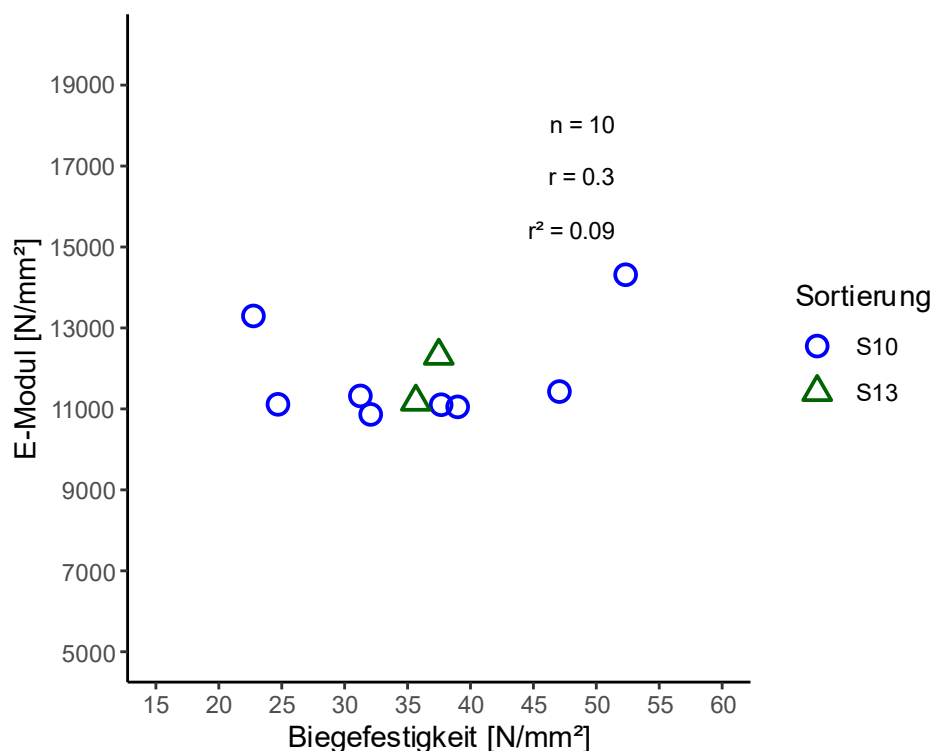


Abbildung 19: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Kantholzbalken

Der Großteil der Prüfkörper zeigte einen Biegebruch in der unteren Zugzone (Abbildung 20).



Abbildung 20: Charakteristischer Biegebruch eines alten Kantholzbalken

5.2.2 Alte Brettschichtholzträger

Die Ergebnisse der Biegeprüfungen zeigen, dass alte Brettschichtholzträger nach ihrer Erstnutzung noch Biegefestigkeiten im Bereich von 18 N/mm^2 bis zu 47 N/mm^2 aufwiesen (Abbildung 21). Die mittlere Biegefestigkeit der 10 geprüften Brettschichtholzträger lag bei 31 N/mm^2 . Der gemessene E-Modul lag im Bereich zwischen 9572 N/mm^2 bis 14663 N/mm^2 , mit einem Mittelwert von 12013 N/mm^2 . Die mittlere Dichte der entnommenen Kleinproben aus den Querschnitten der Prüfkörper lag bei 424 kg/m^3 . Die geprüften Abschnitte wurden nicht nach ihrer genauen Position innerhalb des Ursprungsträgers unterschieden. Es konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,58 ein starker linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Biegefestigkeit und dem E-Modul festgestellt werden. Streuung der Biegeeigenschaften könnte daher auch auf den gezielten Einsatz von Lamellen geringerer Qualität im Mittelteil zurückzuführen sein.

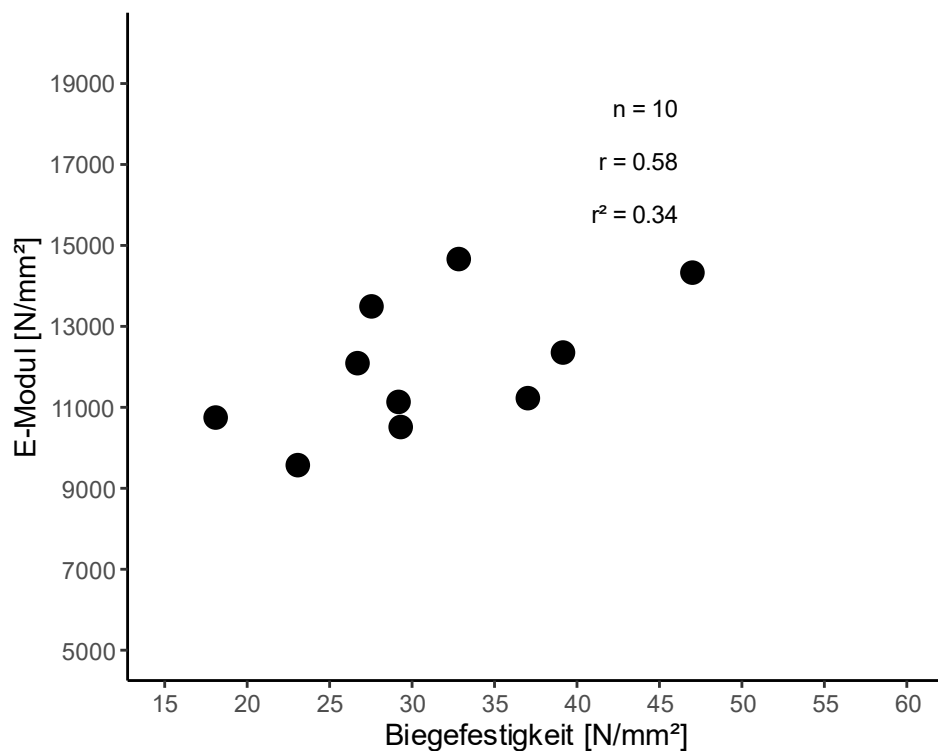


Abbildung 21: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Brettschichholzträgern

Das Versagen der Brettschichholzabschnitte konnte überwiegend durch das Erreichen der maximalen Spannung in der Zugzone erklärt werden (Abbildung 22). Während der Prüfung wurde beobachtet, dass bei einigen Keilzinkverbindungen keine ausreichende formschlüssige Verbindung vorlag, was möglicherweise die Festigkeit der jeweiligen Prüfkörper negativ beeinträchtigte (Abbildung 23).



Abbildung 22: Charakteristischer Biegebruch eines Brettschichholzabschnitts in der Zugzone



Abbildung 23: Fehlverklebte Keilzinkung eines geprüften Brettschichtholzabschnitts

5.2.3 Verklebungsqualität

5.2.3.1 Druckscherprüfungen

Druckscherprüfungen an insgesamt 545 Einzelproben aus altem Brettschichtholz, darunter 273 Proben mit PRF-Klebstoff und 272 Proben mit UF-Klebstoff, ergaben eine mittlere Scherfestigkeit von 6,8 N/mm². Der mittlere Faserbruchanteil betrug 93,6 % (Abbildung 24). Von diesen Proben haben 86 Stück, also 16 %, die Anforderungen an den Einzelwert nicht erfüllt. Von den negativen Proben sind 29 Prüfkörper auf PRF- und 57 Prüfkörper auf UF-verklebte Proben entfallen.

Die Proben für die Druckscherprüfungen stammten aus drei unterschiedlichen Bauwerken. Bei den Proben des ersten Bauwerks, bei dem die Brettschichtholzträger mit PRF verklebt wurden, betrug die mittlere Scherfestigkeit 6,9 N/mm², der mittlere Faserbruchanteil lag bei 93 %.

Im zweiten Bauwerk, bei dem die Träger ebenfalls mit PRF verklebt wurden, wurde eine mittlere Scherfestigkeit von 7,2 N/mm² gemessen, wobei der mittlere Faserbruchanteil bei 96 % lag.

Die Proben des dritten Bauwerks, bei dem die Brettschichtholzträger mit UF verklebt wurden, zeigten eine mittlere Scherfestigkeit von 6,7 N/mm² und einen mittleren Faserbruchanteil von 93 %.

Bei Druckscherprüfungen gilt es zu beachten, dass die Ergebnisse nicht ausschließlich auf die Verklebungsqualität zurückzuführen sind, sondern auch maßgeblich von Holzmerkmalen

beeinflusst werden. Eine niedrige Scherfestigkeit muss also nicht zwingend darauf hindeuten, dass eine unzureichende Verklebungsqualität vorliegt. Besonders bei Holz mit einer niedrigen Dichte zeigen sich oft geringere Druckscherfestigkeitswerte.

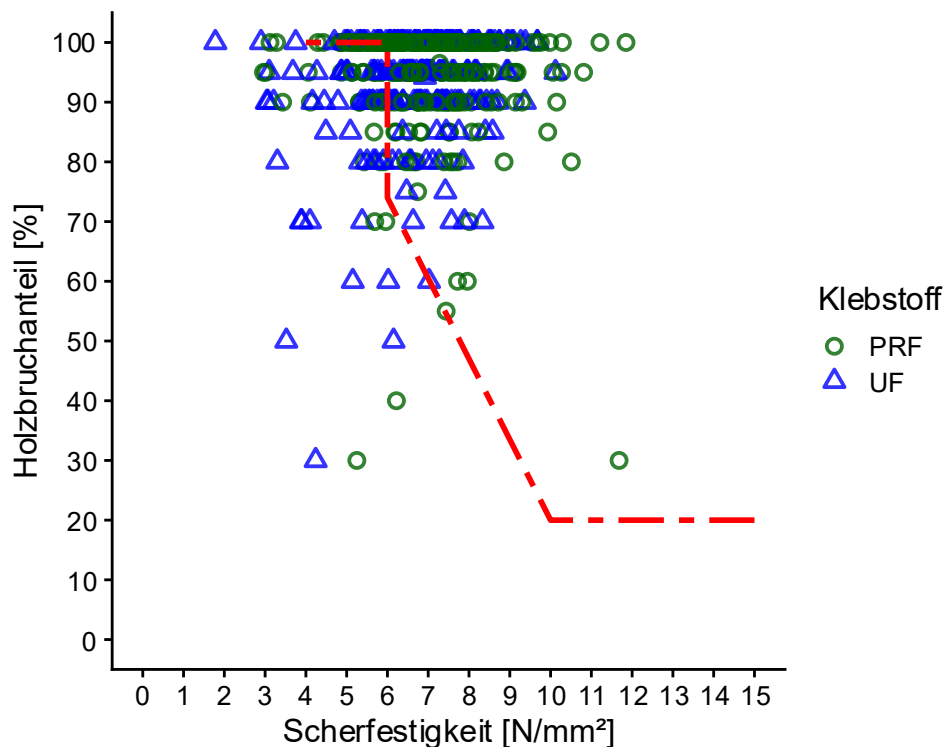


Abbildung 24: Scherfestigkeit und Faserbruchanteil von Druckscherproben aus altem Brett-schichtholz. Die rote Linie visualisiert die Grenzwerte für die Scherfestigkeit und den Faserbruchanteil von Einzelfugen gemäß den Anforderungen der EN 16351, Anhang C.

5.2.3.2 Delaminierungsprüfungen

Bei den Delaminierungsprüfungen wurden zwei PRF-verklebte Brett-schichtholzabschnitte aus demselben Bauwerk und vier UF-verklebte Abschnitte aus zwei unterschiedlichen Bauwerken untersucht, davon jeweils zwei Proben je Bauwerk.

Die Ergebnisse nach zwei Delaminierungszyklen zeigten, dass die PRF-verklebten Proben die Grenzwerte sowohl für die maximale Einzel- als auch für die Gesamtdelaminierung einhielten (Abbildung 25).

Bei den UF-Proben erfüllten zwei Prüfkörper die Anforderungen an die maximale Delaminierung der Gesamtfuge nicht und überschritten mit einem Ergebnis von 8,2 % (Probe 5) und 8,3 % (Probe 6) den Grenzwert von 5 % geringfügig um etwa 3 %. Die Grenzwerte für die maximale Delaminierung der Einzelfuge wurden auch bei allen UF-verklebten Prüfkörpern eingehalten (Abbildung 25).

Nach einem dritten Prüfzyklus, welcher gemäß Normvorgabe vorgesehen ist, wenn die Ergebnisse nach dem zweiten Prüfzyklus negativ ausgefallen sind, erfüllten auch die negativen UF-Proben die Anforderungen an die maximale Delaminierung der Gesamtfuge mit

Einzelwerten von 8,9 % (Probe 5) und 9,1 % (Probe 6) bei einem zulässigen Grenzwert von 10 %. Jedoch wurde durch den dritten Zyklus die Anforderung an die maximale Delaminierung der Einzelfuge von 30 % von einer Probe mit einem Wert von 41,9 % (Probe 5) überschritten (Abbildung 26).

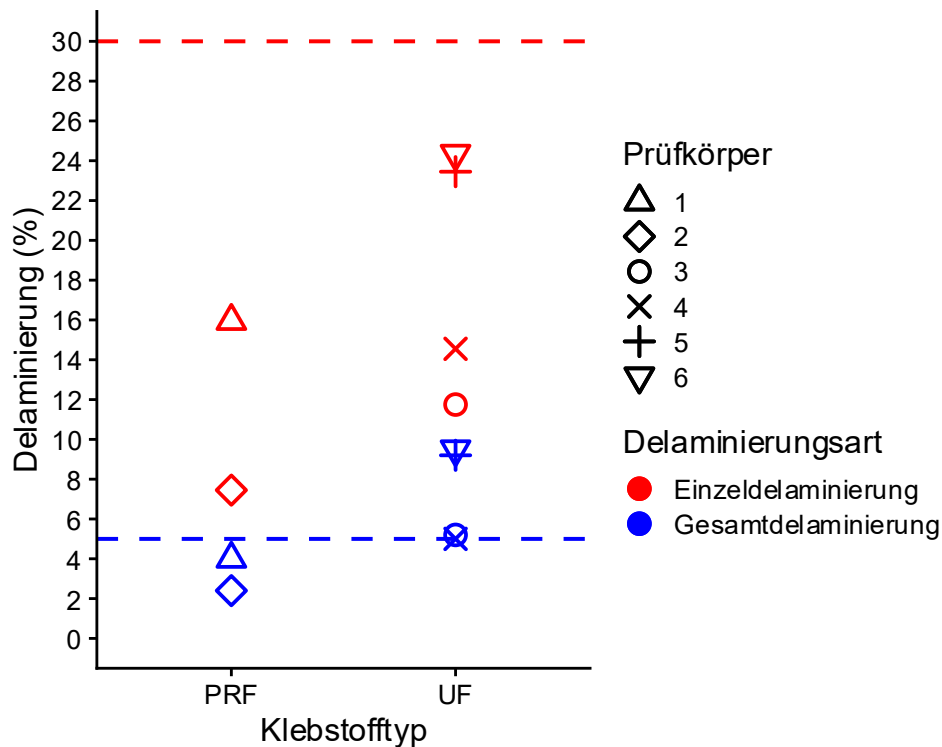


Abbildung 25: Darstellung der maximalen Delaminierungen der Einzel- und Gesamtfuge (nach zwei Prüfzyklen) an alten Brettschichtholzabschnitten, die mit unterschiedlichen Klebstoffsystemen verklebt wurden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte für Delaminierungen gemäß EN 14080, Anhang D, Verfahren A. Die blaue horizontale Linie repräsentiert den zulässigen Grenzwert für die maximale Delaminierung der Gesamtfuge, während die rote horizontale Linie den Grenzwert für die maximale Delaminierung der Einzelfuge markiert.

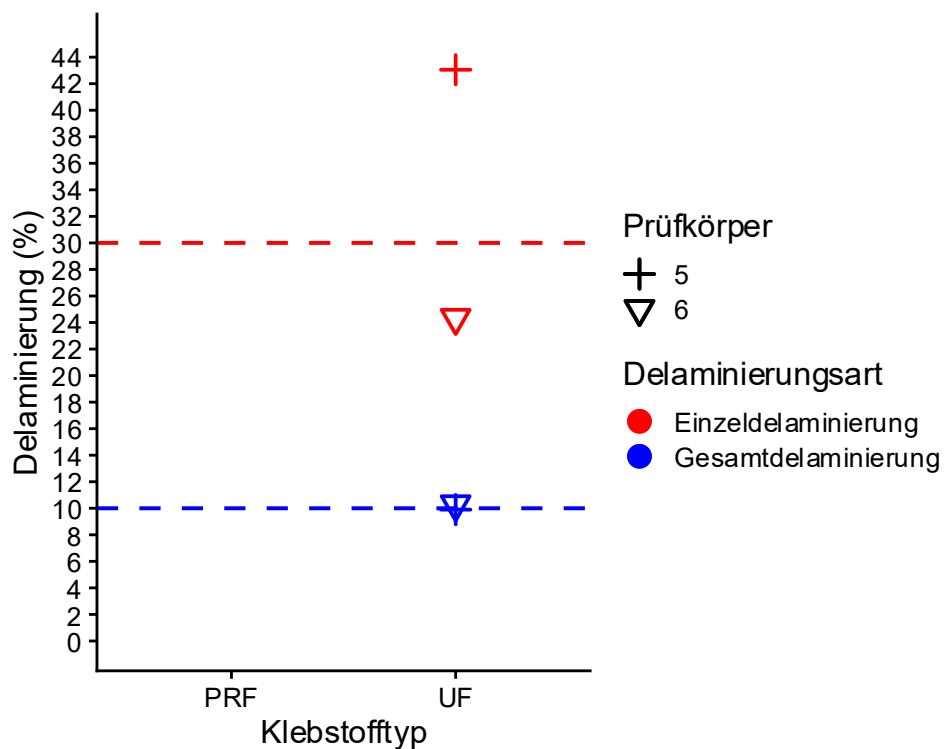


Abbildung 26: Darstellung der maximalen Delaminierungen der Einzel- und Gesamtfuge (nach 3 Prüfzyklen) an alten Brettschichtholzabschnitten, die mit unterschiedlichen Klebstoffsystemen verklebt wurden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte für Delaminierungen gemäß EN 14080, Anhang D, Verfahren A. Die blaue horizontale Linie repräsentiert den zulässigen Grenzwert für die maximale Delaminierung der Gesamtfuge, während die rote horizontale Linie den Grenzwert für die maximale Delaminierung der Einzelfuge markiert.

5.2.3.3 Mikroskopische Aufnahmen

Mikroskopische Aufnahmen der Klebefugen alter Brettschichtholzträger zeigten überwiegend intakte Klebefugen mit einer ausreichenden Eindringtiefe des Klebstoffs in mehrere Zellreihen des Holzes. Einige Stellen der untersuchten Proben wiesen jedoch vereinzelt Mikrorisse auf. Dabei handelte es sich speziell um äußere Abschnitte der ursprünglichen Brettschichtholzträger, aus welchen die Proben entnommen wurden (Abbildung 27).

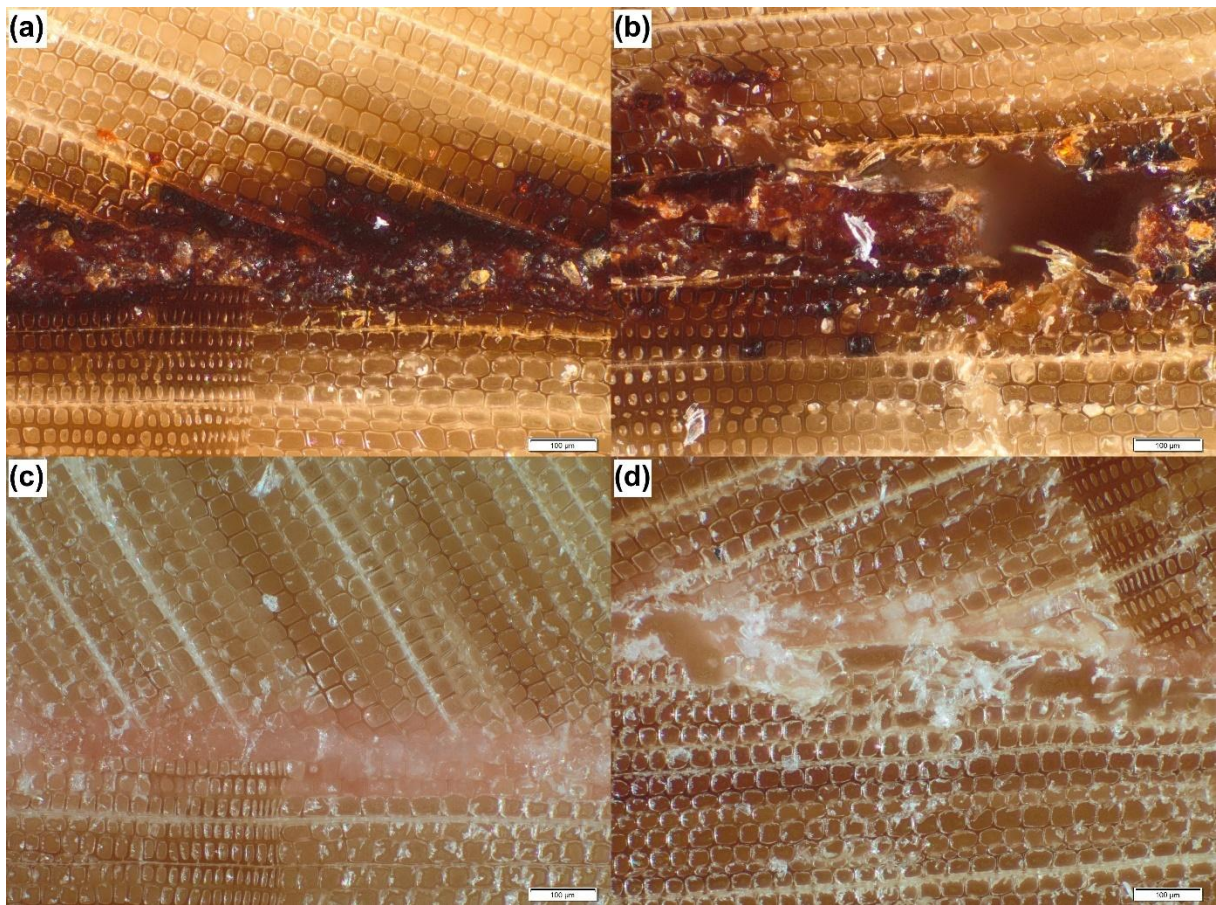


Abbildung 27: Mikroskopische Aufnahmen von Klebefugen alter Brettschichtholzträger: (a) intakte Klebefuge mit PRF, (b) Mikrorisse in Klebefuge mit PRF, (c) intakte Klebefuge mit UF, (d) Mikrorisse in Klebefuge mit UF

5.3 Materialeigenschaften von Stablamellen aus Altholz

5.3.1 Zugfestigkeit von Stablamellen

Die Zugprüfungen an 98 Stablamellen aus altem Brettschichtholz ergaben eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 17 N/mm^2 . Der mittlere Elastizitätsmodul lag bei 10856 N/mm^2 . Die Zugfestigkeiten befanden sich zwischen 15 N/mm^2 und 39 N/mm^2 , die E-Module variierten im Bereich von 8745 N/mm^2 bis 13740 N/mm^2 . Der Korrelationskoeffizient zwischen Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul lag bei 0,35 und zeigte einen mittleren linearen Zusammenhang (Abbildung 28).

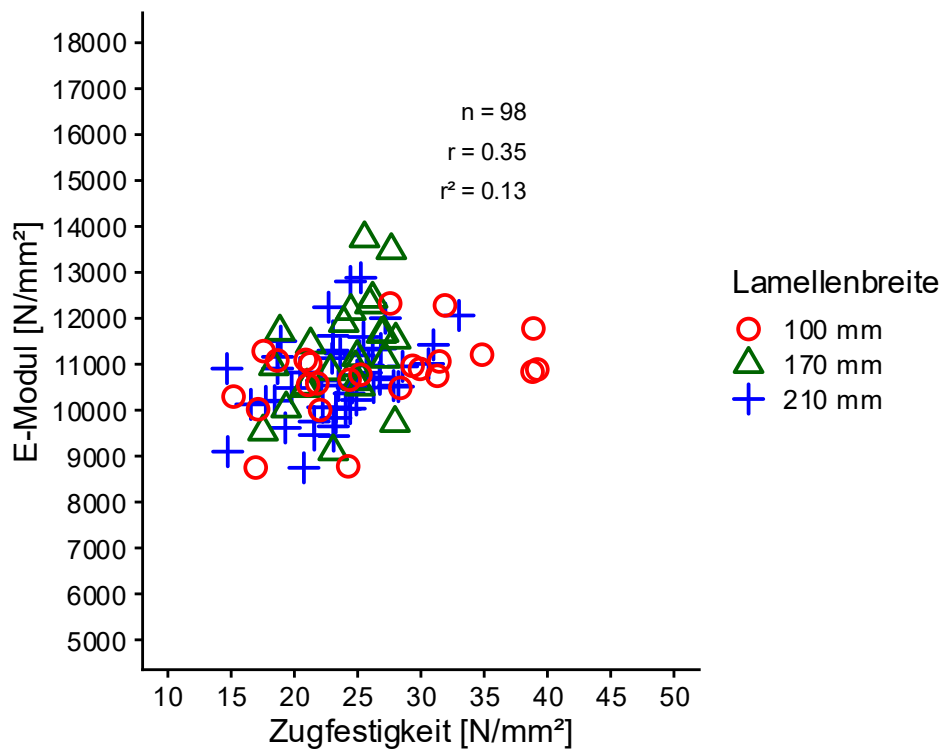


Abbildung 28: Zugfestigkeit und E-Modul von Stablamellen mit unterschiedlichen Lamellenbreiten

Die Stablamellen aus den äußeren, markfernen Bereichen der liegenden Brettschichtholzträger zeigten in Summe höhere E-Module als solche aus den inneren, marknahen Bereichen. Das mittlere E-Modul der Stablamellen aus markfernen Bereichen betrug 11163 N/mm², während das der Stablamellen aus marknahen Bereichen bei 10302 N/mm² lag.

Der Unterschied zwischen markfernen Bereichen und marknahen Bereichen war bei der Zugfestigkeit weniger ausgeprägt. Die mittlere Zugfestigkeit der Stablamellen aus markfernen Bereichen lag bei 25 N/mm², während sich die der Stablamellen aus marknahen Bereichen bei 23 N/mm² befanden (Abbildung 29).

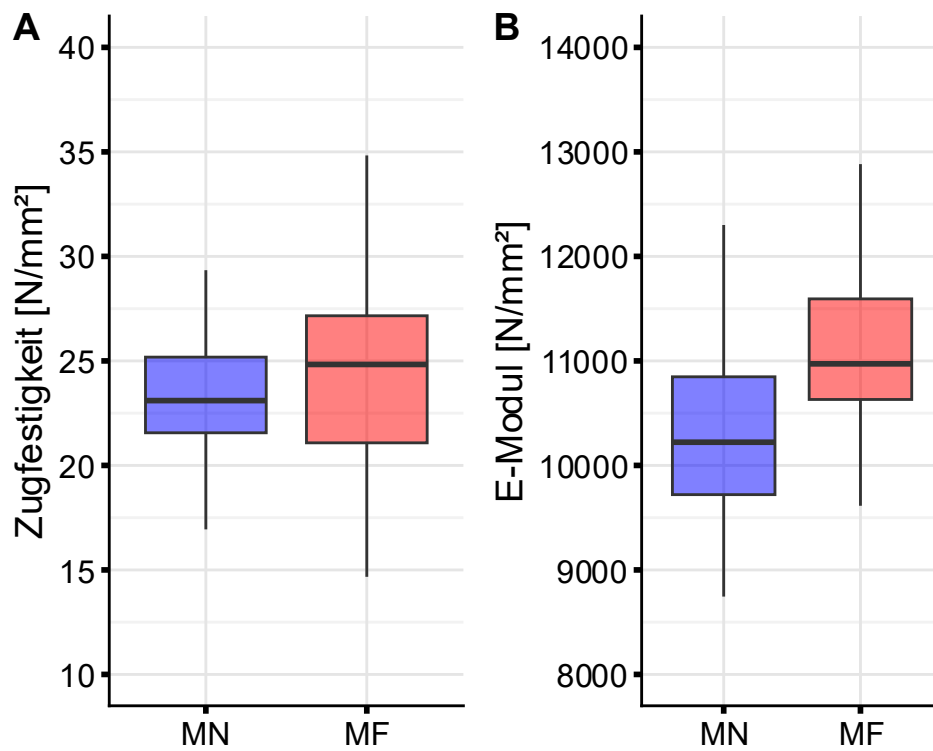


Abbildung 29: Zugfestigkeit (a) und E-Modul (b) von Stablamellen aus marknahen Bereichen (MN) und markfernen Bereichen (MF)

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem dynamischen und dem statischen E-Modul aller geprüfter Stablamellen betrug 0,65 (Abbildung 30).

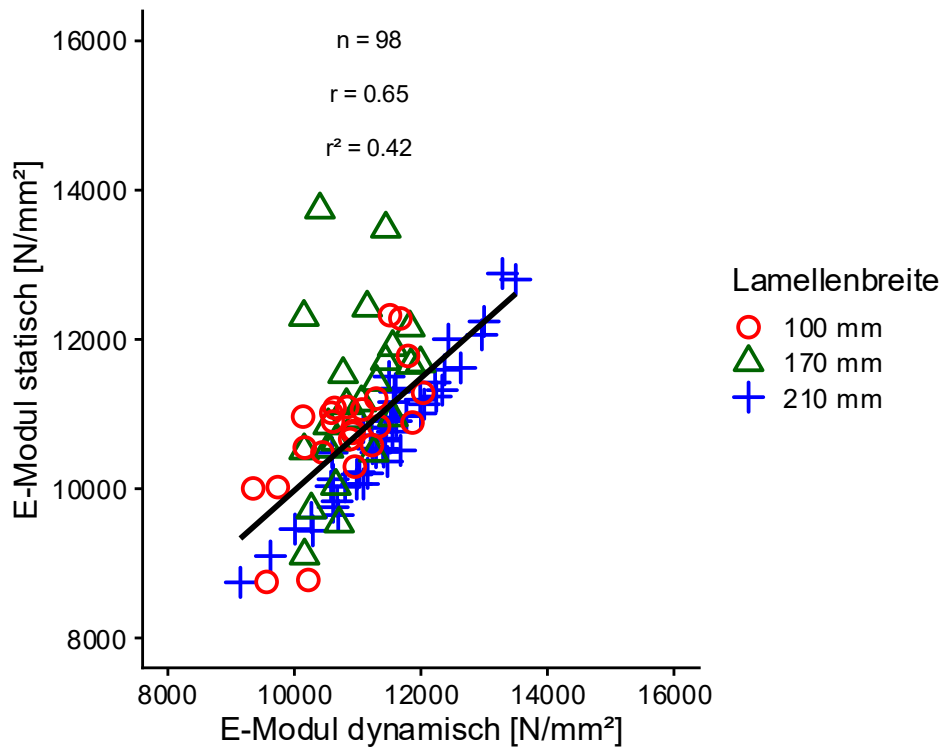


Abbildung 30: Korrelation zwischen statischem und dynamischen E-Modul von Stablamellen

Bei den Stablamellen mit einer Breite von 170 mm wurde bei einzelnen Proben ein schwacher Zusammenhang zwischen dynamischem und statischem E-Modul festgestellt. Dadurch wurde bei dieser Lamellenstärke auch insgesamt der geringste Korrelationskoeffizient ermittelt. Im Gegensatz dazu zeigten die Lamellen mit der größten Breite von 210 mm die höchste Übereinstimmung der beiden E-Modul-Werte, was sich in einer entsprechend starken Korrelation widerspiegelte (Abbildung 31).

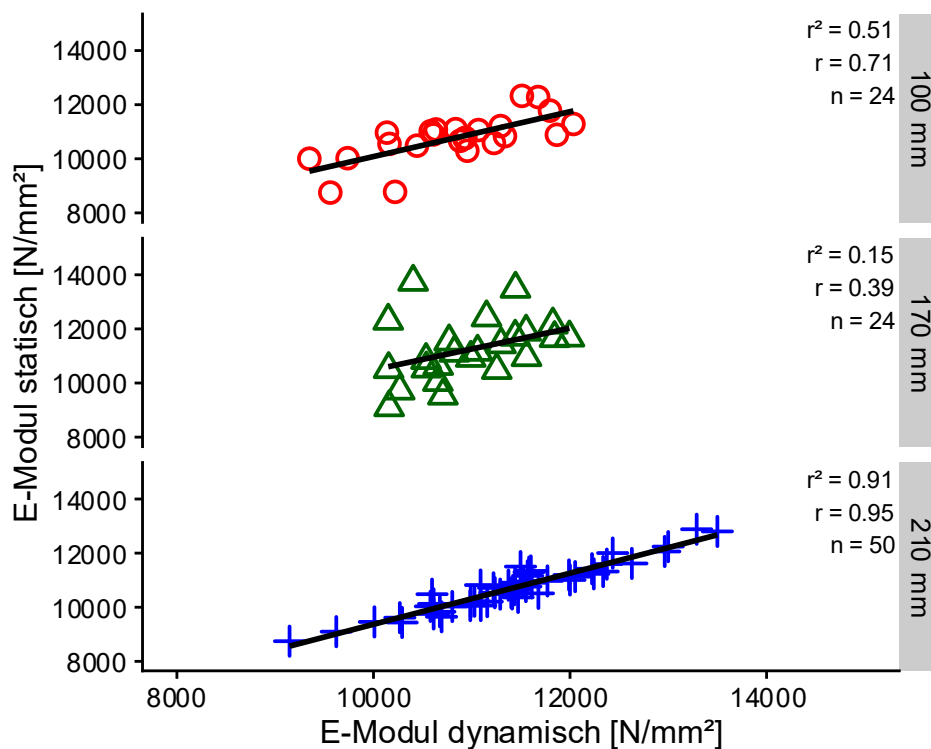


Abbildung 31: Zusammenhänge des dynamischen und statischen E-Moduls von Stablamellen in Abhängigkeit von der Lamellenbreite

5.3.2 Biegefestigkeit von Stablamellen

Die flachkant Biegeprüfungen von 98 Stablamellen aus altem Brettschichtholz ergaben eine mittlere Biegefestigkeit von 50 N/mm², während der mittlere E-Modul bei 10783 N/mm² lag.

Die einzelnen Biegefestigkeitswerte reichten von 33 N/mm² bis zu 67 N/mm². Die gemessenen E-Module befanden sich im Bereich zwischen 8188 N/mm² und 14047 N/mm².

Im Gegensatz zu den Zugprüfungen zeigte sich bei den Biegeproben mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,74 ein hoher linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Biegefestigkeit und dem E-Modul der Proben (Abbildung 32).

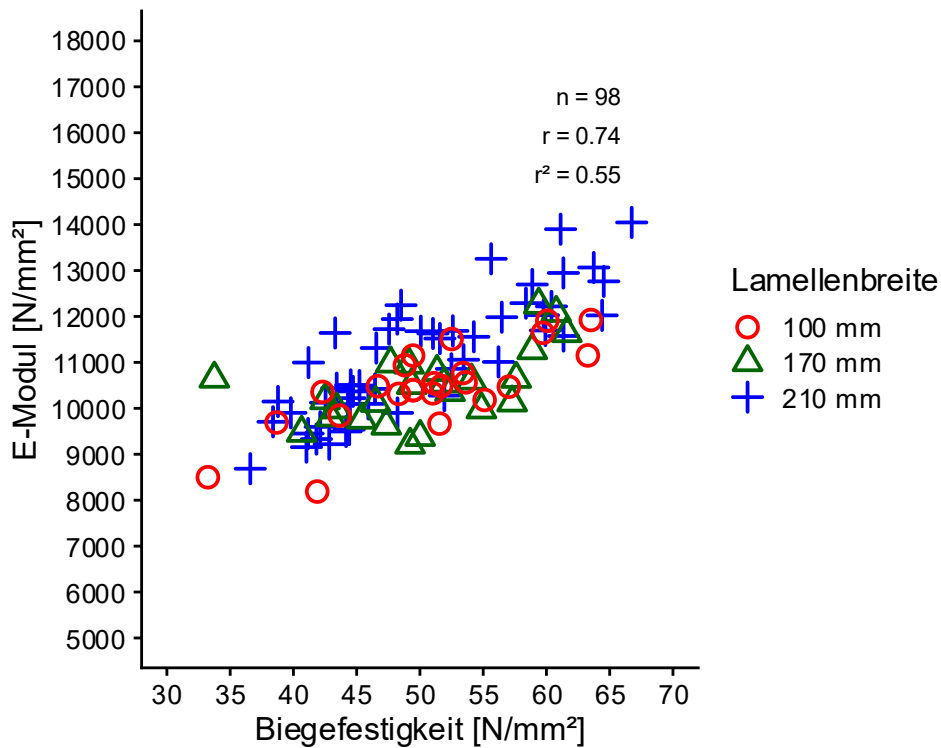


Abbildung 32: Biegefestigkeit flachkant und E-Modul von Stablamellen mit unterschiedlichen Lamellenbreiten

Wie bei den Zugprüfungen, zeigten sich bei den Biegeprüfungen Unterschiede zwischen Stablamellen aus marknahen Bereichen und markfernen Bereichen der ursprünglichen Brettschichtholzträger (Abbildung 33).

Das mittlere E-Modul der markfernen Stablamellen betrug 11037 N/mm^2 , während das aus marknahen Bereichen bei 10283 N/mm^2 lag. Bei den Biegefestigkeiten erreichten markferne Stablamellen eine mittlere Biegefestigkeit flachkant von 51 N/mm^2 und marknahe Stablamellen 48 N/mm^2 .

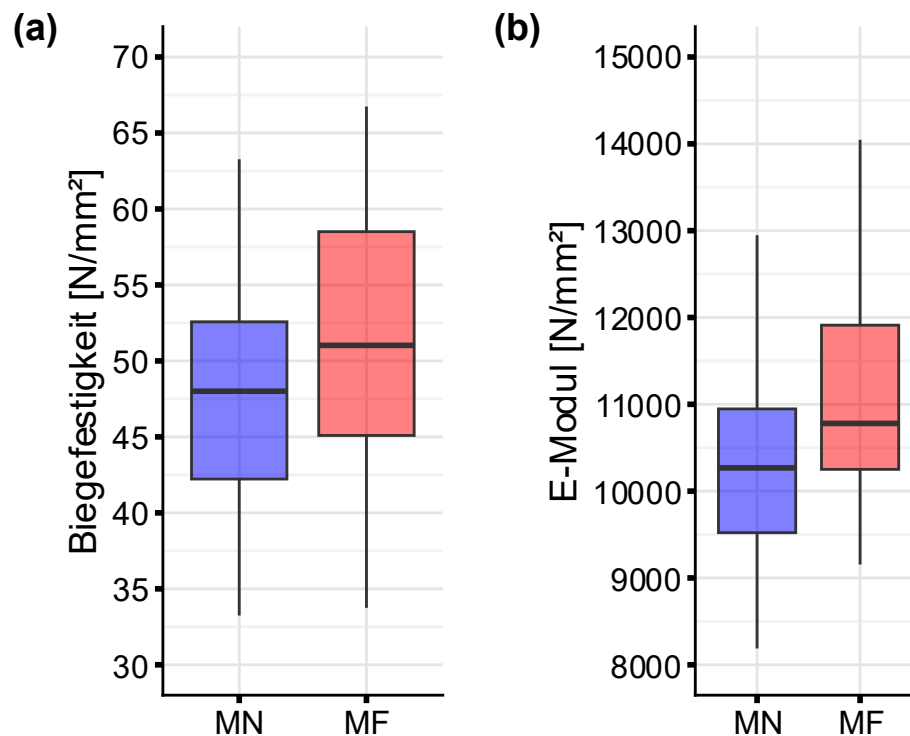


Abbildung 33: Biegefestigkeit flachkant (a), und E-Modul (b) von Stablamellen aus marknahen Bereichen (MN) und markfernen Bereichen (MF)

5.4 Materialeigenschaften von Brettsperrholz aus Altholz

5.4.1 Festigkeitssortierung und Schwingungsfrequenzmessung

Von insgesamt 155 Altholzlamellen aus Kanthölzern und Dippelbäumen, die für die Verarbeitung zu Brettsperrholz vorgesehen waren, wurden 47 Stück aufgrund erheblicher mechanischer Beschädigungen, Fäule und anderer stark festigkeitsvermindernder Merkmale direkt ohne weitere Sortierung von der Weiterverarbeitung ausgeschlossen.

Die verbleibenden 108 Lamellen wurden wie folgt sortiert: 15 Lamellen der Sortierklasse „S7“, 74 Lamellen der Sortierklasse „S10“ und 19 Lamellen der Sortierklasse „S13“. Die Mittelwerte der dynamischen E-Module betragen 11190 N/mm² für „S7“, 11774 N/mm² für „S10“ und 13615 N/mm² für „S13“. Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfüllte die durchgeführte Sortierung die entsprechenden Anforderungen an die charakteristischen Mittelwerte der Festigkeitsklassen gemäß EN 338 [12] (Abbildung 34).

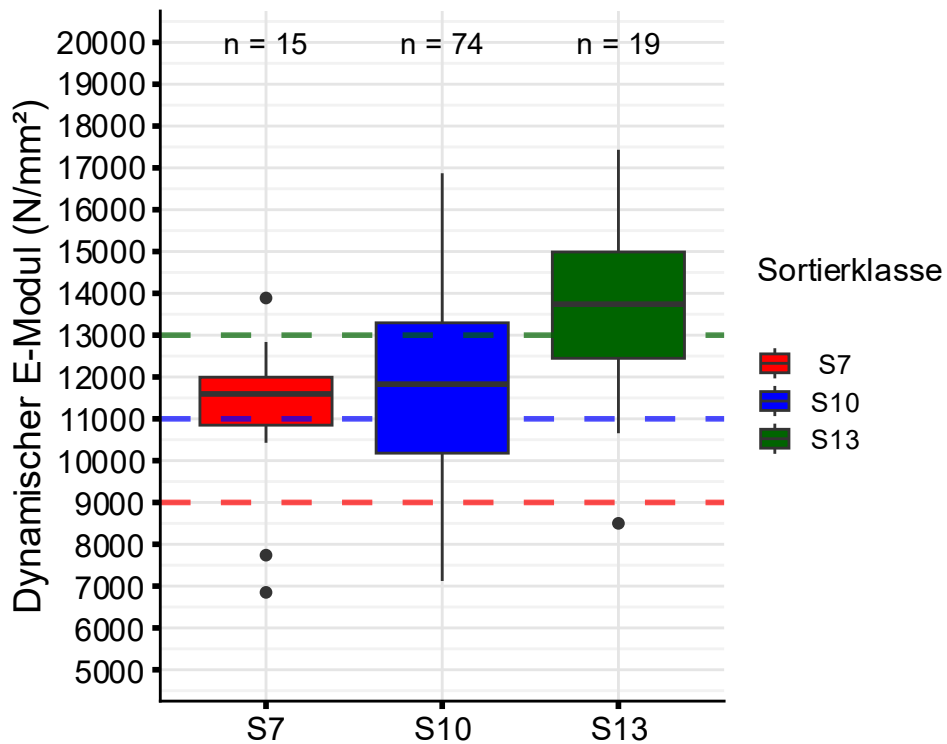


Abbildung 34: Dynamische E-Module von Altholzlamellen verschiedener Sortierklassen. Die horizontalen Linien in rot (S7), blau (S10) und grün (S13) visualisieren die Mindestanforderung (mittlerer E-Modul) für die entsprechende Sortierklasse.

Die Unterscheidung der Holzarten Fichte und Kiefer bei den Ergebnissen des dynamischen E-Modul ergab, dass beide Holzarten bei den untersuchten Altholzlamellen sehr ähnliche Steifigkeitswerte aufwiesen (Abbildung 35). Bei der Unterscheidung zwischen Kanthölzern und Dippelbäumen wurde festgestellt, dass Dippelbäume tendenziell bessere dynamische E-Module erreichten als Kanthölzer (Abbildung 36).

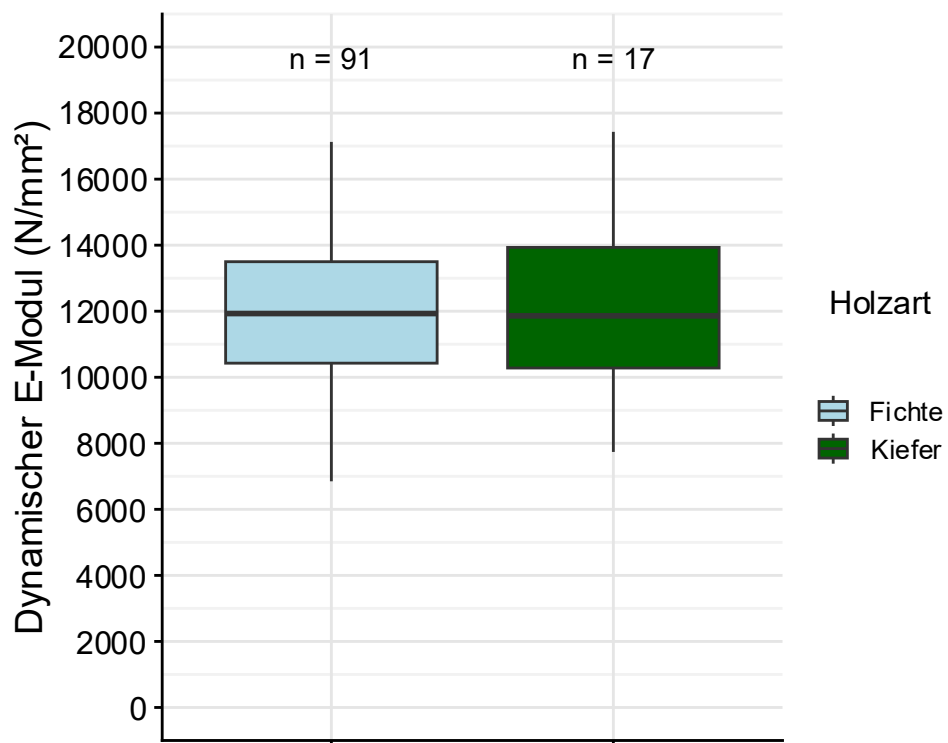


Abbildung 35: Dynamischer E-Modul von Altholzlamellen der Holzarten Fichte und Kiefer

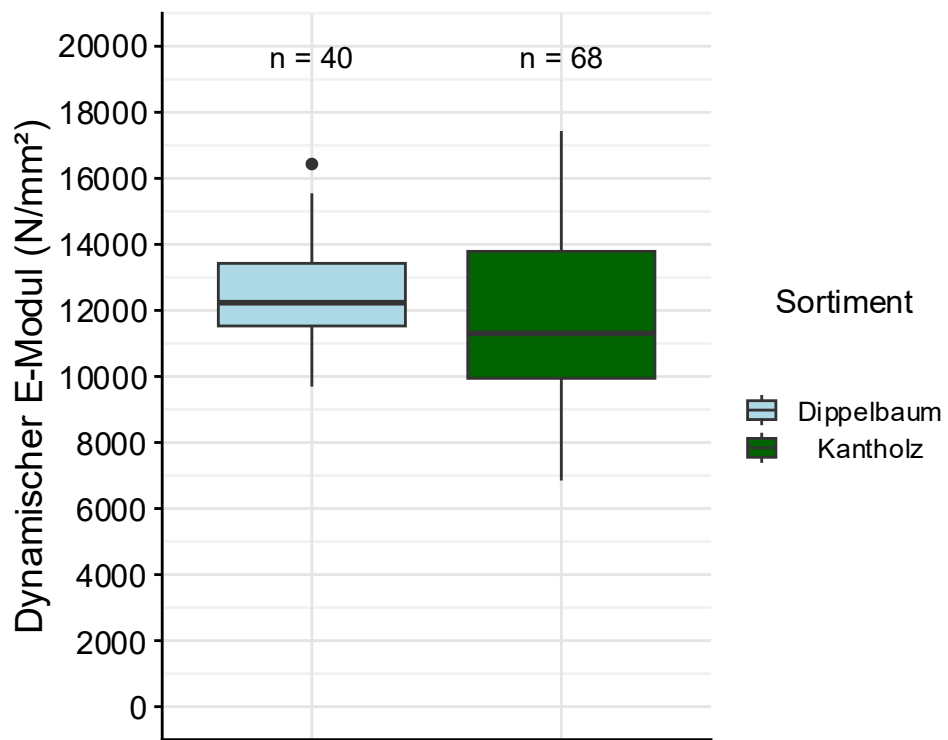


Abbildung 36: Dynamischer E-Modul von Altholzlamellen aus Dippelbäumen und Kantholz

5.4.2 Keilzinkenbiegefestigkeit

Die Keilzinkenproben, welche im Zuge der Brettsperrholzfertigung entnommen wurden, zeigten Biegefestigkeiten im Bereich von 25 N/mm² bis 45 N/mm² (Abbildung 37). Die beiden Prüfkörper mit den niedrigsten Biegefestigkeiten wurden bereits vor der Prüfung bei der Sortierung als Ausschuss identifiziert. Diese Prüfkörper versagten außerhalb der Keilzinkung, was auf festigkeitsmindernde Holzmerkmale zurückzuführen war.

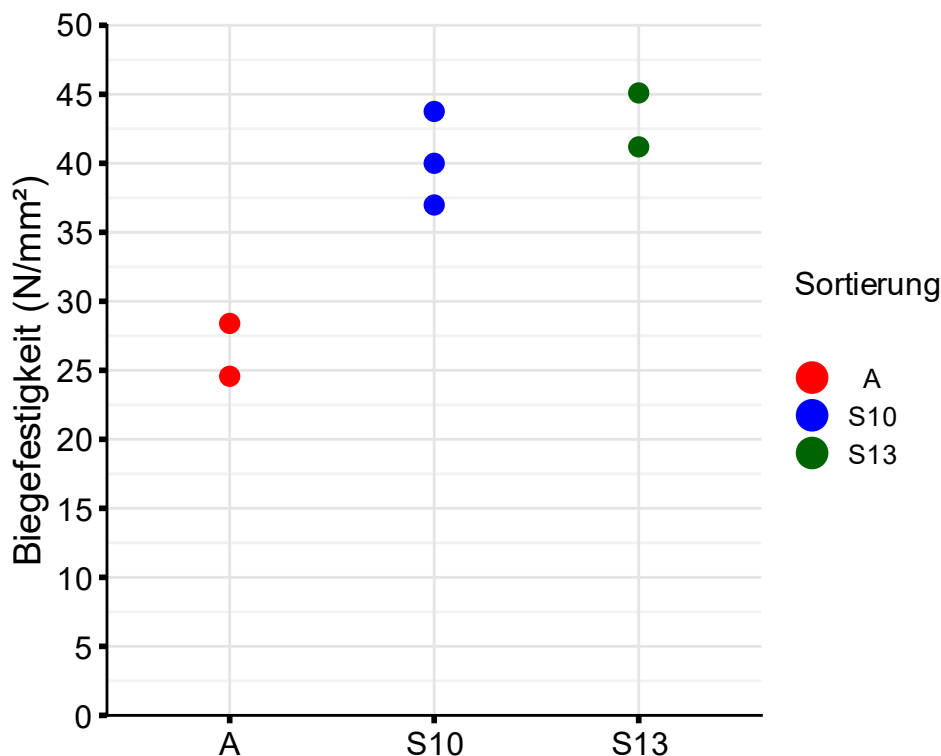


Abbildung 37: Keilzinkenbiegefestigkeit unterschiedlicher Sortierklassen von Altholzlamellen

5.4.3 Biegefestigkeit

Die Biegeprüfungen von 4 Brettsperrholzplatten aus Altholzlamellen wurden auf den Nettoquerschnitt bezogen und ergaben eine mittlere Biegefestigkeit von 34 N/mm², während der mittlere E-Modul bei 14780 N/mm² lag (Abbildung 38). Die einzelnen Biegefestigkeitswerte lagen zwischen 27 N/mm² und 40 N/mm². Die gemessenen E-Module befanden sich im Bereich zwischen 12721 N/mm² und 17543 N/mm². Besonders auffällig ist die hohe Streuung bei den ermittelten Werten für den E-Modul. Die hohe Streuung könnte darauf hindeuten, dass in den jeweiligen Prüfkörpern unterschiedliche Holzarten verwendet wurden, die sich jeweils unterschiedlich auf die Steifigkeit ausgewirkt haben.

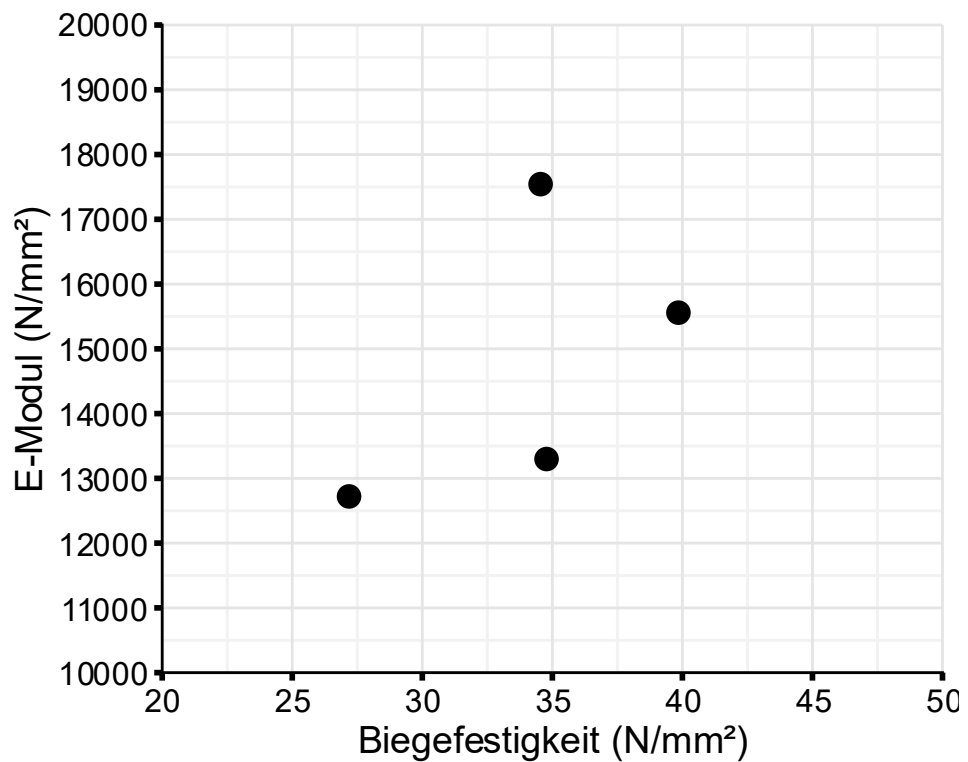


Abbildung 38: Biegefestigkeit von Brettsperrholz aus Altholzlamellen (bezogen auf den Nettoquerschnitt)

5.4.4 Rollschubfestigkeit

Die Ergebnisse der Rollschubprüfungen von 4 Brettsperrholzplatten aus Altholzlamellen wurden auf den Nettoquerschnitt bezogen und ergaben eine mittlere Rollschubfestigkeit von 1,8 N/mm², während der mittlere E-Modul bei 12922 N/mm² lag. Die einzelnen Biegefestigkeitswerte reichten von 1,7 N/mm² bis zu 1,9 N/mm². Die gemessenen E-Module befanden sich im Bereich zwischen 12172 N/mm² und 13484 N/mm² (Abbildung 39).

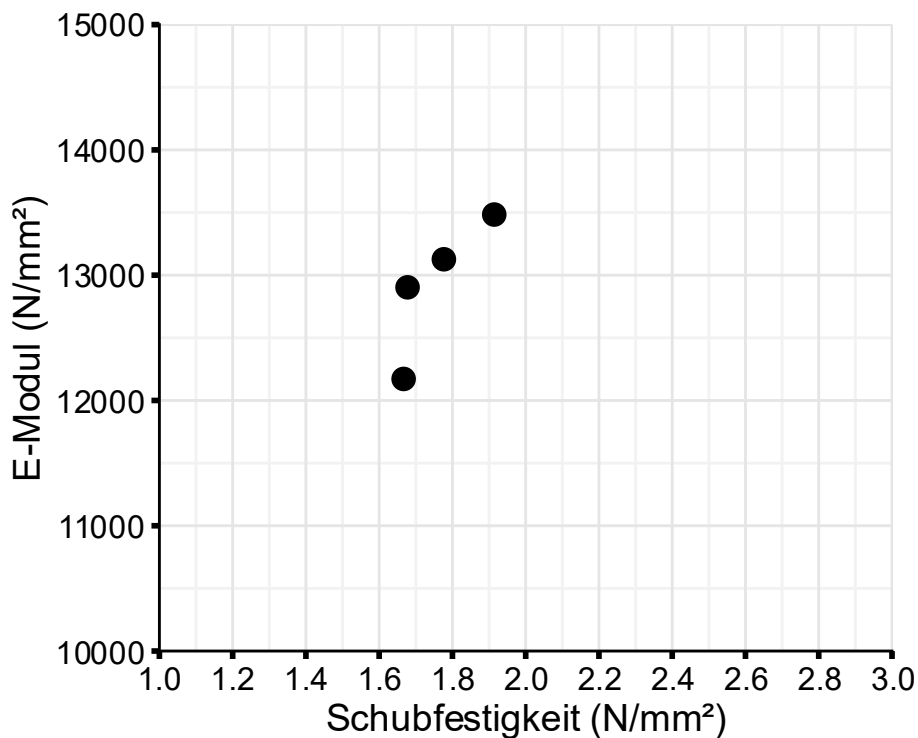


Abbildung 39: Rollschubfestigkeit von Brettsperrholz (bezogen auf den Nettoquerschnitt)

5.4.5 Verklebungsqualität

5.4.5.1 Rollschubfestigkeit

Die Rollschubfestigkeit von 13 Brettsperrholzabschnitten aus Altholz wurde mit einem repräsentativen Datensatz von 60 Brettsperrholzproben aus Frischholz verglichen. Beide Probenarten - die Altholzproben (40 mm x 40 mm x 40 mm) und die Frischholzproben (33 mm x 33 mm x 33 mm) - waren 3-lagig aufgebaut.

Der Mittelwert der Rollschubfestigkeit der Altholzproben lag bei 1,4 N/mm², wobei die Einzelwerte im Bereich von 0,9 N/mm² bis 2,3 N/mm² variierten. Im Vergleich dazu lag der Mittelwert der Frischholzproben bei 1,6 N/mm², mit Werten zwischen 1,2 N/mm² und 2,0 N/mm² (Abbildung 42).

Stichprobenartige Bilder und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an ausgewählten Scherflächen zeigten in einzelnen Fällen Zellwandrisse, die auf strukturelle Vorschädigungen hindeuten. Zusätzlich konnten in radialer Schnittrichtung Pilzhyphen identifiziert werden (Abbildung 41).



Abbildung 40: Bruchfläche einer Druckscherprobe eines neu hergestellten Brettsperrholzelements aus Altholzlamellen nach der Prüfung



Abbildung 41: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Druckscherprobe nach der Druckscherprüfung in axialer Richtung (links) und radialer Richtung (rechts)

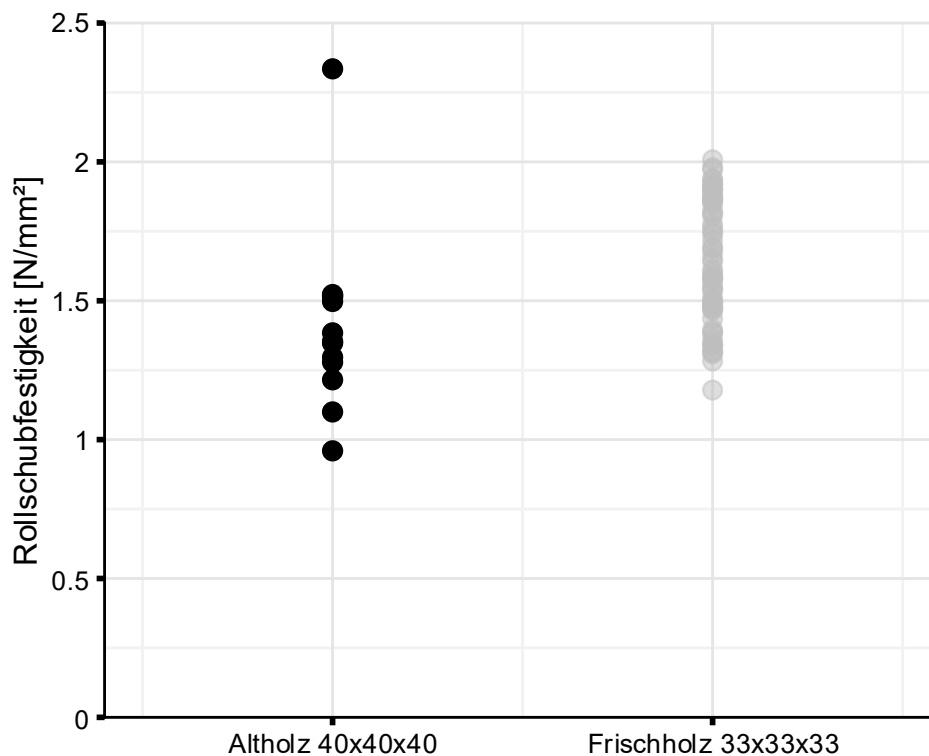


Abbildung 42: Rollschubfestigkeiten von Brettsperrholz aus Altholz und Frischholz

5.4.5.2 Delaminierungen

Die Ergebnisse der zehn Delaminierungsprüfungen von Brettsperrholzabschnitten ergaben einen mittleren Faserbruchanteil von 74 % (bzw. 26 % Delaminierung) für die Einzelfugen und einen mittleren Faserbruchanteil von 83 % (bzw. 17 % Delaminierung) für die Gesamtfuge. Bei Probe 1 wurde die Mindestanforderung an den minimalen Faserbruchanteil der Einzelfuge von mindestens 50 % mit einem Wert von 40 % nicht erreicht. Bei der Probe 3 wurde mit einem minimalen Faserbruchanteil der Einzelfuge von 20 % und einem minimalen Faserbruchanteil der Gesamtfuge von 40 % weder die Anforderung an die Einzelfuge noch an die Gesamtfuge erfüllt (Abbildung 43).

Bei einigen Proben konnte bereits vor der Delaminierungsprüfung eine Fehlverklebung festgestellt werden, da sie aus Lamellen gefertigt wurden, deren Dicke außerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen lag. Die Maßabweichungen entstanden beim Auftrennen des Kantholzes mit einer älteren, schienengeführten Gattersäge mit manueller Zuführung und konnten durch das anschließende Hobeln nicht vollständig ausgeglichen werden.

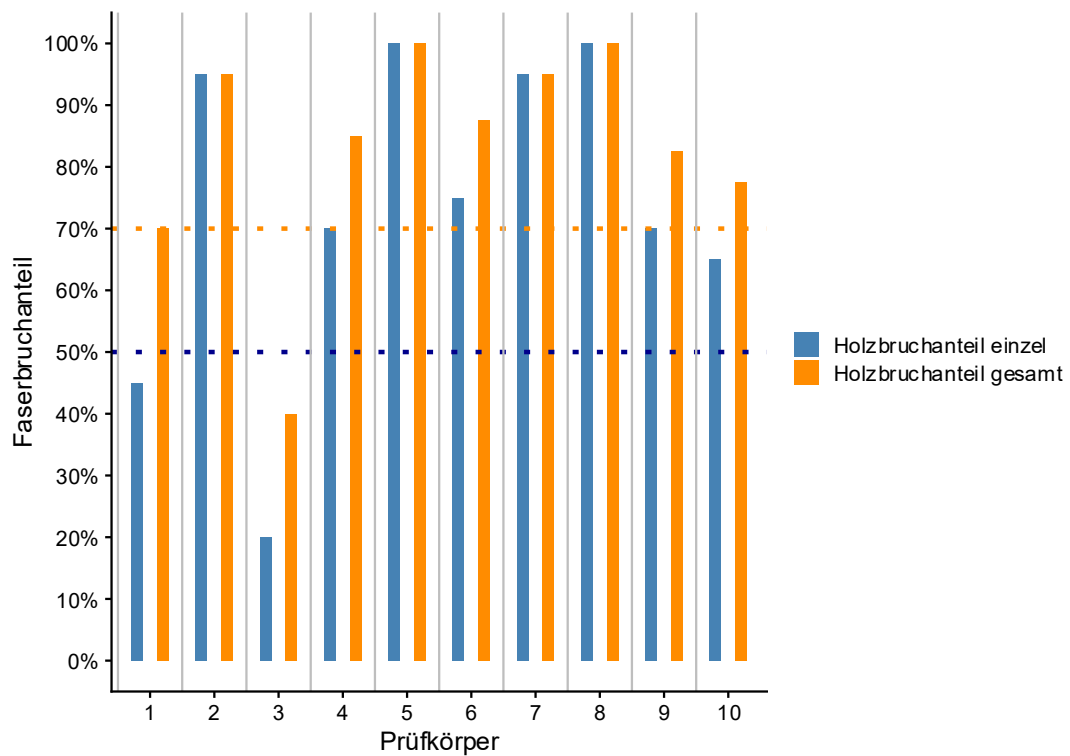


Abbildung 43: Ermittelte Faserbruchanteile der Delaminierungsproben aus Brettsperrholz, welches mit Altholzlamellen hergestellt wurde. Die horizontalen gestrichelten Grenzwertlinien markieren die Anforderungen an die minimalen Faserbruchanteile für die Einzelfuge und die Gesamtfuge gemäß EN 16351, Anhang A

5.5 Materialeigenschaften von Brettschichtholz aus Altholz

5.5.1 Druckscherfestigkeit

Druckscherprüfungen an insgesamt 144 Proben aus Brettschichtholz, ergaben eine mittlere Scherfestigkeit von 7,8 N/mm². Der durchschnittliche Faserbruchanteil lag bei 98,8 % (Abbildung 44). Alle geprüften Varianten erfüllten sowohl die Anforderungen an die Einzelwerte als auch den Mittelwert.

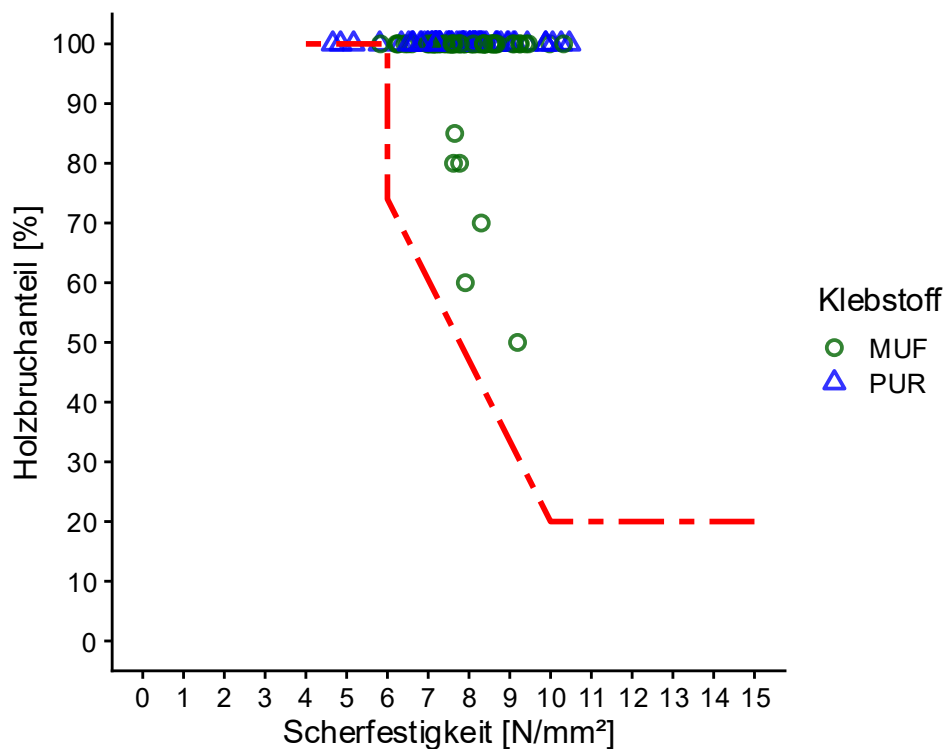


Abbildung 44: Ergebnisse der Druckscherproben von neuem Brettschichtholz aus Altholzlamellen. Die rote Linie visualisiert die Grenzwerte für die Schерfestigkeit und den Faserbruchanteil von Einzelfugen gemäß den Anforderungen von EN 16351, Anhang C.

5.5.2 Delaminierungen

Die Ergebnisse der 90 geprüften Delaminierungsproben aus Brettschichtholz, welches aus verschiedenen Altholzsortimenten hergestellt wurde, zeigten, dass alle Varianten die Anforderungen an die maximal zulässige Delaminierung der Einzelfuge erfüllten. Die Anforderungen an die maximal zulässige Delaminierung der Gesamtfuge wurden nach den ersten zwei Zyklen bei 12 von 90 und somit 11 % der Einzelproben nicht erfüllt, jedoch konnten diese negativen Proben nach einem zusätzlichen dritten Zyklus die Anforderungen alle einhalten (Abbildung 45).

Die mittlere Delaminierung der Einzelfuge aller Proben betrug 6,5 %. Die mittlere Gesamtdelaminierung aller Proben lag nach zwei Prüfzyklen bei 3,1 % und nach einem zusätzlichen dritten Prüfzyklus der nachgeprüften negativen Proben bei 3,5 %.

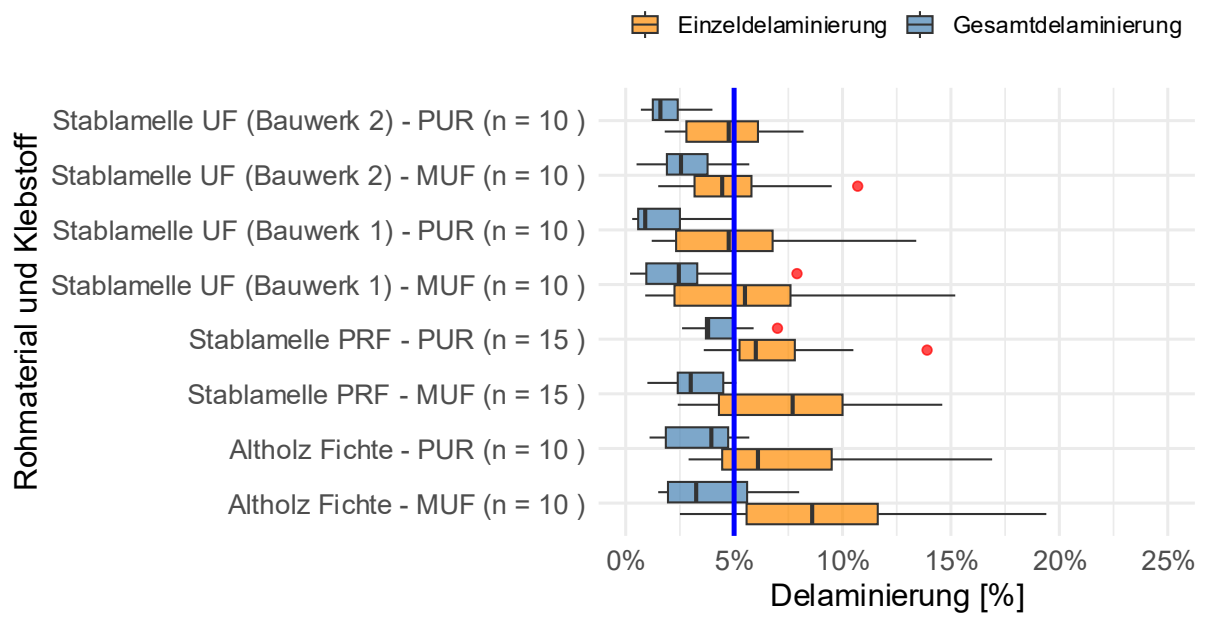


Abbildung 45: Delaminierungsanteile (%) von Brettschichtholz aus Altholzlamellen nach zwei Prüfzyklen. Die blaue vertikale Linie markiert die Anforderungen an die maximal zulässige Delaminierung der Gesamtfuge gemäß EN 14080, Anhang C, Verfahren A

6 Diskussion

6.1 Altholzsortimente und Sortierklassen

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass das Wiederverwendungspotenzial von Altholz hauptsächlich vom Verarbeitungsgrad und dem Volumen der rückgebauten Holzbauteile abhängt. Großvolumige Bauprodukte mit einer geringen Anzahl an Verbindungsmitteln weisen grundsätzlich die besten Voraussetzungen für eine effiziente Wiederverwertung im Sinne einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft auf.

Bei der Beschaffung von Prüfmateriale zur Charakterisierung von Altholz aus tragenden Konstruktionen zeigte sich, dass in Österreich vorwiegend Massivholzquerschnitte, wie Kanthölzer und Dippelbäume, einen großen Anteil der unverklebten Altholzsortimente ausmachen. In jüngeren Bauwerken gewinnen ergänzend verklebte Brettschichtholzbauteile aus großformatigen Ingenieurholzkonstruktionen zunehmend an Bedeutung. Beide Altholzsortimente bieten ein erhebliches Potenzial für die Wiederverwendung, da sie in größeren Mengen verfügbar sind und nur einen geringeren Anteil an Fremdstoffen, wie beispielsweise Verbindungselemente, im Verhältnis zu ihrem Volumen aufweisen. Dennoch bestehen spezifische Herausforderungen, die für eine erfolgreiche Wiederverwendung bewältigt werden müssen. Bei Brettschichtholz können vor allem die vorliegende Verklebungsqualität sowie mögliche Kontaminationen durch Verbindungsmittel und Holzschutzmittel problematisch für eine Kreislaufführung werden. Im Fall von Kanthölzern und Dippelbäumen stellen kleine Metallteile wie Nägel und Schrauben sowie tiefgehende Risse Herausforderungen für die Weiterverarbeitung dar. Weiters kommt es in den Rissen zu Ablagerungen undefinierter Störstoffe. Mit dem zunehmenden Einsatz von Brettsperholz wird dieses Produkt mittelfristig ebenfalls zu den mengenmäßig bedeutendsten Altholzsortimenten gehören. Daher ist es in Zukunft notwendig, auch das Wiederverwendungspotenzial dieses Bauprodukts zu untersuchen und auch hierzu ein geeignetes Kreislaufkonzept zu entwickeln.

Die Sortiererergebnisse von alten Kantholzbalken (Kapitel 5.1) zeigten, dass der Großteil der untersuchten Kanthölzer hinsichtlich der festigkeitsbestimmenden Kriterien den visuellen Sortierklassen „S10“ sowie „S13“ gemäß DIN 4074-1 zugeordnet werden konnte. Dies weist auf ein großes Potenzial für die Wiederverwendung und Weiterverarbeitung hin, da diese Sortierklassen auch heute in großen Mengen verarbeitet werden und das Hauptsortiment darstellen. Dennoch wurde bei einigen Proben festgestellt, dass Merkmale, die durch die Nutzung negativ beeinflusst wurden, als Gründe für schlechtere Sortiererergebnisse und letztlich niedrige Festigkeitseigenschaften identifiziert werden konnten. Besonders bei größeren Querschnitten führten ausgedehnte Rissbildungen sowie biologischer Abbau der Holzsubstanz häufig zu einer Herabstufung in der Sortierklasse. Risse können einerseits durch starke Klimawechsel während der Nutzungsphase oder auch durch hohe statische

Beanspruchungen entstehen. Da die Sortiervorschrift nach DIN 4074-1 nur für die Festigkeitssortierung von frischem Schnittholz ausgelegt ist und keine spezifischen festigkeitsmindernden Merkmale berücksichtigt, die ausschließlich durch die Nutzung und Alterung der Bauteile entstehen können, ist diese Sortiervorschrift nur eingeschränkt für die Analyse von Altholz geeignet. Sie kann als Grundlage für eine erste Einschätzung der vorhandenen Qualität dienen, jedoch wird für eine präzise Sortierung und Bewertung der Festigkeitseigenschaften von Altholzsortimenten zukünftig entweder eine eigenständige Sortiervorschrift für Altholz oder eine Ergänzung der bestehenden Frischholzsortierung notwendig sein.

6.2 Mechanische Eigenschaften rückgebauter Holzbauteile

Der genaue Einfluss von Alterungsprozessen und der Nutzung auf die mechanischen Eigenschaften von Holzbauteilen kann nicht eindeutig quantifiziert werden, da die Heterogenität des Holzes zahlreiche Überlagerungseffekte hervorruft. Um valide Aussagen über die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften durch Alterung und Nutzung zu treffen, wäre eine Untersuchung einer umfangreichen Stichprobe aus einer homogenen Grundgesamtheit mit fehlerfreien Kleinproben erforderlich. Es ist jedoch zu beachten, dass eine solche Untersuchung lediglich Informationen über die spezifische Grundgesamtheit liefern würde und nicht direkt auf andere Bauholzsortimente übertragbar wäre. Die durchgeführten orientierenden Untersuchungen konnten jedoch zeigen, dass Alterung und Nutzung unter normalen Bedingungen in einem geregelten Umgebungsklima und ohne außergewöhnliche statische Belastungen die statische Tragfähigkeit von alten Holzbauteilen nicht wesentlich beeinflussen.

Ergebnisse der Bauteilprüfungen von alten Kantholzbalken (Kapitel 5.2.1) sowie Brettschichtholzabschnitten (Kapitel 5.2.2) deuten darauf hin, dass die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der untersuchten Bauteile auch nach der Alterung und Nutzung weitestgehend der ursprünglichen Leistungsfähigkeit vor der Erstnutzung entsprechen. Bis auf einen Prüfkörper erreichten alle geprüften Kantholzbalken Festigkeitswerte von über 24 N/mm^2 , womit sie den Anforderungswert der Festigkeitsklasse C24 erfüllen würden. Zudem wurde der für C24 geforderte mittlere E-Modul von 11000 N/mm^2 von der Prüfkörperserie erreicht (Abbildung 46). Es hat sich gezeigt, dass mehrere Prüfkörper aufgrund eines Schubversagens nicht die maximale Biegekraft erreicht haben. Dieses Schubversagen wurde durch ausgeprägte Längsrisse verursacht, die durch die Schwindung des Kantholzes während der Trocknung im verbauten Zustand entstanden sind.

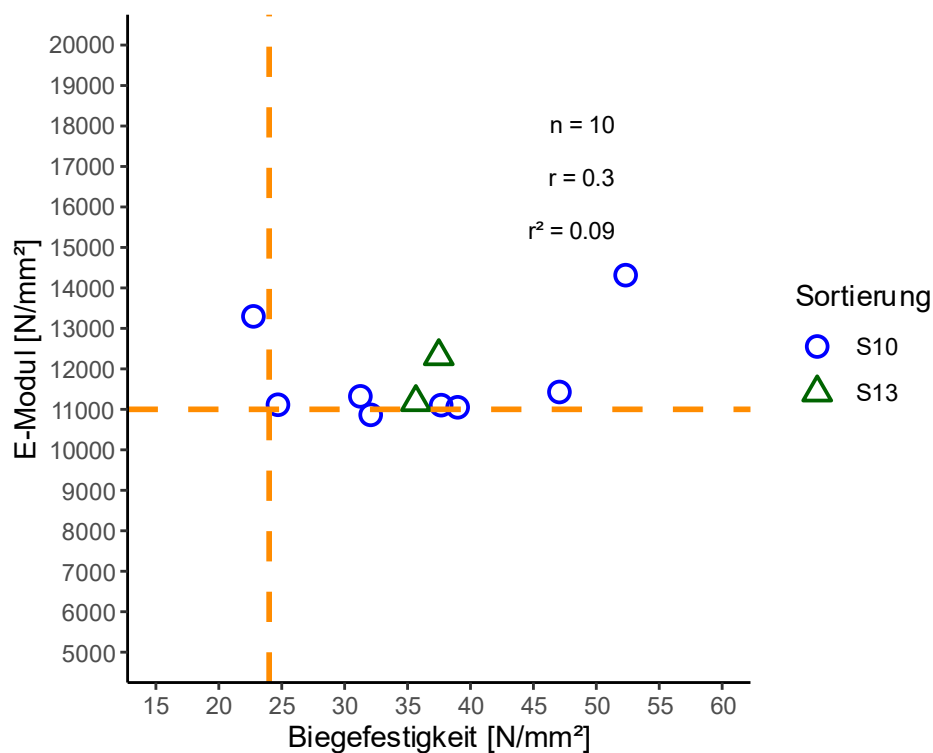


Abbildung 46: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Kantholzbalken. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Biegefestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 338 für die Festigkeitsklasse C24.

Auf Grundlage einer visuellen Beurteilung wurde angenommen, dass die untersuchten Brettschichtholzträger der aktuellen Festigkeitsklasse GL24h zugeordnet werden können. Der Großteil der Proben erreichte Festigkeitswerte von über 24 N/mm² und erfüllte damit die Anforderungen dieser Festigkeitsklasse. Lediglich zwei Prüfkörper blieben unter diesem Wert. Der für GL24h geforderte mittlere E-Modul von 11500 N/mm² wurde von der Prüfkörperserie erreicht (Abbildung 47). Wie bereits bei den Kantholzbalken zeigte sich auch bei den Brettschichtholzabschnitten eine hohe Streuung der Biegefestigkeiten. Die hohe Streuung der Biegefestigkeiten und das Unterschreiten des Werts von 24 N/mm² bei zwei Prüfkörpern könnten darauf zurückzuführen sein, dass bei der Herstellung bewusst schwächere Lamellen in den Mittellagen positioniert wurden.

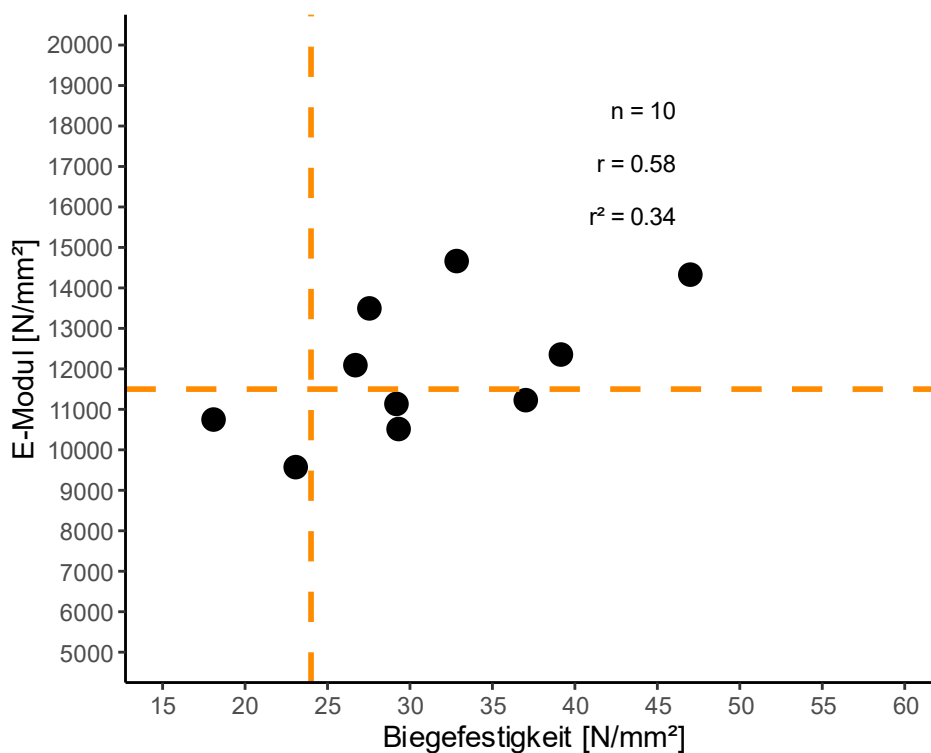


Abbildung 47: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Brettschichtholzträgern. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Biegefestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 14080 für die Festigkeitsklasse GL24h.

Zusammenfassend zeigen die orientierenden mechanischen Bauteilprüfungen der untersuchten Altholzsortimente, dass bei den untersuchten Stichproben weder Alterung noch Nutzung zu einer nachweisbaren Verringerung der mechanischen Eigenschaften geführt haben. Die Unterschiede in Festigkeit und Steifigkeit sind überwiegend auf natürliche Rohmaterialeigenschaften sowie festigkeitsmindernde Merkmale zurückzuführen, die durch das unterschiedliche Wachstum des Holzes bedingt sind und nicht mit Alterung oder Nutzung in Zusammenhang stehen. Dies bestätigt, dass die mechanischen Eigenschaften der Altholzsortimente aus statischer Sicht eine Wiederverwendung oder Weiterverarbeitung nicht einschränken und die geprüften Bauteile grundsätzlich für eine erneute Nutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft geeignet sind. Für präzisere Aussagen über die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften alter Bauteile ist jedoch eine größere Anzahl an Prüfkörpern erforderlich, um die Streuung der Ergebnisse zu reduzieren und verlässlichere Kennwerte für eine Bemessung zu erhalten.

6.3 Verklebungsqualität rückgebauter Holzbauteile

Die Ergebnisse der Verklebungsprüfungen an gealterten Brettschichtholzträgern (Kapitel 5.2.3) zeigen, dass die Verklebungsqualität auch nach der Erstnutzung und Alterung weitestgehend den Mindestanforderungen an die Verklebungsqualität gemäß EN 14080, Anhang C entspricht.

In den Randbereichen einiger Abschnitte wurden größere Delaminierungen gemessen. Diese Delaminierungen sind vermutlich auf eine intensivere Exposition gegenüber klimatischen Veränderungen im verbauten Zustand der Holzbauteile zurückzuführen. Hier ist allerdings hervorzuheben, dass für die Prüfungen bewusst Prüfkörper aus Randabschnitten der Brettschichtholzträger verwendet wurden, um den Extremfall abzubilden und Randbereiche mit Verbindungsmittel in der weiteren Verarbeitung vermutlich ohnehin abgetrennt werden. Es konnte jedoch nicht genau festgestellt werden, ob die Delaminierungen in den Randzonen durch eine Rissbildung oder ein tatsächliches Versagen der Klebefuge zurückzuführen war. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Bereiche, welche nicht im Randbereich liegen, in deutlich besseren Prüfungsergebnissen resultiert hätten. Zudem würden bei einer Weiterverarbeitung die äußersten Abschnitte des Altholzes ohnehin entfernt werden.

Generell zeigte sich an den untersuchten Stichproben, dass die ursprüngliche Verklebungsqualität von alten, verklebten Holzbauteilen auch nach ihrem ersten Lebenszyklus weitestgehend erhalten bleibt, vorausgesetzt, die Bauteile wurden ordnungsgemäß hergestellt, verbaut und keine außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen im Bestand gegeben waren. Bei einer potenziellen Wiederverwendung ist es entscheidend, den Einsatzort des entsprechenden Holzbauteils zu berücksichtigen. Da alte Brettschichtholzträger teilweise mit UF-Klebstoffen verklebt wurden, die nicht feuchtigkeitsbeständig sind, muss eine Verwendung im ungeschützten Außenbereich ausgeschlossen werden.

Bereiche im äußeren Bereich von Brettschichtholzträgern weisen tendenziell eine geringere Verklebungsqualität auf, wobei diese minderwertigen Bereiche meist nur wenige Zentimeter lang sind und bei der Weiterverarbeitung ohnehin entfernt werden. Somit stellt die Verklebung von alten Holzbauteilen kein direktes Hindernis für die Wiederverwendung und Weiterverarbeitung dar. Dennoch sollte die Verklebungsqualität sorgfältig geprüft werden, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Weiterverarbeitbarkeit der alten Bauteile hat.

6.4 Mechanische Eigenschaften von Stablamellen aus Altholz

Durch das Auftrennen von Brettschichtholz quer zur Klebefuge entstehen Stablamellen, die entweder aus den äußeren, markfernen Bereichen oder den inneren, marknahen Bereichen der ursprünglichen Lamellen der Brettschichtholzträger stammen. Die Ergebnisse der Zug- und Biegeprüfungen (Kapitel 5.3.1 und 5.3.2) an den untersuchten Stablamellen aus altem Brettschichtholz zeigen, dass die charakteristischen Festigkeiten von Stablamellen sowohl in den äußeren, markfernen Bereichen als auch in den inneren, marknahen Bereichen mit einer charakteristischen Zugfestigkeit gemäß EN 14358 von jeweils 17 N/mm^2 dem Anforderungswert der Festigkeitsklasse T14 gemäß EN 14080 und EN 338 entsprechen. Der charakteristische E-Modul wurde bei diesen Untersuchungen ausschließlich von den markfernen Stablamellen erreicht, da der mittlere E-Modul der marknahen Stablamellen sowohl bei der Zug- als auch bei der Biegeprüfung unterhalb des Anforderungswertes von

11000 N/mm² liegt (Abbildung 48). Dies deutet darauf hin, dass die Festigkeitsanforderungen für T14 Lamellen mit Stablamellen aus altem Brettschichtholz grundsätzlich erfüllt werden können, während die Steifigkeit aufgrund der schlechteren Werte von marknahen Stablamellen geringfügig unter den Anforderungen liegt. Diese Tatsache könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Laminierungseffekt von Stablamellen vorwiegend eine Optimierung der Festigkeit hervorruft, während die Steifigkeit im Vergleich zum Ausgangsmaterial nicht wesentlich verändert wird. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Untersuchungen von Egner et al. [13], die bei der Untersuchung von Stablamellen aus frischem Fichtenholz beobachteten, dass die Steifigkeit im Vergleich mit dem verwendeten Brettmaterial im Mittel keine nennenswerten Veränderungen hervorbrachte. Im Gegenteil dazu, nahm die Zugfestigkeit der Stablamellen gegenüber dem Ausgangsmaterial nachweislich zu. Für das Erreichen der Festigkeitsklasse T14 und das Einhalten des geforderten Mittelwerts des E-Moduls kann eine Vorsortierung der Lamellen vorgenommen werden. Hierbei werden Lamellen mit einem niedrigen E-Modul ausgeschlossen und für niedrigere Festigkeitsklassen verwendet, um die Anforderungen an die Festigkeitsklasse ohne Unterscheidung zwischen marknahen und markfernen Lamellen sicherzustellen.

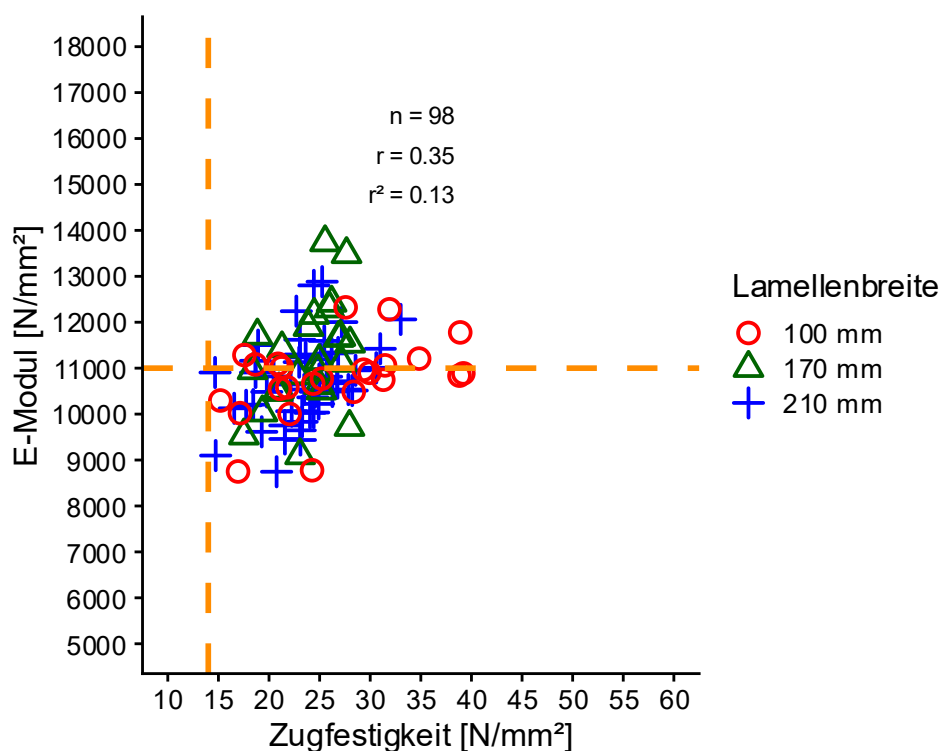


Abbildung 48: Zugfestigkeit und E-Modul von Stablamellen aus altem Brettschichtholz. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Zugfestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 14080 für die Festigkeitsklasse T14.

Aufgrund der Ergebnisse ist anzunehmen, dass die natürliche Alterung und Nutzung des untersuchten Brettschichtholzes keine wesentlichen Abminderungen der mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Stablamellen verursacht haben. Allerdings wurde

festgestellt, dass Stablamellen aus marknahen Bereichen deutlich geringere Steifigkeiten aufweisen als Stablamellen aus markfernen Bereichen. Diese Differenz ist auf die strukturellen Eigenschaften des Holzes innerhalb des Stammquerschnitts zurückzuführen. Marknahe Bereiche bestehen überwiegend aus juvenilem Holz, das in den frühen Wachstumsjahren des Baumes gebildet wird. Charakteristisch für juveniles Holz sind eine geringere Dichte, dünnere Zellwände sowie ein größerer Mikrofibrillenwinkel der Zellulosefibrillen in der Zellwand. Diese Merkmale führen zu reduzierten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu adultem Holz aus markfernen Bereichen.

Auf Grundlage der Erkenntnisse ist anzunehmen, dass alte Brettschichtholzträger als Rohmaterial zur Herstellung von Stablamellen genutzt werden können, die die charakteristischen Werte der Festigkeitsklasse T14 erreichen. Diese Stablamellen können anschließend zu neuem Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 weiterverarbeitet werden. Es könnte jedoch erforderlich sein, einen Teil der Lamellen aus marknahen Bereichen niedrigeren Festigkeitsklassen zuzuordnen. Diese Annahme sollte durch eine größere Stichprobe an Rohmaterial und daraus hergestellten Stablamellen verifiziert werden.

Ergebnisse zeigen, dass größere Lamellenbreiten vorteilhaft für die mechanischen Eigenschaften sind, da sie eine größere Anzahl an Einzelstäben beinhalten, was zu einem stärkeren Homogenisierungseffekt führt. Dieser Effekt verringert die Streuung der Ergebnisse und verbessert insbesondere das 5%-Quantil der Festigkeit. Hohe Korrelationen zwischen den aufgenommenen dynamischen und statischen E-Modulen weisen darauf hin, dass der dynamische E-Modul dem statischen E-Modul sehr nahekommt. Bei größeren Lamellenbreiten, die eine höhere Anzahl an Einzelstäben enthalten, ist der Zusammenhang zwischen dem statischen und dynamischen E-Modul am stärksten ausgeprägt. Dies lässt darauf schließen, dass eine maschinelle Sortierung von Stablamellen mithilfe einer Schwingungsfrequenzmessung realisierbar ist.

Zwischen der Dichte und den Festigkeits- sowie Steifigkeitswerten der Stablamellen zeigte sich kein deutlicher Zusammenhang. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Versagen der Stablamelle in der Prüfung maßgeblich durch den schwächsten Stab im Verbund bestimmt wird. Da dieser einzelne Stab möglicherweise nicht die Dichte der gesamten Stablamelle widerspiegelt, ist die Gesamtdichte nicht zuverlässig zur Vorhersage der mechanischen Eigenschaften geeignet. Dies legt nahe, dass die Beurteilung der Dichte zur Einschätzung der Festigkeit bei Stablamellen nur bedingt anwendbar ist.

6.5 Materialeigenschaften neuer Bauprodukte aus Altholz

Die Ergebnisse der Materialprüfungen von Brettspertholz aus Altholz zeigten, dass ähnliche Festigkeiten und Steifigkeiten wie bei Bauprodukten aus Frischholz erreicht werden konnten. Aufgrund unzureichender Vergleichsdaten gestaltet sich die Beurteilung der Bauprodukte auf Basis der Prüfwerte jedoch als herausfordernd. Um eine fundierte Bewertung vornehmen zu

können, ist es notwendig, neben den Bauteilen aus Altholz auch solche aus Frischholz für Vergleichsprüfungen heranzuziehen.

Während der Verarbeitung des Rohmaterials zur Herstellung der Brettsperrholzplatte mussten zahlreiche Brettlamellen aufgrund von Merkmalen, die potenzielle Produktionsprobleme verursachen und die Festigkeit beeinträchtigen könnten, aussortiert und von der Verarbeitung ausgeschlossen werden. Insbesondere Merkmale wie Ausbrüche, fehlende Querschnitte, Kantenbeschädigungen sowie Bereiche mit Fäule führten dazu, dass diese Altholzlamellen einer weiteren Verarbeitung nicht zugeführt werden konnten. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass nicht alle Altholzlamellen aus den Sortimenten Kantholz und Dippelbäume aus Gebäuden der Gründerzeit gleichermaßen für die Wiederverwendung und Weiterverarbeitung geeignet sind. Daher wird eine sorgfältige Vorsortierung als unerlässlich erachtet. Besonders biologischer Abbau im Anfangsstadium ist visuell schwer zu erkennen. Trotz sorgfältiger Entfernung von Störstoffen vor dem Auftrennen des Rohmaterials zu Brettlamellen, wurden metallische Verunreinigungen sowie mineralische Ablagerungen in der fertigen Brettsperrholzplatte erkannt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer gründlicheren Prüfung und Reinigung des Rohmaterials vor der Weiterverarbeitung, um die Qualität und Sicherheit der Endprodukte zu gewährleisten sowie den Produktionsprozess störungsfrei zu gestalten und keinen erhöhten Verschleiß von Maschinen und Werkzeugen herbeizuführen.

Die Verklebungsversuche an neuen Bauteilen aus Altholz zeigen, dass die Verklebung von Altholz grundsätzlich unproblematisch ist und aufbereitete Oberflächen von Altholz eine gute Eignung für die Verklebung aufweisen. Sowohl die Anforderungen der Delaminierungsprüfung als auch der Druckscherprüfung konnten größtenteils erfüllt werden.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass alte Holzbauteile hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften grundsätzlich für eine Wiederverwendung, Reparatur sowie für eine Weiterverarbeitung zu neuen tragenden Bauteilen geeignet sein können. Bei verklebten Holzprodukten kann – sofern die klimatischen Bedingungen im ersten Nutzungszyklus den Anforderungen entsprachen – von einer Verklebungsqualität auf dem Niveau des Herstellungszeitpunkts ausgegangen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die vorliegenden Erkenntnisse auf orientierenden Prüfungen typischer Altholzsortimente beruhen und daher nicht uneingeschränkt generalisierbar sind.

Die stichprobenartige Sortierung der Altholzsortimente deutet darauf hin, dass Altholz aus tragenden Bereichen in der Regel vergleichbare Sortiereigenschaften wie gegenwärtig verarbeitete und verbaute Bauprodukte im Holzbau aufweist. Für eine problemlose Wiederverwendung, Reparatur und Weiterverarbeitung ist zukünftig eine neu zu erarbeitende Sortiervorschrift erforderlich, die auch festigkeitsvermindernde Holzmerkmale berücksichtigt, die durch die Nutzung und Alterung entstehen können. Darüber hinaus gilt es Konzepte zur vollständigen Entfernung von Schad- und Störstoffen zu entwickeln, um eine wirtschaftliche Aufbereitung und Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Während der Ansatz der direkten Wiederverwendung und Reparatur für weitgehend intakte Bauteile geeignet ist, eröffnet das Konzept der Weiterverarbeitung, bei dem durch die gezielte Aufbereitung alter Holzbauteile neue Brettlamellen hergestellt werden, eine alternative Möglichkeit mit mehr Flexibilität in der Weiterverarbeitung. Zusammenfassend lässt sich ein hohes Potenzial für die Kreislaufführung alter tragender Bauteile feststellen. Für eine tiefergehende Analyse der mechanischen Eigenschaften von Stablamellen, welche aus vertikal zur Klebefuge aufgetrennten Brettschichtholzträgern hergestellt werden, wird im Rahmen eines Folgeprojekts der Holzforschung Austria eine große Anzahl von einzelnen Prüfkörpern unterschiedlicher Herkünfte untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist die Erstellung eines umfangreichen Datensatzes zur Ermittlung charakteristischer Materialkennwerte, auf dessen Grundlage ein Modell zur Vorhersage der Festigkeit von Stablamellen, insbesondere aus Altholz, entwickelt werden soll. Durch dieses Modell soll ein standardisiertes Verfahren zur Festigkeitseinstufung von Stablamellen für die Holzverarbeitende Industrie entstehen. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Analyse des Langzeitverhaltens von alten Bauteilen sowie daraus hergestellter Holzbauprodukte. Hierbei sind insbesondere die Auswirkungen langjähriger Nutzung und Krieeffekte auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] United Nations and the Food and Agriculture Organization of the United States, Circularity concepts in wood construction: Geneva Timber and Forest Study Paper 95, United Nations, Geneva.
- [2] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie., 2022.
- [3] K. Kránitz, Effect of natural aging on wood (2014).
- [4] W. Sonderegger, K. Kránitz, C.-T. Bues, P. Niemz, Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood, *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015) 883–889.
- [5] A. Cavalli, D. Cibecchini, M. Togni, H.S. Sousa, A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber, *Construction and Building Materials* 114 (2016) 681–687.
- [6] E. Kojima, M. Yamasaki, C.-G. Lee, Y. Sasaki, Synchrotron X-ray measurements of cellulose in the cell wall of aged wood under uniaxial loading, *Holzforschung* 77 (2023) 260–269.
- [7] E. Raknes, Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing, *Eur. J. Wood Prod.* 55 (1997) 83–90.
- [8] Deutsches Institut für Normung, DIN 4074-1: Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [9] Austrian Standards International, ÖN B 4100-2: Holzbau Holztragwerke, Austrian Standards International, Wien, 1981.
- [10] F. Löschnig, AP4: Holz- und Bauwerksdiagnostik: Forschungsbericht des Projekts prokis04/2, Wien, 2010.
- [11] Austrian Standards International, EN 408: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, Austrian Standards International, Wien, 2012.
- [12] Austrian Standards International, EN 338: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen, Austrian Standards International, Wien, 2016.
- [13] S. Egner, S. Strübel, M. Frese, Fünfteilige Fichtenlamellen zur Erzielung eines zweidimensionalen Laminierungseffekts in Brettschichtholz, *Bautechnik* 98 (2021) 61–74.

9 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Altes Massivholz während (links) und nach dem Abbruch (rechts).....	12
Abbildung 2: Alte Brettschichtholzträger im Bestand (links) und herausgetrennte Abschnitte für die Bauteilprüfungen (rechts).....	13
Abbildung 3: Altes Brettschichtholz vor (links) und während (rechts) der Verarbeitung zu Stablamellen	14
Abbildung 4: Angewandte Methoden zur Charakterisierung verschiedener Altholzsortimente.....	15
Abbildung 5: Gemäß DIN 4074-1 sortierte Kantholzbalken aus abgebrochenen Gründerzeithäusern	16
Abbildung 6: Eingespannter Kantholzbalken bei der 4-Punkt-Biegeprüfung	17
Abbildung 7: Eingespannter Brettschichtholzabschnitt bei der 4-Punkt-Biegeprüfung	17
Abbildung 8: Druckscherprüfung eines Brettschichtholzabschnitts gemäß EN 14080, Anhang D	18
Abbildung 9: Proben aus altem BSH vor (links) und nach (rechts) der Delaminierungsprüfung	18
Abbildung 10: Verfahren zur Auftrennung eines Brettschichtholzträgers zu Stablamellen	19
Abbildung 11: Aus Brettschichtholz herausgetrennte Stablamelle mit 7 verbundenen Einzelstäben	20
Abbildung 12: Aufgetrennte Altholzlamellen aus Altholzsortimenten vor der Weiterverarbeitung.....	21
Abbildung 13: Einschichtplatten aus Altholzlamellen vor der Flächenverklebung zu Brettsperrholz.....	22
Abbildung 14: Altholzlamellen beim Klebstoffauftrag vor dem Verpressen zu neuem Brettschichtholz.....	23
Abbildung 15: Brettsperrholzplatte aus Altholzlamellen bei der 4-Punkt-Biegeprüfung	25
Abbildung 16: Brettsperrholzplatte aus Altholzlamellen bei der 4-Punkt-Rollschubprüfung	25
Abbildung 17: Druckscherprüfungen an Brettsperrholzabschnitten aus Altholz	26
Abbildung 18: Sortierte Kantholzbalken gemäß DIN 4074-1 (durch Alterung und Nutzung veränderliche Merkmale sind durch die Markierung „*“ gekennzeichnet).....	27
Abbildung 19: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Kantholzbalken	28
Abbildung 20: Charakteristischer Biegebruch eines alten Kantholzbalken	29
Abbildung 21: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Brettschichtholzträgern	30
Abbildung 22: Charakteristischer Biegebruch eines Brettschichtholzabschnitts in der Zugzone	30

Abbildung 23: Fehlverklebte Keilzinkung eines geprüften Brettschichtholzabschnitts	31
Abbildung 24: Scherfestigkeit und Faserbruchanteil von Druckscherproben aus altem Brettschichtholz. Die rote Linie visualisiert die Grenzwerte für die Scherfestigkeit und den Faserbruchanteil von Einzelfugen gemäß den Anforderungen der EN 16351, Anhang C.	32
Abbildung 25: Darstellung der maximalen Delaminierungen der Einzel- und Gesamtfuge (nach zwei Prüfzyklen) an alten Brettschichtholzabschnitten, die mit unterschiedlichen Klebstoffsystemen verklebt wurden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte für Delaminierungen gemäß EN 14080, Anhang D, Verfahren A. Die blaue horizontale Linie repräsentiert den zulässigen Grenzwert für die maximale Delaminierung der Gesamtfuge, während die rote horizontale Linie den Grenzwert für die maximale Delaminierung der Einzelfuge markiert.	33
Abbildung 26: Darstellung der maximalen Delaminierungen der Einzel- und Gesamtfuge (nach 3 Prüfzyklen) an alten Brettschichtholzabschnitten, die mit unterschiedlichen Klebstoffsystemen verklebt wurden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte für Delaminierungen gemäß EN 14080, Anhang D, Verfahren A. Die blaue horizontale Linie repräsentiert den zulässigen Grenzwert für die maximale Delaminierung der Gesamtfuge, während die rote horizontale Linie den Grenzwert für die maximale Delaminierung der Einzelfuge markiert.	34
Abbildung 27: Mikroskopische Aufnahmen von Klebefugen alter Brettschichtholzträger: (a) intakte Klebefuge mit PRF, (b) Mikrorisse in Klebefuge mit PRF, (c) intakte Klebefuge mit UF, (d) Mikrorisse in Klebefuge mit UF	35
Abbildung 28: Zugfestigkeit und E-Modul von Stablamellen mit unterschiedlichen Lamellenbreiten	36
Abbildung 29: Zugfestigkeit (a) und E-Modul (b) von Stablamellen aus marknahen Bereichen (MN) und markfernen Bereichen (MF)	37
Abbildung 30: Korrelation zwischen statischem und dynamischen E-Modul von Stablamellen.....	38
Abbildung 31: Zusammenhänge des dynamischen und statischen E-Moduls von Stablamellen in Abhängigkeit von der Lamellenbreite.....	39
Abbildung 32: Biegefestigkeit flachkant und E-Modul von Stablamellen mit unterschiedlichen Lamellenbreiten.....	40
Abbildung 33: Biegefestigkeit flachkant (a), und E-Modul (b) von Stablamellen aus marknahen Bereichen (MN) und markfernen Bereichen (MF).....	41
Abbildung 34: Dynamische E-Module von Altholzlamellen verschiedener Sortierklassen. Die horizontalen Linien in rot (S7), blau (S10) und grün (S13) visualisieren die Mindestanforderung (mittlerer E-Modul) für die entsprechende Sortierklasse.	42
Abbildung 35: Dynamischer E-Modul von Altholzlamellen der Holzarten Fichte und Kiefer	43

Abbildung 36: Dynamischer E-Modul von Altholzlamellen aus Dippelbäumen und Kantholz	43
Abbildung 37: Keilzinkenbiegefestigkeit unterschiedlicher Sortierklassen von Altholzlamellen	44
Abbildung 38: Biegefestigkeit von Brettsperrholz aus Altholzlamellen (bezogen auf den Nettoquerschnitt)	45
Abbildung 39: Rollschubfestigkeit von Brettsperrholz (bezogen auf den Nettoquerschnitt)	46
Abbildung 40: Bruchfläche einer Druckscherprobe eines neu hergestellten Brettsperrholzelements aus Altholzlamellen nach der Prüfung	47
Abbildung 41: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Druckscherprobe nach der Druckscherprüfung in axialer Richtung (links) und radialer Richtung (rechts)	47
Abbildung 42: Rollschubfestigkeiten von Brettsperrholz aus Altholz und Frischholz	48
Abbildung 43: Ermittelte Faserbruchanteile der Delaminierungsproben aus Brettsperrholz, welches mit Altholzlamellen hergestellt wurde. Die horizontalen gestrichelten Grenzwertlinien markieren die Anforderungen an die minimalen Faserbruchanteile für die Einzelfuge und die Gesamtfuge gemäß EN 16351, Anhang A	49
Abbildung 44: Ergebnisse der Druckscherproben von neuem Brettschichtholz aus Altholzlamellen. Die rote Linie visualisiert die Grenzwerte für die Scherfestigkeit und den Faserbruchanteil von Einzelfugen gemäß den Anforderungen von EN 16351, Anhang C.	50
Abbildung 45: Delaminierungsanteile (%) von Brettschichtholz aus Altholzlamellen nach zwei Prüfzyklen. Die blaue vertikale Linie markiert die Anforderungen an die maximal zulässige Delaminierung der Gesamtfuge gemäß EN 14080, Anhang C, Verfahren A	51
Abbildung 46: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Kantholzbalken. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Biegefestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 338 für die Festigkeitsklasse C24.	54
Abbildung 47: Biegefestigkeit und E-Modul von alten Brettschichtholzträgern. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Biegefestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 14080 für die Festigkeitsklasse GL24h.	55
Abbildung 48: Zugfestigkeit und E-Modul von Stablamellen aus altem Brettschichtholz. Die orange-strichlierten Linien visualisieren die Mindestanforderung für die Zugfestigkeit (x-Achse) und den mittleren E-Modul (y-Achse) gemäß EN 14080 für die Festigkeitsklasse T14.	57

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hergestelltes Brettschichtholz aus Altholz zur Untersuchung der Verklebungsqualität	23
Tabelle 2: Eingestellte Parameter zur Verklebung von Altholzlamellen zu Brettschichtholz	24

11 Begriffsdefinitionen

Dippelbäume - Dreiseitig behauene, halbrunde und entrindete Stämme für Tragkonstruktionen im Holzbau (historisches Bauprodukt aus Österreich und Süddeutschland)

Gutes Bauholz - Sortierklasse für Schnittholz gemäß ÖNORM B 4100-2:1951

Markfern (MF) - Äußere Holzbereiche des Stammquerschnitts, welche sich nicht in der Nähe des Marks befinden

Marknah (MN) - Innere Holzbereiche des Stammquerschnitts, welche sich in der Nähe des Marks befinden

MUF (Melamine-Urea-Formaldehyde) - Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze

PUR (Polyurethane) - Polyurethan-Klebstoff

Stablamelle - Brettförmiges Halffertigprodukt, welches durch das Auftrennen von Brettschichtholz quer zur Klebefuge hergestellt wird

Kontakt für Anfragen zu den Rohdaten der ermittelten Prüfergebnisse:

k.albrecht@holzforschung.at