

Cement impregnated laminated veneer lumber rail sleepers CemSleeper

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
VIF 2018

Juni 2023



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A - 1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Universität Innsbruck
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Technikerstraße 13
A - 6020 Innsbruck



Technische Hochschule Rosenheim
Zentrum für Forschung, Entwicklung und Transfer
Hochschulstraße 1
D - 83024 Rosenheim



Georg-August-Universität Göttingen
Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte
Büsgenweg 4
D - 37077 Göttingen



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A - 1090 Wien



Cement impregnated laminated veneer lumber rail sleepers CemSleeper

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
VIF 2018

Autorinnen und Autoren:

Sebastian HIRSCHMÜLLER

Seraphin UNTERBERGER

Christian BRISCHKE

Marc LUGER

Brendan MARAIS

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Universität Innsbruck - Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Technische Hochschule Rosenheim - Zentrum für Forschung, Entwicklung und Transfer

Georg-August-Universität Göttingen - Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte

Inhalt

1	EINLEITUNG	7
2	Zementimprägniertes Furnierschichtholz aus Buche zur Verwendung als Bahnschwellen	10
2.1	Überblick der Forschungsarbeiten zur Dauerhaftigkeit zementbehandelten Holzes	10
2.2	Material und Methoden	11
2.2.1	Verfahren zur Zementimprägnierung von Einzelfurnieren	11
2.2.2	Verklebung zementimprägnierter Buchenschäl furniere	15
2.2.3	Bestimmung des pH-Wertes zementimprägnierter Furniere	20
2.2.4	Elutionsverhalten zementimprägnierter Buchenschäl furniere	20
2.2.5	Untersuchungen zur biologischen Dauerhaftigkeit zementimprägnierter Furniere	24
2.2.6	Mechanische Untersuchungen an Bahnschwellen	26
2.3	Ergebnis der Zementimprägnierung	34
2.3.1	Zementeindringmenge	34
2.3.2	Verklebungseigenschaften zementimprägnierter Schäl furniere	38
2.3.3	pH-Wert-Analyse zementimprägnierter Buchenfurnieren	43
2.3.4	Eluatverhalten zementimprägnierter Furniere	43
2.4	Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit zementimprägnierter Furniere	49
2.5	Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen	65
2.5.1	Lochleibung Systemversuch	65
2.5.2	Schraubenauszugsfestigkeit	66
2.5.3	Zweischnittige Lochleibungsfestigkeit	70
2.6	Zusammenfassung zur Zementimprägnierung von Buchenfurnierschichtholz	72
3	Imprägnierung von Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz mit kupferbasierten Holzschutzmitteln	74
3.1	Untersuchungen an Halbschwellen aus Buchenfurnierschichtholz	74
3.1.1	Herstellung der Halbschwellen	74
3.1.2	Imprägnierung	77
3.1.3	Analyse der Wirkstoffkonzentrationen	82
3.1.4	Dauerhaftigkeit von Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz imprägniert mit kupferbasierten Holzschutzmitteln	86
3.1.5	Zu erwartende Gebrauchsdauer	94
3.2	Sorptionsversuche an Furnieren	97
3.3	Auswirkung einer Schutzmittelbehandlung auf die Verklebungsqualität	101
3.3.1	Zugscherversuche	102
3.3.2	Blockscherversuche	106
3.4	Mechanische Untersuchungen	112

3.4.1	Schraubenausziehversuche	112
3.5	Vierpunktbiegeversuche.....	113
3.5.1	Prüfkörpereinteilung	113
3.5.2	Versuchsaufbau des Vierpunktbiegeversuches.....	114
3.5.3	Prüfkörperfertigung	120
3.5.4	Massenentwicklung der Prüfkörper.....	121
3.5.5	Bestimmung der Konditionierungsdauer.....	122
3.5.6	Versuchsdurchführung.....	124
3.5.7	Ergebnis der Vierpunktbiegeversuche.....	125
3.5.8	Zusammenfassung der mechanischen Versuche	132
3.6	Zusammenfassung und Schlußfolgerung	133
4	Literaturverzeichnis	135

1 EINLEITUNG

Die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Holzschwellen als wichtiger Bestandteil des Oberbaus der Fahrwegtechnik stellen einen wichtigen Baustein des Streckenmanagement im Eisenbahnwesens dar. In diesem Zusammenhang spielt auch die Holzschwelle vor allem aufgrund ihres guten Dämpfungsvermögens und des robusten Verhalten gegenüber lokaler Beschädigungen, beispielsweise bei Güterzugentgleisungen im Bereich von Rangierbahnhöfen, nach wie vor eine wichtige Rolle. Fortschreitende Materialentwicklungen und -verbesserungen konkurrierender Werkstoffe wie Beton, Kunststoff oder Stahl, in Verbindung mit einem künftig möglichen europaweitem Verbot des seit Jahrzehnten bewährten Holzschutzmittels Kreosot drängen diese immer weiter in den Hintergrund. Daher sind innovative Produktentwicklungen im Bereich der Holz- und Holzwerkstoffe in Verbindung mit innovativen Holzschutzmaßnahmen auf Basis von Holzmodifizierung oder chemischer Behandlung einer holzbasierten Schwelle nötig, um die Rückeroberung verlorener Marktanteile zu ermöglichen. Nach Schramm (1952) konnten durch eine nach dem Doppel-Rüping-Verfahren durchgeführte Tränkung von Buchenschwellen mit Kreosot mittlere Lebenszeiten von 35 Jahren erzielt werden. Mit der Verlängerung der Genehmigung von Kreosot als Wirkstoff zur Verwendung in Biozidprodukten bis zum Auslaufen der Durchführungsverordnung (EU) 2022/1950 zum 31.10.2029, sollte eine geeignete Alternative zu dessen Substitution gefunden werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes verfolgt man in einem ersten Schritt einen innovativen Ansatz der Verwendung zementöser Imprägnierstoffe als nicht-biozides Schutzsystem für Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz. Das übergeordnete Ziel bestand darin, kreosotimprägnierte Bahnschwellen durch das System "CemSleeper" zu ersetzen. Dadurch soll verhindert werden, dass Holzschwellen weiterhin Marktanteile an Beton- und Kunststoffschwellen verlieren, die bekanntermaßen aus nicht erneuerbaren Rohstoffen hergestellt werden und negative Auswirkungen auf die Kohlenstoffbilanz haben. Durch die Zementimprägnierung der Buchenfurniere vor der Verklebung konnte die Dauerhaftigkeit des Holzes erhöht werden. Durch die Verwendung von Lagenwerkstoffen aus 2 mm bis 3 mm starken Schäl furnieren aus Buche als Ausgangsmaterial sollte eine Homogenisierung des Schichtwerkstoffes durch Auskappen und Verteilen typischer Holzmerkmale wie Äste über das Bauteil erreicht und damit eine erhöhte Tragfähigkeit im Vergleich zu Vollholz erzielt. Zusätzlich bietet die Behandlung der Einzelfurniere vor der Verklebung die Herstellung eines vollständig imprägnierten Schwellenquerschnittes an.

Die Zementimprägnierung mit einer Glykol-Zement-Suspension als Schleppmittel und einer Hydratisierung des Zements im Holz durch anschließende Wasserlagerung der imprägnierten Furniere stellte sich als geeignete Prozesstechnologie dar, um die Zelllumen über den Furnierquerschnitt verteilt nahezu vollständig mit Zementstein zu verfüllen. Eine vermutete Dauerhaftigkeitserhöhung durch die Imprägnierung mit Zement konnte nicht im erforderlichen Umfang bestätigt werden, bei gewissen Pilzarten wurde sogar durch einen alkalischen Voraufschluss der Holzstruktur ein stärkerer biotischer Abbau der Zellstruktur beobachtet.

Auf dem Markt erhältliche und von den Österreichischen Bundesbahnen eingesetzte Alternativen zu kreosothaltigen Produkten ist unter anderem ein zweistufiges Holzschutzmittelsystem, als Kombination eines wässrigen, Kupfer-amin-basiertem Holzschutzmittels (Schutzmittel 1) mit einem Salz-Ölbasiertem Holzschutzmittel (Schutzmittel 2), eingebracht in aufeinanderfolgenden Imprägniervorgängen, verfügbar.

In Übereinstimmung mit dem Auftraggeber wurden die ursprünglichen Zielvorgaben zur Untersuchung einer zementimprägnierten Holzschwelle auf die Untersuchung mit Schutzmittel 1 und Schutzmittel 2 zweistufig imprägnierter Furnierschichtholzschwellen aus Buche hinsichtlich der Imprägnierqualität, der Dauerhaftigkeit, der Auswirkung auf die Verklebungsintegrität sowie derer mechanischen Eigenschaften geändert und erweitert.

Die Auswirkung einer zweistufigen Imprägnierung (wässrige Imprägnierung mit Kupfer sowie organischen Biozidbestandteilen in der ersten Imprägnierstufe mit anschließender Tränkung in ölbasiertem Holzschutzmittel mit organischen Co-Bioziden) auf die Verklebungsintegrität des Furnierschichtholzes zeigte eine ausreichende Beständigkeit des verwendeten Klebstoffsystems (Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Klebstoff PRF nach EN 301 (2013). Die zugelassenen Klebstoffe mit geprüftem Klebstoff-Härter-Verhältnis sind im technischen Dossier der Europäischen Technischen Bewertung des Produktes angegeben und ist beim Österreichischen Institut für Bautechnik hinterlegt. Die zweistufige Imprägnierung mit Schutzmittel 1 und Schutzmittel 2, angewandt auf Prüfkörper aus Furnierschichtholz aus Buche (FSH-BU), bietet eine weitere Möglichkeit, ebendieses Material auf seine Eignung als Alternativmaterial für Holzschwellen hin zu untersuchen. Die Eignung als Schwellenmaterial wurde überwiegend experimentell untersucht. Die wohl markantesten Unterschiede zu herkömmlichen Buchenvollholzschwellen sind die vorhandenen Klebefugen, welche die einzelnen Furnierlagen aus ca. 3 mm starkem Buchenschäl furnier verbinden. Daher befassten sich die durchgeführten mechanischen Versuche vorwiegend mit der Leistungsfähigkeit der Klebefugen. Um das Tränkverhalten

des unidirektional gerichteten Furnierschichtholzes aus Buche beurteilen zu können, wurden Prüfkörper mit dem Regelquerschnitt einer Holzschwelle (B x H = 260 x 160 mm²) mit halber Schwellenlänge (L = 1300 mm) hergestellt und in Abstimmung mit dem Auftraggeber spanend bearbeitet und anschließend imprägniert. An diesen Prüfkörpern wurden Analysen zur Wirkstoffkonzentration sowie Dauerhaftigkeitsversuche angestellt, um den Widerstand gegen biologische Angriffe zu evaluieren.

Im ersten Berichtsabschnitt werden die Untersuchungen an zementimprägniertem Furnierschichtholz beschrieben und die wesentlichen Ergebnisse beschrieben und bewertet. Der zweite Teil des Ergebnisberichtes befasst sich mit der Auswirkung einer zweistufigen Imprägnierung aus wässriger mit anschließender öliger Imprägnierung auf die mechanischen und biologischen Leistungseigenschaften von Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz und erläutert neben Herstellung und Präparation der Prüfkörper die durchgeführten Versuche und deren Ergebnis. Der Bericht wird mit einer Zusammenfassung und Beurteilung der Resultate und der aufgetretenen Probleme, sowie einem Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten auf diesem Gebiet geschlossen.

2 ZEMENTIMPRÄGNIERTES FURNIERSCHICHTHOLZ AUS BUCHE ZUR VERWENDUNG ALS BAHNSCHWELLEN

2.1 Überblick der Forschungsarbeiten zur Dauerhaftigkeit zementbehandelten Holzes

Die Zementbehandlung von Holz ist eine innovative Methode zur Verbesserung der Haltbarkeit und Beständigkeit von Holz- und Holzwerkstoffen. Das Holz wird mit einer zementartigen Substanz behandelt, wodurch eine widerstandsfähigere und dauerhaftere Materialstruktur entsteht. Studien haben gezeigt, dass die Zementimprägnierung von Holz zu einer Steigerung der Dauerhaftigkeit führen kann. Nur wenige Veröffentlichungen untersuchten den Einfluss einer Zementbehandlung auf den biotischen Holzabbau. Goodell et al. (1997) berichteten über eine Hemmung der Pilzbesiedlung auf vollständig in Zement eingekapselten Holzpartikeln und vermuteten eine Veränderung des pH-Wertes als Schutzmechanismus gegen Pilzbefall. Papadopoulos et al. (2019) bewertete die Fäulnisresistenz von zementgebundenen Holzwerkstoffplatten gegen Braunfäule (*Coniophora puteana*) und Weißfäule (*Trametes versicolor*) in Abhängigkeit des Zement-Holz-Masseverhältnisses durch Messung des Gewichtsverlustes der Bretter nach 16 – wöchiger Inkubationszeit. Bei Proben aus Weißpappel (*Populus alba*) mit einem Masseverhältnis zwischen Zement und Holz von 3,0 wurde eine Massenzunahme anstelle eines Masseverlustes beobachtet. Beide Pilzgattungen griffen die zementgebundenen Platten nicht an. Brischke (2007), Brischke et al. (2007) und Brischke et al. (2014) beschrieben Dauerhaftigkeitsversuche im Boden entsprechend EN 252 (2015) unter Verwendung verschiedener Bodensubstrate u. a. mit Kiefernspiltholz (*Pinus sylvestris* L.), Fichte (*Picea abies* Karst.) und Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), wobei eine Einbettung der Holzproben in Portlandzement die Restlebensdauer im Vergleich zu unbeschichteten Stäben signifikant um den Faktor 2,7 erhöht wurde. Jedoch erhöhte sich im Anschluss an einem signifikant geringeren Holzabbau während der ersten drei Jahre die Abbaurate der in Portlandzement gebetteten Stäbe signifikant. Nur wenige Veröffentlichungen, die sich mit dem Holzabbau befassten, ermittelten neben dem Masseverlust die Materialfestigkeit biotisch (Armstrong and Savory 1959; Boettcher 1985) oder alkalisch (Hirschmüller et al. 2018b) geschädigten Holzes. Eine signifikante Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch Behandlung von Furnierschichtholz aus Buche mit Zement stellte Hirschmüller et al. (2018a) fest, wo zementummantelte Buchenfurnierschichtholzstäbe nach einem Jahr Lagerung in biotisch aktiven Erds substrat in Anlehnung an CEN/TS 15083-2 (2005) keinerlei

Holzabbau zeigten und auch die Restmaterialfestigkeit lediglich durch alkalisch bedingte Materialschädigung bestimmt war. Aufbauend auf den vorausgegangenen Erkenntnissen wurde ein innovatives Verfahren zur Zementimprägnierung von Holz entwickelt, um bestimmte Materialeigenschaften von Holz, wie Brandverhalten oder Dauerhaftigkeit, gezielt zu beeinflussen (Hirschmüller et al. 2020). Die Veränderung der natürlichen Dauerhaftigkeit von zementimprägnierten Buchenschäl furnieren sowie dessen Eignung zur Verwendung für Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz wird in den folgenden Abschnitten erörtert und die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. Für die Eignungsbewertung einzelmineralisierter Furniere zur Herstellung von Bahnschwellen aus schichtverklebten Furnierschichtholzbauteilen wurden neben Untersuchungen zur Verklebbarkeit der zementimprägnierten Schäl furniere auch Versuche zur Bewertung der Massenzunahme durch die Zementeinlagerung in der Holzstruktur, Elutionsversuche zur Bewertung der Auswaschbeständigkeit, mechanische Versuche und Dauerhaftigkeitsversuche durchgeführt. Zur Festlegung der mechanischen Anforderungen an Bahnschwellen aus zementimprägniertem Furnierschichtholz aus Buche wurden vergleichende Versuchsserien zur Ermittlung der Schraubenauszugsfestigkeit und der Lochleibungsfestigkeit von Schwellenschrauben in kreosotimprägnierten Buchenschwellen und in Schwellen aus Buchenfurnierschichtholz durchgeführt.

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Verfahren zur Zementimprägnierung von Einzelfurnieren

Schäl furniere aus Buche (*Fagus sylvatica L.*) mit einer Dimension von (120 x 500 x 3) mm³, klimatisiert im Normalklima NC bei 65 % relativer Luftfeuchte und 20 °C, wurden mit einer Zementsuspension durch ein Vakuum-Druckverfahren imprägniert. Dabei werden die Zementkörner über eine Trägerflüssigkeit in die Gefäße des Holzes transportiert und der Hydratisierungsprozess des Zements zu Zementstein durch anschließende Wasserlagerung der imprägnierten Furniere aktiviert. Die Imprägniersuspension wurde aus einem Feinstzement (CEM I 52,5 R) auf Basis von Hüttsand und einer Korngröße $d_{95} < 20 \mu\text{m}$ (Dyckerhoff GmbH 2021), dispergiert in Glykol als inerte Trägerflüssigkeit (CAS-Nr. 107-21-1, Reinheit 99,5 %), bei einem Glykol – Zement – Massenverhältnis von 0,8 hergestellt. Die Imprägniersuspension wurde für 3 min bei 12.000 U/min hochdispergiert und anschließend für die Kesseldruckimprägnierung der Schäl furniere verwendet. Zur Bewertung der Massenzunahme durch die Zementeinlagerung in der

Zellstruktur des Holzes wurden die Furniere vor der Klimatisierung und anschließenden Imprägnierung darrgetrocknet.

Nachfolgend werden die Verfahrensschritte der Zementimprägnierung (Abbildung 1) detailliert beschrieben:

- a. Aufnahme der Rohdichte unbehandelter Furniere bei Normalklima
- b. Darrtrocknung der unbehandelten Furniere bei 103 °C bis zur Massenkonstanz und Aufnahme der Darrmassen
- c. Rückkonditionieren der unbehandelten Furniere bei Normalklima bis zur Massenkonstanz
- d. Imprägnierung der Furniere
 - a. 30 min Entlüftung bei Unterdruck
 - b. 120 minütige Druckphase bei (9 ± 1) bar absolut
 - c. Entnahme der Furniere aus der Imprägniersuspension
 - d. Oberflächliches Entfernen der Zementrückstände
 - e. 48 h Wasserlagerung zur Aktivierung der Zementhydratation
- e. Darrtrocknung der behandelten Furniere bei 103 °C bis zur Massenkonstanz und Aufnahme der Darrmassen zur Bestimmung der Massenzunahme durch Zementeinlagerung
- f. Rückkonditionierung der behandelten Furniere bei Normalklima bis zur Massenkonstanz



Abbildung 1: Imprägnierprozess mit anschließender Trocknung: a) Einlegen der Furniere mit Abstandsgitter; b) Unterdruckphase mit Einsaugen der Suspension; c) Überdruckphase im Autoklav; d) Furnier nach Imprägniervorgang; e) Ablösen der Zementschicht; f) waschen der Furniere in Wasser;

Zur Bestimmung der erforderlichen Druckphasendauer wurden diese bei verschiedenen Proben zwischen 3 h, 6 h und 18 h variiert. Anschließend wurden die zementimprägnierten Furniere in Anlehnung an die EN ISO 18122 (2015) pyrolysiert. Dazu wurden die Furniere in einzelne Bereiche aufgeteilt, zerkleinert, gewogen und in Tiegeln in einem Muffelofen pyrolysiert (Abbildung 2). Der eingebrachte Zementanteil wurde aus der Massendifferenz zwischen der Asche der Referenzproben aus nicht imprägnierten Proben und imprägnierten Proben bestimmt. Es wurden je Versuchsreihe zwei Furniere pyrolysiert. Die Dimensionen der einzelnen Bereiche betrug ca. (83 x 40) mm².

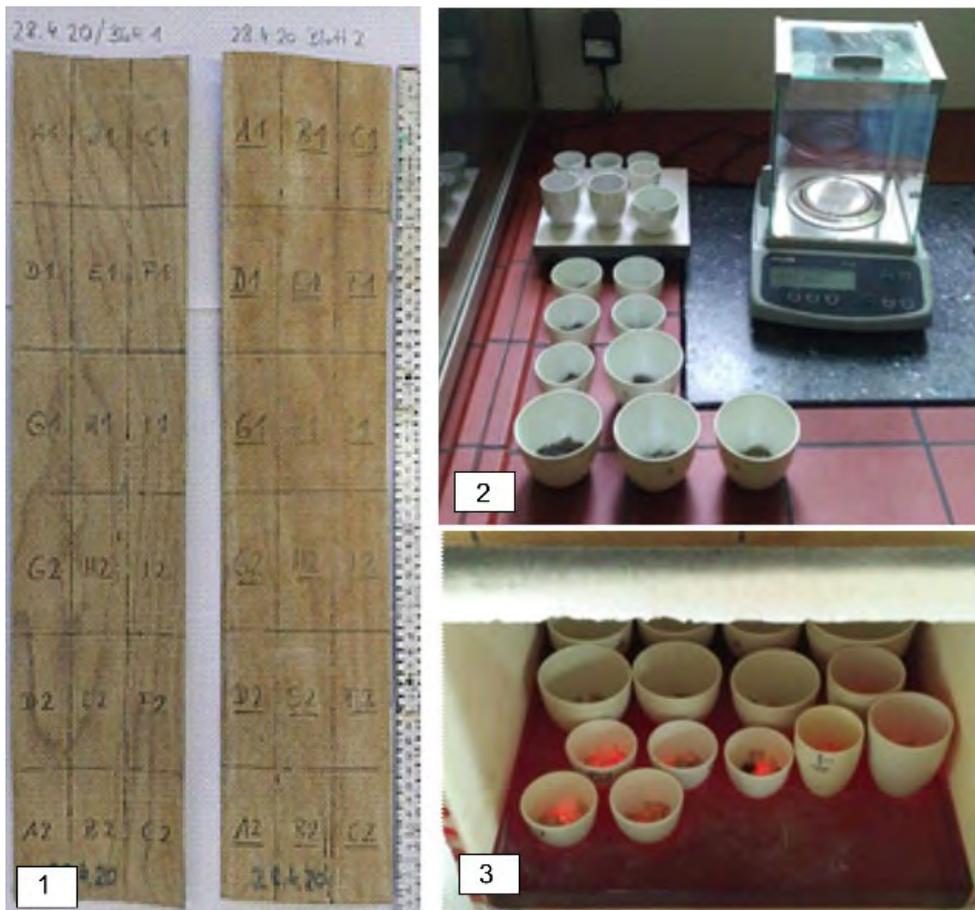


Abbildung 2: Bestimmungen der Massenzunahme mittels Pyrolyse; 1) Aufteilung der Furniere, 2) veraschte Holzproben, 3) Pyrolysevorgang

Zur Abschätzung des Zementeindringverhaltens in verklebte Furnierschichtholzbauteile wurden zusätzlich zur Mineralisierung von Einzelfurnieren mehrschichtige Furnierschichtholzproben mit dem vorher beschriebenen Verfahren imprägniert und im Anschluss pyrolysiert. Dazu wurden unbehandelte, 3 mm starke Schäl furnier aus Buche mit einem Einkomponenten – Polyurethanklebstoff (PURBOND HBS 309, Auftragsmenge von 160 g/m²) in sechs Lagen bei 90 min Presszeit und 1,0 MPa zu einer Mehrschichtplatte (L x B x H = (200 x 200 x 20) mm³) verklebt, sieben Tage im Normalklima konditioniert und anschließend entsprechend der vorher beschriebenen Prozessschritte mit Zement imprägniert.

Nach der Wasserlagerung wurde die Platte in vier Furnierschichtholzproben mit 50 mm Kantenlänge aufgetrennt (Abbildung 3), Abschnitte des Randbereiches und der Probenmitte entnommen und pyrolysiert. Dadurch konnte die Verteilung der eingebrachten

Zementmenge über die Plattenfläche durch Bestimmung des Aschegehalt abgeschätzt werden.



Abbildung 3: Probenabschnitte einer zementimprägnierten Furnierschichtholzplatte

Zusätzlich zur quantitativen Bestimmung der Eindringmenge mittels Pyrolyseverfahren wurde die Qualität der Imprägnierung durch Auflichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Computertomographie (CT) ermittelt.

2.2.2 Verklebung zementimprägnierter Buchenschäl furniere

Die Verklebbarkeit zementimprägnierter Buchenfurniere wurde mittels Zugscherversuchen entsprechend EN 302-1 (2013) im Rahmen einer Abschlussarbeit untersucht (Moosreiner 2021). Die Prüfung dient zur qualitativen Beurteilung der Anwendbarkeit eines Klebstoffes. Dadurch können behandelte und unbehandelte Proben verglichen werden. Zur Herstellung der Zugscherprüfkörper wurden vierlagige Furnierplatten gefertigt, wobei die der zu prüfenden Klebefuge beidseits anliegenden Furniere mit Zement entsprechend dem in Abschnitt 2.2.1 erläuterten Verfahren imprägniert wurden. Alle Furniere wurden nach der Imprägnierung und Darrtrocknung für mindestens 7 Tage im Normalklima (20 °C/65 % r.F.) konditioniert. Für die Verklebung wurden zwei für die Verklebung tragender Bauteile aus Laubholz zugelassene Klebstoffe, ein Einkomponenten-Polyurethanklebstoff mit Primer und ein Phenol-Resorzin-Harzklebstoff mit Härter, gewählt. In Tabelle 1 sind die Auftragsmengen, Pressparameter und technischen Daten der verwendeten Klebstoffe angeführt.

Tabelle 1: Verklebungs- und Anwendungsparameter der verwendeten Klebstoffe (Dynea AS 2016; Purbond AG 2014)

	PUR - Klebstoff		PRF - Klebstoff	
	Primer	Klebstoff	Klebstoff	Härter
	<i>PR3105</i>	<i>Loctite HB S309 Purbond</i>	<i>Prefere 4094</i>	<i>Prefere 5827</i>
Mischungsverhältnis (nach Gewicht)	-		100 Teile	20 Teile
Auftragsmenge pro Fläche	20 g/m ²	160 g/m ²	400 g/m ²	
Auftragsmenge pro Furnier (320 x130 mm)	0,8 g	6,7 g	16,7 g	
Gebrauchsdauer / Wartezeit bei [20/65]	ab Klebstoffauftrag 30 min		nach Anmischen 105 min	
Zusätzliche geschlossene Wartezeit	nach Zusammenlegen der Lamellen: 5 - 10 min		-	
Pressdruck	0,8 - 1,2 MPa		0,6 - 1,0 MPa	
Pressdauer/-temperatur	150 - 180 min bei 20 °C		105 min bei 30 °C	
Nachlagern bei 20 °C	mind. 4 h		2 - 3 d	
Anmerkungen	Primer muss vor Klebstoffauftrag für 10 min abgetrocknet werden		Bei Hartholz ist Pressdruck von 1,0 MPa zu wählen	

Die vorbereiteten Furnierplatten wurden auf die verschiedenen möglichen Kombinationen aus Imprägnierung und Verklebung aufgeteilt. Diese Kombinationen bzw. Varianten wurden mit einer eindeutigen Identifikationsnummer versehen und werden in Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2: Benennung der Varianten der Imprägnierung/Verklebung

	Zement	Unbehandelt
PUR + Primer	3	5
PRF	4	6

Entsprechend dieser Zuordnung wurden alle Furnierplatten mit den Nummern X.3 (z.B. 2.3; 3.3) für die Variante 3 verwendet, also mit Zement imprägniert und mit PUR verklebt. Die Platten der Nummern X.5 und X.6 wurden nach obigem Schema nicht imprägniert, sondern unbehandelt als Referenzproben verwendet. Nach diesem Schema werden in den folgenden Schritten auch die verklebten Platten bzw. Zugscherkörper benannt und identifiziert. Anschließend wurden die Platten entsprechend der geometrischen Vorgaben aus EN 302-1 (2013) aufgetrennt, vorbereitet und vor der Zugscherfestigkeitsprüfung einer

Vorbehandlung der in EN 302-1 (2013) beschriebenen Klassen A1 und A4 unterzogen. Klasse A1 beschreibt dabei eine Lagerung im Normklima mit anschließender Zugscherprüfung der konditionierten Proben. Für eine Vorbehandlung entsprechend der Klasse A4 werden die Proben für sechs Stunden in kochendem Wasser getaucht und anschließend zwei Stunden lang in 20 °C temperiertem Wasser bei Raumtemperatur nachgelagert, wobei die Prüfung in feuchtem Zustand der Proben erfolgt.

Die Bruchlast der Zugscherprüfung wurde an einer Universalprüfmaschine mit 5 kN Kraftmessdose bestimmt und die zugehörige Scherfestigkeit f_v in (N/mm²) nach folgender Formel berechnet:

$$f_v = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{200}$$

Dabei ist

F_{max} die aufgebrachte Bruchlast (in N);

A die verklebte Prüffläche in Quadratmillimeter (in mm²)

Es ist anzumerken das die Prüffläche/Scherfläche durch die exakte Probenfertigung immer mit 200 mm² berechnet wurde, eine mögliche Änderung der Geometrie durch Quellung wurde vernachlässigt. Neben den einzelnen Ergebnissen für Scherfestigkeit und Holzbruchanteil (WFP) wird auch jeweils der arithmetische Mittelwert einer Prüfreihe angegeben. Abweichend zur Norm wird der Holzfaserbruch nicht visuell geschätzt, sondern durch ein Softwaretool genau berechnet. Dazu können je nach Klebstoff entweder Farbunterschiede zwischen Klebstoff und Holz (PRF) oder Farbunterschiede unter UV-Licht zwischen Holz und Klebstoff durch fluoreszierende Additive im Klebstoff genutzt werden (PUR). Nach Benetzung und Aushärtung des Klebstoffes bildet sich eine Klebefuge mit den Schichten Klebstoffschicht – Klebstoff-Interphase – Interface – Holz-Interphase – Füge teil aus. Dies stellen auch die möglichen Versagenspunkte einer Verklebung dar. Zu diesen Brucharten kommt noch der Bruch nahe der Grenzfläche bzw. in der Interphase hinzu. Die Versagenspunkte sollen im Folgenden jeweils genauer behandelt werden, ebenso die Versagensursachen und Bestimmungskriterien der Bruchbilder.

Kohäsionsbruch Holz- / Füge teil: Ein Bruch tief im Holz ist generell die gewünschte Versagensursache, da die Klebung dann ausreichend stabil ist. Das Füge teil hat hier eine geringere Festigkeit als die Klebung, der Bruch verläuft oft entlang der Jahrringstruktur. Ein reiner Kohäsionsbruch im Holz liegt vor, wenn zwischen Klebefuge und Bruchfläche eine dickere Schicht Holz liegt und kein Klebstoff auf der Bruchfläche zu sehen/detektieren ist. Dieser Bruch entspricht 100 % Holzversagen bzw. Holzfaserbruchanteil. (Künniger 2007)

Holz-Interphase: Ein Bruch im Holzgefüge nahe der Klebefuge ist weniger wünschenswert: Wie oben beschrieben dringt der Klebstoff in die Holz-Interphase ein. Prepolymerisierte Klebstoffe dringen bis in die Zell-Lumina, In-Situ-polymerisierende sogar bis in die Zellwände vor. Eine gute Eindringung des Klebstoffes in die Zell-Lumina bewirkt eine sehr hohe mechanische Adhäsion, sodass chemische Bindungen am Interface weniger wichtig werden (Frihart 2005). Bei In-Situ-Polymerisation wird die Holz-Interphase sowohl mechanisch als auch gegen Wasseraufnahme bzw. Quellen und Schwinden stabilisiert. Dies bewirkt eine Dimensionsstabilisierung und verringert innere Spannungen zwischen Holz und Klebstoff bei Feuchteänderungen, da die Klebefuge nicht wie das Holz quillt und schwindet. Hier ist anzumerken, dass eine zu tiefe/starke Eindringung des Klebstoffes ins Holz, z.B. bei zu geringer Viskosität, ebenfalls nachteilig sein kann, da die eigentliche Klebefuge dann unterversorgt ist. Eine zu geringe oder zu starke Penetration des Klebstoffes in das Holz kann die Verklebung also schwächen. Je nach Grad der Stabilisierung der Interphase können starke Feuchteschwankungen und die daraus entstehenden Spannungen im Holz ebenfalls zum Versagen in diesem Bereich beitragen (Frihart 2004, 2009). Der Bruch verläuft entlang sowie durch die Schicht der klebstoffgefüllten Zellen. Ein Bruch in der Holz-Interphase ist durch eine glatte Bruchfläche charakterisiert. Auf den Bruchflächen ist eine sehr leichte, meist spiegelbildliche Färbung durch den Klebstoff sichtbar (Künniger 2007).

Interface: Der Adhäsionsbruch beschreibt einen Bruch direkt an der Füge teiloberfläche. Ein Adhäsionsbruch deutet auf sehr schlechte Benetzung und mechanische Verankerung oder Inkompatibilität des Systems Klebstoff – Holz/Vorbehandlung hin. Ein Bruch am Interface ist durch sehr glatte, ergänzend (nicht spiegelbildlich) gefärbte Bruchflächen charakterisiert, auf einer Seite befindet sich also rein Holz und auf der anderen rein die Klebschicht. (Künniger 2007)

Bruch nahe der Grenzfläche: Vom „idealen“ Adhäsionsbruch kann man den Bruch nahe der Grenzfläche unterscheiden, bei dem sich ein Adhäsionsbruch am Interface und ein Bruch im Holz vermischen. Die Bruchflächen werden durch spiegelbildliche, aber unterschiedliche intensive Färbung durch den Klebstoff charakterisiert. Sowohl ein reiner Adhäsionsbruch wie auch ein Bruch nahe der Grenzfläche entsprechen einem Versagen des Klebstoffes. (Künniger 2007)

Klebstoff-Interphase und Klebstoffschicht: Der Bruch in der Klebstoff-Interphase und der Klebschicht ist sehr schwierig zu unterscheiden, da die Klebefuge sehr dünn ist. Mögliche Gründe für den Bruch in der Klebefuge sind eine mangelhafte Festigkeit des Klebstoffes (schwächer als das Holz), welche durch zu geringe Dauerhaftigkeit bei Langzeiteinsatz oder z.B. durch Wasserlagerung vor der Festigkeitsprüfung bedingt sein kann. Interaktionen der Klebstoff-Interphase mit der Vorbehandlung des Holzes bei der Aushärtung bzw. eine langfristige Schädigung sind ebenfalls möglich. Der Bruch ist spiegelbildlich auf beiden Bruchflächen mit gleichmäßiger Färbung durch den Klebstoff vorhanden und wurde mit 100 % Klebstoffversagen bewertet. Tabelle 3 fasst die zuvor beschriebenen Brucharten zusammen. Dort wird neben der Charakterisierung der Brucharten auch aufgeführt, ob die Bruchart jeweils einem Versagen des Holzes oder des Klebstoffes zugeordnet wurde.

Tabelle 3: Benennung und Merkmale der Brucharten, angelehnt an Künniger (2007)

#	Kurzbezeichnung	Erläuterung / Merkmale
1	Kohäsion Holz	Kein Klebstoffversagen detektiert, Bruch tief im Holz. Entspricht Versagen des Holzes
2	Kohäsion Klebstoff	Beidseitig ist spiegelbildlich intensive Färbung durch Klebstoff zu sehen. Entspricht Klebstoffversagen
3	Interface	Ergänzendes (nicht spiegelbildliches) Bruchbild mit einer Seite nur Holz, andere Seite nur Klebstoff. Entspricht Klebstoffversagen
4	Nahe Grenzfläche / nahe Interface	Spiegelbildlicher Bruch, eine Seite intensiv von Klebstoff gefärbt, andere Seite leicht angefärbt. Entspricht Klebstoffversagen.
5	Interphase Holz	Spiegelbildlich, beidseitig leichte Anfärbung durch Klebstoff. Wird als Holzbruch gewertet.

Bestimmung des pH-Wertes zementimprägnierter Furniere

Die Messung des pH-Wertes der Furniere wurde an Christian Bohn (2009) angelehnt durchgeführt. Je ein unbehandeltes, ein kupfer- und ein zementimprägniertes Furnier wurden manuell mit einer feinen Holzraspel zerfasert (Abbildung 4).



Abbildung 4: Faserproben zur pH-Wertbestimmung



Abbildung 5: Schütteln der Fasern auf Rührplatten unter Luftabschluss

Nach dem Zerfasern wurden die Fasern in kleinen Schalen im Darrofen bei 103 °C für 1 h darrgetrocknet. Von den absolut trockenen Fasern wurden je $(5 \pm 0,01)$ g abgewogen und in 150 ml destilliertes Wasser gegeben. Anschließend wurden die Fasern auf einer Rührplatte für 24 h leicht bei Raumtemperatur geschüttelt. Um einer Verfälschung des Ergebnisses durch Reaktion der Extrakte mit Luftbestandteilen (Versauerung durch Kohlenstoffdioxid) vorzubeugen, wurden die Bechergläser luftdicht verschlossen (Abbildung 5). Die extrahierten Lösungen wurden in mit destilliertem Wasser gespülte Bechergläser abfiltriert. Bei Eintauchen der pH-Messsonde in die gefilterten Extrakte und leichtem Schwenken schwankten die Messwerte zuerst stark, nach wenigen Minuten oszillierten die Messwerte nur noch leicht um einen konstanten Mittelwert. Vor der Messung des pH-Wertes wurde die Messsonde mit destilliertem Wasser gespült und referenziert, ebenso nach jeder Messung. Zur Kontrolle wurde zudem der pH-Wert des verwendeten destillierten Wassers überprüft.

2.2.3 Elutionsverhalten zementimprägnierter Buchenschälffurniere

Ziel der Elutionsversuche ist es, quantitative sowie qualitative Aussagen über die Lösung von Stoffen aus der Holzstruktur zu treffen und anschließend die stoffliche Freisetzung mit der zuvor ermittelten Masse an eingebrachtem Zement zu vergleichen. In Abhängigkeit der

Zeit wird die Masse an in Wasser gelösten Stoffen dargestellt. Hinsichtlich des Auslaugverhaltens sind monolithische und körnige Materialien zu unterscheiden. Monolithische Materialien zeigen oft eine durch Diffusion gesteuerte stoffliche Freisetzung. In Tabelle 4 sind die maßgeblichen Faktoren zusammengefasst:

Tabelle 4: Zusammenfassung wesentlicher Faktoren bei der Auslaugung von Bauprodukten

Chemische Prozesse	Physikalische Faktoren	Externe Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> - Löslichkeit - pH-Wert - Redoxreaktionen - Säure-Base Pufferkapazität - DOC - Ionenstärke - Temperatur - Zeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Perkolation - Diffusion - Abwaschen Oberfläche - körnig/monolithisch - Größe - Porosität - Permeabilität - Tortuosität - Erosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Wassermenge - Kontaktdauer - pH Umgebung - Temperatur - DOC

Die Untersuchung von Auslaugvorgängen im Labor kann unter permanentem Eintauchen, zwischenzeitlichem Befeuchten und Trocknen (kurzzeitiges Eintauchen) oder unter künstlicher Bewitterung durchgeführt werden. Labortests sind gekennzeichnet durch eine begrenzte Anzahl von festgelegten und kontrollierten Parametern. Dies ermöglichte eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Versuche. Für die meisten Prüfungen wird vollentsalztes VE - Wasser verwendet oder Wasser, das bestimmte Umweltbedingungen repräsentiert (z.B. künstliches Meerwasser). Die Dauer des Wasserkontakts und die Erneuerungszeiten des Elutionsmittels sind entscheidende Faktoren bei Elutionsprozessen. Üblicherweise werden Auslaugversuche bei einer Temperatur von etwa 20 °C durchgeführt. Ein weiterer wesentlicher Parameter um die Wiederholbarkeit von Labortests zu gewährleisten, ist die Wassermenge pro Oberfläche der Probekörper. Parameter wie Wind, Expositionsausrichtung, örtliche oder regionale Gegebenheiten und Änderung der Bedingungen können in Labortests nur schwer oder gar nicht berücksichtigt werden. Die Stabilität der Substanzen, z. B. gegenüber Hydrolyse, Photolyse oder biologischem Abbau, kann durch spezifische Testbedingungen oder zusätzliche Alterungsmethoden in Kombination mit Auslaugprüfungen (UV-Bestrahlung, pH- und Temperaturänderungen) berücksichtigt werden, wird aber bei Labortests meist nicht berücksichtigt. Im Folgenden sollen drei normierte Auslaugprüfungen für monolithische und

plattenartige Produkte auf ihre Eignung für die geplanten Versuche untersucht werden. Dabei wird der Prüfkörper jeweils in ein Elutionsmittel getaucht, das in bestimmten Zeitintervallen erneuert wird. Die folgende Übersicht in Tabelle 5 zeigt einen Vergleich wesentlicher Parameter der Prüfnormen:

Tabelle 5: Vergleich verschiedener Prüfvorschriften für Elutionsversuche

	DIN EN 16637-2	DIN CEN/TS 15119-2	OECD 313
Elutionsmittel	Wasser Grad 3 nach EN ISO 3698; pH 5,0 - 7,0; demineralisiert	"	demineralisiertes Wasser
Geometrie Probekörper	≥ 40 mm in alle Richtungen; ≥ 100 cm ² exponierte Oberfläche für plattenartige Produkte	≥ 200 cm ² exponierte Oberfläche	nach EN 113 25 x 50 x 15 mm ³
Anzahl Probekörper	≥ 1	≥ 3	≥ 5
Verhältnis Volumen Wasser zu Fläche Probekörper (L/A)	8 ml/cm ² ≥ 2 ml/cm ² für plattenartige Produkte	2,5 ml/cm ²	2,5 ml/cm ²
Dauer	64 d	29 d	29 d
Temperatur	22 °C +/- 3 °C	20 °C +/- 2 °C	20 °C +/- 2 °C

Die Versuchsreihen wurden entsprechend (CEN/TS 16637-2, 2014) geprüft, eine für Holz geeignete Prüfmethode (Hjlemar et al. 2013). Diese Versuche können in einem größeren Temperaturbereich durchgeführt werden und die Prüfdauer von 64 Tagen kann das Langzeitverhalten besser abbilden. Die Probenbecher der Eluate wurden nach Art des Imprägniermittels, Behälternummer und Nummer des Auslaugintervalls bezeichnet. Die Messergebnisse der Analyseberichte wurden entsprechend gekennzeichnet (Abbildung 6 und Abbildung 7).



Abbildung 6: Darstellung Probenbeschriftung



Abbildung 7: Probenbehälter Elutionsversuche

Der pH-Wert wurde mit einem *SI Analytics Lab 845* Messgerät und einer *BlueLine* Elektrode auf zwei Nachkommastellen bestimmt. Für die Leitfähigkeit kam ein *WTW MultiLab P5* mit einer *TetraCon 96* Sonde zum Einsatz. Die Elementbestimmung in den Eluat erfolgt mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) an einem *Thermo Fisher Scientific iCAP 6000 Series*. Die Untersuchung der Holzproben auf ihre organischen bzw. anorganischen Anteile erfolgte mit einem Muffelofen. Die Bestimmung des Aschegehaltes wurde gemäß EN ISO 18122 (2015) durchgeführt (Verfahren in Abschnitt 2.2.1). Eine Veraschung der Prüfkörper soll, neben der Untersuchung der Eluate und der Bestimmung des Atrogewichtes der Proben, dazu beitragen, nähere Informationen über (nicht) eluierte Stoffe zu erhalten. Die Versuche wurden nach DIN EN 16637-2 (2021) durchgeführt. Vor den Eluatentnahmen wurde der pH-Wert sowie die Leitfähigkeit im Behälter gemessen. Zur Vermeidung einer Verschleppung von Substanzen erfolgte nach jeder Messung eine Reinigung der Sonden mit VE-Wasser. Die Menge an entnommenen Eluat betrug pro Behälter und Intervall 100 ml (Abbildung 7). Bis zur Analyse wurden die Proben lichtgeschützt gelagert. Für das L/A-Verhältnis (Verhältnis Volumen der Flüssigkeit in Kontakt mit der Prüfmenge zu geometrische Fläche der Prüfmenge, beanspruchte Oberfläche des Probestücks/der Probestücke) wurde der Mindestwert von 2,5 ml/cm² gewählt, womit eine ausreichende Bedeckung des Prüfkörpers mit Wasser noch gewährleistet war. Zur Herstellung einer Blindprobe wurde vollentsalztes Wasser mit einem Abstandhalter 12 h in einem Behälter

gelagert. Die entnommene Blindprobe wurde mit dem ICP auf alle relevanten Elemente untersucht, die Konzentrationen waren jeweils unter oder knapp über der Nachweisgrenze. Die Eluatentahme und der Wasserwechsel erfolgte entsprechend EN 16637-2 (Tabelle 6) bis einschließlich Schritt 7.

Tabelle 6: Schrittfolge für die Eluatentnahme bzw. Wasserwechsel nach EN 16637-2

Schritt/Anteil	Dauer des jeweiligen Schritts	Dauer ab Beginn der Prüfung (t_0)
1	6 h \pm 15 min	6 h
2	18 h \pm 15 min	1 Tag
3	1 d und 6 h \pm 45 min	2 d und 6 h
4	1 d und 18 h \pm 75 min	4 d
5	5 d \pm 75 min	9 d
6	7 d \pm 75 min	16 d
7	20 d \pm 7 h	36 d
8	28 d \pm 12 h	64 d

2.2.4 Untersuchungen zur biologischen Dauerhaftigkeit zementimprägnierter Furniere

Dauerhaftigkeitsprüfungen von Zementüberstandswässern

Im Rahmen der geplanten Anwendung von zementimprägniertem Buchenfurnierschichtholz als Bahnschwellen ist insbesondere die Auswirkung des Zements auf die Eigenschaften des Holzes von Interesse. Das Ziel von umfassenden Screeningversuchen war es, den Einfluss hoher pH-Werte und unterschiedlicher Zementadditive auf die Dauerhaftigkeit des Holzes gegenüber holzerstörenden Pilzen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden Prüfkörper mit den Abmessungen (10 (ax.) x 20 x 5) mm³ aus Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Überstandswässern von sieben Zementarten unterschiedlicher Rezeptur getränkt. Diese stark alkalische Imprägnierung (pH > 12) diente der Simulation einer Zementimprägnierung von Holz. Zur Gewinnung der Überstandswässer wurden Zementsuspensionen mit verschiedenen Wasser / Zement (W/B) – Werten fünf Minuten mit einem Dispermaten (Ultraturax) bei 5000 U/min gemischt und die Suspension in den ersten Stunden wiederholt aufgemischt. Nach einem Tag wurden die Überstandswässer abfiltriert (Tabelle 7) und im Anschluss die Inhaltsstoffe analysiert.

Tabelle 7: Zementrezeptur der Überstandswässer

Nr.	Rezeptur	W/B Wert	pH-Wert	Leitfähigkeit mS/cm	T °C
L 1	100% CEM I 52,5 N	2,0	13,08	19,98	21,2
L 2	100% CEM I 42,5 R SRO	2,0	13,05	17,73	21,2
L 3	50% CEM I 52,5N / 50% Weißfeinkalk	4,0	13,03	13,64	21,2
L 4	50% CEM I 52,5N / 50% Hüttensand	2,0	13,07	15,82	21,2
L 5	50% CEM I 52,5N / 50% Diabasmehl	2,0	13,04	15,42	21,2
L 6	90% CEM I 52,5N / 10% Bentonit S	4,0	13,07	17,49	21,2
L 7	50% CEM I 52,5N / 50% Flugasche	1,5	13,04	17,93	21,2

Um die Beanspruchung der Werkstoffe im Bodenkontakt nachzuvollziehen, wurde die Hälfte der Prüfkörper im Anschluss an den Tränkvorgang in den Überstandswässern nach Tabelle 7 einer Auswaschung in Anlehnung an EN 84 (2020) unterzogen. Die Wirkung der Imprägnierung und der Auswaschung auf die Dauerhaftigkeit wurde durch Abbaueversuche in Anlehnung an EN 113-2 (2021) mit dem Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* und dem Weißfäuleerreger *Trametes versicolor* überprüft.

Dauerhaftigkeitsprüfungen zementimprägnierter Furnierbauteile

Durch die Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Universität Göttingen wurden zahlreiche Dauerhaftigkeitsprüfungen mit Reinkulturen holzerstörender Basidiomyceten und gegenüber Moderfäuleerregern in unsteriler Erde (terrestrische Mikrokosmen) durchgeführt. Die im Projekt eingesetzten Ausgangsmaterialien bzw. -produkte unterschieden sich hinsichtlich Ausformung, anatomischer Ausrichtung und Abmessungen sowohl untereinander als auch von den in den einschlägigen Prüfstandards getroffenen Vorgaben. Die unterschiedlichen Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden deshalb größtenteils in Anlehnung an europäische Prüfnormen durchgeführt. Abweichungen wurden bei Bedarf vorgenommen.

Drei unterschiedliche Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden in Anlehnung an die folgenden Prüfnormen durchgeführt:

- (1) EN 113-2 (2021): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfverfahren in Bezug auf Holz zerstörende Basidiomyceten - Teil 2: Bewertung der natürlichen

oder verbesserten Dauerhaftigkeit. Es fanden Prüfungen gegenüber Braunfäule (*Coniophora puteana*) und Weißfäule (*Trametes versicolor*) statt.

- (2) CEN/TS 15083-2 (2005): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzerstörende Pilze, Prüfverfahren - Teil 2: Moderfäulepilze. Es wurde eine Mischung aus Kompostboden und Quarzsand als unsteriles Bodensubstrat genutzt.
- (3) EN 252 (2015): Freiland-Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung eines Holzschutzmittels im Erdkontakt. Es wurden die Erdeingrabeversuche auf dem Versuchsfeld der Abteilung am Faßberg (Nordcampus der Universität Göttingen) durchgeführt.

2.2.5 Mechanische Untersuchungen an Bahnschwellen

Zur Ermittlung eines Anhaltswertes der erforderlichen Schwellenschraubenfestigkeit von Furnierschichtholzschwellen wurden seitens der ÖBB-Infrastruktur AG - Streckenmanagement und Anlagenentwicklung, Fachbereich Fahrwegtechnik Oberbau vier kreosotimprägnierte Buchenvollholzschwellen der Dimension $L \times B \times H = 2600 \text{ (ax.)} \times 260 \times 160 \text{ mm}^3$ mit montierten Rippenplatten (Regelzeichnung 2703 vom Dezember 1988) zur Verfügung gestellt. Die Befestigung der Rippenplatten erfolgte mit jeweils vier Schwellenschrauben SS 76 mit rechteckigem Schlüsselansatz und waagrechter Unterfläche (Regelzeichnung 6958/1 vom November 1978, Abbildung 8). Die Bahnschwellen wurden anschließend für die weiteren Versuche geschnitten und dimensioniert. Zur vergleichenden Ermittlung der Schwellenschraubentragfähigkeiten wurde an der TH Rosenheim eine Buchenfurnierschichtholzschwelle der Dimension $L \times B \times H = 2600 \text{ (ax.)} \times 260 \times 160 \text{ mm}^3$ aus blockverklebten, unidirektional und axial gerichteten und im Handel erhältlichen Furnierschichtholzplatten (Platten aus längslaufenden Furnieren mit einer Materialstärke von 40 mm) hergestellt (Abbildung 9).



Abbildung 8: Bahnschwellen für die Ermittlung der statischen Kennwerte für den Vergleich mit einer unbehandelten Buchenfurnierholzschwelle



Abbildung 9: Prototyp einer Buchenfurnierschichtholzschwelle aus blockverklebten Furnierschichtholzplatten

Lochleibung Systemversuch

Der Versuch wurde mittels einer Shimadzu 300 kN Universalprüfmaschine durchgeführt. Mittels dieses Aufbaus sollen „realitätsnahe“ Ergebnisse erzielt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Stahllasche mit 25 mm Stärke mit der Schwellenschraube SS 76 fixiert (vgl. Abbildung 10). Das Schwellenstück wird in der Maschine fixiert und Halterungen zur Verschiebung angebracht. Die Verschiebungen werden mittels Wegaufnehmern extern erfasst. Der Versuch wurde weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt.

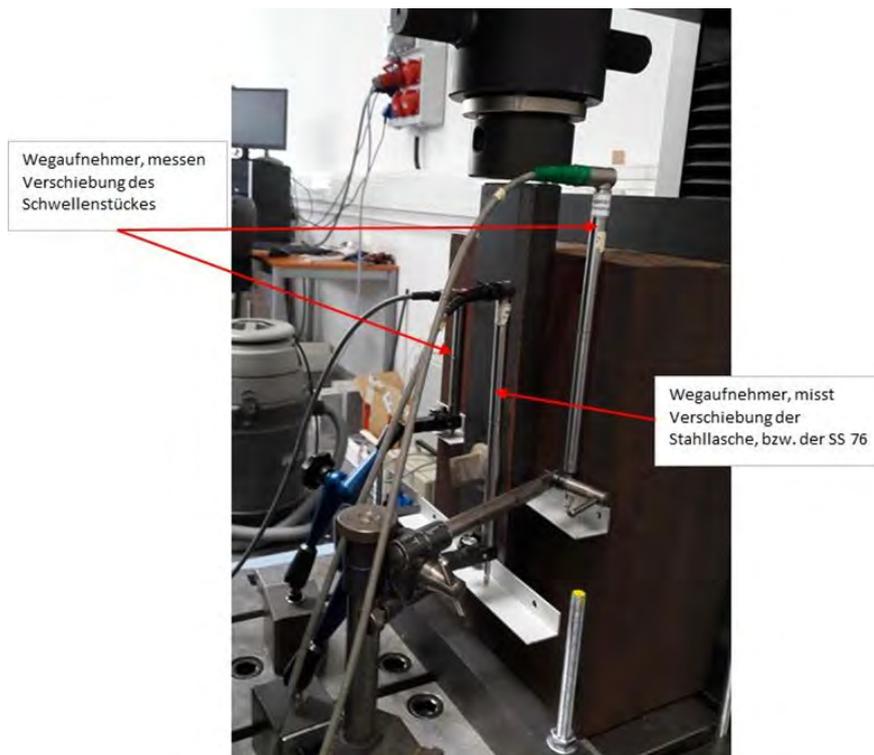


Abbildung 10: Versuchsaufbau des Lochleibungsversuchs-Systemversuch an der Universität Innsbruck

Schraubenauszugsfestigkeit

Zur Beurteilung des Buchenfurnierschichtholzes hinsichtlich seiner statischen Eignung als Werkstoff zur Herstellung von Holzschwellen wurden erste Versuchsreihen durchgeführt, die primär die Verbindungsmittel, i.e. die Schwellenschrauben, mit denen die Rippenplatten befestigt werden und somit den Verbund zwischen Schiene und Schwelle herstellen, in den Fokus setzten. Dazu wurde experimentell der Auszugswiderstand der besagten Verbindungsmittel in Form von Schwellenschrauben vom Typ SS76 nach ÖNORM EN 13146-10 ermittelt. Zu Referenzzwecken wird der Schraubenauszugswiderstand ebenfalls an herkömmlichen, kreosotimprägnierten Buchenvollholzschielen ermittelt. Diese Schwellen, neu und mit einem Jahresnagel des Jahres 2020 versehen, wurden freundlicherweise von der ÖBB zur Verfügung gestellt. Die Schraubenbohrungen wurden mit einem Schwellenbohrer hergestellt. Die Schwellenschrauben wurden bei den Ausziehversuchen und den Scherlochleibungsversuchen bis auf 25 mm versenkt, was einer realitätsnahen Einbausituation entspricht. Die Unterkante des Schwellenschraubenkopfs weist in korrekter Einbaulage einen Abstand von etwa 25 mm zur Oberkante der Schwelle auf (Abbildung 11).

Für die Versuchsaufbauten wurden Rippenplatte und Federring durch den Boden der Hülse ersetzt, mit deren Hilfe die erforderliche Zugkraft auf die Schwellenschraube aufgebracht wird. Der Boden dieser Hülse, durch den die Schwellenschraube durchgeführt wird, weist dementsprechend eine Stärke von 25 mm auf. Alle Schwellenschrauben wurden mit Gewindebitumen und einem Anzugsmoment von 280 Nm eingebaut.

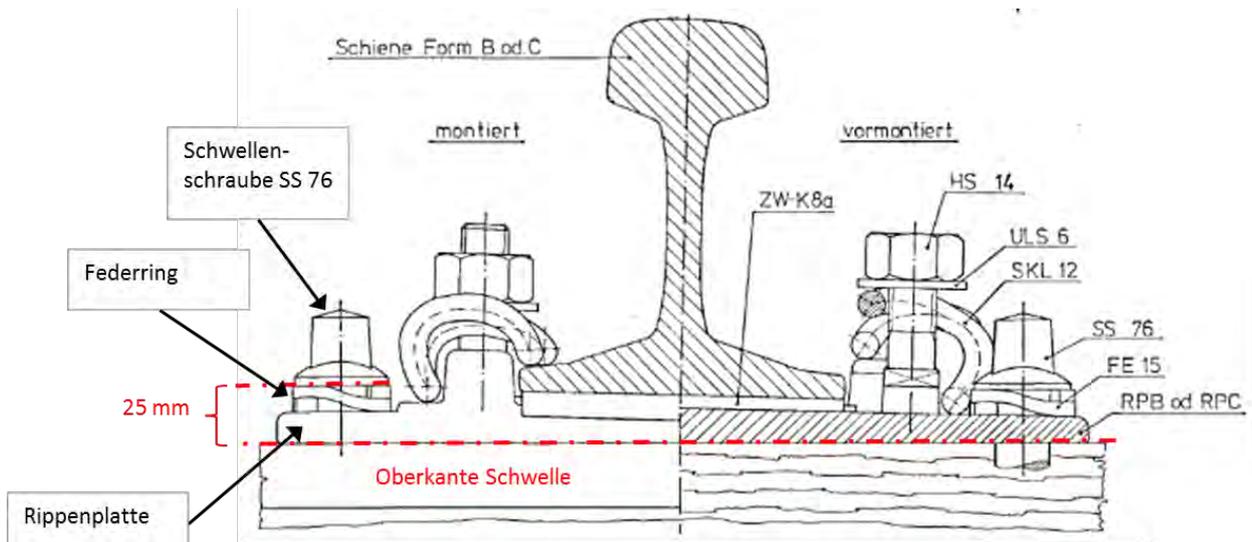


Abbildung 11: Schiene und Rippenplatte im eingebauten Zustand; Quelle: R2 2703 der ÖBB

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Schraubenauszugsfestigkeit wurde in Anlehnung an EN 1382 (2016) entworfen und umgesetzt und in Anlehnung an EN 13146-10 durchgeführt. Dabei wurde eine Schraube durch die Auszugshülse geschraubt und diese dadurch fixiert (Abbildung 12). Wie in der schematischen Skizze zu erkennen, wird hierzu ein Schwellenstück mit geeigneter Länge (400 mm) auf dem Spanntisch der Prüfmaschine verankert. In das vorgebohrte Loch in der Schwelle wird die Schwellenschraube durch die Ausziehhülse eingeschraubt. Der vollständige Prüfkörper wird anschließend mittels Haltebolzen in die Werkzeugaufnahme der Prüfmaschine, die über die Kraftmessdose mit dem beweglichen Joch verbunden ist, eingehängt. Die Verschiebungen wurden mittels eines externen Wegaufnehmers aufgezeichnet. Der Versuch wurde kraftgesteuert mit einer Laststeigerungsrate von 50 kN/min durchgeführt. Dabei wurden die von der Norm geforderte Kraft von 30 kN aufgebracht und für 180 s gehalten. 30 kN entsprechen der mittleren Last, die eine der vier Schwellenschrauben pro Rippenplatte bei der maximal möglichen nach oben gerichteter Last von 120 kN pro Rippenplatte. Nach den 180 s erfolgt ein Herunterfahren der aufbrachten Zugkraft bis zum Erreichen der initialen Null, ebenfalls mit konstanter Geschwindigkeit von 50 kN/min. Nach 60 s in diesem unbelasteten

Zustand wird die Kraft erneut mit 50 kN/min gesteigert, diesmal jedoch bis zum Versagen der Verbindung.

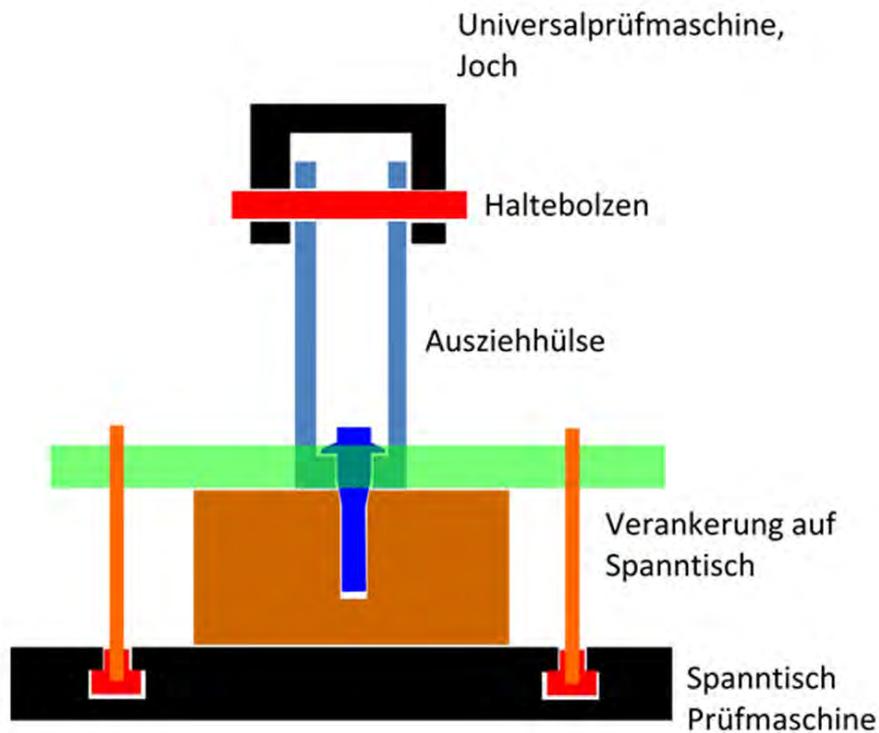


Abbildung 12: Prinzipskizze des realisierten Auszugsversuchs

Sowohl Festigkeit als auch Verformungsverhalten der Ausziehhülse wurden mittels einer Finite-Elemente-Simulation auf ihre Eignung überprüft. Die gesamte Simulation erfolgte dabei in drei Schritten, die nacheinander abgewickelt wurden. Um die Simulation realitätsnah zu gestalten, wurden Kontaktpaare definiert. Durch die Formulierung der Kontaktmöglichkeit können Kräfte zwischen zwei separat modellierten Komponenten des FE Modells (FE ... Finite Elemente) übertragen werden. Dazu müssen die erforderlichen Kontaktflächen definiert werden (rot in Abbildung 13).

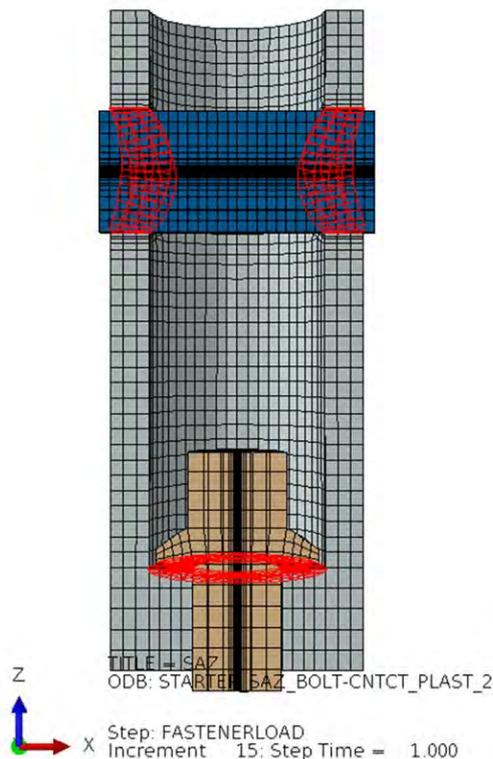


Abbildung 13: FE-Modell zur Auslegung der Ausziehhülse

Im ersten Berechnungsschritt wurde der Kontakt zwischen Haltebolzen (blau in Abbildung 13) und Ausziehhülse (grau in Abbildung 13) etabliert, dargestellt durch die oberen beiden Kontaktflächenpaare. Mit dem ersten etablierten Kontakt können nun also Kräfte von der Ausziehhülse auf den Haltebolzen übertragen werden. Somit wird die Möglichkeit einer realistischen Lagerung des Systems gegeben: Kräfte von der Hülse werden auf den fest gelagerten Bolzen weitergegeben. Dieses System entspricht der Lagerung des Haltebolzens in der Werkzeugaufnahme. Im zweiten Berechnungsschritt wird der Kontakt zwischen Ausziehhülse und Schwellenschraube (beige in Abbildung 13) etabliert, dargestellt durch das untere Kontaktflächenpaar. Im dritten Berechnungsschritt wird eine Schraubenzugkraft von 125 kN aufgebracht. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearität und von ideal-elastischem/ideal-plastischem Materialverhalten. Abbildung 14 zeigt die maßgeblichen Ergebnisse der FE-Analyse. Bei der verwendeten Stahlsorte für die Hülse S 355 tritt im Bereich des Kontakts von Ausziehhülse und Haltebolzen ein lokales Fließen des Stahls auf. Da das Verhalten des Materials in der Simulation eben ideal-elastisch/ideal-plastisch gewählt wurde, ist bei

der auftretenden Teilplastifizierung des Hülksenquerschnitts kein Materialversagen zu erwarten.

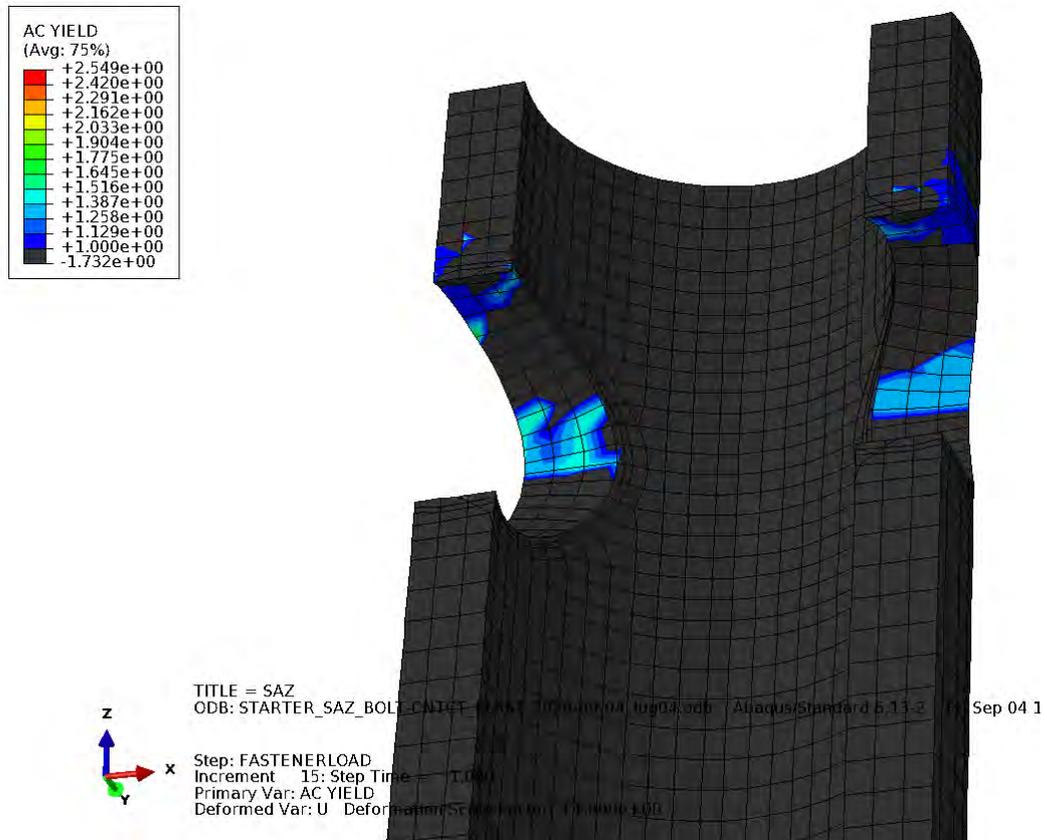


Abbildung 14: Kontourplot der Fließbereiche

Abbildung 15 zeigt den vollständigen Versuchsaufbau vor Testbeginn. Um die Nachgiebigkeit der Verbindung ermitteln zu können, wurden drei induktive Wegaufnehmer angebracht. Mit diesen präzisen Verschiebungsmessern werden die Verschiebung der Ausziehhülse (ein Wegaufnehmer) und die Verschiebung des Schwellenabschnitts (zwei Wegaufnehmer an gegenüberliegenden Kanten, um mögliche Verdrehungen zu eliminieren) gemessen.

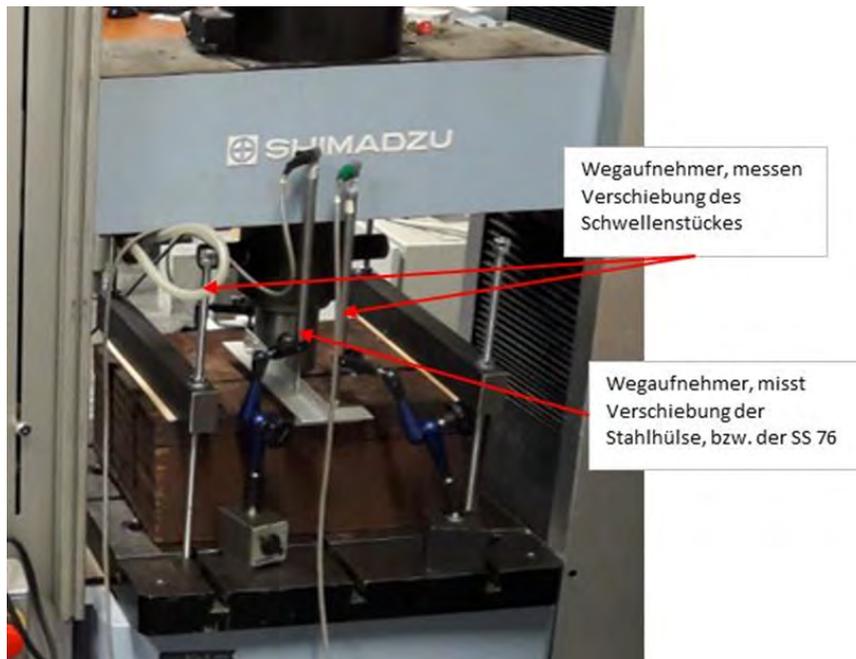


Abbildung 15: Versuchsaufbau des Schraubenausziehversuchs

Lochleibungsfestigkeit einer zweiseitigen Verbindung

Der Versuch wurde in Anlehnung an EN 383 (2007) durch die TVFA der Universität Innsbruck (vgl. Abbildung 16) durchgeführt. Die Versuche wurde weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt.



Abbildung 16: Versuchsaufbau des zweischnittigen Lochleibungsversuches

2.3 Ergebnis der Zementimprägnierung

2.3.1 Zementeindringmenge

In Tabelle 8 sind die Pyrolyseergebnisse gelistet. Gruppe a) beschreibt den Aschegehalt der jeweiligen Flächenbereiche des nicht imprägnierten Referenzfurniers, während Gruppe b), c) und d) den Aschegehalt der jeweiligen Flächenbereiche nach drei, sechs und 18 Stunden Druckphasendauer während der Imprägnierung darlegen. Der Aschegehalt und somit die Menge des eingebrachten Zements steigt mit zunehmender Dauer der Druckphase an. Die Verteilung des Zements über die Oberfläche ist von der Probenkante bis zur Probenmitte annähernd gleichmäßig.

Tabelle 8: Verteilung des Aschegehalt über die Probenoberfläche bei Variation der Druckphasendauer: a) Referenz; b) 3 h; c) 6 h; d) 18 h

0,68%	1,44%	0,48%	a	10,23%	9,67%	10,49%	b
0,39%	0,51%	0,51%		9,70%	9,09%	10,06%	
0,49%	0,51%	0,52%		9,40%	9,61%	8,91%	
0,62%	0,50%	0,56%		13,51%	8,55%	10,05%	
3,78%	0,48%	0,46%		10,19%	7,65%	9,06%	
0,51%	0,49%	0,49%		9,31%	7,35%	10,45%	
6,37%	5,76%	6,46%	c	13,48%	13,10%	13,56%	d
5,80%	5,17%	5,13%		13,47%	11,54%	12,54%	
5,99%	5,01%	5,19%		11,63%	11,35%	11,41%	
6,10%	5,58%	6,25%		12,71%	11,93%	11,88%	
5,62%	5,08%	5,51%		10,79%	11,18%	9,28%	
5,46%	4,88%	5,02%		9,66%	10,78%	10,33%	

Ein Vergleich des Gesamtaschegehaltes von Proben mit unterschiedlicher Druckphasendauer während der Imprägnierung zeigt bei sechsstündiger Druckphase einen signifikant geringeren Aschegehalt im Vergleich zur dreistündigen oder 18 – stündigen Druckphasendauer (Abbildung 17). Dies kann aber auf einen Prozessfehler zurückgeführt werden, da dieselbe Zementsuspension über zwei Tage zur Imprägnierung benutzt wurde und dadurch möglicherweise Veränderungen durch eine beginnende Hydratation aus der Umgebungsluftfeuchte eingetreten sein kann. Im Gegensatz zum hohen Aschegehalt der imprägnierten Einzelfurniere wurde nach der Pyrolyse der mehrschichtigen Buchenfurnierschichtholzplatte ein signifikant geringerer Gehalt an mineralischen Rückständen festgestellt. Der Mittelwert des Aschegehalts liegt bei den Referenzproben im Außenbereich bei 0,6 % und bei 0,7 % in Probenmitte. Die imprägnierten Proben enthalten 2,9 % mineralischen Rückstand im Randbereich und 1,7 % in Probenmitte.

Der geringe Anteil lässt sich auf die Klebefuge zwischen den Furnierschichten zurückführen, welcher als Sperrschicht ein Eindringen der Suspension in die Furnierbauteile verhindert.

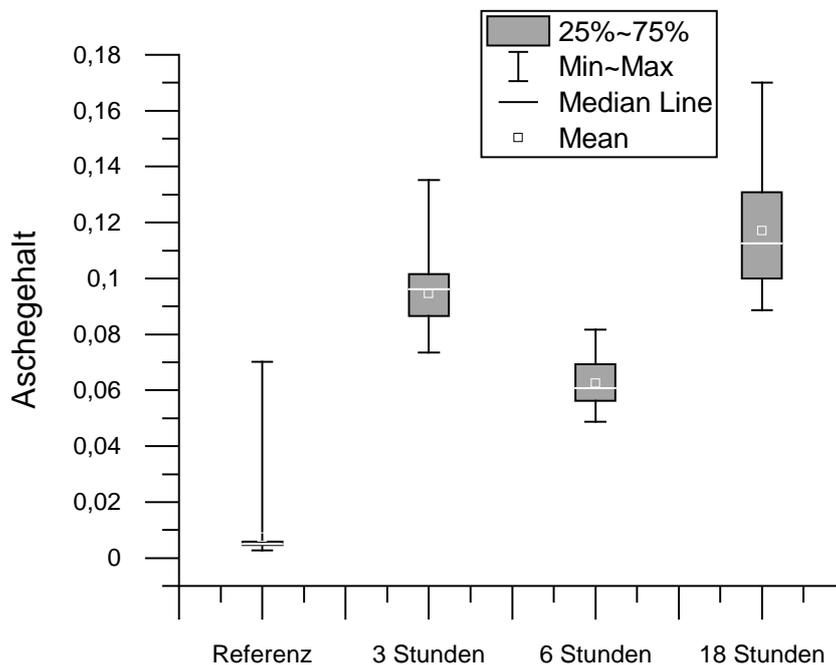


Abbildung 17: Aschegehalt als Massenverhältnis bei unterschiedlicher Druckphasendauer im Vergleich zur unbehandelten Referenzprobe

Durch mikroskopische Aufnahmen von Quer- und Längsschnitten der Buchenschäl furniere konnte eine gute Verteilung des eingebrachten Zements über den Querschnitt festgestellt werden. Insbesondere im Randbereich der Furniere (Bereiche mit hohem Aschegehalt) konnte eine vollständige Zementfüllung der Gefäßsporen nachgewiesen werden (Abbildung 18).

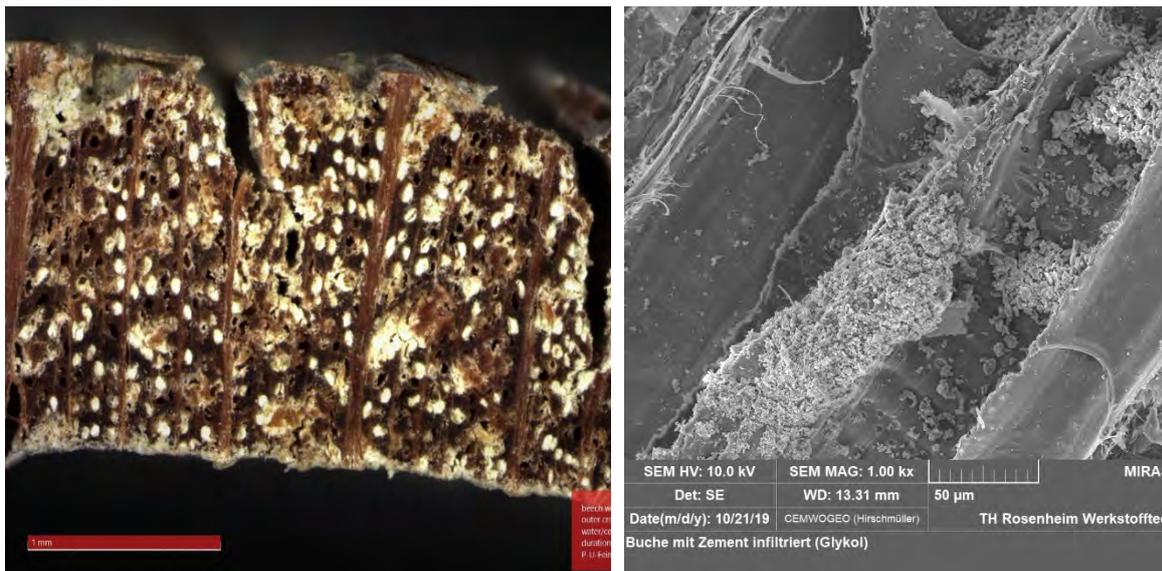


Abbildung 18: Querschnitt eines Furniers mit deutlich gefüllten Holzzellen; weiße Bereiche sind mineralische Komponenten; Maßstabsbalken 1 mm (links); REM-Aufnahme einer Gefäßwand im Längsschnitt mit anhaftenden Zementpartikeln; Maßstabsbalken 50 µm (rechts)

Um die Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie und der Pyrolyse bestätigen zu können, wurden ausgewählte Proben mittels eines Computertomographen des Typs *Xradia* der Firma *Zeiss* untersucht. Es wurden unterschiedliche Proben mit unterschiedlicher Positionierung innerhalb eines Furniers gewählt. Durch diese Messungen konnte die Durchimprägnierung der Furniere dargestellt werden. Nachfolgend wurde exemplarisch eine Fichten- und eine Buchenprobe dargestellt. Bei den Messungen wurde die Probe auf einem Halter aufgebracht und einzelne Bereiche gemessen. Die so aufgenommenen Daten wurden anschließend rekonstruiert und mit der Auswertesoftware *Avizo* der Firma *Thermo* bearbeitet, segmentiert und visualisiert (Abbildung 19).

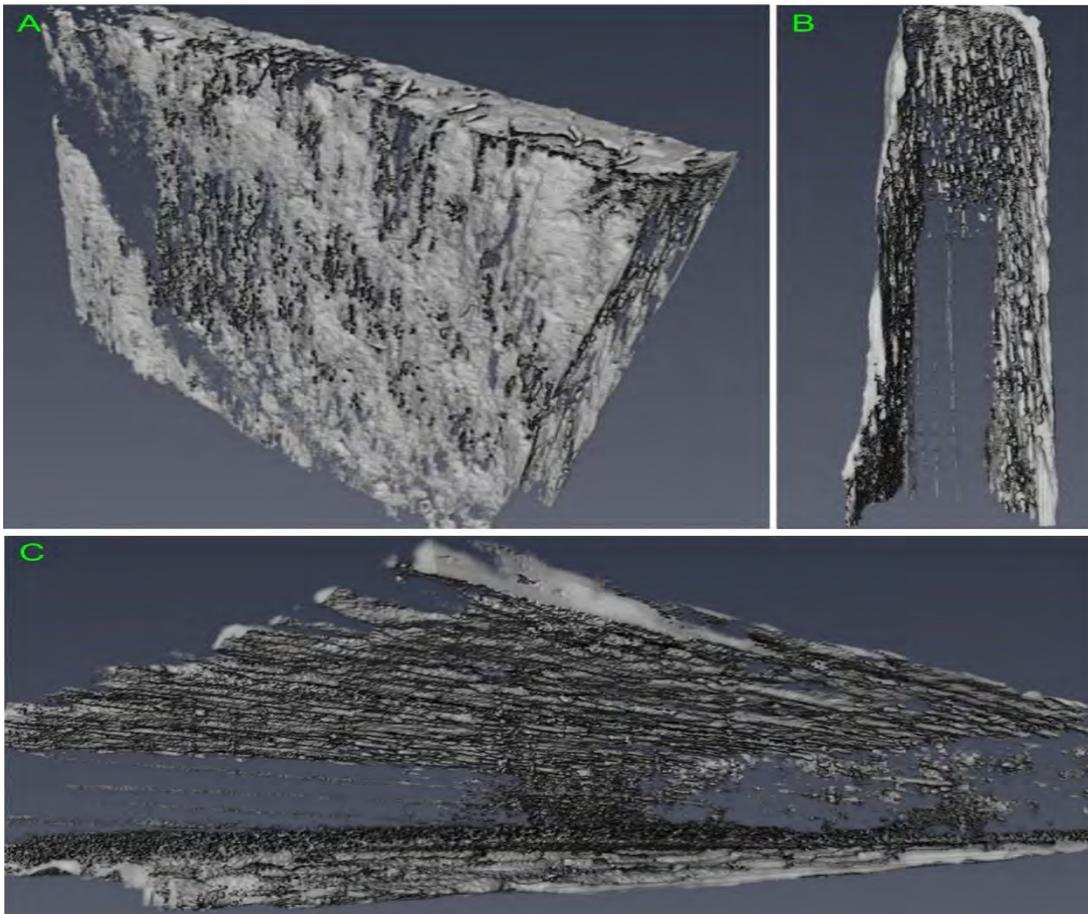


Abbildung 19: Segmentierte Datensätze der Messung einer imprägnierten Buchenprobe mit ca. 10 µm Auflösung.

Die höherdichten zementösen Materialien sind grau visualisiert. Teilbild A in Abbildung 19 stellt eine Seitenansicht eines Furnierabschnittes dar (Hirnholz oben), Teilbild B eine Seitenansicht. Deutlich erkennbar ist die zementöse Schicht auf den Außenseiten des Furniers. Bei genauerer Betrachtung sind, ausgehend von Hirnholz, Zementfüllungen unterschiedlicher Länge erkennbar. Teilbild C zeigt die Probenseitenansicht in geänderter Perspektive und verdeutlicht neben einer Eindringung der Zementsuspension über das Hirnholz auch die stärkere Füllung der Zelllumen durch radiale Transportvorgänge ausgehend von der Seitenfläche des Holzes.

2.3.2 Verklebungseigenschaften zementimprägnierter Schäl furniere

Eine Zusammenfassung von Ergebnissen der Zugscherprüfungen ist in Tabelle 9 aufgelistet. Die Bezeichnung der Probenfolgen schlüsselt die Art der Proben auf: Die erste Stelle gibt die Variante an, die zweite die Art der Vorbehandlung (Klasse A1 oder A4 nach EN 302-1 (2013)). Die letzten beiden Stellen dienen der schnelleren Identifikation von

Klebstoff und Imprägnierung. Die Probenfolge 3-A1-PUR-ZEM stammt aus Variante 3 (Tabelle 2), wurde mit Zement imprägniert, mit PUR verklebt und nicht kochwassergelagert, sondern im Normklima konditioniert (A1). Insgesamt wurden 80 Probekörper ausgewertet. Da die Probekörper einer Platte immer je zur Hälfte der Vorbehandlung A1 und A4 zugeordnet wurden und von jeder Variante zwei Platten hergestellt wurden, enthält jede Probenfolge jeweils fünf Probekörper von beiden Platten der Variante.

Tabelle 9: Scherfestigkeiten der Zugscherprüfungen

#	Probenfolge	Anzahl Proben	Mittelwert Scherfestigkeit in N/mm ²	Standardabweichung der Scherfestigkeit in N/mm ²
5	3-A1-PUR-Zem	10	14,03	2,30
6	3-A4-PUR-Zem	10	7,11	0,70
7	4-A1-PRF-Zem	10	12,48	1,10
8	4-A4-PRF-Zem	10	6,47	1,56
9	5-A1-PUR-Ref	10	11,42	1,45
10	5-A4-PUR-Ref	10	7,27	1,13
11	6-A1-PRF-Ref	10	11,45	1,30
12	6-A4-PRF-Ref	10	7,18	1,05

Die Ergebnisse werden in Abbildung 20 grafisch dargestellt. Die PUR-verklebten Proben wiesen bei der Vorbehandlung nach A1 eine um ca. 12 % höhere bzw. bei den Referenzfurnieren eine nahezu gleiche Festigkeit wie die PRF-verklebten Proben auf. Die höchsten Festigkeiten bei A1 wurden für beide Klebstoffe bei den zementimprägnierten Furnieren gemessen. Die geringsten Festigkeiten bei A1 zeigten die unbehandelten Referenzfurniere. Die imprägnierten Proben wiesen zwischen 9 % und 27 % höhere Festigkeiten auf als die Referenzproben. Sowohl bei den Referenz- als auch bei den zementimprägnierten Furnieren reduzierte die Kochwasserlagerung wie erwartet die Scherfestigkeit..

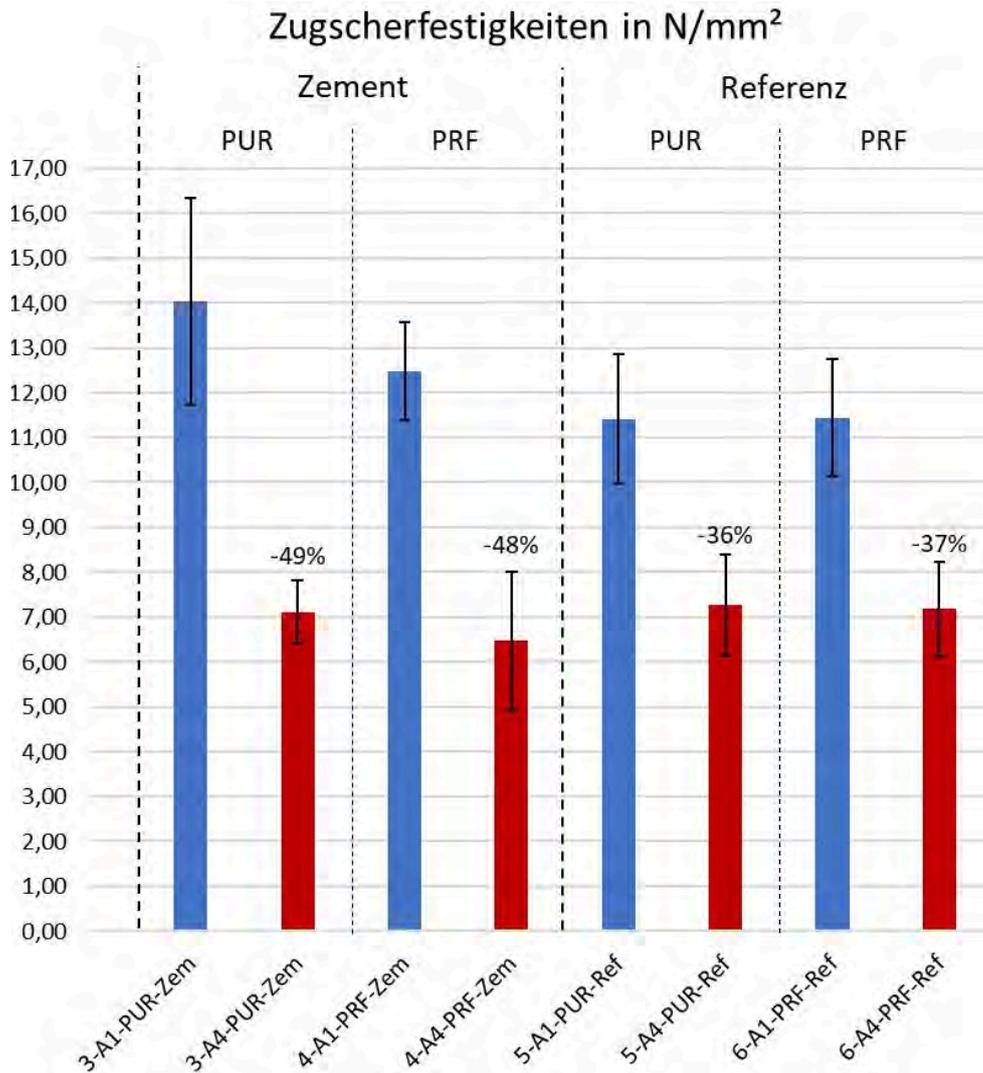


Abbildung 20: Balkendiagramm der Zugscherfestigkeiten; Fehlerindikatoren zeigen einfache Standardabweichung; Prozentangaben bedeuten relative Abnahme der Festigkeit von A1 auf A4

Die Streuung der Messwerte um den Mittelwerte aller Varianten liegt nach der Vorbehandlung nach A4 in einem engeren Bereich als bei Vorbehandlung nach A1. Durch den vergleichbaren Verlust an Festigkeit beider Serien bei Zement und Referenz verhalten sich die Mittelwerte dieser Varianten bei A4 ähnlich wie bei A1.

Der Holzfaserbruchanteil auf den Bruchflächen wurde nicht visuell bewertet, sondern durch softwaregestützte Bildanalyse bestimmt. Dazu wurden die Bruchflächen fotografiert und die Bereiche des Klebstoffversagens in der Software durch Farbunterschiede zwischen Holz und Klebstoff bestimmt. Der Kontrast zwischen Holz und Klebstofffärbung war im Falle des dunklen PRF-Klebstoffes zur Auswertung ohne weitere Hilfsmaßnahmen ausreichend. Zur Identifikation des PUR-Klebstoffes wurden Aufnahmen mit UV-Licht angefertigt, wodurch

die dem Klebstoff zugefügte Fluoreszenzsubstanz aktiviert wurde und in der Bildbearbeitung erfasst werden konnte. Beide Bruchflächen einer Probe wurden ausgewertet, um einen Rückschluss auf die Bruchart ziehen zu können. Bei einer ideal spiegelbildlichen Bruchfläche ist der Anteil des Klebstoffversagens bzw. Holzbruches auf beiden Seiten gleich. Zur Bestimmung des Holzbruchanteils würde die Analyse einer Seite ausreichen. Um Abweichungen zu minimieren, wurden in der Auswertung beide Flächen erfasst und der Mittelwert gebildet. Bei nicht spiegelbildlichen Bruchflächen wurden die Anteile des Klebstoffversagens beider Bruchflächen addiert, um den gesamten Bereich des Klebstoffversagens zu erfassen. Der Holzbruchanteil entspricht der neben dem Klebstoffbruch verbleibenden Fläche. Viele Bruchflächen zeigten eine Überlagerung mehrerer Brucharten.

Kohäsionsbruch im Holz war die überwiegende Bruchart, gefolgt vom Bruch am Interface und nahe der Grenzfläche. Selten traten auch Kohäsionsbrüche im Klebstoff bzw. Brüche in der Interphase auf. In Tabelle 10 werden die Ergebnisse der Holzbruchanteile zusammengefasst, in Abbildung 21 werden diese grafisch dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Bruchflächenauswertung

#	Probenfolge	Anzahl Proben	Vorwiegende Bruchart	Mittelwert Holzbruchanteil in %	Standardabweichung in %	Abnahme Holzbruch ggü. A1 in %
5	3-A1-PUR-Zem	10	1 Kohäsion Holz	100	0	
6	3-A4-PUR-Zem	10	3 Interface	48	22	-52
7	4-A1-PRF-Zem	10	1 Kohäsion Holz	98	3	
8	4-A4-PRF-Zem	10	1 Kohäsion Holz	74	10	-24
9	5-A1-PUR-Ref	10	1 Kohäsion Holz	90	20	
10	5-A4-PUR-Ref	10	2 Kohäsion Klebstoff	12	20	-86
11	6-A1-PRF-Ref	10	1 Kohäsion Holz	93	3	
12	6-A4-PRF-Ref	10	1 Kohäsion Holz	91%	10	-3

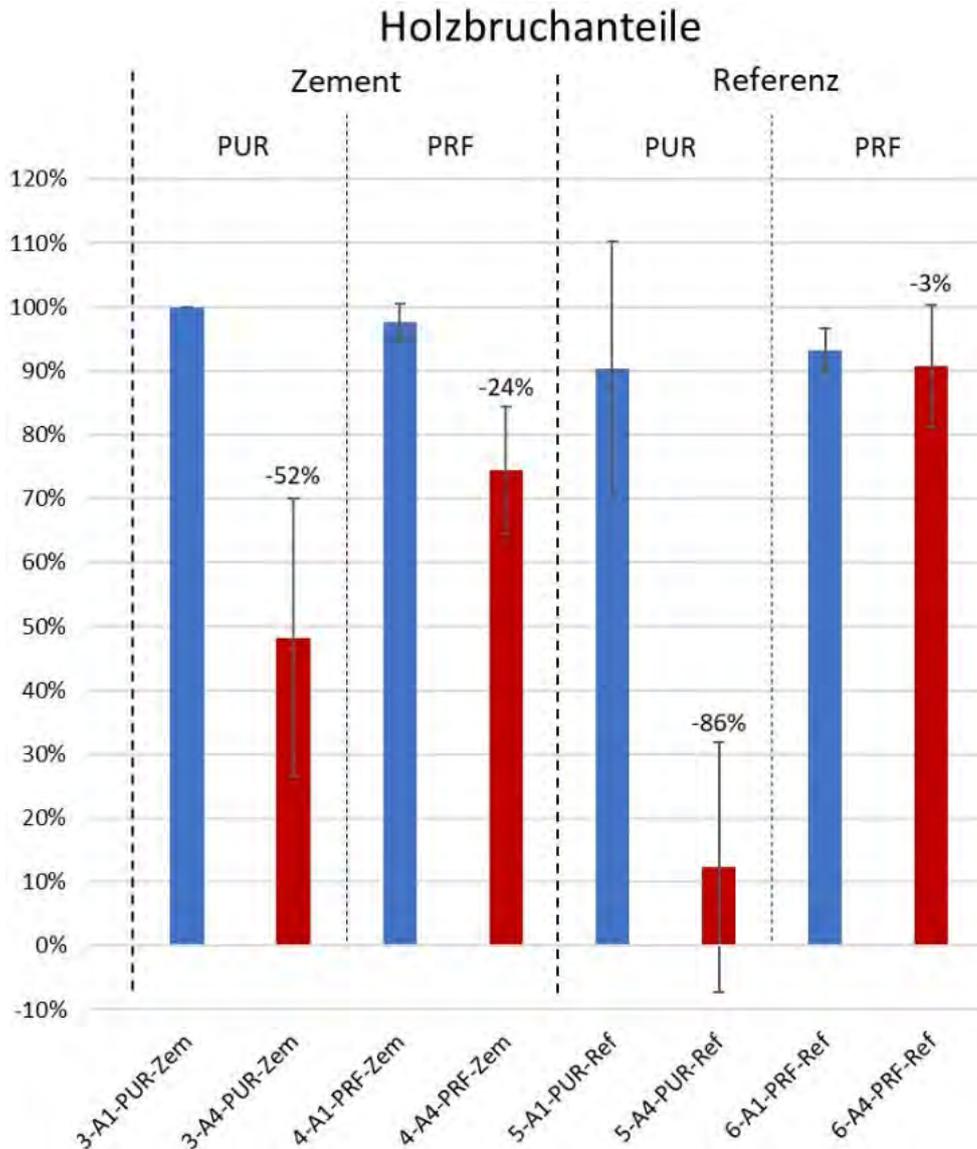


Abbildung 21: Balkendiagramm der Holzbruchanteile; Fehlerindikatoren zeigen einfache Standardabweichung; Prozentangaben bedeuten relative Abnahme des Holzbruchanteils von A1 auf A4

Bei der fünften Probenfolge „3-A1-PUR-Zem“ wiesen alle Probekörper 100 % Holzbruch auf, dementsprechend gibt es keine Streuung der Messwerte. Die z.T. hohe Streuung der Holzbruchanteile innerhalb der Probenfolgen resultierte in hohen Standardabweichungen, wodurch diese z.T. über 100 % bzw. unter 0 % reichen. Bei allen Varianten war der Holzbruchanteil nach der Kochwasserlagerung geringer als bei Normklimatisierung. Diese relative Abnahme des Holzbruchanteils innerhalb einer Variante ist durch Prozentangaben über den roten Balken dargestellt. Einzig bei der Verklebung

zementimprägnierter Furniere mit Vorbehandlung A1 erzielte der PUR-Klebstoff einen höheren Holzbruchanteil als der PRF-Klebstoff, bei den anderen Varianten wies der PRF-Klebstoff durchgehend höhere Holzbruchanteile auf. Die höchsten Holzbruchanteile der Vorbehandlung A1 ergaben sich bei den zementimprägnierten und mit PUR verklebten Proben. Der höchste Holzbruchanteil der Vorbehandlung A4 wurde bei den Referenzfurnieren mit dem PRF-Klebstoff nachgewiesen. Auf Basis der durchgeführten Versuche kann davon ausgegangen werden, dass auch bei zementimprägnierten Furnieren eine zuverlässige Verklebung der Bauteile möglich ist, da sich die Festigkeitswerte und der Anteil des Holzbruches nicht signifikant von denen unbehandelter Referenzproben unterscheidet.

2.3.3 pH-Wert-Analyse zementimprägnierter Buchenfurnieren

Der vom Analysegerät angezeigte Wert stabilisierte sich um den angegebenen Mittelwert, die durch das Messgerät bedingte Schwankung ist als Unsicherheit angegeben. Der Wert der unbehandelten Buchen-Referenzprobe entspricht mit 5,0 dem in der Literatur angegebenen Wert von ca. 5,1 (Jung and Roffael 2002) und bestätigt somit die Zuverlässigkeit der Messung bzw. des Extraktionsvorgehens. Durch die Zementimprägnierung wurde der pH-Wert der Proben erhöht. Die pH-Werte der zementimprägnierten Probe liegen im leicht basischen Bereich (Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse der pH-Wert-Analyse

	pH-Wert
Destilliertes Wasser	6,94 ± 0,02
Buche unbehandelt (Referenz)	5,00 ± 0,03
Zementimprägnierte Probe	7,74 ± 0,02

2.3.4 Eluatverhalten zementimprägnierter Furniere

In einem ersten Schritt wurden unbehandelte Buchenfurniere auf Elemente untersucht, welche bei imprägnierten Proben eine wesentliche Rolle spielen. Somit soll zwischen der Auslaugung des Holzes und den verwendeten Imprägniersubstanzen differenziert werden können. Die Stoffkonzentrationen nehmen allgemein mit der Zeit ab (Abbildung 22).

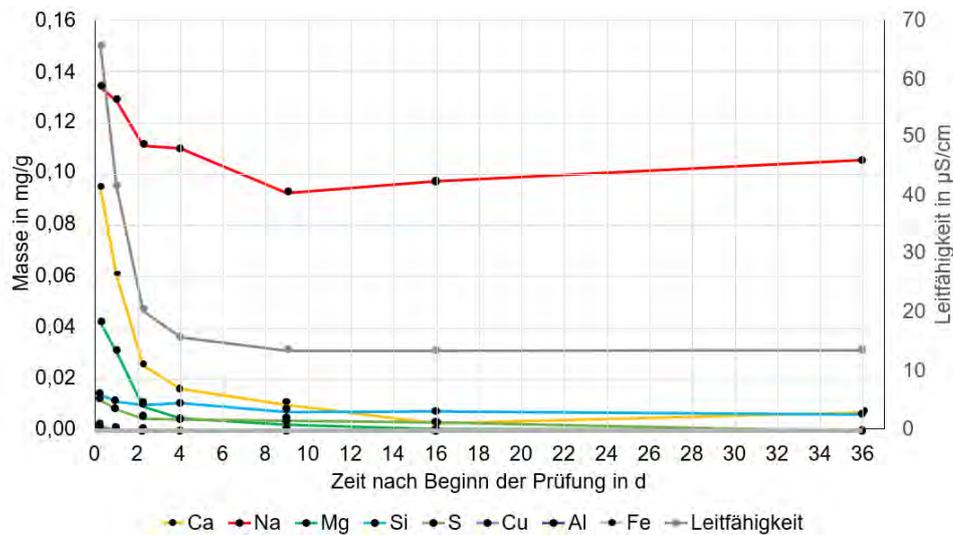


Abbildung 22: Messergebnis Elutionsversuch von unbehandelter Buche

Vergleichsweise hoch sind die Werte für Natrium, Calcium und Magnesium, was auch mit der Analyse des Ascherückstandes übereinstimmt (Abbildung 23). Die Konzentrationen der restlichen betrachteten Elemente sind relativ gering. Im Falle einer Unterschreitung der Nachweisgrenze wurde der jeweilige Wert nicht berücksichtigt. Die Leitfähigkeit nimmt ebenfalls mit der Zeit ab. Der pH-Wert ist bis zum vierten Tag nach Beginn der Prüfung im leicht sauren Bereich und bleibt anschließend bei etwa 7,0 (nicht abgebildet).

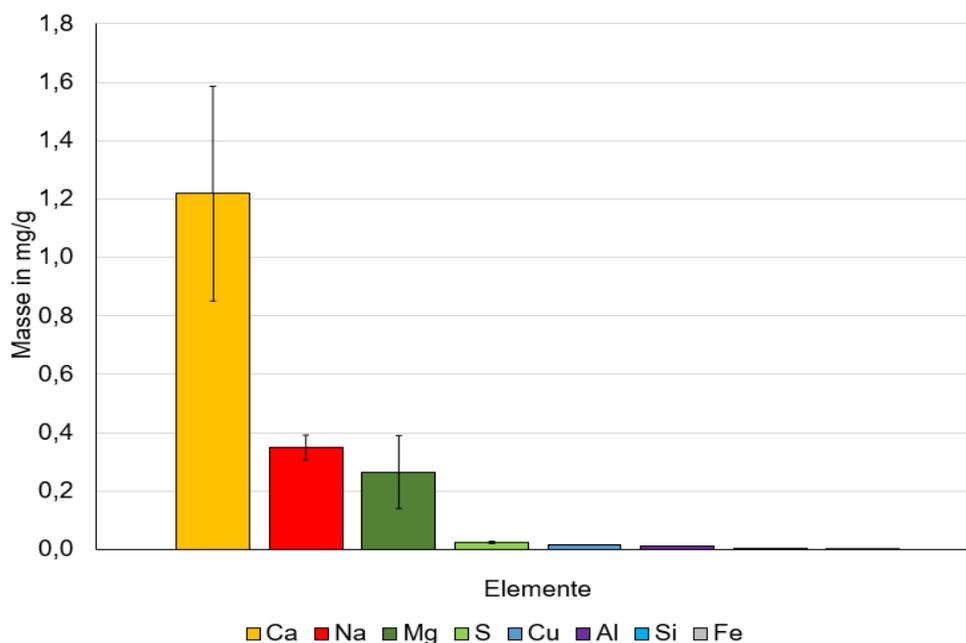


Abbildung 23: Elementkonzentrationen im Ascherückstand unbehandelter Buche

Eluatverhalten zementimprägnierter Buchenfurniere nach sieben Tagen Lagerung

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben fand nach der Zementimprägnierung eine 48-stündige Wasserlagerung der Prüfkörper statt. Der Start der Elutionsversuche erfolgte anschließend nach siebentägiger Lagerung der Proben im Normalklima. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass bereits vor dem Elutionsversuch der zementimprägnierten Proben eine Elution von Extraktstoffen aus der Holzmatrix stattfand.

Die ermittelte Massenabnahme nach der Elutionsprüfung ($2,51 \pm 0,21$) % ist mit der Differenz der Aschegehalte von Proben mit bzw. ohne Elutionsversuch ($3,08 \pm 3,73$) % vergleichbar. Die Auslaugung zementimprägnierter Proben findet aufgrund größtenteils schwer in Wasser löslicher Bestandteile statt, was eine überwiegend auf Feststoff basierende Freisetzung bedeutet. Sowohl die gemessene Massenabnahme nach der Elutionsprüfung, als auch weitere Veraschungen von Prüfkörpern deuten auf einen geringen, rund 3 %-igen Masseverlust (Abbildung 24).

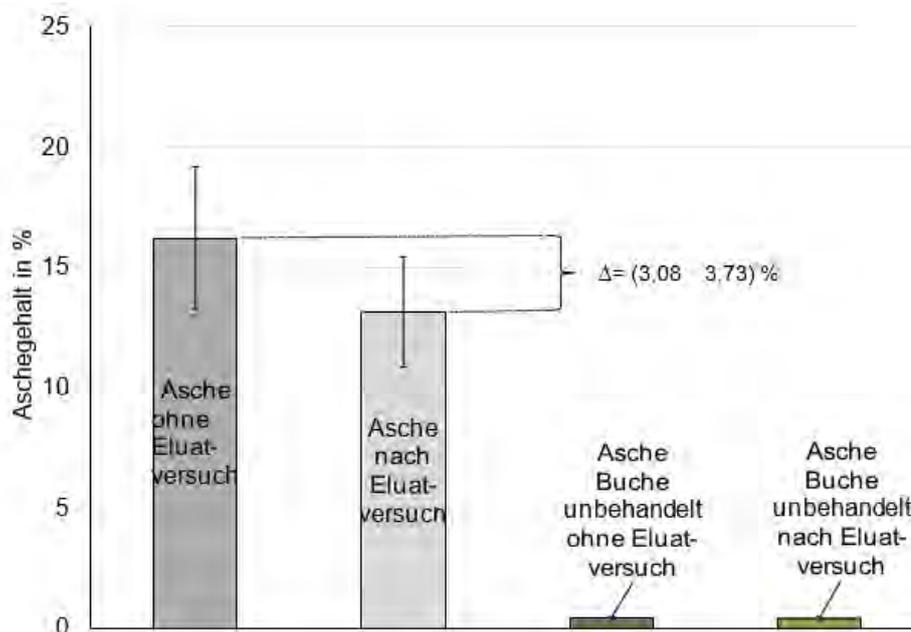


Abbildung 24: Vergleich Aschegehalt von Proben mit bzw. ohne Elutionsversuch

Eluatverhalten zementimprägnierter Buchenfurniere nach 28 Tagen Lagerung

Zementimprägnierte Proben, welche 28 Tage im Normalklima gelagert wurden, werden beim Elutionsversuch bezüglich der Elementkonzentrationen von Ca, Mg, Al und Fe untersucht.

Die erste Eluatentnahme ergab bei Ca eine Masse von $(2,16 \pm 0,330)$ mg/g (Abbildung 25). Die Masse an Ca bei sieben Tage lang gelagerten Proben beträgt zu diesem Zeitpunkt $(1,08 \pm 0,264)$ mg/g. Nach einem Tag unterscheidet sich die Freisetzung von Ca nicht mehr wesentlich. Beide Probengruppen weisen vergleichbare Verläufe von gelösten Elementen über die Zeit auf. Auch bei 28 Tage alten Proben folgt die Leitfähigkeit dem Verlauf der Ca Konzentration. Der pH-Wert befindet sich über die Prüfdauer hinweg im leicht basischen Bereich (Abbildung 26), die Konzentrationen an Al und Fe im Eluat sind für Proben mit siebentägiger Nachlagerzeit vergleichbar mit Proben von 28 Tagen Nachlagerzeit (Abbildung 27).

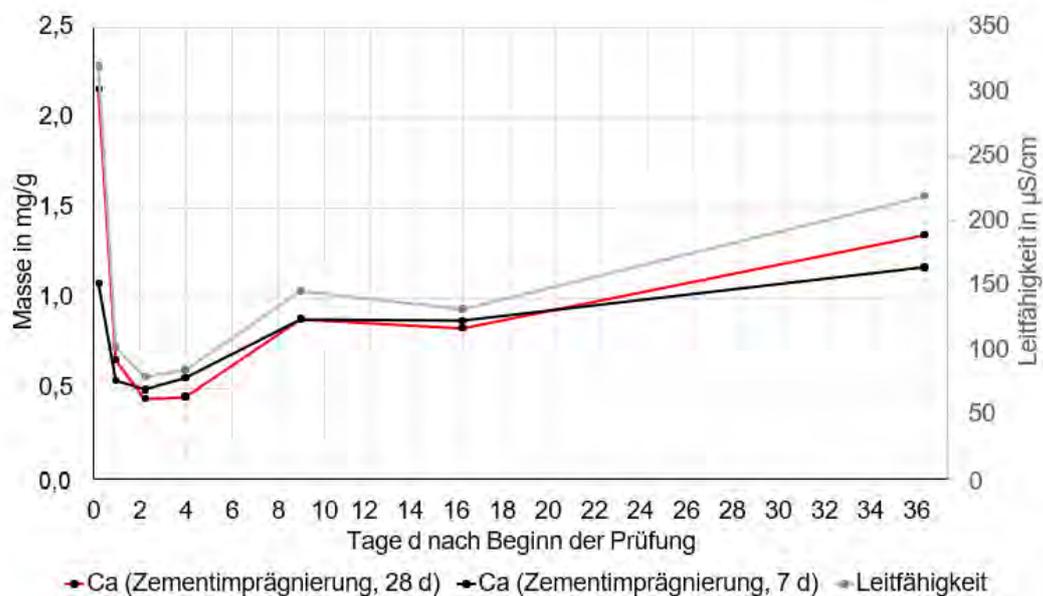


Abbildung 25: Masse an gelöstem Ca und Leitfähigkeit

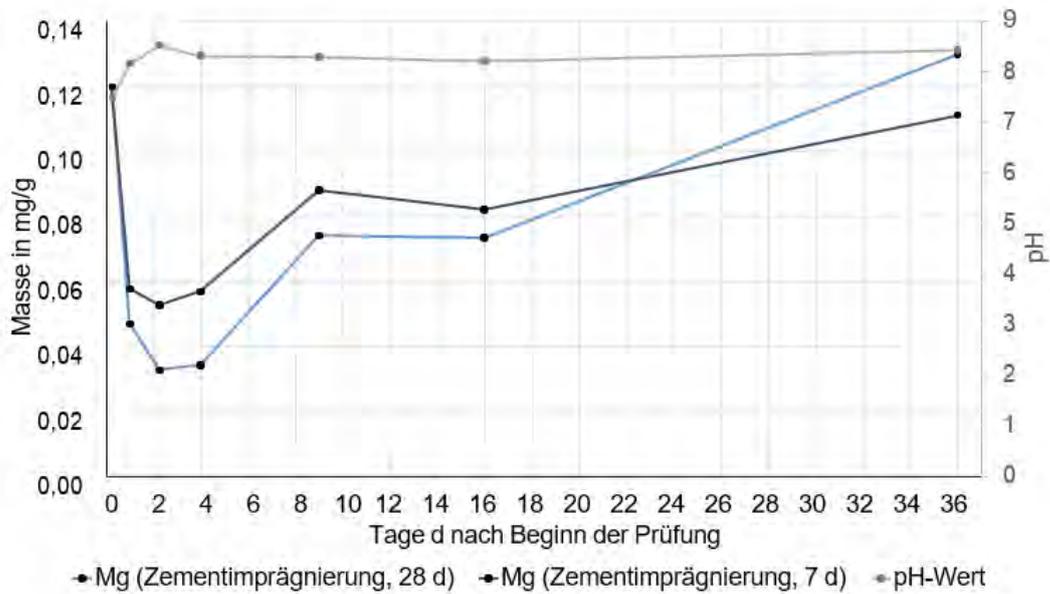


Abbildung 26: Masse an gelöstem Mg und pH-Wert

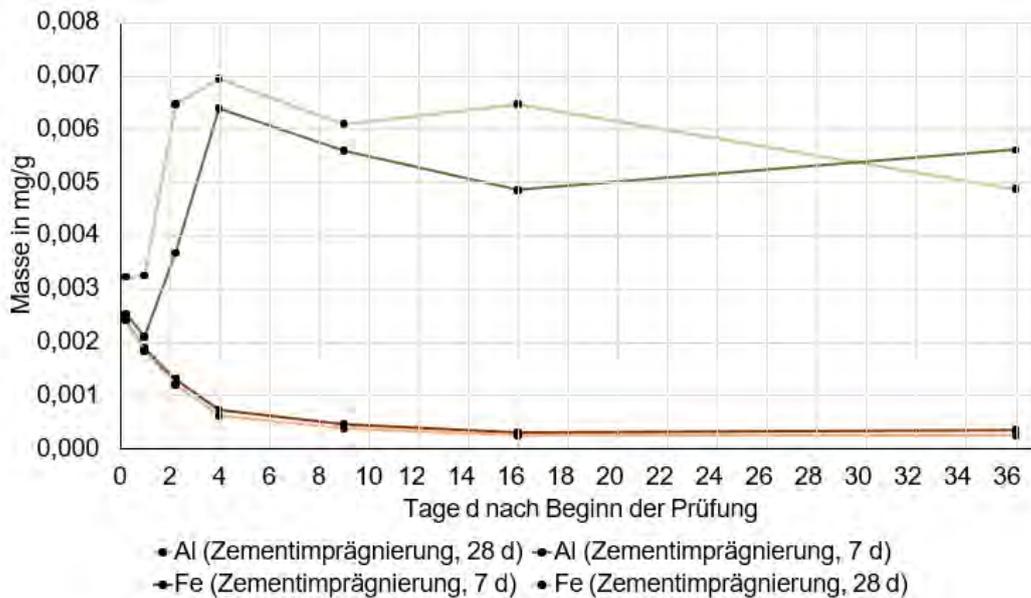


Abbildung 27: Masse an gelöstem Fe und Al

Die Massenzunahme der Furniere bei 28 Tage Nachlagerzeit betrug durch die Imprägnierung ($104 \pm 12,4$) mg/g (Abbildung 28). Der gesamte Massenverlust nach dem Elutionsversuch betrug ($33,3 \pm 11,4$) mg/g bzw. ($3,37 \pm 1,03$) %. Bei unbehandelter Buche wurde ein Massenverlust von ($20,4 \pm 1,71$) mg/g ermittelt.

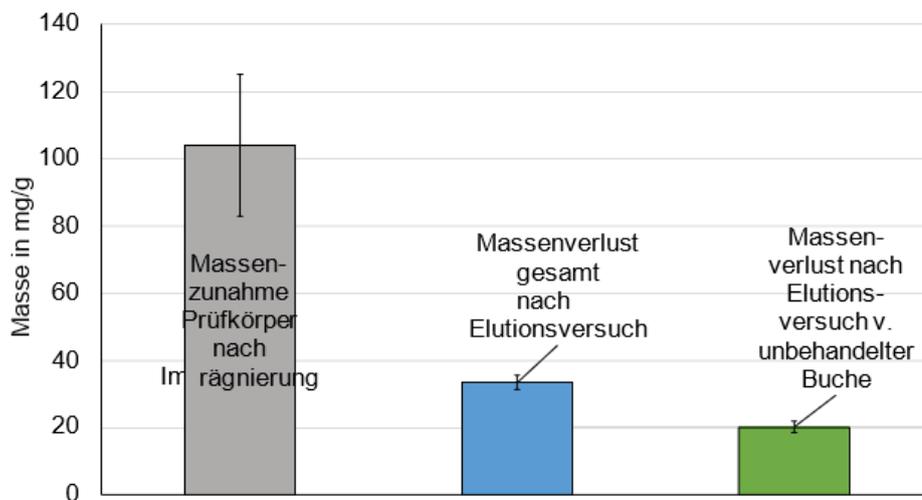


Abbildung 28: Vergleich der Holzmassen

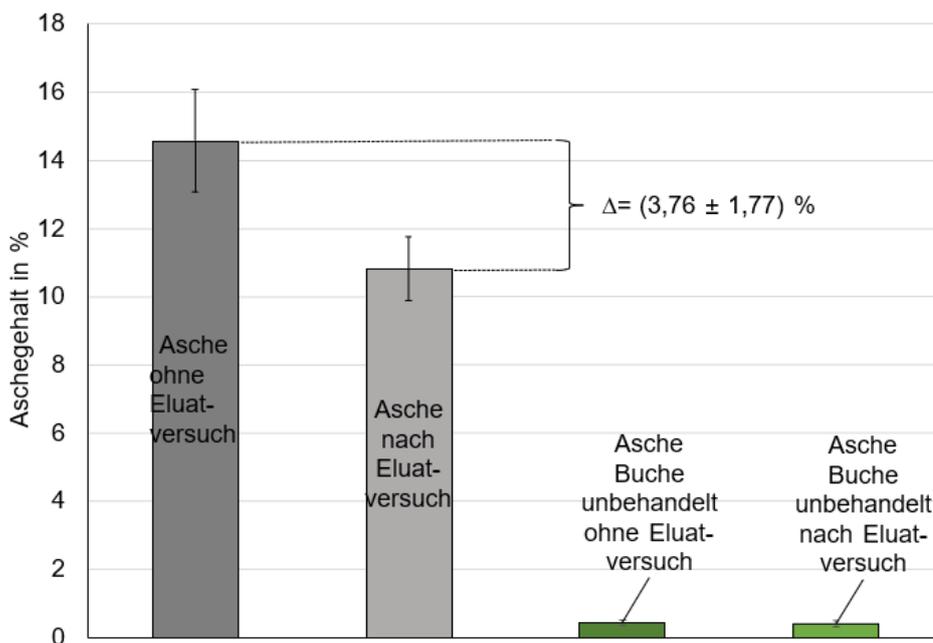


Abbildung 29: Vergleich Aschegehalt von Proben vor und nach Elutionsversuch

Ein Vergleich mit der Veraschung nicht eluierter, ebenfalls 28 Tage gelagerten Proben ergab eine Differenz von $(3,76 \pm 1,77) \%$ (Abbildung 29). Im Vergleich zum ermittelten Massenverlust anorganischer Stoffe bei sieben Tage gelagerten Proben (Differenz der Aschegehalte: $(2,51 \pm 0,21) \%$) weisen Proben nach 28 Tagen Lagerung einen höheren Masseverlust auf (Abbildung 29). Die gemessenen Konzentrationen wesentlicher Elemente in den Eluaten sind in beiden Fällen vergleichbar. Die Trocknung der Proben

bei 105 °C, jeweils vor und nach dem Elutionsversuch, ergab bei beiden Probengruppen eine Massenabnahme von etwa 3 %. Durch die Veraschung nicht eluierter, sieben und 28 Tage alten Proben konnte die Differenz der Aschegehalte vergleichbar zu etwa 3 % bestimmt werden.

2.4 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit zementimprägnierter Furniere

Dauerhaftigkeit in Zementüberstandswässern gelagerter Furniere

Die Ergebnisse der chemischen Analyse, insbesondere im Hinblick auf die Hauptelemente Ca, K, Na und S, sowie die Leitfähigkeit (Lf) und Lösungstemperatur (Temp) sind in Tabelle 12 aufgelistet, wobei Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze BG nicht angegeben sind.

Tabelle 12: Analyseergebnis der Zementüberstandswässer L1 bis L7

	Dim	BG	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
pH	-	-	12,79	12,77	12,74	12,78	12,74	12,73	12,73
Lf	µS/cm	1	19220	16880	13010	14970	14740	15250	17090
Temp.	°C	-	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
F	mg/l	0,002	0,44	1,35	0,46	0,38	0,35	0,38	0,45
Cl	mg/l	0,002	185	218	174	78,8	98,3	93,0	145
NO ₂	mg/l	0,002	4,12	4,15	3,88	4,72	3,81	3,74	4,33
Br	mg/l	0,002	1,85	7,26	2,49	< BG	< BG	1,24	1,58
NO ₃	mg/l	0,002	4,07	3,90	6,23	4,39	4,09	4,79	4,33
SO ₄	mg/l	0,002	2089	1405	152	502	1094	1184	2141
Al	mg/l	0,01	0,052	0,039	0,024	0,041	0,034	0,036	0,092
Ca	mg/l	0,01	705	743	662	590	710	661	799
Cd	mg/l	0,0001	0,0015	0,0010	0,0001	0,0007	0,0008	0,0009	0,0029
Co	mg/l	0,0001	0,0010	0,0011	0,0011	0,0009	0,0011	0,0011	0,0011
Cr	mg/l	0,002	0,027	1,555	0,016	0,013	0,044	0,009	0,056
Cu	mg/l	0,002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Fe	mg/l	0,002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
K	mg/l	0,5	2643	2042	956	1386	1410	1027	1796
Mg	mg/l	0,002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Mn	mg/l	0,002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Na	mg/l	0,1	417	342	198	271	319	651	530
Ni	mg/l	0,002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
P	mg/l	0,1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Pb	mg/l	0,0001	0,0007	0,0029	0,0025	0,0010	0,0019	0,0003	0,0013
S	mg/l	0,1	713	546	50	168	360	384	686
Zn	mg/l	0,0001	0,0012	0,0039	0,0019	0,0026	0,0029	0,0015	0,0053

Die Tränkung von Buchenprüfkörper mit Zementüberstandswässern hatte keinen positiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegenüber *Tranetes versicolor*. Im Gegenteil nahm der Masseverlust der Buche im Vergleich zu den unbehandelten Referenzprüfkörpern sogar zu (Tabelle 13). Die Inkubation der Buche mit *Coniophora puteana* führte nach der Tränkung zu einer geringen Verbesserung der Dauerhaftigkeit. Nach der Auswaschung war der Masseverlust der Prüfkörper jedoch signifikant höher als jener der Referenz, was durch eine Vorschädigung des Holzes zu erklären ist. Die Tatsache, dass eine Wachstumshemmung nur für den Braunfäulepilz festgestellt wurde, liegt vermutlich im hohen pH-Wert nach der Tränkung begründet. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass es sich nur um eine temporäre Hemmung handelte, welche durch Regulationsmechanismen des Pilzes überwunden werden kann. Abbildung 30 und

Abbildung 31 zeigen für die verschiedenen Lösungen (Überstandswässer) den Masseverlust von Buchenholz, das mit *C. puteana* und *T. versicolor* inkubiert wurde.

Tabelle 13: Masseverlust des Buchenholzes in Abhängigkeit der Pilzart und der Auswaschung für alle getränkten Prüfkörper sowie die Referenz (Mittelwert und Standardabweichung).

Behandlungsart	Masseverlust [%]	
	<i>Coniophora puteana</i>	<i>Trametes versicolor</i>
nicht ausgewaschen (U)	8,88 (± 6,62)	60,29 (± 8,35)
ausgewaschen (EN 84)	31,76 (± 15,17)	62,55 (± 7,55)
Referenz nicht ausgewaschen (U)	14,19 (± 12,95)	49,95 (± 4,49)
Referenz ausgewaschen (EN 84)	12,24 (± 14,44)	48,42 (± 5,51)

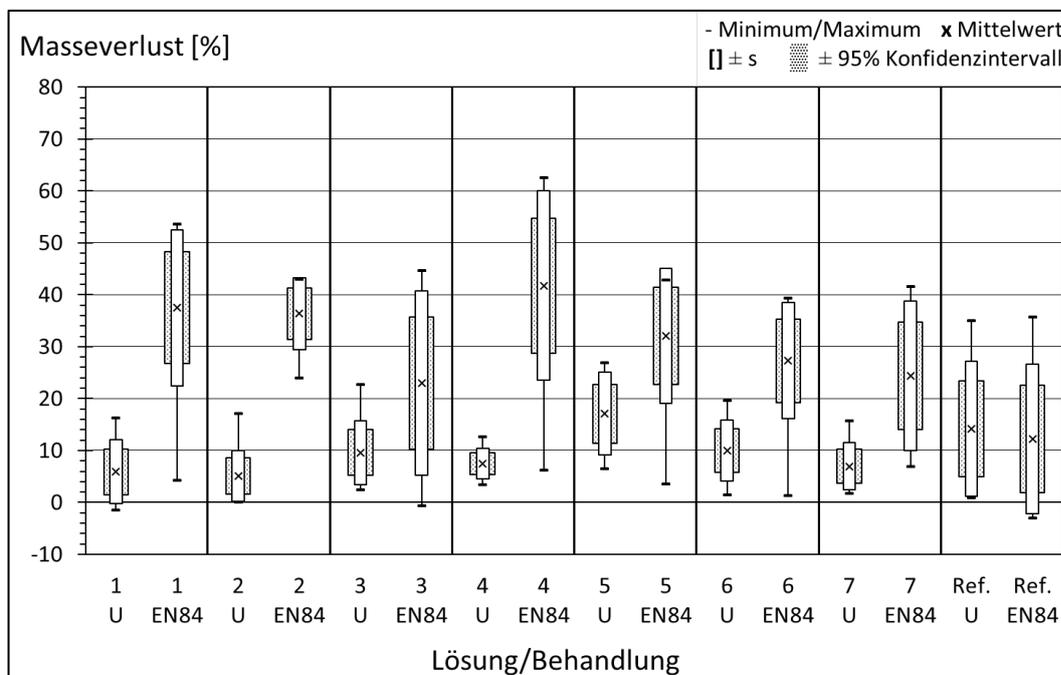


Abbildung 30: Masseverlust in % der nicht ausgewaschenen (U) und ausgewaschenen (EN 84) Buchenprüfkörper durch *Coniophora puteana*

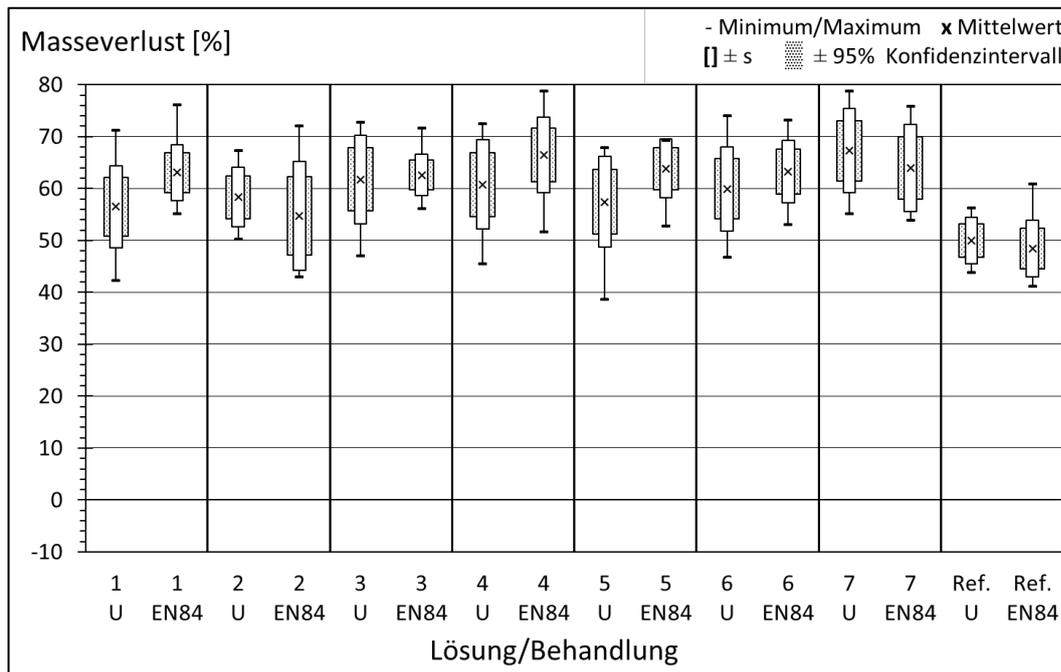


Abbildung 31: Masseverlust in % der nicht ausgewaschenen (U) und ausgewaschenen (EN 84) Buchenprüfkörper durch *Trametes versicolor*

Dauerhaftigkeit zementimprägnierter Furnierbauteile

Nach erfolgreicher Einzelfurnierimprägnierung wurden die Verklebungsparameter zur Gewährleistung einer dauerhaften Verklebungsqualität definiert und verschiedene Furnierschichtholzprüfkörper produziert. Tabelle 14 und Abbildung 32 zeigen die verschiedenen Dauerhaftigkeitsprüfungen, die mit zementimprägnierten Furnieren sowie zementimprägniertem Buchenfurnierschichtholz (LVL) durchgeführt wurden.

Zusammenfassung der Dauerhaftigkeitsprüfungen mit zementbehandeltem Holzmaterial:

- In Prüfungen mit Basidiomyceten-Reinkulturen zeigte sich, dass die Dauerhaftigkeit von Buchenfurnierschichtholz durch eine Zementimprägnierung nur geringfügig (*C. puteana*) bzw. nicht erhöht wurde (*T. versicolor*) – (Tabelle 14, Versuch #1.1, Abbildung 32a, Abbildung 33).
- Zementimprägnierte Buchenfurniere wiesen im Vergleich zu unbehandelten Referenzprüfkörpern keine erhöhte Dauerhaftigkeit nach Exposition in terrestrischen Mikrokosmen auf (Tabelle 14, Versuch #2.1, Versuch #2.2, Abbildung 32b, Abbildung 34, Abbildung 35).

- In Prüfungen mit unsteriler Erde zeigte sich, dass die Dauerhaftigkeit von Buchenfurnierschichtholz gegenüber Moderfäule und anderen bodenbewohnenden Mikroorganismen durch eine Zementimprägnierung nicht erhöht wurde (Tabelle 14, Versuch #2.3, Abbildung 32d, Abbildung 36).

Tabelle 14: Allgemeine Informationen und Ergebnisse zu Dauerhaftigkeitsprüfungen mit zementbehandeltem Material an der Universität Göttingen. Abkürzungen: LVL = Furnierschichtholz (Laminated veneer lumber).

#	Prüfung	Behandlung	Pilzart	n	Mittlerer Masseverlust in %	Medianer Masseverlust in %
1.1	DIN EN 113-2 (2021)	unbehandelt	<i>C.p.</i>	15	38,9	37,4
1.1	DIN EN 113-2 (2021)	unbehandelt	<i>T.v.</i>	15	26,2	25,8
1.1	DIN EN 113-2 (2021)	zementimprägnierte LVL	<i>C.p.</i>	15	13,8	14,8
1.1	DIN EN 113-2 (2021)	zementimprägnierte LVL	<i>T.v.</i>	15	26,1	27,0
2.1	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	unbehandelt	TMC	10	19,2	19,0
2.1	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	zementimprägniert (Furnier)	TMC	35	19,3	20,1
2.2	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	unbehandelt (Furnier)	TMC	5	Abbildung 35 (zu viele Behandlungsserien, um sie hier zu präsentieren)	
2.2	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	zementimprägnierte (Furnier)	TMC	30		
2.3	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	unbehandelte Buche Vollholz	TMC	20	12,8	13,0
2.3	DIN CEN/TS 15083-2 (2005)	zementimprägnierte LVL	TMC	22	11,8	12,0

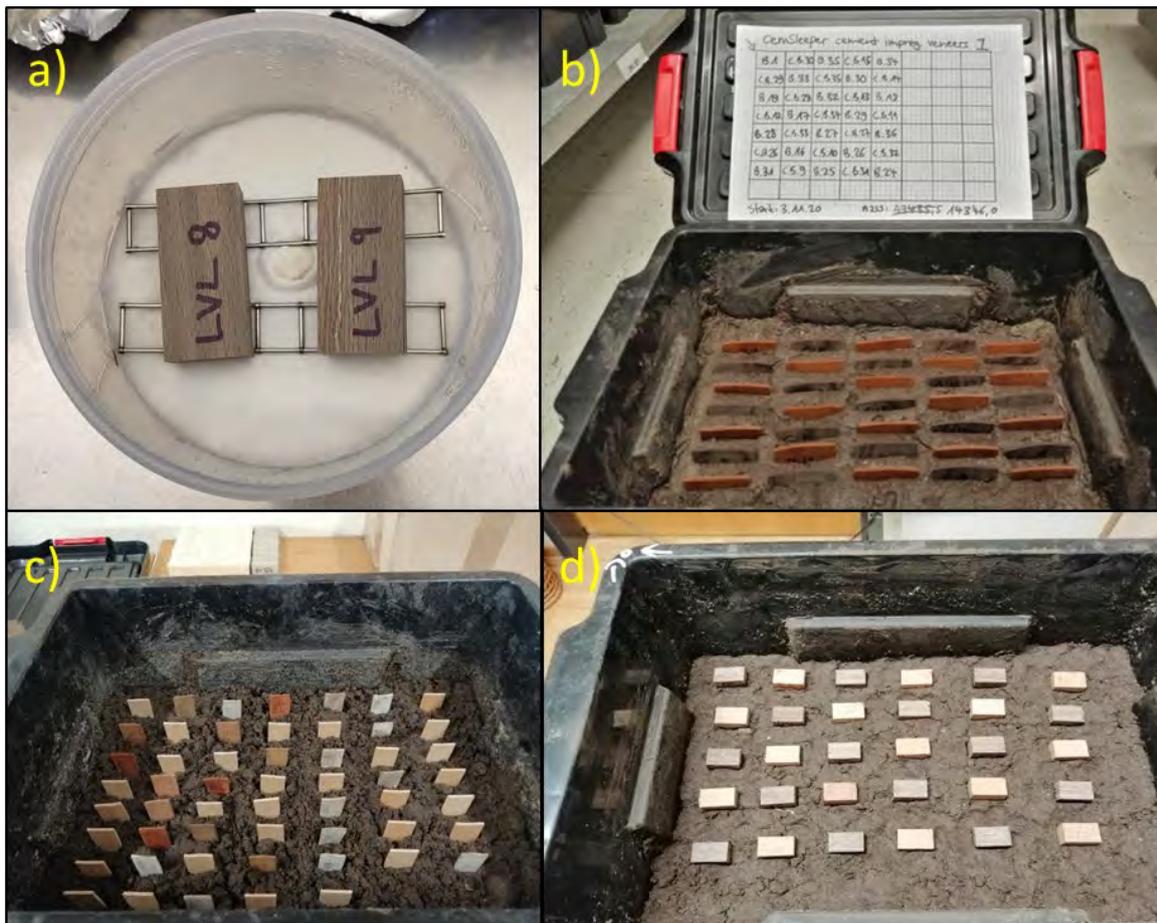


Abbildung 32: a) Versuch #1.1; in Anlehnung an EN 113-2 , zementimprägnierte LVL-Prüfkörper aus Buche mit Weißfäule (*Trametes versicolor*) inkubiert. b) Versuch #2.1; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2 , zementimprägnierte Buchen-Prüfkörper (Furniere) exponiert in unsteriler Erde. c) Versuch #2.2; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2 (2005), zementimprägnierte Buchenprüfkörper (Furniere) exponiert in unsteriler Erde. d) Versuch #2.3; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2 , zementimprägnierte Buchen-LVL-Prüfkörper exponiert in unsteriler Erde.

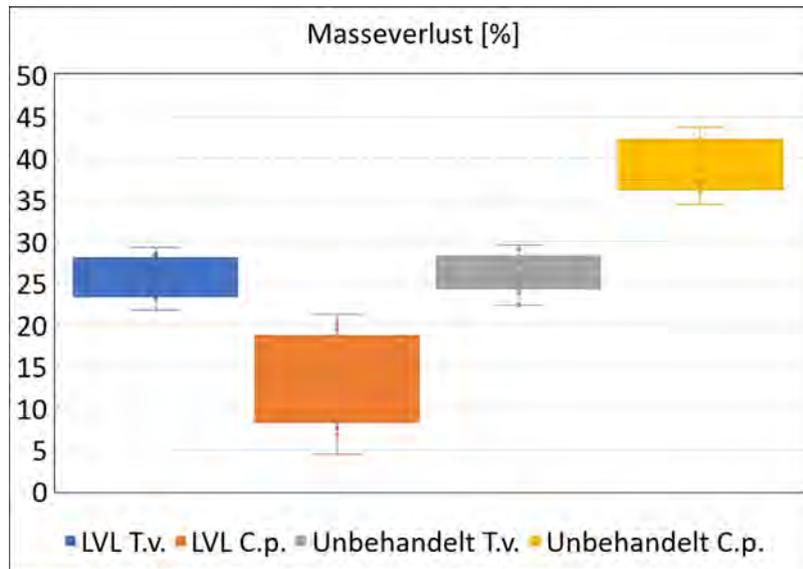


Abbildung 33: Versuch #1.1; in Anlehnung an EN 113-2, Masseverlust von zementimprägnierten Buchen-LVL-Prüfkörpern nach 16 Wochen Inkubation mit Weißfäule (*Trametes versicolor*, T.v.) und Braunfäule (*Coniophora puteana*, C.p).

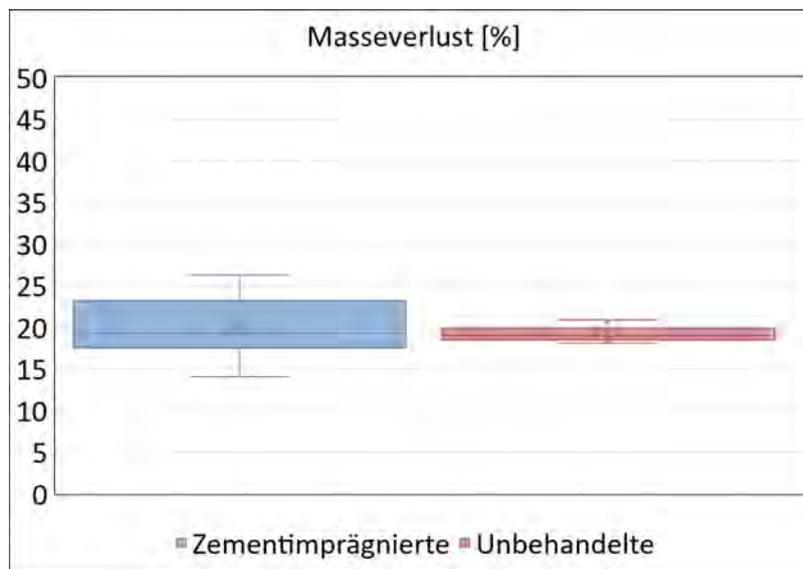


Abbildung 34: Versuch #2.1; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2, Masseverlust von zementimprägnierten Buchenprüfkörpern (Furniere) exponiert in unsteriler Erde.

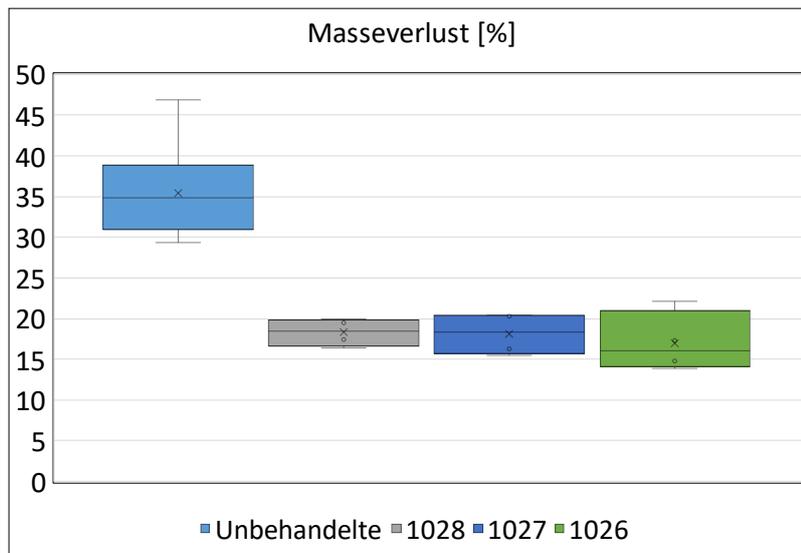


Abbildung 35: Versuch #2.2; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2, Masseverlust von zementimprägnierten (1026, 1027, 1028) Buchenprüfkörpern (Furniere), exponiert in unsteriler Erde

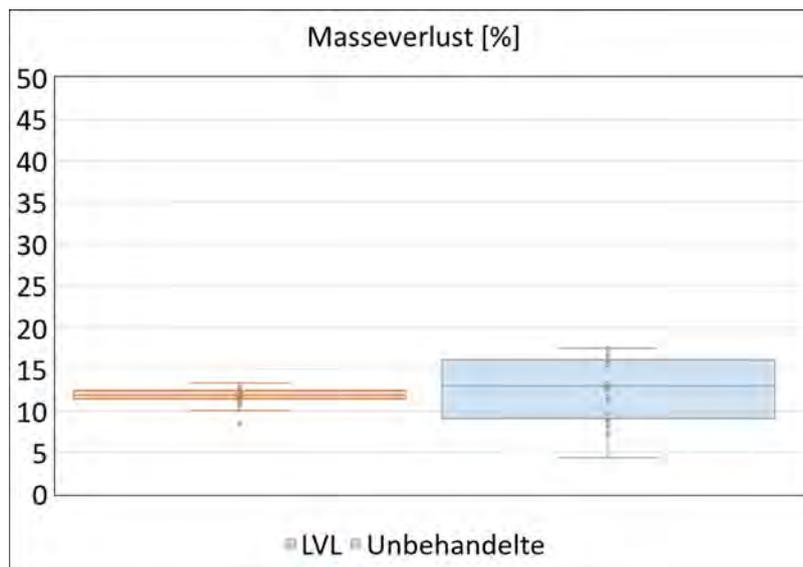


Abbildung 36: Versuch #2.3; in Anlehnung an CEN/TS 15083-2, Masseverlust von zementimprägnierten Buchen-LVL-Prüfkörpern exponiert in unsteriler Erde nach 24 Wochen.

Zur Beurteilung der Effektivität der Zementimprägnierung gegenüber verschiedenen Fäuleerregern war - unter Einbeziehung der in den Laborprüfungen hervorgerufenen Masseverluste - eine bildgebende Betrachtung der Prüfkörper nötig, um deren innere

Integrität zu beurteilen. Hierzu stehen verschiedene bildgebende Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Zu den in der Holzforschung wichtigsten zählen die gängigen und seit langem etablierten Verfahren der Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie in der jüngeren Vergangenheit auch die Mikro-Computertomographie (μ CT) (Koddenberg et al. 2019). Der große Vorteil der REM besteht in der Vergrößerung und folglich der Detaillierbarkeit der inneren Struktur der Prüfkörper, weshalb diese Methode im Rahmen dieser Untersuchung verwendet wurde. Es sollte eine elektronenmikroskopische Analyse zementimprägnierter Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörper mittels REM erfolgen, um zu bewerten, welchen Einfluss die Zementimprägnierung auf die Dauerhaftigkeit des Materials hat, inwieweit dies die innere Integrität der Prüfkörper beeinflusst und ob sich charakteristische Merkmale der verschiedenen Fäulnisformen visualisieren lassen, um die Ergebnisse der Laborprüfungen visuell zu bestätigen. Tabelle 15 zeigt die Masseverluste der Prüfkörper durch die drei Fäuleerreger. Angegeben ist sowohl der mittlere Masseverlust der jeweiligen Prüfkörperkollektive als auch der Masseverlust der für die elektronenmikroskopische Analyse verwendeten Prüfkörper. Zu beachten ist dabei, dass insbesondere bei den Prüfkörpern aus Furnierschichtholz, welche den Basidiomyceten ausgesetzt waren, der Masseverlust der für die elektronenmikroskopische Analyse verwendeten Prüfkörper deutlich vom mittleren Masseverlust abweicht. Diese beiden Prüfkörper wurden daher nicht als charakteristisch für das jeweilige Prüfkörperkollektiv angesehen. Wie zu erwarten, waren die Masseverluste der unbehandelten Vollholzprüfkörper am höchsten, wobei der Masseverlust durch *C. puteana* im Vergleich zu jenen hervorgerufen durch *T. versicolor* und Moderfäule um etwa 10 % höher war. Die Zementimprägnierung von Furnierschichtholz war nicht effektiv, insbesondere durch *C. puteana* wurden hohe Masseverluste hervorgerufen.

Tabelle 15: Masseverluste der für die rasterelektronenmikroskopische (REM) Analyse verwendeten Prüfkörper aus unbehandeltem Buchen-Vollholz und zementimprägniertem Buchen-Furnierschichtholz (LVL). Abkürzungen: C.p.= *Coniophora puteana*, T.v.= *Trametes versicolor*.

Prüfkörperart	Behandlungsart	Masseverlust (*/**) in %		
		C.p.	T.v.	Moderfäule
Vollholz	unbehandelte	38,9 / 36,2	26,2 / 27,6	38,9 / 36,2
Furnierschichtholz	zementimprägnierte	26,1 / 21,8	13,8 / 4,5	11,7 / 12,0

* Mittlerer Masseverlust des jeweiligen Prüfkörperkollektivs

** Masseverlust der für die elektronenmikroskopische Analyse verwendeten Prüfkörper

Zur Referenzansicht diente ein unbehandelter und nicht abgebauter Buchen-Vollholz-Prüfkörper, dessen Integrität wie erwartet unbeeinflusst war (Abbildung 37).

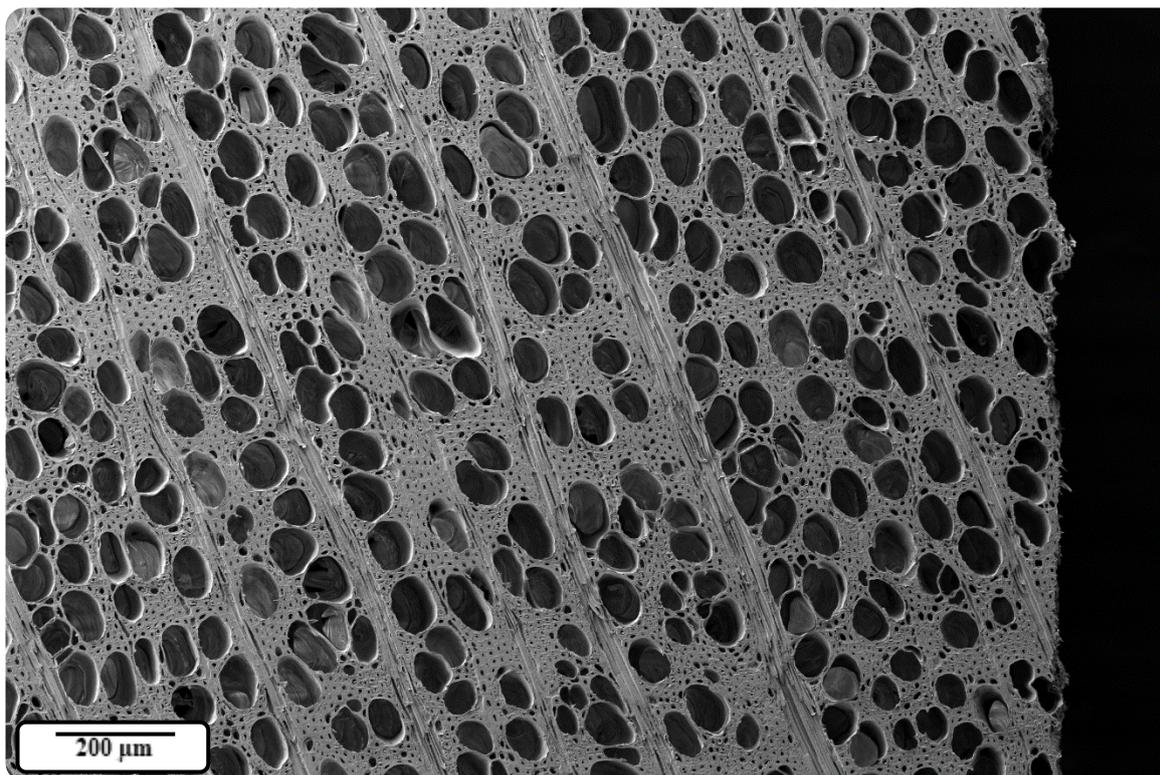


Abbildung 37: REM-Aufnahme eines ungetriebenen und nicht abgebauten Buchen-Vollholz-Prüfkörpers

Abbildung 38 zeigt Aufnahmen der ungetriebenen Buchen-Vollholz-Prüfkörper in verschiedenen Vergrößerungen, welche den Fäuleerregern *C. puteana* (Abbildung

38, a - c), *T. versicolor* (Abbildung 38 d-f) sowie Moderfäule (Abbildung 38 g-i) ausgesetzt waren. Im Vergleich zum unbehandelten, nicht abgebauten Prüfkörper (Abbildung 37) war deutlich erkennbar, dass die Integrität der mit den beiden Basidiomyceten inokulierten Prüfkörper stark in Mitleidenschaft gezogen wurde. Da es sich bei *C. puteana* um einen Braunfäuleerreger handelt, ist der Integritätsverlust darauf zurückzuführen, dass sowohl die Cellulose als auch die Hemicellulosen der Holzzellwände teilweise abgebaut worden sind, wohingegen das Lignin überwiegend unverändert bzw. modifiziert zurückblieb (Eaton and Hale, 1993). Der Abbau der Cellulose und Hemicellulosen geht mit einem Festigkeitsverlust einher, durch welchen die stark eingeknickten Zellwände zu erklären waren (Abbildung 38, b und c, rote Markierungen). Diese entstehen während der Probenpräparation durch die auf den Prüfkörper Druck ausübende Klinge des Mikrotoms. Der hohe Festigkeitsverlust wird zudem durch den hohen Masseverlust deutlich (Tabelle 15). Auch an dem mit *T. versicolor* inkubierten Prüfkörpern war der gleiche Effekt des Integritätsverlustes erkennbar. Da es sich bei *T. versicolor* um einen Weißfäuleerreger handelt, wurde neben der Cellulose und den Hemicellulosen ebenfalls das Lignin abgebaut (Timell et al. 1990). Allgemein wird zwischen zwei Formen der Weißfäule unterschieden – die selektive Delignifizierung und die simultane Fäule (Schwarze and Engels 2011). Bei der selektiven Delignifizierung werden im Frühstadium der Holzersetzung das Lignin und die Hemicellulosen stärker abgebaut als die Cellulose (Schmidt 1994). Im Gegensatz dazu werden bei der simultanen Weißfäule die Polysaccharide und das Lignin annähernd gleichzeitig abgebaut (Schmidt 1994). Bei *T. versicolor* handelt es sich um einen Weißfäuleerreger, welcher eine simultane Fäule verursacht (Schmidt 1994; Schwarze and Engels 2011) wodurch die Löcher in den Holzstrahlen zu erklären waren (Abbildung 38, e und f, gelbe Markierungen). Beide Basidiomyceten können zudem dadurch charakterisiert werden, dass deren Hyphen zumeist in den Zelllumina wachsen (Liese 1964; Schmidt 1994). Diese Eigenschaft konnte auch anhand der REM-Aufnahmen beobachtet werden (Abbildung 38, c und f, grüne Markierungen). Die Integrität des Prüfkörpers, welcher Moderfäule ausgesetzt wurde, wurde lediglich im Randbereich beeinflusst (Abbildung 38, g und h, blaue Markierungen). Ein charakteristisches Merkmal des Holzabbaus durch Moderfäule war in Abbildung 38 i anhand der Löcher in den Zellwänden zu erkennen. Dabei handelte es sich um sogenannte Kavernen, welche durch das oszillatorische Wachstum der Mikrohyphen von Moderfäulepilzen innerhalb der Sekundärwand entstehen. Ausgehend vom Lumen wachsen die Hyphen bevorzugt in der Sekundärwand und innerhalb dieser parallel zu den

Mikrofibrillen. Die von den Hyphen ausgeschiedenen Enzyme bewirken den Abbau aller Zellwandkomponenten in unmittelbarer Nähe zum Ausscheidungsort, wodurch die Kavernen entstehen (Liese 1964). Durch den intensiven Celluloseabbau nimmt bei geringem Gewichtsverlust die Holzfestigkeit und die Dimensionsstabilität stark ab.

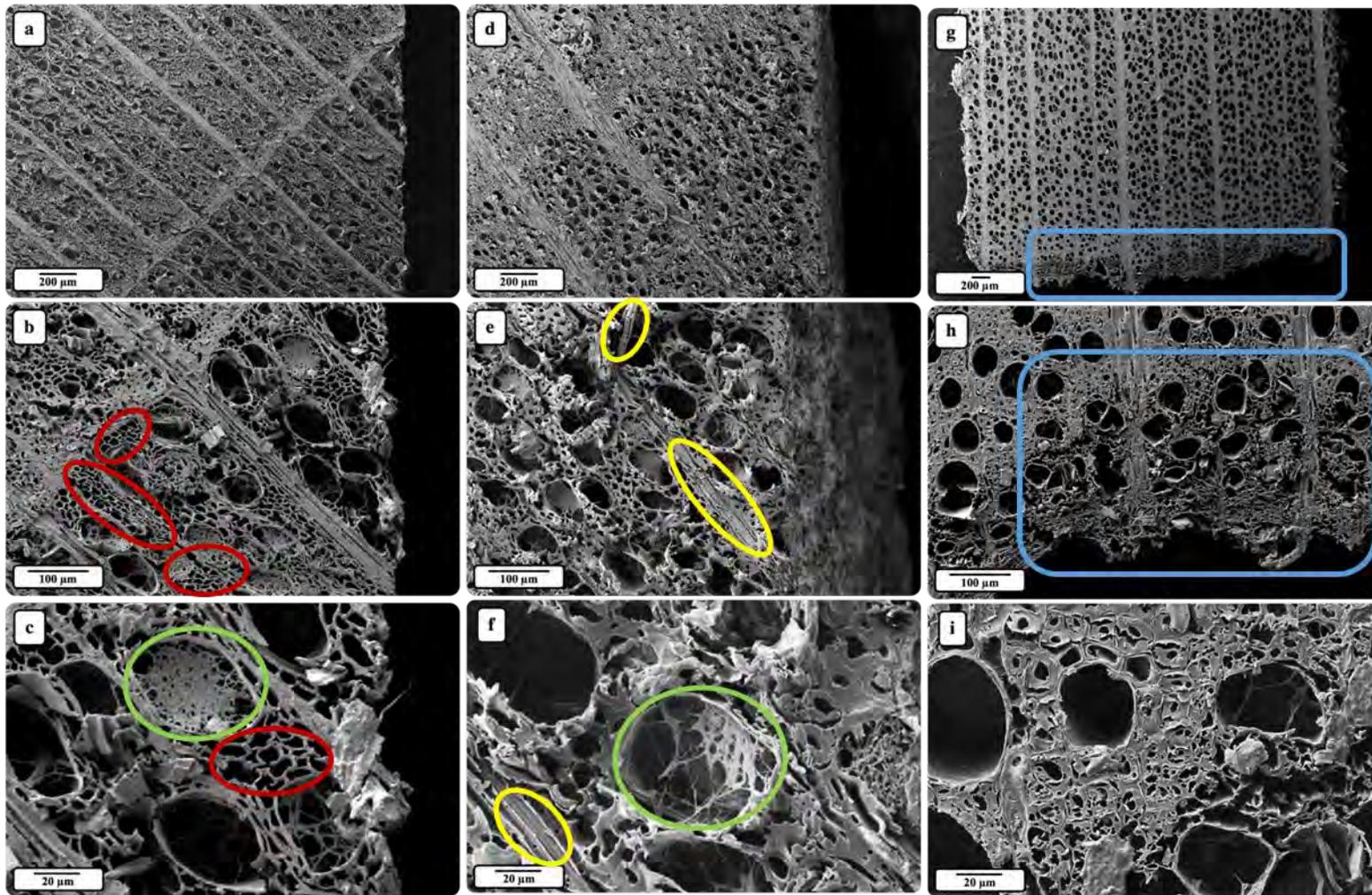


Abbildung 38: REM-Aufnahmen unbehandelter Buchen-Vollholz-Prüfkörper in verschiedenen Vergrößerungen, welche den Fäuleerregern *Coniophora puteana* (a - c), *Trametes versicolor* (d - f) sowie Moderfäule (g - i) ausgesetzt waren

Als Referenz diente ein zementimprägnierter und nicht abgebauter Prüfkörper aus Buchen-Furnierschichtholz (Abbildung 39). Die Klebefugen zwischen den einzelnen Furnierlagen waren aufgrund des Graustufenbildes des REM in der Übersicht schwer erkennbar und wurden deshalb markiert (Abbildung 39 a, rote Markierungen).

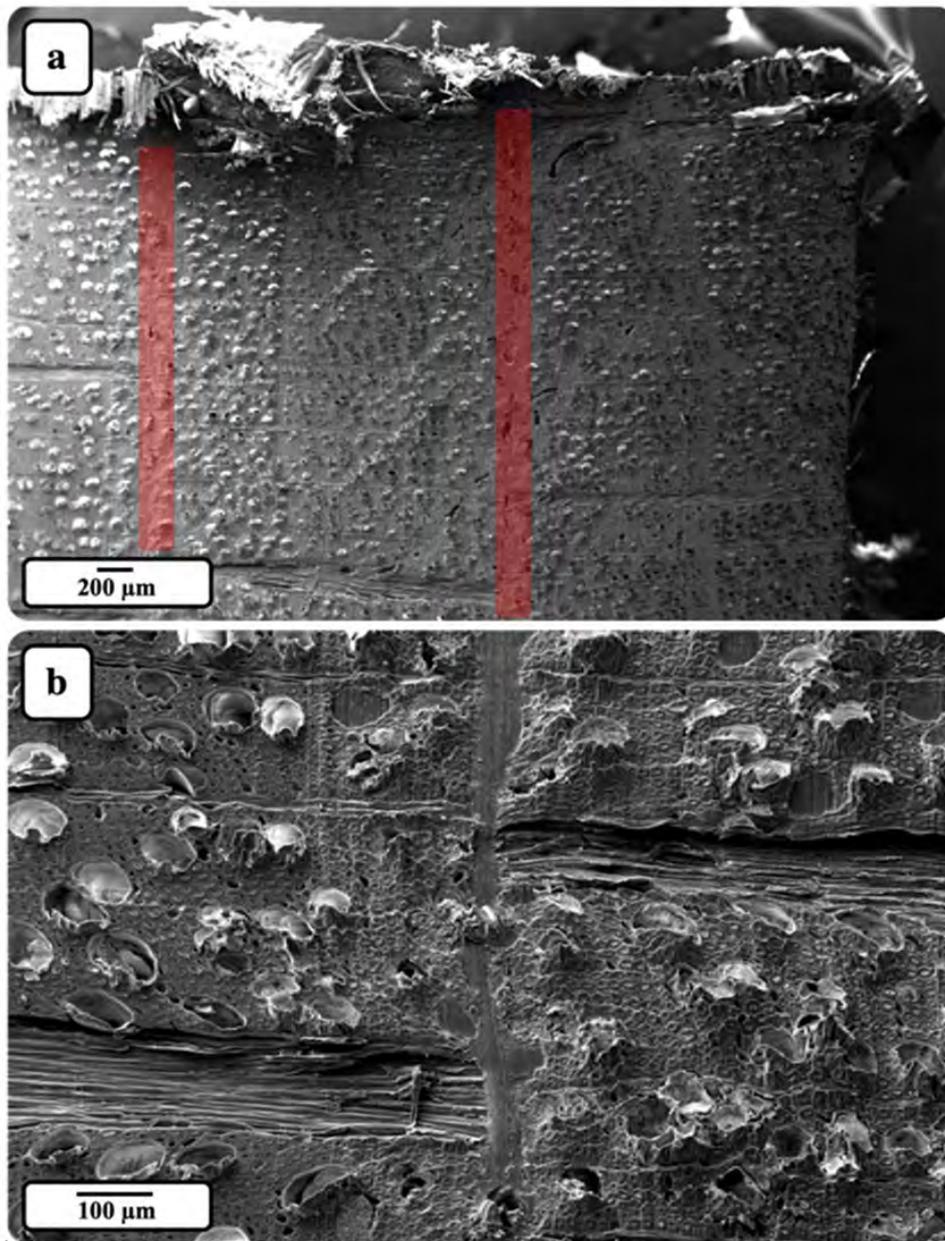


Abbildung 39: REM - Aufnahmen eines zementimprägnierten und nicht abgebauten Prüfkörpers aus Furnierschichtholz in verschiedenen Vergrößerungen.

Des Weiteren war in den Aufnahmen zu erkennen, dass aufgrund der Zementimprägnierung die Präparation schwierig war, da durch die Härte des Zements die Klinge des Mikrotoms die Prüfkörper nicht ohne Schnittartefakte zu erzeugen waren.

Abbildung 40 zeigt Aufnahmen der zementimprägnierten Prüfkörper aus Furnierschichtholz in verschiedenen Vergrößerungen, welche den Fäuleerregern *C. puteana* (Abbildung 40, a - c), *T. versicolor* (Abbildung 40, d - f) sowie Moderfäule (Abbildung 40, g - i) ausgesetzt waren. Die Ineffektivität der Zementimprägnierung wurde insbesondere bei den Aufnahmen des Prüfkörpers deutlich, welcher *C. puteana* ausgesetzt wurde. Im Randbereich des Prüfkörpers war der Abbau durch den Prüfpilz deutlich sichtbar, wodurch der hohe Masseverlust (Tabelle 15) visuell bestätigt wurde. Wie beim unbehandelten Prüfkörper waren auch bei den Tracheiden im Randbereich eingeknickte Zellwände sichtbar, welche auf den Celluloseabbau durch Braunfäule zurückzuführen waren (Abbildung 40, c). Bei den innerhalb des Prüfkörpers auftretenden Rissen war nicht klar, ob diese während des Herstellungsprozesses, der Laborprüfung oder der Trocknung im Anschluss an die Prüfkörperpräparation für das REM entstanden sind.

Da der Masseverlust des Prüfkörpers, welcher *T. versicolor* ausgesetzt war, sehr gering war und nicht als charakteristisch für das Prüfkörperkollektiv anzusehen war, war auch die Integrität des Prüfkörpers im äußeren Bereich nicht sichtbar beeinflusst (Abbildung 40, d und e). Bei der Detailaufnahme der Holzstrahlen ließen sich Löcher in den Holzstrahlen visualisieren, welche auf die simultane Weißfäule zurückzuführen waren (Abbildung 40, f). Es ist davon auszugehen, dass bei Betrachtung eines Prüfkörpers mit einem höheren Masseverlust im Bereich des Mittelwerts des Prüfkörperkollektivs auch der Einfluss auf die Prüfkörperintegrität im Randbereich besser sichtbar würde.

Im Randbereich des Prüfkörpers, welcher Moderfäule ausgesetzt war, ließ sich der Integritätsverlust deutlich abbilden. Rechts der im Randbereich sichtbaren Klebefuge (Abbildung 40, g - i) war zu erkennen, dass scheinbar ein großer Bereich einer zuvor vorhandenen Furnierschicht nahezu komplett abgebaut wurde. Entsprechend hoch waren auch die Masseverluste (Tabelle 15).

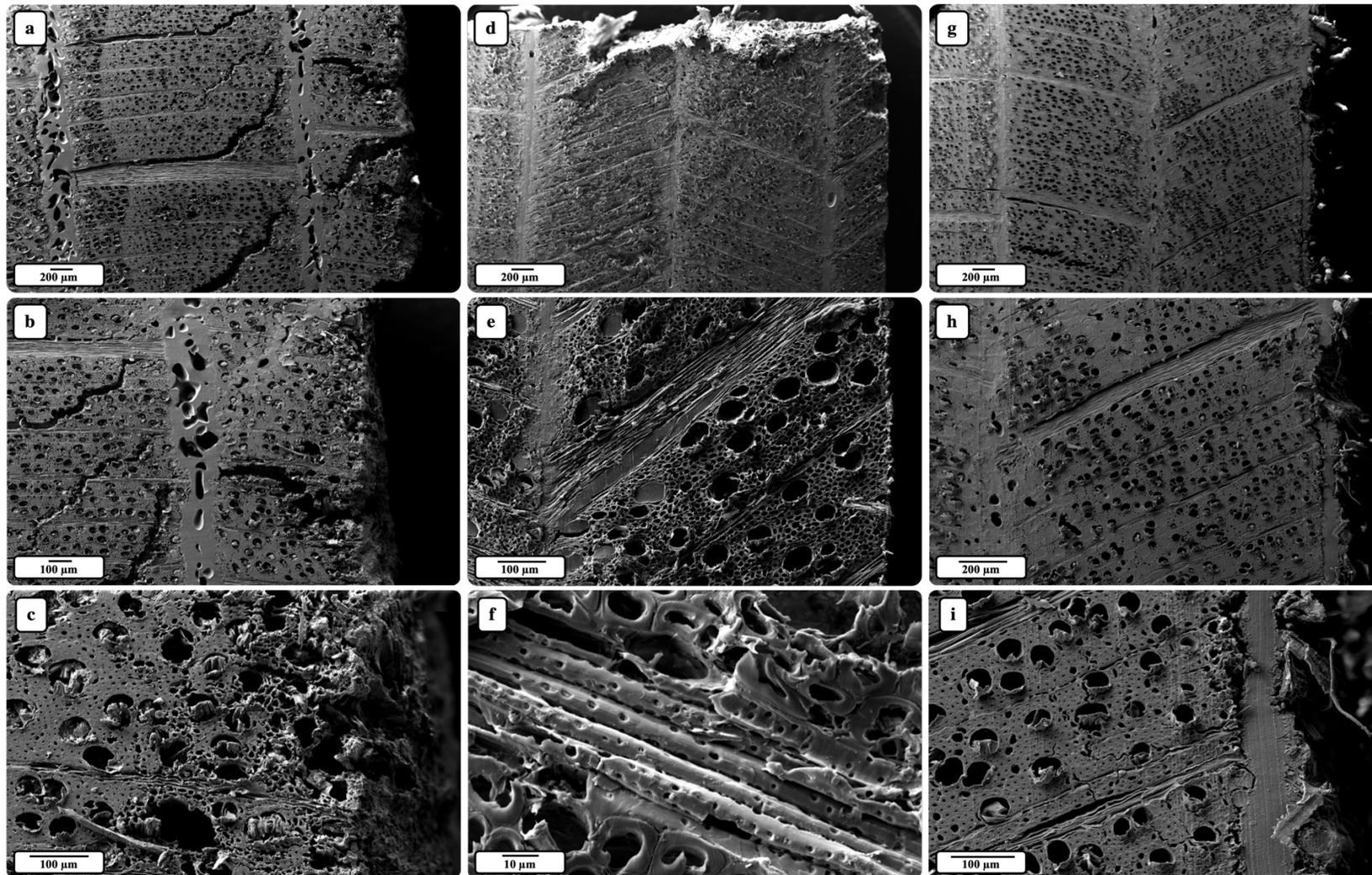


Abbildung 40: REM-Aufnahmen zementimprägnierter Prüfkörper in verschiedenen Vergrößerungen, welche den Fäuleerregern *C. puteana* (a-c), *T. versicolor* (d-f) sowie Moderfäule (g-i) ausgesetzt waren.

Der Einfluss der Zementimprägnierung auf den Befall durch die Fäuleerreger ließ sich unter Einbeziehung der Masseverluste aus den Laborversuchen #1.2 und #2.3 anhand der Beeinflussung der Prüfkörperintegrität nachvollziehen. Des Weiteren war die Abbildung charakteristischer Merkmale der verschiedenen Fäulnisformen möglich. Zusammenfassend ließ sich auch visuell feststellen, dass die Zementimprägnierung von Furnierschichtholz nicht effektiv war und deshalb nicht als Behandlungsmethode für Bahnschwellen aus Buchen-Furnierschichtholz geeignet ist.

2.5 Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen

2.5.1 Lochleibung Systemversuch

In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist ein exemplarisches Ergebnis eines Versuches dargestellt. Aus diesen Daten wurden die Maximalkraft und die Nachgiebigkeit des jeweiligen Schwellenmaterials ermittelt und in Tabelle 16 zusammengefasst. Da bei den vorliegenden Proben die Holzfeuchte unterschiedlich war, wurden die Ergebnisse nach EN 384 (2010) korrigiert. Dadurch können die ermittelten Werte besser miteinander verglichen werden.

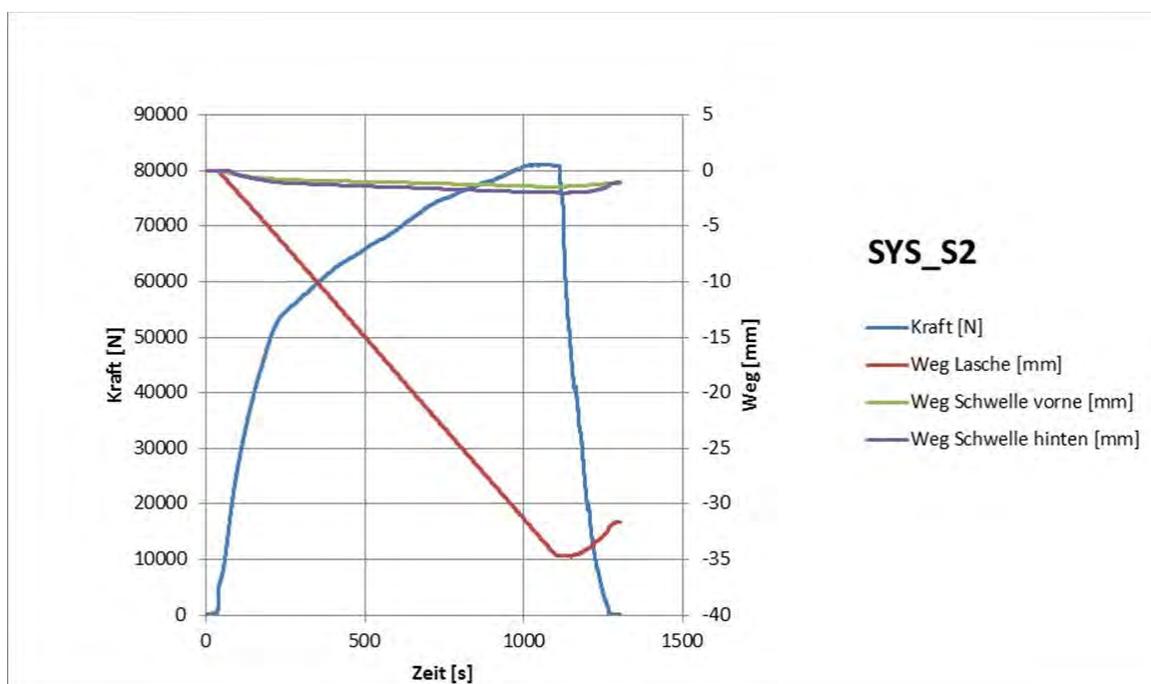


Abbildung 41: Exemplarisches Ergebnis eines Lochlaibungs-Versuches



Abbildung 42: Resultierendes "Schraubenloch" und Schraube nach einem Lochleibungsversuch

Wie in Tabelle 16 ersichtlich ist, erreicht die Lochleibungsfestigkeit von Schwellenschrauben in Buchenfurnierschichtholz ähnliche Festigkeiten wie in marktüblichen kreosotimprägnierten Buchenvollholzswellen. Für differenziertere Aussagen müssten weitere Versuche durchgeführt werden.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Lochleibungsversuche. Zur Vergleichbarkeit wurden die ermittelten Werte nach Eurocode und Norm korrigiert.

	Kreosot-Schwelle			LVL-Schwelle
	S2	S3	S4	
Maximale Kraft [kN]	81	70	60	86
Maximale Kraft [kN]- k_{mod} (EC5)	90	78	67	86
maximale Kraft [kN]-EN384:2016	103	86	76	77
Nachgiebigkeit [mm/N]	6,30E-05	2,90E-05	3,90E-05	2,30E-05
Holzfeuchte [%]	20,9	19,6	21,1	8,6

2.5.2 Schraubenauszugsfestigkeit

In Abbildung 43 zeigt alle aufgezeichneten Messwerte als Funktion der Zeit. Aus diesen Daten wird die maximale Kraft und die Nachgiebigkeit des jeweiligen Schwellenmaterials ermittelt und in Tabelle 17 zusammengefasst. Da bei den vorliegenden Proben die Holzfeuchte unterschiedlich war, wurden die Ergebnisse nach ÖNORM B 1995-1-1 (2019)

und EN 384 (2016) korrigiert. Dadurch können die ermittelten Werte besser miteinander verglichen werden. Die Kraft (blaue Kurve) lässt den durchgeführten Versuch mit obiger Erläuterung vergleichen. Im zweiten Anstieg der Kraft beginnt die Verschiebung der Ausziehhülse ab etwa 400 s Versuchsdauer überproportional zu wachsen. In diesem Bereich beginnt das Versagen der Verbindung

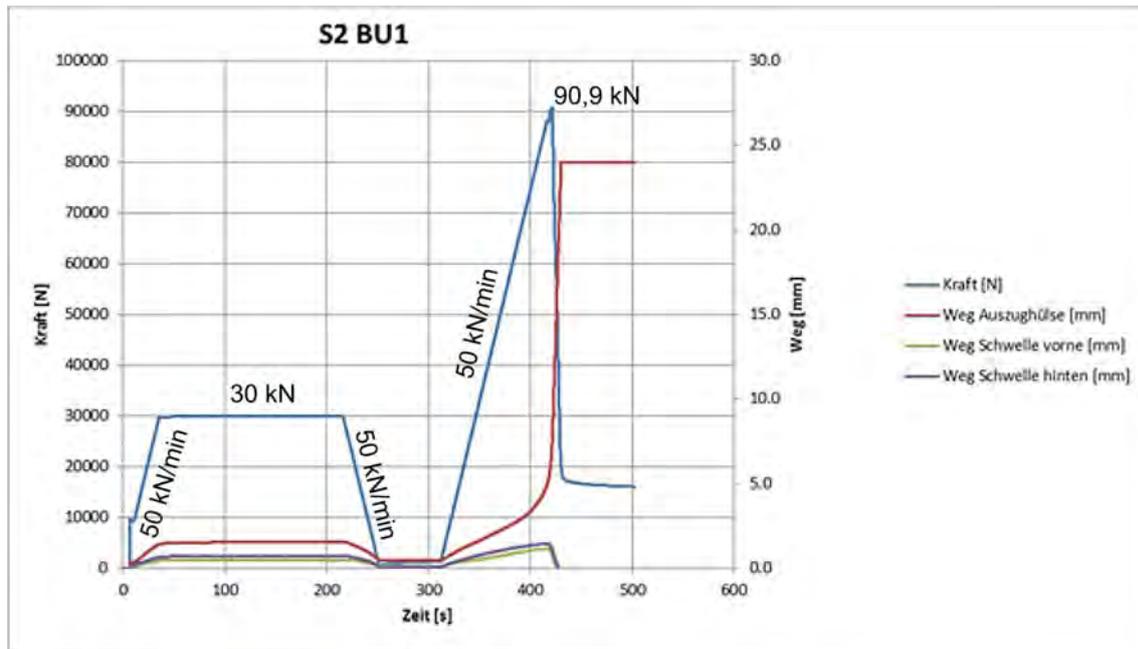


Abbildung 43: Exemplarische Schraubenauszugskraft einer kreosotimprägnierten Buchenvollholzwelle über die Zeit

In Abbildung 44 wurden die Verschiebungen der Wegaufnehmer als Funktion der Kraft aufgetragen. Die beiden Verschiebungen der Schwelle beschreiben zwar ähnliche Kurven, unterscheiden sich jedoch in ihren Beträgen. Das Schwellenstück scheint sich also geringfügig verdreht zu haben. Die repräsentative Verschiebung des Bereichs der eingebauten Schraube kann als Mittelwert der beiden Schwellenverschiebungen angenommen werden, da das Schraubenloch mittig gebohrt wurde.



Abbildung 44: Exemplarische Schraubenverschiebung einer kreosotimprägnierten Buchenvollholzschwelle als Funktion der Kraft

Um die Nachgiebigkeit der Verbindung zu bestimmen, ist es zweckmäßig, die relative Verschiebung der Ausziehhülse zur oberen Fläche der Schwelle zu ermitteln. Die Relativverschiebung u_r wird durch die Subtraktion des Mittelwerts der beiden Verschiebungen $u_{s,v}$ und $u_{s,h}$ der oberen Schwellenkanten von der Verschiebung u_H der Ausziehhülse berechnet. Durch den Mittelwert der gemessenen Schwellenverschiebung wird die Verschiebung in Schwellenmitte berechnet.

$$u_r = u_H - \frac{u_{s,v} + u_{s,h}}{2}$$

Die Ermittlung der Nachgiebigkeit bzw. der Steifigkeit erfolgt im Regelfall bei der zweiten Belastung des Prüfkörpers. Ein Bereich mit linearer Steigung der Relativverschiebung u_r bei linear steigender Kraft wird als Grundlage für eine lineare Regression, wie in Abbildung 45 und Abbildung 46 ersichtlich, gewählt.

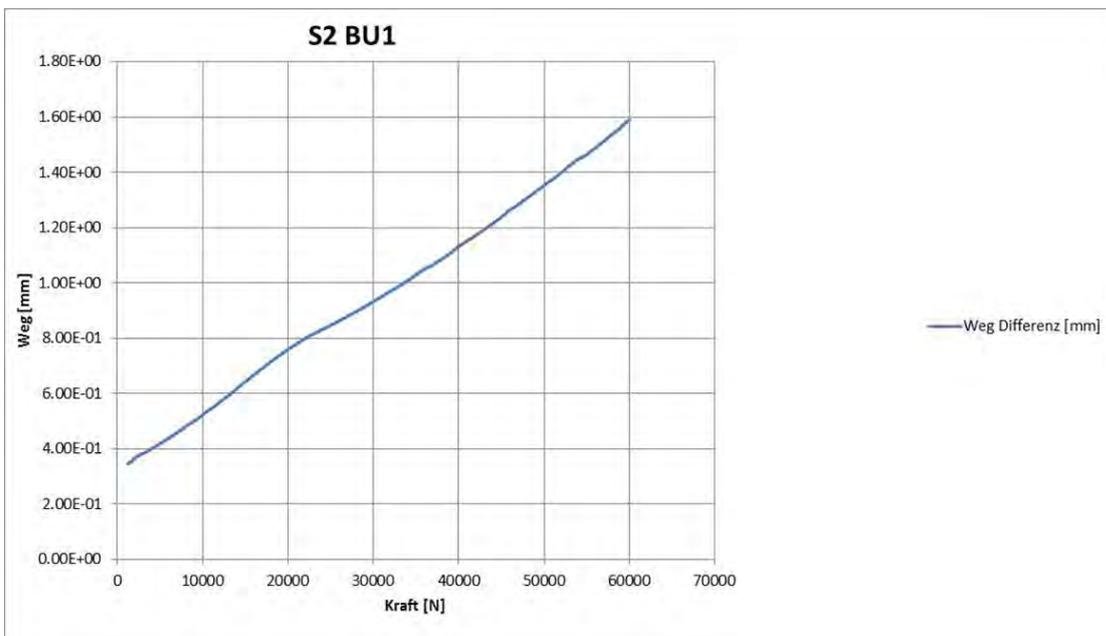


Abbildung 45: Schraubenrelativverschiebung einer kreosotimprägnierten Buchenvollholzschwelle als Funktion der Kraft

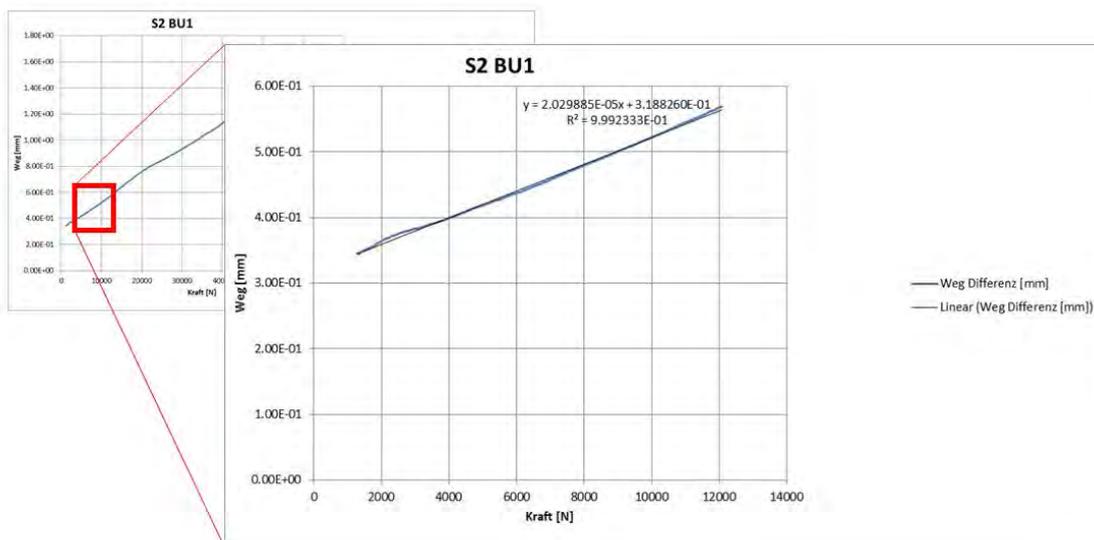


Abbildung 46: Schraubenauszugsnachgiebigkeit einer kreosotimprägnierten Buchenvollholzschwelle als Funktion der Kraft

Die erhaltene Funktion, die eine Verschiebung als Funktion der Kraft ausdrückt, entspricht demzufolge

$$u_r = nF + a$$

wobei der Parameter n der Nachgiebigkeit mit der Dimension u/F , also [mm/N] entspricht.
 Die Steifigkeit c entspricht dem Kehrwert der Nachgiebigkeit mit

$$c = \frac{1}{n}$$

und hat somit die Dimension F/u , also [N/mm].

Ähnlich zu den Lochleibungsversuchen erreichen die beiden Schwellentypen ähnlich hohe Werte. Zur eindeutigen Aussage müssten weitere Versuche durchgeführt werden.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schraubenauszugsversuche. Zur Vergleichbarkeit wurden die ermittelten Werte nach EN 384 korrigiert

	Kreosot-Schwelle			LVL-Schwelle
	S2	S3	S4	
Maximale Kraft [kN]	91	89	73	112
Maximale Kraft [kN]- k_{mod} (EC5)	101	98	81	112
maximale Kraft [kN]-EN384:2016	103	110	91	100
Nachgiebigkeit [mm/N]	2,03E-05	1,08E-05	1,81E-05	6,76E-06
Holzfeuchte [%]	16,6	20,1	20,4	8,6

2.5.3 Zweischnittige Lochleibungsfestigkeit

Es wurden jeweils zwei Versuche der Kreosot- (V1/V2) und LVL - Schwellen (V3/V4) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 grafisch dargestellt. In Abbildung 48 ist ein typisches Verformungsbild eines Prüfkörpers abgebildet. Die ermittelten Werte der einzelnen Schwellen sind in Tabelle 18 aufgelistet.

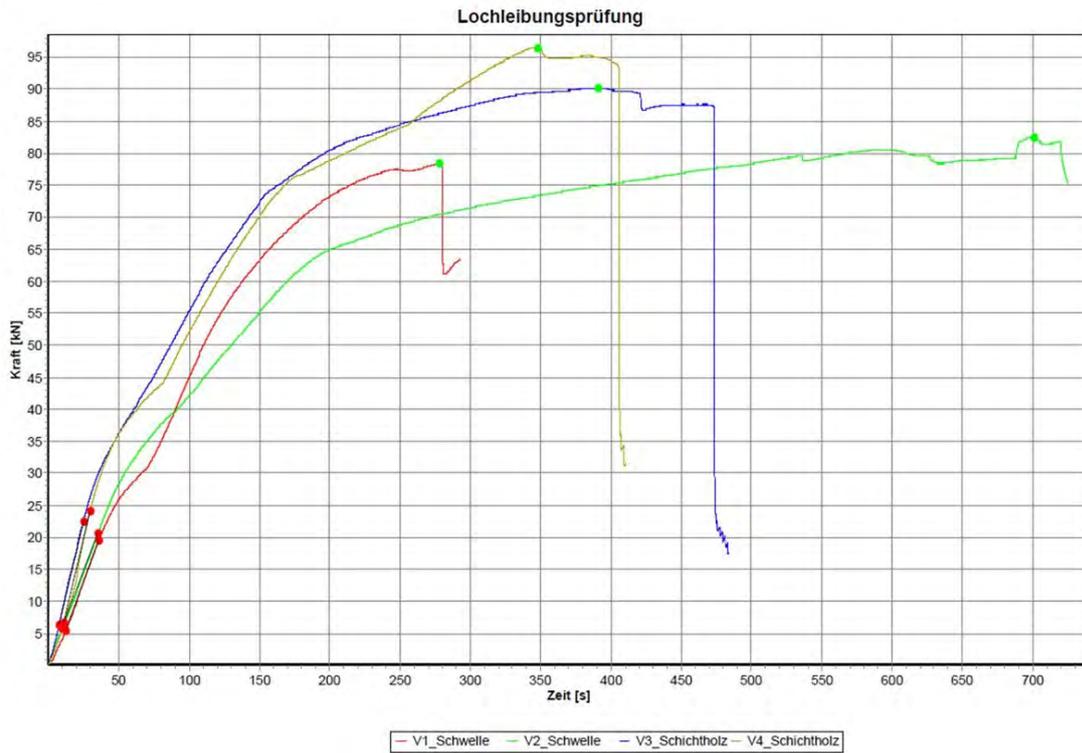


Abbildung 47: Kraftverlauf der zweischnittigen Lochleibungsversuche

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der zweischnittigen Lochleibungsfestigkeit

	Kreosot-Schwelle		LVL-Schwelle	
	V1	V2	V3	V4
Maximale Kraft [kN]	79	83	90	97
Nachgiebigkeit [mm/N]	3,20E-05	3,10E-05	2,30E-05	2,40E-06



Abbildung 48: Plastische Schwellenschraubendeformation bei einem zweischnittigen Lochleibungsversuch

2.6 Zusammenfassung zur Zementimprägnierung von Buchenfurnierschichtholz

Die durchgeführten Untersuchungen zur Verwendbarkeit von zementimprägnierten Furnierschichtholz für Bahnschwellen zeigten die Machbarkeit einer Zementimprägnierung von Einzelfurniere aus Buchenschäl furnier sowie dessen Eignung zur Verklebung als Schichtholzquerschnitte auf. Die Verwendung von Furnierschichtholz aus Buche bietet neben dem Vorteil eines qualitätsgesicherten Rohproduktbezugs auch ansprechende mechanische Eigenschaften der Schwellenschraubentragfähigkeit, welche in den durchgeführten Vorversuchen auch jeweils über den Werten des marktüblichen Vollholzproduktes liegt. Jedoch konnte bei der Zementimprägnierung von mehrschichtigen Furnierschichtholzplatten insbesondere in innenliegenden Querschnittsbereichen nur eine unzureichende Zementaufnahme festgestellt werden. Ebenso zeigten sich bei der Durchführung der Dauerhaftigkeitsversuche nur eine unzureichende Verbesserung der Dauerhaftigkeit gegenüber biotischem Abbau. In Prüfungen mit Basidiomyceten-Reinkulturen zeigte sich, dass die Dauerhaftigkeit von Buchenfurnieren und Buchenfurnierschichtholz durch eine Zementimprägnierung nur

geringfügig erhöht wurde. In Prüfungen mit unsteriler Erde konnte keine Dauerhaftigkeitserhöhung von Buchenfurnieren und Buchen-LVL gegenüber Moderfäule und anderen bodenbewohnenden Mikroorganismen durch eine Zementimprägnierung nachgewiesen werden. Die Imprägnierung von Buchenholz mit Zement – weder in Form von Furnier oder Furnierschichtholz – hat zu keiner langfristigen Dauerhaftigkeitserhöhung geführt, womit ein Einsatz als Schutzmittel für Bahnschwellen gegen biotischen Abbau ausgeschlossen ist.

3 IMPRÄGNIERUNG VON BAHNSCHWELLEN AUS BUCHENFURNIERSCHICHTHOLZ MIT KUPFERBASIERTEN HOLZSCHUTZMITTELN

3.1 Untersuchungen an Halbschwellen aus Buchenfurnierschichtholz

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zur Wirksamkeit einer Zementimprägnierung auf die Dauerhaftigkeit von Furnierschichtholzbauteilen aus Buche wurden in weiterer Folge Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz auf die Eignung für ein zweistufiges Imprägnierverfahren nach ÖBB-Standard als Kombination eines wässrigen, Kupfer-amin-basiertem Holzschutzmittels (Schutzmittel 1) mit einem öligen-kupferbasiertem Holzschutzmittel (Schutzmittel 2) untersucht. Die Eignung als Schwellenmaterial soll hierbei hauptsächlich experimentell untersucht werden. Die wohl markantesten Unterschiede zu herkömmlichen Buchenvollholzschwellen sind die vorhandenen Klebefugen, die die einzelnen Furnierlagen aus ca. 3 mm starkem Buchenholz verbinden. Um das Tränkungsverhalten des Buchenfurnierschichtholzes aus unidirektional gerichteten Einzelfurnierlagen zu untersuchen, wurden Prüfkörper mit dem Regelquerschnitt einer Holzschwelle hergestellt und gemäß den Vorgaben der ÖBB spanend bearbeitet und imprägniert. An diesen Prüfkörpern wurden Analysen zur Wirkstoffkonzentration sowie Dauerhaftigkeitsversuche angestellt, um den Widerstand gegen biologische Angriffe zu evaluieren.

In diesem Abschnitt werden, ausgehend von der Herstellung und Präparation der Prüfkörper, die durchgeführten Versuche beschrieben und die Ergebnisse dargestellt und erläutert. Der Bericht wird mit einer Zusammenfassung und Beurteilung der Resultate und der aufgetretenen Probleme, sowie einem Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten auf diesem Gebiet, abgeschlossen.

3.1.1 Herstellung der Halbschwellen

Für die geplanten Dauerhaftigkeitsversuche und mechanische Charakterisierung wurde eine ganze Holzschwelle als Probendimension definiert. Bei den geplanten Versuchen sollte das Verhalten der Furnierschichtholzschwelle im Zuge eines zweistufigen Imprägnierverfahrens untersucht werden. Aufgrund des Bauholzmangels im Jahr 2021 wurde nach Absprache mit dem Auftraggeber entschieden, die Dimension auf eine

Halbschwelle zu reduzieren. Um die Mindestanzahl (drei Probekörper) zu erreichen, wurden handelsübliche Furnierschichtholzplatten aus Buche mit 3,2 mm Einzelfurnierstärke (jeweils eine Platte mit 40 mm und 80 mm Stärke) im Normalklima nach EN 325 (2012) bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert, zu 1300 mm langen und 260 mm breiten Plattenstreifen geschnitten und jeweils vier Platten mit einem für tragende Verklebungen von Laubholz in Nutzungsklasse 3 zugelassenem Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Klebstoff (PRF) zu insgesamt sechs 160 mm starken und 1300 mm langen Schwellen blockverklebt (siehe Abbildung 49). Die Liste der zugelassenen Klebstoffe mit geprüftem Klebstoff-Härter-Verhältnis sind im technischen Dossier der Europäischen Technischen Bewertung des Produktes angegeben und ist beim Österreichischen Institut für Bautechnik hinterlegt. Die gefertigten Holzschwellen wurden anschließend mittels eines Polyurethanharzes an einer Hirnholzseite verschlossen. Damit soll der Imprägniervorgang von Vollschwellen abgebildet werden (Abbildung 50). Nach der Verklebung und Versiegelung wurden die gefertigten Halbschwellen bis zur weiteren Verarbeitung wiederum im Normalklima gelagert. Die gerichteten und einseitig versiegelten Halbschwellen wurden für die weitere Bearbeitung und Imprägnierung in ein Imprägnierwerk geliefert. Die Querhobelung für die Applikation der Rippenplatte und die Oberlochbohrungen für die Schwellenschrauben wurden werksseitig gemäß ÖBB-Standard TL 07.09.08 aus dem Jahr 2020 ausgeführt (Abbildung 51). Die Unterlochbohrungen im Bereich der Schwellenmitte zur Erzielung einer vollständigeren Durchtränkung, wurden für die sechs Prüfkörper nur bis zur Mitte des Querschnitts gebohrt, um deren Einfluss bei Furnierschichtholz zu sehen bzw. um eventuelle Unterschiede in der Durchtränkung in Bereichen zu erhalten, die ohne Einfluss dieser Unterlochbohrungen imprägniert wurden.

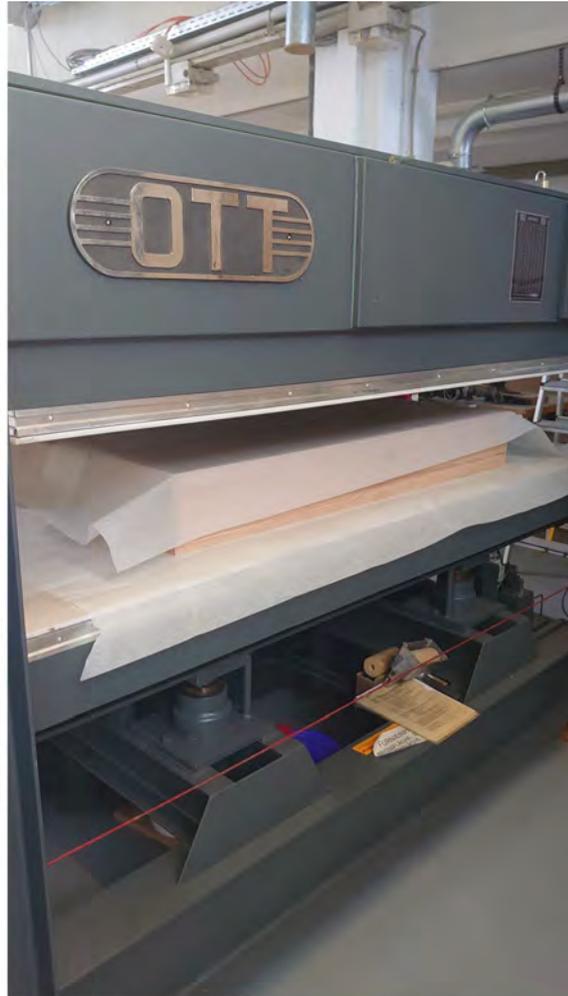


Abbildung 49: Herstellung der Halbschwellen



Abbildung 50: Einseitige Hirnholzversiegelung der Halbschwellen



Abbildung 51: Maschinell bearbeitete Halbschwellen vor der Imprägnierung

3.1.2 Imprägnierung

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen an Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz wurden zur Imprägnierung der Furnierschichtholzhalbschwellen ein zweistufiges Imprägnierverfahren entsprechend den Anweisungen der technischen Lieferbedingungen TL 07.09.09 der ÖBB-Infrastruktur AG aus dem Jahr 2020 gewählt. Dabei wurden die Furnierschichtholzschwellen nach Lagerung im Normklima bei 20 °C und 65 % r.F. und anschließender spanender Bearbeitung im Imprägnierwerk in einer ersten Verfahrensstufe

mit einer 5 %-igen Lösung eines Kupfer-Amin-basiertem Holzschutzmittels (Holzschutzmittel HSM 1) im Volltränkverfahren imprägniert und nach Rücktrocknung auf die Tränkreife für die zweite Imprägnierstufe ($\rho \leq 950 \text{ kg/m}^3$) im Spartränkverfahren durch ein Einfach-Rüping-Verfahren mit einem öligen Holzschutzmittel (Holzschutzmittel HSM 2) getränkt. Die biozide Wirksamkeit des öligen Holzschutzmittels wird durch die Wirkstoffe Kupfer und zwei organische Co-Biozide (ein quaternäres Ammoniumsalz und ein Triazol) erreicht. Die Zusammensetzung der bioziden Inhaltsstoffe ist in Tabelle 19 angegeben.

Tabelle 19: Biozide Inhaltsstoffe der verwendeten Holzschutzmittel

Holzschutzmittel	Primärewirkstoff(e) / Wirkstoffgruppe	Anteil in % (w/w)
HSM 1 wässrig	Bis-(N-Cyclohexyldiazoniumdioxy)-Kupfer („Kupfer-HDO“)	2,80
	Kupfer(II)hydroxidcarbonat (Kupfer)	13,04
HSM 2 ölig	Kupfer-(II)-hydroxid (Kupfer)	4,60
	N,N-didecyl-N-methyl-poly-(oxyethyl)-ammonium propionat (Quat)	4,20
	Cyproconazol (Triazol)	0,15

Um die Imprägnierbarkeit und das Tränkungsverhalten kontrollieren bzw. bewerten zu können, wurden alle Halbschwellen vor und nach jedem Prozessschritt gewogen. Laut Herstellerangaben der Furnierschichtholzplatten beträgt der Klebstoffanteil ca. 6 % (w/w). Um die Aufnahme der jeweiligen Holzschutzmittel dennoch auf die tatsächliche Holzmasse beziehen zu können, wurden der Klebstoffanteil von der ermittelten Ausgangsmasse der Prüfkörper abgezogen, welche unmittelbar vor dem ersten Imprägnierschritt mit HSM 1 ermittelt wurde. In der nachfolgenden Tabelle 20 sind die ermittelten Daten und Ergebnisse vor und nach der wässrigen Imprägnierung mit HSM 1 angegeben.

Tabelle 20: Ermittelte Daten und Ergebnisse der Imprägnierversuche mit Halbschwellen mit HSM 1 (wässrige Lösung). LVL-Materialstärke bezieht sich auf die verwendete Buchenplatte zur Herstellung der Halbschwelle. (Berechnung Aufnahme: Volumen Halbschwelle 0,05408 m³)

Prüfkörper ID	LVL Ausgangsmaterialstärke [mm]	Ausgangsmasse [kg]	Ausgangsmasse korrigiert [kg]	Masse nach Imprägnierung mit HSM1, korrigiert [kg]	Aufnahme HSM1 [kg]	Aufnahme HSM1 [kg/m ³]
1	80	43,0	40,4	77,1	36,7	678,6
2	80	43,6	41,0	77,3	36,3	671,2
3	80	42,8	40,2	76,7	36,5	674,9
4	40	46,3	43,5	79,9	36,4	673,1
5	40	47,3	44,5	80,0	35,5	656,4
6	40	46,5	43,7	79,7	36,0	665,7

Mittelwert der Aufnahme HSM 1 in kg/m³: 670,0 ± 7,9

Auf der Basis von Erfahrungswerten erreichen Volltränkungen von kernfreiem Buchenholz Tränklösungsaufnahmen im Bereich von 650 bis 700 kg/m³. Aber auch bei der Imprägnierung von Buchenschäl furnieren mit Tränklösungen aus Lignin-Formaldehydbestandteilen (Fleckenstein et al. 2018) oder Polyethylenglykoldimethacrylat (Bösing 2022; Krey et al. 2022) wurden Tränklösungsaufnahmen von über 100 % (w/w) ermittelt. Werden diese Werte mit den im Zuge des Imprägniervorganges erzielten Aufnahmen (Tabelle 20) verglichen, kann von einer Volltränkung der Furnierschichtholzswellen mit dem wässrigen Holzschutzmittel HSM 1 ausgegangen werden. Zur Durchführung der zweiten Imprägnierstufe mit Holzschutzmittel 2, muss die Rohdichte ρ (Schwellengewicht) der Furnierschichtholzswellen nach der ersten Imprägnierstufe von $\rho \sim 1481 \text{ kg/m}^3$ auf eine Rohdichte von maximal $\rho \leq 950 \text{ kg/m}^3$ getrocknet werden (ÖBB-Infrastruktur AG 2020). Neben der Tränklösungsaufnahme wurde das Trockenverhalten der Furnierschichtholzswellen als Teil der Untersuchungen aufgenommen, da hier keine Erfahrungswerte vorlagen. Zur Trocknung wurden Furnierschichtholzswellen im Freien unter Dach äquivalent der Vorgehensweise bei handelsüblichen Vollholzswellen aufgestapelt. Nach zehn Wochen Freilufttrocknung erfolgte eine visuelle Inspektion der Prüfkörper hinsichtlich des Rissverhaltens. Die Ergebnisse sind in Abbildung 52 bis Abbildung 54 repräsentativ zusammengefasst. An keiner Klebefuge der Furnierschichtholzplatten wurden Delaminierungsrisse festgestellt. Lediglich an der im Labor hergestellten Blockverklebungsfuge konnten vereinzelt

Delaminierungsrisse festgestellt werden (Abbildung 54). Nach sechsmonatiger Freilufttrocknung betrug die Rohdichte der einstufig imprägnierten Furnierschichtholzschwellen im Mittel $\rho_M = 1156 \text{ kg/m}^3$. Daher wurden die Bahnschwellen in weiterer Folge in den Trockenkammern der TH Rosenheim technisch auf die Tränkreife von $\rho \leq 950 \text{ kg/m}^3$ getrocknet. Nach Trocknung der drei Halbschwellen wurde die Polyurethanharzabdichtung der Hirnholzflächen überarbeitet, um auch bei der zweiten Imprägnierstufe mit HSM 2 das Tränkungsverhalten einer vollständigen Holzschwelle nachbilden zu können.



Abbildung 52: Mit HSM 1 imprägnierte Furnierschichtholzschwellen nach 10-wöchiger Freilufttrocknung

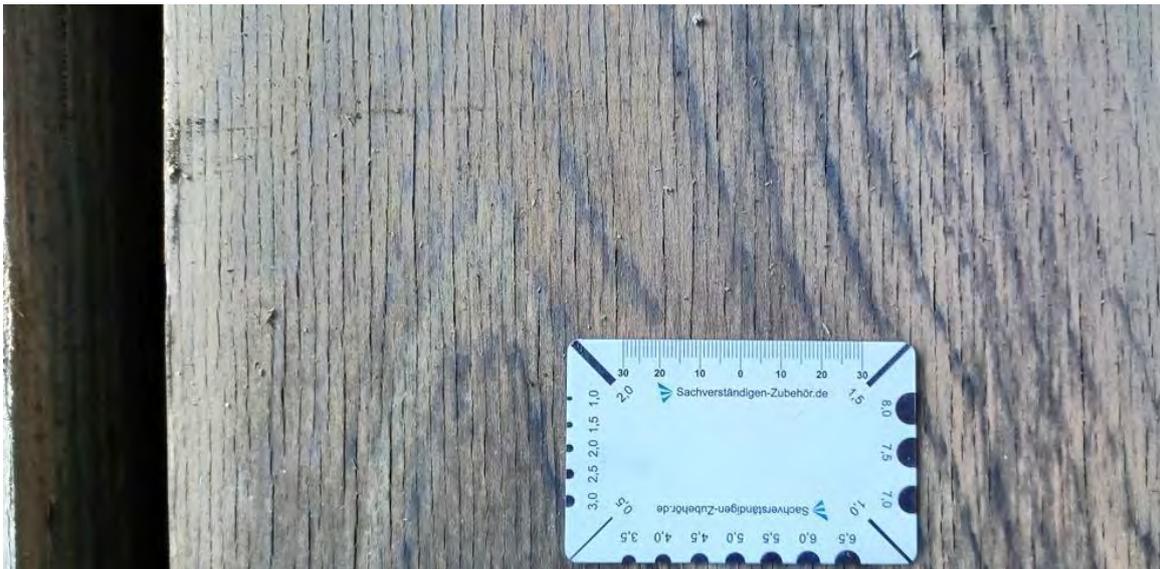


Abbildung 53: Trocknungsrisse einer mit HSM 1 imprägnierten Furnierschichtholzschwelle nach 10-wöchiger Freilufttrocknung



Abbildung 54: Seitenansicht einer mit HSM 1 imprägnierten Furnierschichtholzschwelle aus zwei blockverklebten, 80 mm starken Buchenfurnierschichtholzplatten nach 10-wöchiger Freilufttrocknung mit Delaminierung der Blockfuge

Nach Erreichen der Tränkcreife wurden die bereits in erster Stufe mit HSM 1 imprägnierten drei Prüfkörper in der zweiten Imprägnierstufe mit HSM 2 entsprechend den Vorgaben in den technischen Lieferbedingungen der ÖBB (TL 07.09.09 aus 2020) im Spartränkverfahren durch ein Einfachrüpingverfahren getränkt. Dieses Verfahren zielt darauf ab, lediglich die einflussexponierten Randbereiche der Holzschwelle mit öligem Holzschutzmittel zu behandeln. Die Aufnahmemenge an HSM 2 der

Buchenfurnierschichtholzschwellen ist in Tabelle 21 zusammengefasst und betrug im Mittel 96.9 kg/m³.

Tabelle 21: HSM 2 - Tränklösungsaufnahme der bereits wässrig imprägnierten Halbschwellen

Prüfkörper ID	LVL Ausgangsmaterialstärke [mm]	Ausgangsmasse [kg]	Ausgangsmasse korrigiert [kg]	Masse nach Imprägnierung mit HSM2, korrigiert [kg]	Aufnahme HSM2 [kg]	Aufnahme HSM2 [kg/m ³]
1	80	53,3	50,7	55,6	5,0	95,6
2	80	53,9	51,2	56,5	5,3	101,4
3	80	53,3	50,7	55,5	4,9	93,7

Mittelwert der Aufnahme HSM 2 in kg/m³: 96,9 ± 4,0

3.1.3 Analyse der Wirkstoffkonzentrationen

Zur Ermittlung der Wirkstoffkonzentration und -verteilung innerhalb der zweistufig imprägnierten Furnierschichtholzschwellen wurden neun Testproben mit den Nennmaßen (vor Imprägnierung) L x B x H = (50 (axial) x 260 x 160) mm³ in Abständen von 300 mm, 800 mm und 1250 mm vom nicht versiegelten Hirnholzende der Halbschwellen entnommen und nach ausreichender Trocknung an einem externen Prüfinstitut analysiert (Anlage I, Prüfbericht 2793/2022 – HC vom 06.12.2023). Der Testprobenquerschnitt wurde zur Ermittlung der Wirkstoffverteilung entsprechend Abbildung 55 segmentiert.

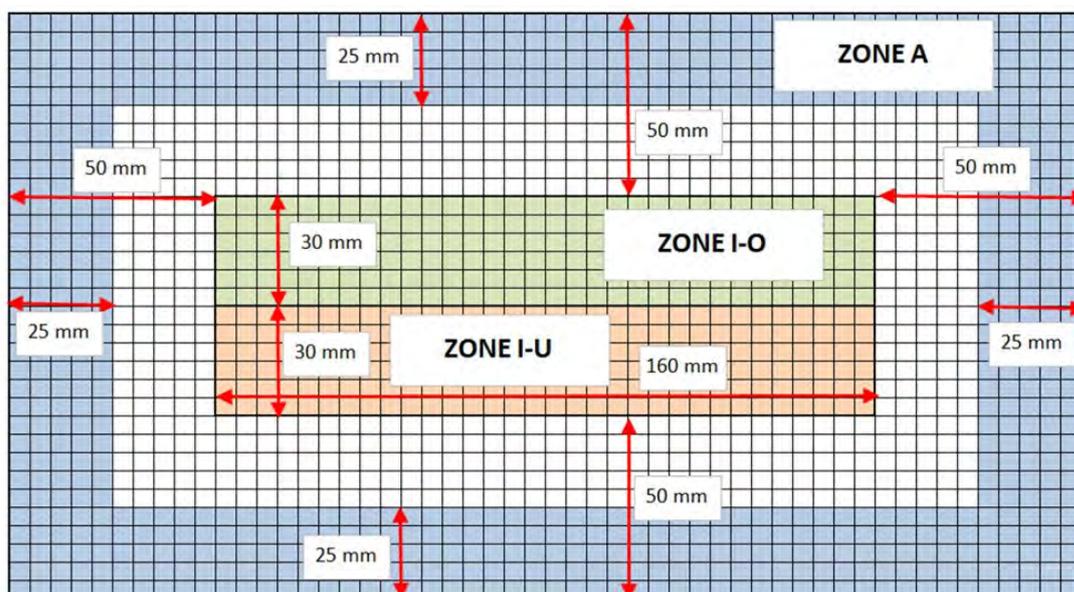


Abbildung 55: Analysezonensegmentierung der Schwellenabschnitte

Die Analysezone zur Wirkstoffanalytik wurden in die Zonen „Außen“ und „Innen“ unterteilt. Analysezone A (Außen) deckte den Randbereich in einer Breite von 25 mm ab. Die Prüfzone „Innen“ mit 50 mm Randabstand wurde zusätzlich in zwei Zonen unterteilt, um einen Einfluss der Unterlochbohrung zu erheben:

- Zone I-O sollte keinem Einfluss der bis zur Querschnittsmitte reichenden Unterlochbohrungen unterliegen
- In Zone I-U hingegen sollte ein Einfluss der Unterlochbohrungen auftreten

Insgesamt ergaben sich somit neun Probenkollektive, entnommen im Abstand von 300 mm, 800 mm und 1250 mm vom versiegelten Hirnholzende.

- Zone A mit 300 mm, 800 mm und 1250 mm zum Hirnholzende
- Zone I-O mit 300 mm, 800 mm und 1250 mm zum Hirnholzende
- Zone I-U mit 300 mm, 800 mm und 1250 mm zum Hirnholzende

Das externe Institut wurde mit der Wirkstoffanalyse von Kupfer, Cyproconazol (Triazol), Bis-(N-Cyclohexyldiazoniumdioxy)-Kupfer (Cu-HDO), sowie der quartären Ammoniumverbindung Didecylmethylpoly-(oxyethyl)-ammonium-propionat (DMPAP) beauftragt. Tabelle 22 gibt die Ergebnisse der Wirkstoffeinbringmengen wieder. Es fand trotz der Verwendung von lagenweise verklebten Furnierschichtholz aus Buche ein Eintrag von Wirkstoffen in die Kernbereiche der Furnierschichtholzschwellen statt, jedoch ist ein deutlicher Gradient der Einbringmenge von außen nach innen feststellbar.

**Tabelle 22; Ergebnisse in mg Wirkstoff/kg Holz (atro, d.h. bezogen auf die Trockenmasse);
 Quelle: Prüfbericht 2793/2022**

Probenbezeichnung	Kupfer	Cu-HDO	Cypro- conazol	DMPAP
	mg/kg atro			
30_A	7 247	789	48,7	2 220
80_A	7 294	782	49,0	2 532
125_A	6 853	755	41,9	1 705
30_UI	5 383	766	34,7	-
80_UI	4 594	722	26,2	-
125_UI	4 270	596	23,2	-
30_OI	4 864	721	30,3	-
80_OI	4 393	736	21,9	-
125_OI	3 119	549	8,5	-

Einbringmengen-Grenzwerte für vorgesehene Holzschutzmittel (ÖBB-Infrastruktur AG):

Für den Einsatz durch die ÖBB in der Praxis sollten Holzschwellen, die mit einem wässrigen Holzschutzmittel (HSM 1) und in der zweiten Stufe mit einem öligen Holzschutzmittel (HSM 2) behandelt wurden, folgende Anforderungen an Einbringmengen der Wirkstoffe erfüllen (auch in Tabelle 23 gezeigt):

Analysenzone Innen: 6 x 16 cm – Rotkern ist nicht Analysenzone

- Holzschutzmittelaufnahme Kupfer (Innen 60 x 160 mm): $\geq 19,6 \text{ kg/m}^3$
- Holzschutzmittelaufnahme Cu-HDO (Innen 60 x 160 mm): $\geq 11,9 \text{ kg/m}^3$

Analysenzone Außen: 25 mm von außen – Rotkern ist nicht Analysenzone

- Holzschutzmittelaufnahme Kupfer (Außen 25 mm): $\geq 3750 \text{ mg/kg}$ (Eintrag durch beide Holzschutzmittel)
- Holzschutzmittelaufnahme Triazol (Außen 25 mm): $\geq 25,1 \text{ kg/m}^3$
- Holzschutzmittelaufnahme Quat (Außen 25 mm): $\geq 25,1 \text{ kg/m}^3$

Grenzwertangaben erfolgen in kg Holzschutzmittel pro m^3 Holz [kg/m^3]. Bei Kupfer erfolgt

ein Eintrag in der Außenzone durch beide Holzschutzmittel, daher ist der Grenzwert in mg Wirkstoff pro kg Holz [mg/kg] angegeben. Die Umrechnung erfolgt für Buche/Eiche nach DIN EN 12490 (2010) mit 625 kg/m³ (Rohdichte bei 0% Holzfeuchte).

Tabelle 23: ÖBB-Infrastruktur AG Einbringmengengrenzwerte von Analysenparameter von Holzschutzmitteln in Außen- und Innenbereich in mg Wirkstoff pro kg Holz [mg/kg] und kg Holzschutzmittel pro m³ Holz [kg/m³]. Zellen mit Bindestrich (-) bedeuten, dass entweder die ÖBB diese aufgeführte Maßeinheit nicht zur Festlegung eines Einbringmengengrenzwerts verwendet oder keinen Einbringmengengrenzwert für dieses Untersuchungsbereich festgelegt hat

Maßeinheit	Kupfer		Cu-HDO		Cyproconazol		DMPAP	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
[kg/m ³]	≥ 19,6	(-)	≥ 11,9	(-)	(-)	≥ 25,1	(-)	≥ 25,1
[mg/kg]	(-)	≥ 3750	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Tabelle 24 zeigt die von der Holzforschung Austria gemessenen Wirkstoffeinbringmengen in zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten. Ein Vergleich zu den Mindesteinbringmengen der ÖBB für Wirkstoffe wird anhand grüner und roter Farben dargestellt. Grün bedeutet, dass das Material die Mindesteinbringmengen erreicht hat, und Rot, dass das Material die Mindesteinbringmengen nicht erreicht hat. Die Messungen der Wirkstoffeinbringmengen wurden vom beauftragten Prüfinstitut in mg Wirkstoff pro kg Holz gegeben [mg/kg] (Tabelle 22). Um diese Werte mit den in Tabelle 23 angegebenen Mindesteinbringmengen der ÖBB zu vergleichen, war eine Umrechnung von mg Wirkstoff pro kg Holz [mg/kg] auf kg Holzschutzmittel pro m³ Holz [kg/m³] erforderlich. Zulässig war dies nur auf Basis der Rohdichte des Buchen-/Eichenmaterials nach EN 12490 (2010) mit 625 kg/m³ (bei 0 % Holzfeuchte), durchgeführt gemäß folgender Gleichung:

$$\frac{(a * b)}{1000000} / c = d$$

a ist Wirkstoffeinbringmenge in mg pro kg Holz [mg/kg].

b ist der Rohdichte des Buchen-/Eichenmaterials nach DIN EN 12490 (2010) von 625 [kg/m³] (bei 0 % Holzfeuchte).

c ist der Anteil des Wirkstoffs im Holzschutzmittel [%].

d ist der Holzschutzmittelaufnahme in kg pro m³ Holz [kg/m³].

Das Material erreichte den Mindestwert für Kupfer, Cu-HDO und DMPAP - aber nicht für Cyproconazol.

Tabelle 24: Einbringmengen von Wirkstoffen pro kg Holz [mg/kg] in zweistufig imprägnierten Buchen-LVL-Bahnschwellensegmenten (gemessen von Holzforschung Austria) und die daraus berechnete Holzschutzmittelaufnahme kg Holzschutzmittel pro m³ Holz [kg/m³]. Grün markierte Zellen: Einbringmenge ausreichend. Rot markierte Zellen: Einbringmenge nicht ausreichend. Zellen mit Bindestrich (-): ÖBB definiert keinen Mindestwert für Wirkstoffeinbringmengen in der Analysezone (Abbildung 55). Zellen mit (x): es wurde keine Analyse durchgeführt. Prüfkörperbezeichnung: A = Außenbereich, UI = unterer Innenbereich, OI = oberer Innenbereich

Probe und Analysezone		Gemessene Analysenparameter von Schwellensegmenten						
		Kupfer	Cu-HDO		Cyproconazol		DMPAP	
		[mg/kg]	[mg/kg]	[kg/m ³]	[mg/kg]	[kg/m ³]	[mg/kg]	[kg/m ³]
Außen	30_A	7247	789	(-)	48,7	20.29	2220	33.04
	80_A	7294	782	(-)	49,0	20.42	2532	37.68
	125_A	6853	755	(-)	41,9	17.46	1705	25.37
Innen	30_UI	5383	766	17.10	34,7	(-)	(-)	(x)
	80_UI	4594	722	16.12	26,2	(-)	(-)	(x)
	125_UI	4270	596	13.30	23,2	(-)	(-)	(x)
Innen	30_OI	4864	721	16.09	30,3	(-)	(-)	(x)
	80_OI	4393	736	16.43	21,9	(-)	(-)	(x)
	125_OI	3119	549	12.25	8,5	(-)	(-)	(x)

3.1.4 Dauerhaftigkeit von Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz imprägniert mit kupferbasierten Holzschutzmitteln

Zur Prüfung der biologischen Dauerhaftigkeit der zweistufig imprägnierten Bahnschwellen aus Buchenfurnierschichtholz wurden Zwillinge der in Abschnitt 3.1.3 gefertigten Testproben zur Ermittlung der Wirkstoffkonzentration mit den Segmentabmessungen L x B x H = 50 (axial) x 75 x 260 bis 280 mm³ (Maße nach der Imprägnierung im gequollenen Zustand) für eine Dauerhaftigkeitsprüfung in Anlehnung an EN 113-2 (2021) verwendet. Abbildung 56 zeigt zur Verdeutlichung die Entnahmestellen der Zwillingproben (Abbildung 57) für die Wirkstoffanalyse nach Abschnitt 3.1.3 und die Untersuchung der biologischen Dauerhaftigkeit in Anlehnung an EN 113-2 (2021).

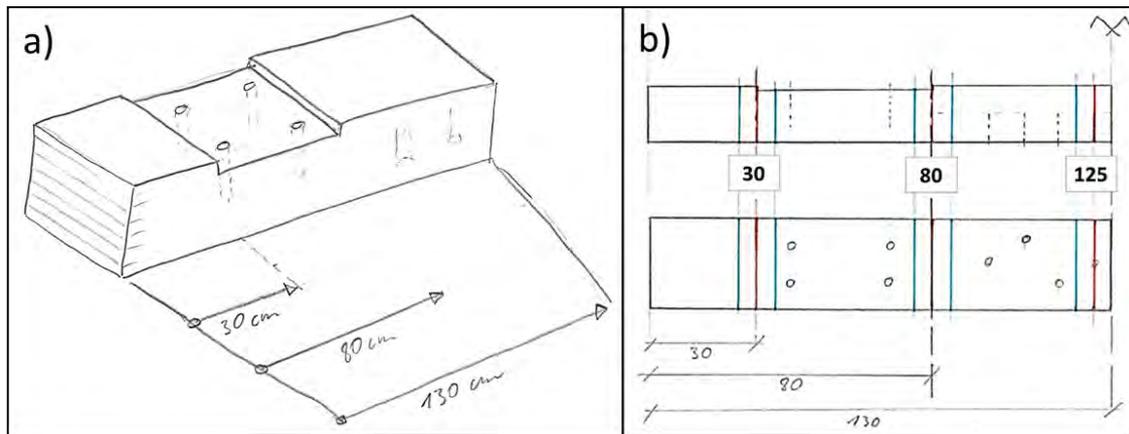


Abbildung 56: a) Schematische Darstellung von Schwellenabschnitte b) Übersicht von Schwellenabschnittentnahme für Dauerhaftigkeitsprüfungen an der Universität Göttingen und Wirkstoffanalyse an das Prüfinstitut. Zwei Abschnitte (blaue Markierung) pro unterschiedlichen Abstand vom Ende der halben Bahnschwelle wurde entnommen (rote Markierung); Quelle: ÖBB.

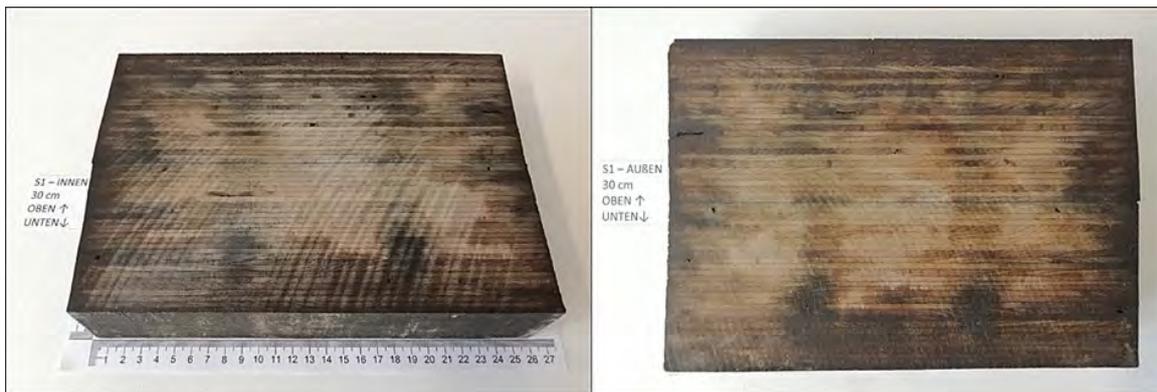


Abbildung 57: Zweistufig imprägnierte Buchen-LVL-Bahnschwellenabschnitt (50 x 175 x 260 mm³)

Es wurden Prüfkörper der Dimension (50 (ax) x 15 x 25) mm³ aus den inneren und äußeren Bereichen der Segmente gefertigt (Abbildung 58 und Abbildung 59).

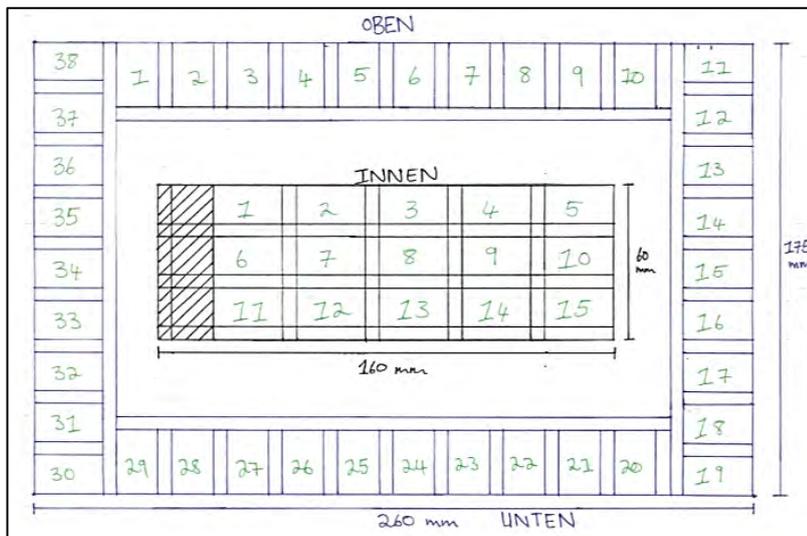


Abbildung 58: Prüfkörperentnahmeschema der Schwellensegmente. Analysenzonen: Außenzone (1-38), Innenzone (1-15), Gesamt (1-15 und 1-38)



Abbildung 59: Prüfkörper aus Schwellensegment mit Abmessungen von $(15 \times 25 \times 50) \text{ mm}^3$ für Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021).

Die Prüfkörper wurden gedarrt ($103 \text{ }^\circ\text{C}$), gewogen [g] und der Dauerhaftigkeitsprüfung in Anlehnung an EN 113-2 (2021) unterzogen. In diesem Bericht werden die Ergebnisse der vom externen Prüfinstitut durchgeführten Wirkstoffanalysen herangezogen, um die erzielten Masseverluste [%] und die daraus resultierende Dauerhaftigkeitsklassifizierung zu interpretieren.

Nach 16-wöchiger Inkubation mit Braunfäule, *Coniophora puteana* (C.p.), und Weißfäule, *Trametes versicolor* (T.v.), wurden die Prüfkörper von Pilzmyzel gereinigt, feucht gewogen, bei 103°C gedarrt, und anschließend erneut gewogen. Die Masseverluste der Virulenzprüfkörper aus Buchen- und Kiefern-Splintholz erreichten die erforderlichen Mindestmasseverlust von 30 % und 20 % (Abbildung 60). Die Prüfung war somit gültig. Durch die zweistufige Imprägnierung wurde der Masseverlust im Vergleich zu den unbehandelten Prüfkörpern deutlich reduziert. *T. versicolor* zeigte in allen Holzschwellenabschnitten und -zonen einen höheren Masseverlust als *C. puteana*. Die Entnahme von Prüfkörpern, sowohl aus der Außenzone, als auch aus der Innenzone des Holzschwellenabschnitts diente dazu, die Eindringtiefe der Holzschutzmittel und deren möglichen Einfluss auf die Resistenz gegen Pilzbefall zu bestimmen. Nach Inkubation mit *T. versicolor* zeigten die inneren Zonen einen höheren Masseverlust als die äußeren Zonen (Abbildung 61 und Abbildung 62); nach Inkubation mit *C. puteana* zeigte hingegen die innere Zone einen geringeren Masseverlust (Abbildung 63 und Abbildung 64).

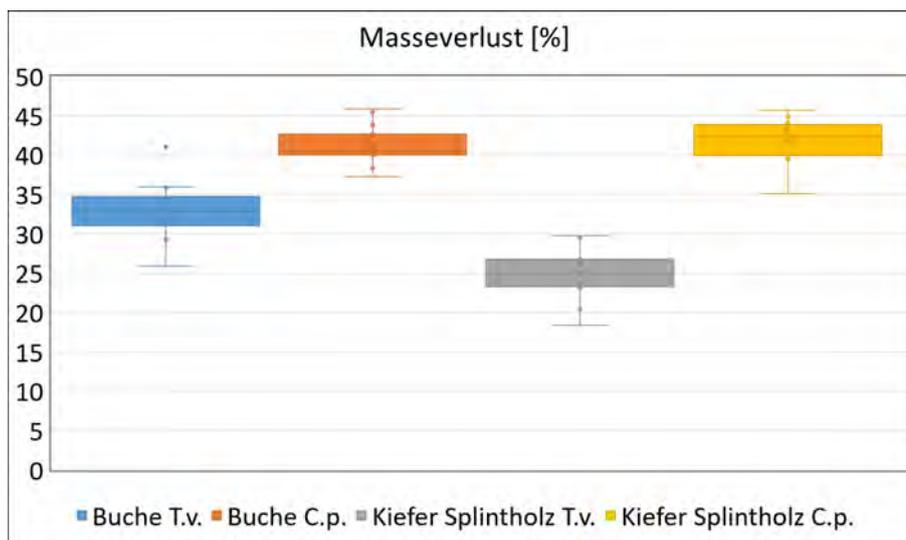


Abbildung 60: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von unbehandelten Vollholz-Prüfkörpern aus Buche (*Fagus sylvatica*) und Kiefern-Splintholz (*Pinus sylvestris*) nach Inkubation mit Weißfäule (*Trametes versicolor*, T.v.) und Braunfäule (*Coniophora puteana*, C.p.).

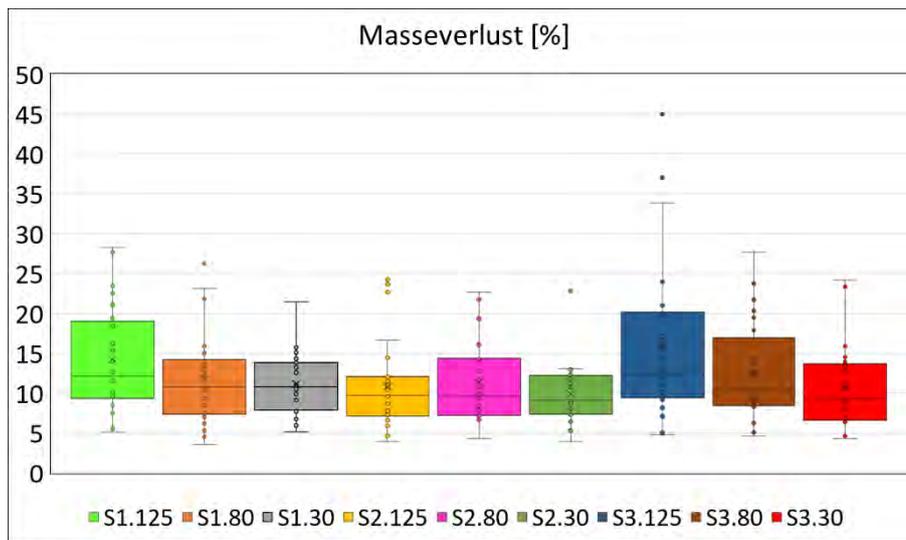


Abbildung 61: Gesamter Abschnitt: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Weißfäule (*Trametes versicolor*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

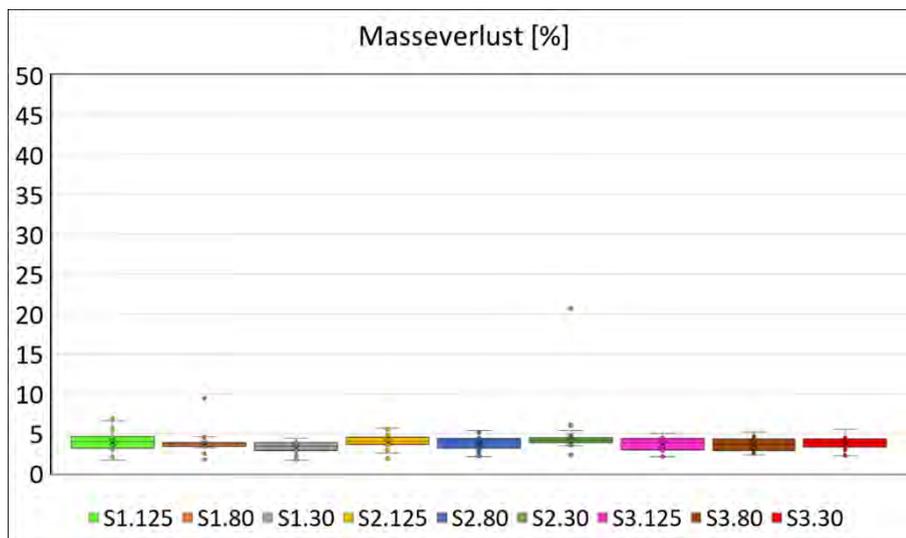


Abbildung 62: Gesamter Abschnitt: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Braunfäule (*Coniophora puteana*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

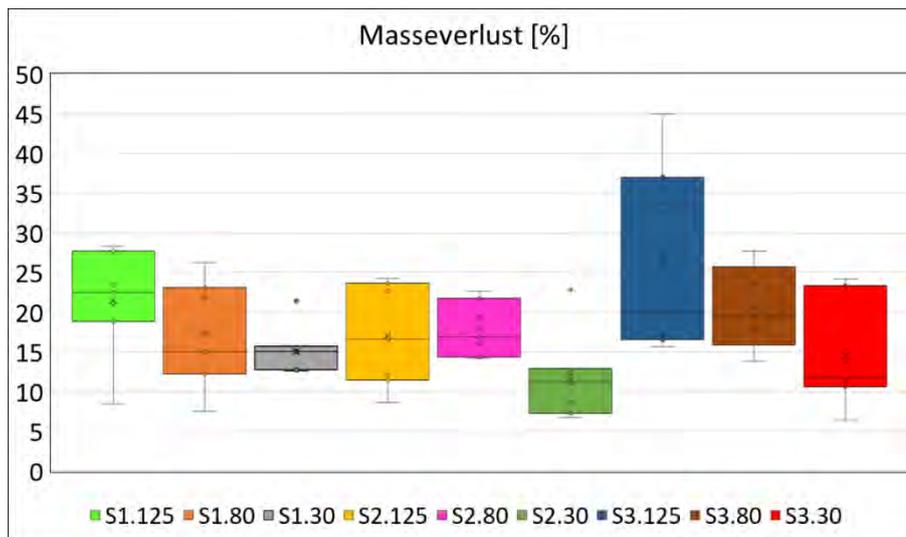


Abbildung 63: Innenzone: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Weißfäule (*Trametes versicolor*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

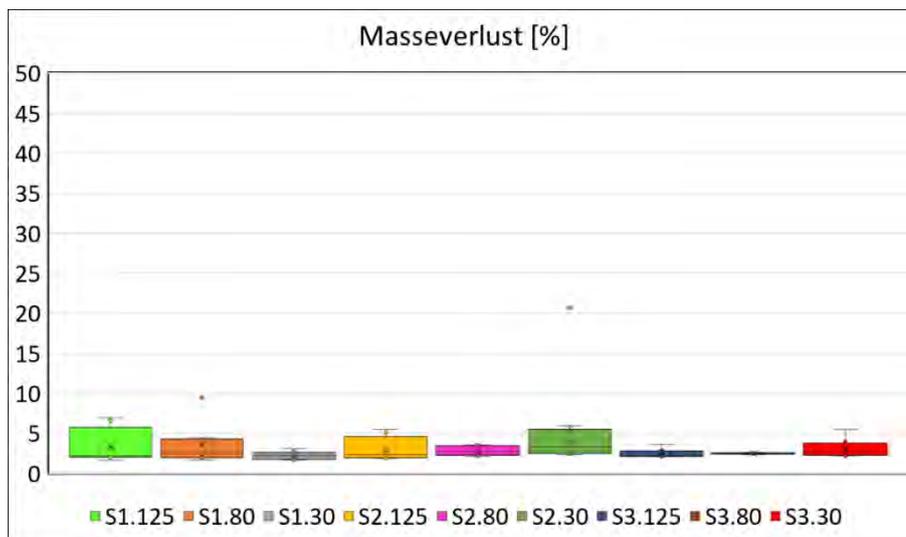


Abbildung 64: Innenzone: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Braunfäule (*Coniophora puteana*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

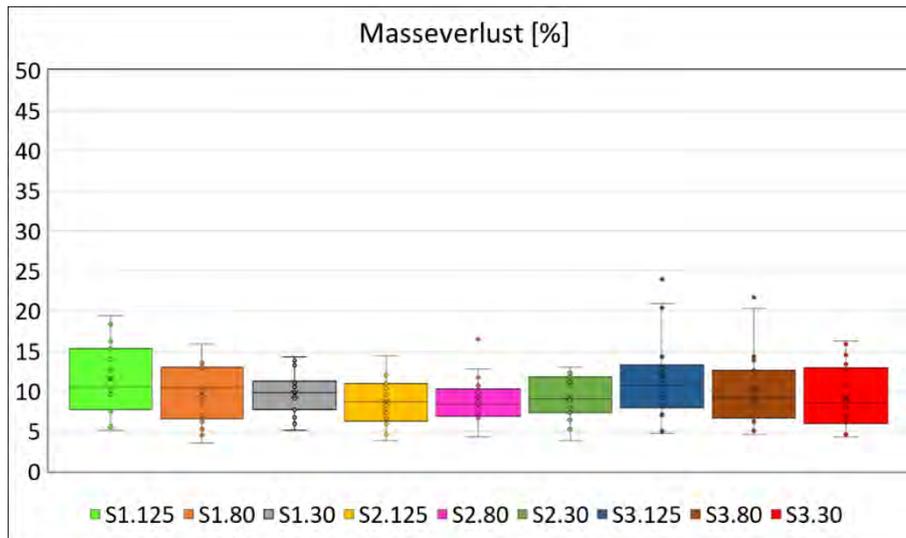


Abbildung 65: Außenzone: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Weißfäule (*Trametes versicolor*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

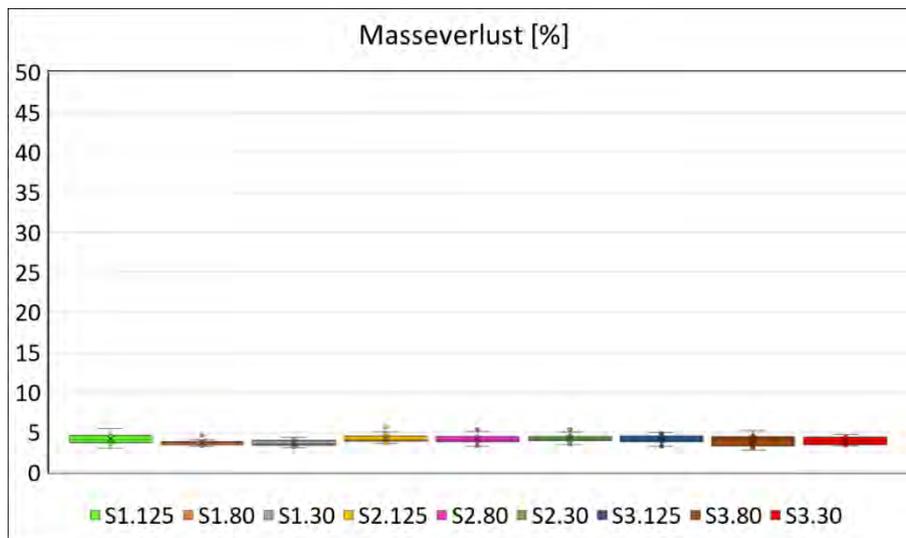


Abbildung 66: Außenzone: Masseverlust [%] nach Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten (wässrig und ölig) Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten nach Inkubation mit Braunfäule (*Coniophora puteana*). Legende: S1, S2, S3 = Schwellennummer; 30, 80, 125 = Abstand [cm] vom Hirnholzende der Halbschwelle.

Tabelle 25: Medianer Masseverlust (MV in %) und Standardabweichung (SD in %) nach Inkubation mit *Coniophora puteana* in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten (Gesamt, Außen, Innen)

Schwellen-segment#		S1.125	S1.80	S1.30	S2.125	S2.80	S2.30	S3.125	S3.80	S3.30
Gesamter Querschnitt	MV [%]	4.0	3.7	3.4	4.0	3.9	4.1	3.9	3.6	3.9
	SD [%]	1.3	1.3	0.8	1.0	0.8	3.3	0.9	0.8	0.8
Außenzone	MV [%]	4.1	3.7	3.6	4.1	4.1	4.2	4.1	4.1	3.9
	SD [%]	0.6	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4
Innenzone	MV [%]	2.2	2.5	2.2	2.4	2.8	3.3	2.3	2.5	2.7
	SD [%]	2.0	2.4	0.5	1.4	0.5	5.8	0.5	0.1	1.1

Tabelle 26: Medianer Masseverlust (MV in %) und Standardabweichung (SD in %) nach Inkubation mit *Trametes versicolor* in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzschwellensegmenten (Gesamt, Außen, Innen)

Schwellen-segment#		S1.125	S1.80	S1.30	S2.125	S2.80	S2.30	S3.125	S3.80	S3.30
Gesamter Querschnitt	MV [%]	12.1	10.8	10.8	9.7	9.7	9.1	12.4	10.4	9.4
	SD [%]	6.5	5.5	3.7	5.4	5.0	3.6	9.8	6.2	5.2
Außenzone	MV [%]	10.6	10.4	9.9	8.7	8.4	9.1	10.8	9.2	8.5
	SD [%]	4.1	3.5	2.7	2.7	2.8	2.6	5.2	4.5	3.8
Innenzone	MV [%]	22.5	15.1	15.1	16.7	16.9	11.1	20.0	19.5	11.8
	SD [%]	6.2	6.2	2.9	6.0	3.2	5.1	11.0	4.8	6.2

Zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit der untersuchten Buchenfurnierschichtholzschwellensegmente wurde das Klassifizierungssystem nach EN 113-2 (2021) verwendet. Alle Materialien wurden nach dem Masseverlust klassifiziert, der durch die Exposition gegenüber *Trametes versicolor* entstand. Erwartungsgemäß wies die innere Zone eine geringere (DC 3-4), die äußere Zone eine höhere Dauerhaftigkeit (DC 2-3) auf (Tabelle 27 und Tabelle 28).

Tabelle 27: Bestimmung der Dauerhaftigkeit nach EN 113-2 (2021)

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	Medianer prozentualer Masseverlust (ML) nach EN 113-2 (2020)
DC 1	Sehr dauerhaft	ML ≤ 5%
DC 2	Dauerhaft	5% < ML ≤ 10%
DC 3	Mäßig dauerhaft	10% < ML ≤ 15%
DC 4	Wenig	15% < ML ≤ 30%
DC 5	Nicht dauerhaft	ML > 30%

ML = der höchste Medianwert der Masseverluste (in %), bestimmt für die Prüfkörper, die jedem der verwendeten Prüfpilze ausgesetzt wurden.

Tabelle 28: Dauerhaftigkeitsklassifizierung von Dauerhaftigkeitsprüfungen in Anlehnung an EN 113-2 (2021) von zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzswellensegmenten. Für jede Prüfzone (Gesamt, Außen, Innen) ist der höchste mediane Massenverlust (MV in %) für *Trametes versicolor* (T. v.) in der oberen Reihe angezeigt, gefolgt von der Dauerhaftigkeitsklassifizierung (DC) in der unteren Reihe.

Schwellensegment #		S1.125	S1.80	S1.30	S2.125	S2.80	S2.30	S3.125	S3.80	S3.30
Gesamter Querschnitt	MV [%]	12.1	10.8	10.8	9.7	9.7	9.1	12.4	10.4	9.4
	DC	3	3	3	2	2	2	3	3	2
Außenzone	MV [%]	10.6	10.4	9.9	8.7	8.4	9.1	10.8	9.2	8.5
	DC	3	3	2	2	2	2	3	2	2
Innenzone	MV [%]	22.5	15.1	15.1	16.7	16.9	11.1	20.0	19.5	11.8
	DC	4	4	4	4	4	3	4	4	3

3.1.5 Zu erwartende Gebrauchsdauer

Die zu erwartende Gebrauchsdauer des geprüften Furnierschichtholzmaterials im Bodenkontakt (Gebrauchsklasse 4) wurde nach Alfredsen et al. (2021) und Brischke et al. (2021) berechnet. Die in dieser Studie durchgeführte Gebrauchsdauervorhersage ist aufgrund der begrenzten Datenmenge ausdrücklich als indikative Abschätzung zu betrachten.

Unten angeführte Gleichung besagt, dass die Exposition, die Holzabbau durch Pilze verursacht, immer kleiner oder gleich der Fähigkeit des Materials sein sollte, dem Holzabbau durch Pilze zu widerstehen (Resistenzdosis: D_{Rd}), der aus dieser Exposition resultiert (Expositionsdosis: D_{Ed}).

$$D_{Ed} \leq D_{Rd}$$

D_{Ed} ist die Expositionsdosis für den Standort, an dem das Material exponiert ist [Tage].

D_{Rd} ist der Resistenzdosiswert des Materials [Tage]

Die Expositionsdosis (D_{Ed}) ist die Jahresdosis des jeweiligen Standorts basierend auf den physiologischen Anforderungen holzerstörender Pilze an Temperatur und Feuchtigkeit. Abbildung 67 zeigt die Expositionsdosis für Holz im Erdkontakt für den europäischen Kontinent basierend auf einem Dosis-Wirkungs-Modell, das von Marais et al. (2021) entwickelt wurde. Die D_{Ed} liegt in Österreich zwischen 10 und 70 Tagen pro Jahr. Das heißt, dass an 10 bis 70 Tagen ideale Bedingungen für pilzlichen Abbau vorliegen. Eine geringere Dosis lässt sich auf geringere Temperaturen in Bergregionen zurückführen.

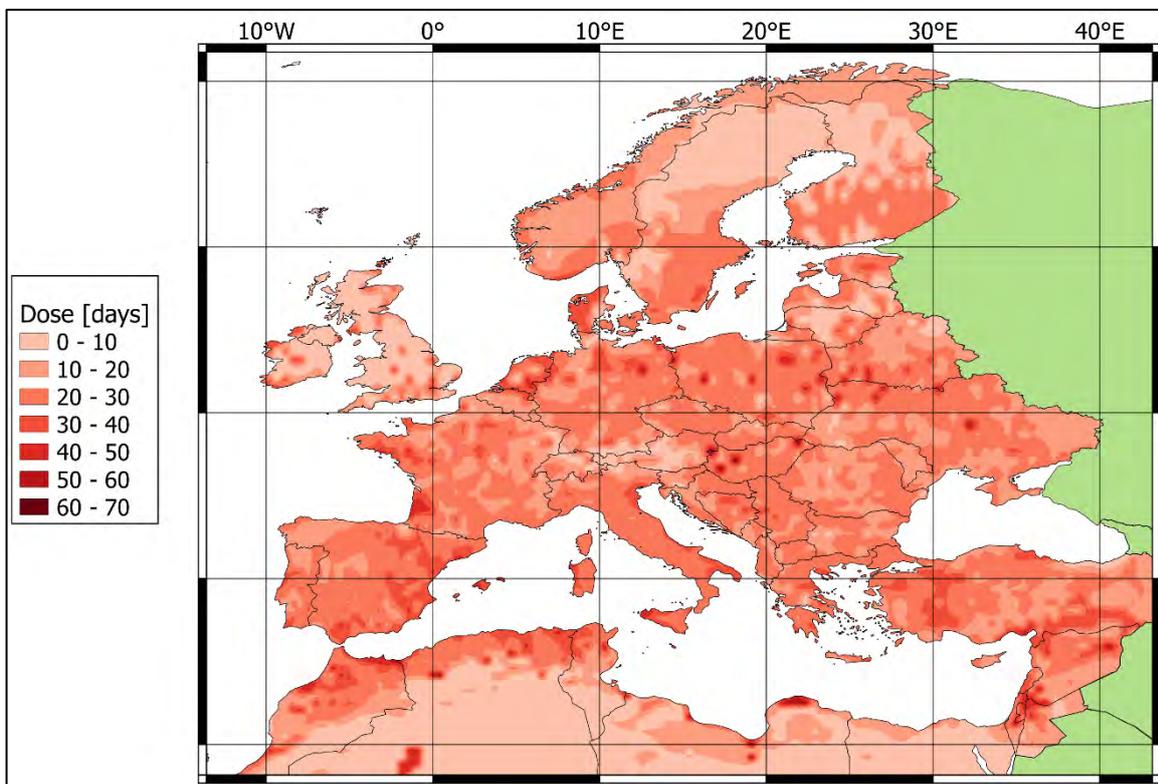


Abbildung 67: Expositionsdosis in Tagen im Boden für ein durchschnittliches Jahr, basierend auf Marais et al. (2021)

Die Resistenzdosis $D_{Rd,soil}$ ermöglicht die Quantifizierung der Resistenz eines Materials gegen die verschiedenen Abbaueinflüsse anhand der materialinhärenten Schutzeigenschaften und der Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe. Im Fall des zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzes stammen die einzigen verfügbaren Daten zum

Verständnis der Schutzeigenschaften $k_{inh,non-soil,lab}$ im Vergleich zu einem unbehandelten Referenzmaterial aus der oben beschriebenen Dauerhaftigkeitsprüfung. Unten aufgeführte Gleichung zeigt die Berechnung von $k_{inh,non-soil,lab}$. Der Faktor $k_{inh,non-soil,lab}$ ist der Mittelwert von zwei Quotienten aus dem mittleren Massenverlust von unbehandelten Buchen-Referenzprüfkörpern und Buchenfurnierschichtholzprüfkörpern, pro Inkubationspilz aus oben beschriebenem Versuch. Der Faktor $k_{inh,non-soil,lab}$ wurde für die den gesamten Abschnitt berechnet. Die Resistenzdosis ist daher das Produkt aus der kritischen Dosis ($D_{crit} = 52,7$), die der Dosis entspricht, die einem vollständigen Versagen eines Referenzbuchenprüfkörpers nach EN 252 (2015) entspricht (Abbaubewertung 4 - unveröffentlichte Daten aus der 'IRG Durability Database'), und dem Faktor $k_{inh,non-soil,lab}$. Schließlich kann die geschätzte Gebrauchsdauer in Jahren berechnet werden.

$$D_{Rd,soil} = D_{crit} * k_{inh,non-soil,lab}$$

- $D_{Rd,soil}$ ist die Resistenzdosis des Materials bei Bodenkontakt [Tage].
- D_{crit} ist die kritische Dosis eines Buchen-Referenzprüfkörpers nach EN 252 (2015) bis zum Versagen (Abbaubewertung 4) [Tage].
- $k_{inh,non-soil,lab}$ ist der Faktor, der die inhärenten Schutzeigenschaften des Materials gegen Pilzabbau in Tests ohne Bodenkontakt beschreibt (-).

$$k_{inh,non-soil,lab} = \frac{\frac{a}{b} + \frac{c}{d}}{2} = \frac{\frac{41,16}{3,79} + \frac{33,52}{12,05}}{2} = 6,82$$

- a ist der mittl. Masseverlust von unbehandelten Buchen-Prüfkörpern aus Versuch #1.2 mit *C. puteana* inkubiert [%].
- b ist der mittl. Masseverlust von Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörpern aus vor beschriebenem Versuch mit *C. puteana* inkubiert [%].
- c ist der mittl. Masseverlust von unbehandelten Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörpern aus *T. versicolor* inkubiert [%].
- d ist der mittl. Masseverlust von Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörpern - Prüfkörpern aus vor beschriebenem Versuch mit *T. versicolor* inkubiert [%].

$$Gebrauchsdauer = \frac{D_{Rd,soil}}{D_{Ed}}$$

Gebrauchsdauer ist die erwartete Zeit vor beschriebenem Versuch, die ein EN 252 (2015) – Prüfkörper des LVL-Materials benötigt, um eine Abbaubewertung von 4 zu erreichen [Jahre].

- $D_{Rd,soil}$ ist die Resistenzdosis des Materials bei Bodenkontakt [Tage].
- D_{Ed} ist die Expositions-dosis für den jeweiligen Standort [Tage].

Die zu erwartende Gebrauchsdauer liegt somit zwischen 5,1 und 35,9 Jahren. Für die obige Berechnung wurde weder das Feuchteverhalten des Materials noch seine Resistenz gegenüber Moderfäule und andere bodenbewohnende Organismen berücksichtigt. Des Weiteren basiert die Berechnung auf dem mittleren Masseverlust für den gesamten

Schwellenquerschnitt und ist somit konservativ. Die gleiche Berechnung wurde auch ausschließlich für den äußeren Bereich durchgeführt, wobei sich jedoch die zu erwartende Gebrauchsdauer mit 5,1 bis 35,8 Jahren nur vernachlässigbar erhöhte.

Zusammenfassend zeigt sich bei Dauerhaftigkeitsprüfungen mit Basidiomyceten in Reinkultur mit Prüfkörpern, die aus zweistufig imprägnierten Furnierschichtholz-Bahnschwellensegmenten entnommen wurden, dass ein wirksamer Schutz in der äußeren Zone der Schwelle erzielt werden kann (DC 2-3). Nachträgliche Analysen der Wirkstoffe in den Buchenfurnierschichtholzschwellen durch ein externes Prüfinstitut ergaben, dass das Material nur einen der vier untersuchten Wirkstoffe, die für die Verwendungszertifizierung der ÖBB erforderlichen Mindestwerte an Wirkstoffen nicht enthielt. Lediglich Cyproconazol erreicht in der Außenzone nicht den seitens ÖBB vorgegebenen Grenzwert. Eine geringe natürliche Dauerhaftigkeit des Buchenfurnierschichtholzschwellenmaterials und ein geringes Eindringen des öligen Holzschutzmittels (zu geringe Aufnahme von Cyproconazol) könnten die Ursache für einen hohen Masseverlust und eine geringe Dauerhaftigkeitseinstufung der Innenzonen gewesen sein. Eine vorläufige Gebrauchsdauerabschätzung des zweistufig-imprägnierten Furnierschichtholzmaterials ergab auch für die Außenzone keine merkbar erhöhte zu erwartende Gebrauchsdauer.

3.2 Sorptionsversuche an Furnieren

Im Rahmen der zweistufigen Furnierschichtholzschwellenimprägnierung wurden zusätzlich Einzelfurniere dem Imprägnierprozess beigefügt. Das verwendete Furnier wurde geteilt und mit HSM 1 wässrig imprägniert. Die daraus resultierende Furnierplatte wurde wiederum geteilt und ein Teil wurde mit HSM 2 ölig imprägniert. Diese Furniere wurden anschließend für die Sorptionswaage zu Probenstücken mit 30 x 30 mm zugeschnitten (Abbildung 68). Es sind deutliche Farbveränderungen im Zuge des zweistufigen Imprägnierverfahrens zu erkennen.



Abbildung 68: Übersicht über die hergestellten Furniere

Die einzelnen Proben wurden vor dem Sorptionsversuch gewogen (Tabelle 29). Aus den angegebenen Massen ist die jeweilige Massenzunahme nach jeder Imprägnierstufe ersichtlich.

Tabelle 29: Ermittelte Massen der Proben vor der Sorptionsmessung. Es wurde ein Mittelwert der Massen berechnet; A: unbehandeltes Furnier; B: einstufig imprägniertes Furnier mit HSM 1; C: zweistufig imprägniertes Furnier mit HSM 1 + HSM 2

Furnier		
A	W	O
[mg]	[mg]	[mg]
1264	1463	1672
1262	1464	1742
1283	1501	1743
	1422	1686
1270	1463	1711

Die Sorptionsmessungen wurden mittels einer SPS Analysewaage durchgeführt. Die Proben wurden bei 25°C / 0 % r.F. konditioniert und die Ausgleichsfeuchten bis 25°C / 90 % r.F. in Schrittweiten der relativen Feuchte von 10 % bestimmt. Dabei wird die Massenzunahme über die Zeit bestimmt (Abbildung 69) und als Massenzunahme bezogen auf die Trockenmasse in Prozent dargestellt.

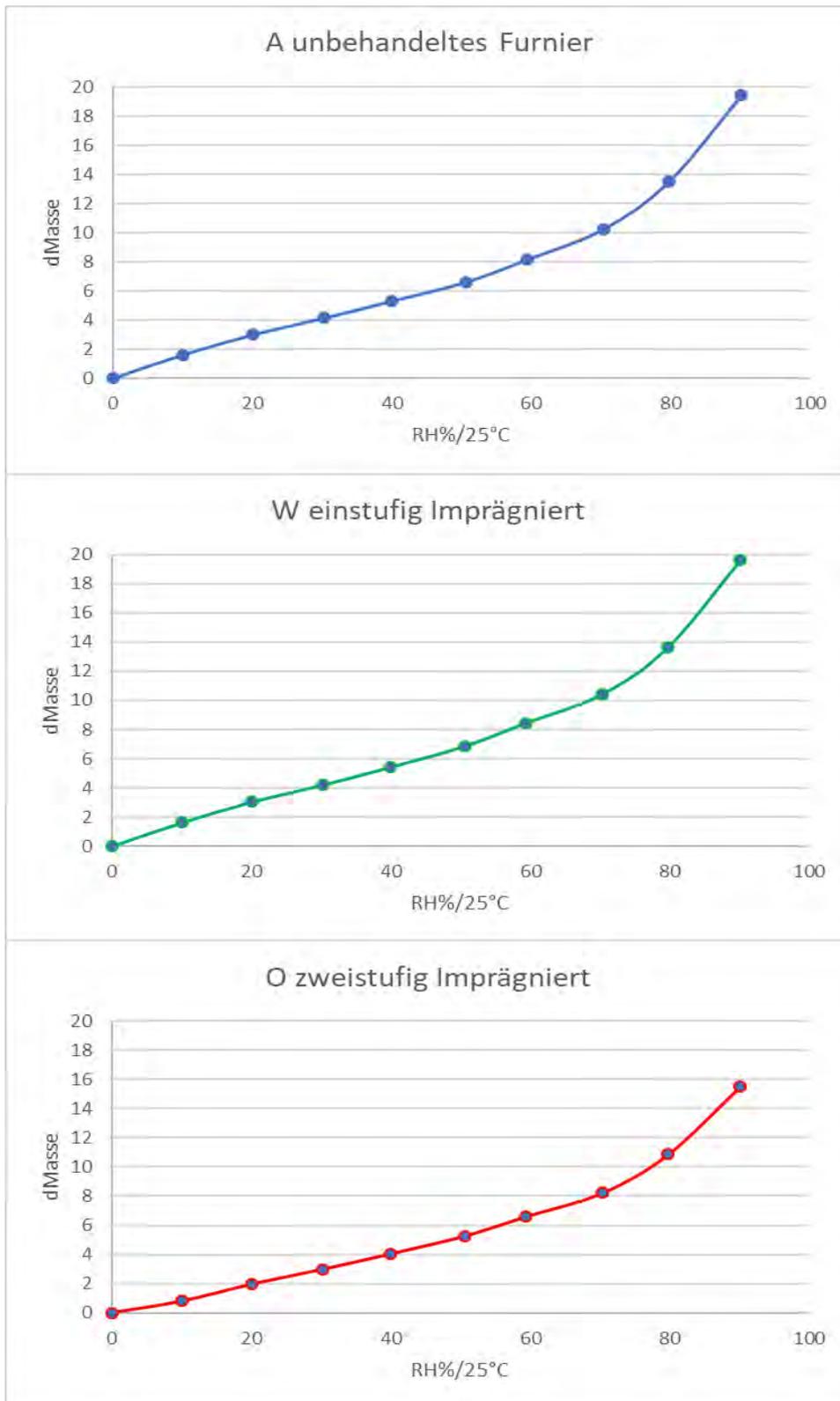


Abbildung 69: Graphische Darstellung der Sorptionskurven der Furniere von 25 °C / 0 % r.F bis 25 °C / 90 % r.F.; Schrittweite 10 % r.F.;

Dargestellt ist die Massenzunahme (Wasseraufnahme) bezogen auf die Trockenmasse in %.

Beim Vergleich der Sorptionskurven (Abbildung 70) wird offensichtlich, dass die wässrige Imprägnierung mit Holzschutzmittel 1 zu einer leicht erhöhten Sorption führt. Die zweistufige Imprägnierung mit wässrigem Holzschutzmittel 1 und öligem Holzschutzmittel 2 führt zu einer Reduktion der Sorption. Da es sich hier um den Vergleich von relativen Kurven handelt wurde die absolute Wassermenge bei der Ausgleichsfeuchte bei 70 % r.F. für einen Vergleich herangezogen (Tabelle 30).

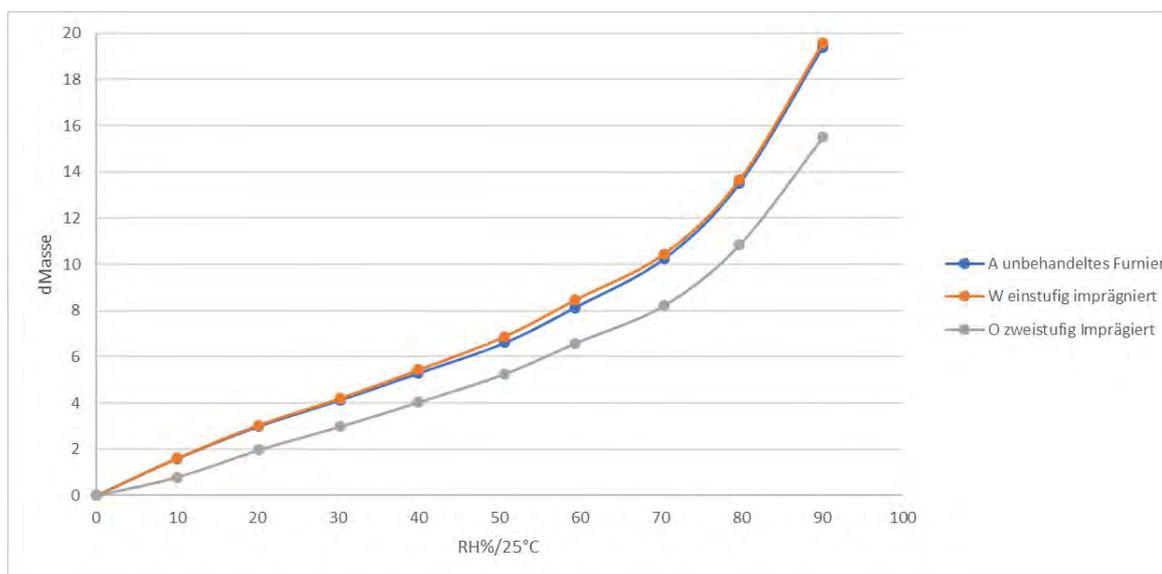


Abbildung 70: Vergleich der einzelnen Sorptionskurven der Furniere; Dargestellt ist die Massenzunahme (Wasseraufnahme) bezogen auf die Trockenmasse in %.

Tabelle 30: Massen der Furnierholzproben bei Ausgleichsfeuchte 25°C / 70 % r.F.

Lfd. Nr	Furnier		
	A in mg	W in mg	O in mg
1	1391	1617	1807
2	1386	1615	1881
3	1421	1662	1888
4	--	1571	1830
Mittelwert:	1851 ± 39	1399 ± 19	1616 ± 37

Werden diese Massen mit den Ausgangsmassen und den Aufnahmen der Holzschutzmittel

verglichen bzw. subtrahiert, ergeben sich absolute Wasseraufnahmen von 130 mg für A, 154 mg für W und 141 mg für O (Mittelwerte). Was wiederum zeigt, dass die Holzschutzmittel Einfluss auf das Sorptionsverhalten besitzen bzw. selbst einen Teil an Wasser binden. Die unterschiedlichen Holzschutzmittel bzw. Wirkstoffrückstände in den Furnieren führen im Vergleich zur Referenz zu einem veränderten Sorptionsverhalten. Die absoluten Wassermengen sprechen für einen Anteil der Holzschutzmittel bzw. Wirkstoffrückstände am Sorptionsverhalten.

3.3 Auswirkung einer Schutzmittelbehandlung auf die Verklebungsqualität

Die Überprüfung der Klebefugenqualität von Furnierschichtholzbauteilen erfolgt in der Regel entsprechend EN 14374 (2005) durch einen Aufstechversuch der Klebefuge nach einem festgelegtem Vorbehandlungsverfahren mit Kochwasserlagerung. Durch den stark subjektiven Charakter dieser Bewertungsmethode dient dieses Verfahren eher zu einer qualitativen Beurteilung der Klebefugenintegrität (Dill-Langer 2017) und wird im Rahmen der Untersuchungen durch ein in Dill-Langer (2017) vorgeschlagenes Verfahren ersetzt und die Verklebung anhand des darin vorgeschlagenen Anforderungswertes bewertet. Von der Betrachtung ausgeschlossen sind dynamische Aspekte der Klebefugenintegrität. Bei der in (Dill-Langer 2017) vorgeschlagenen Methode handelt es sich um ein abgewandeltes Verfahren zur Ermittlung der Blockscherfestigkeit nach EN 14080 (2013), welches den Verhältniswert der Klebefugenfestigkeiten von Zwillingsproben ohne und mit vorheriger Vorbehandlung ermittelt. Das Verfahren wird zur Bewertung einer möglichen Auswirkung der Holzschutzmittelimprägnierung auf die Klebefugenintegrität um Zugscherprüfungen entsprechend EN 302-1 (2013) ergänzt und wie folgt durchgeführt:

1. Blockscherprüfung nicht imprägnierter Proben nach EN 14080 ohne vorherige Vorbehandlung
2. Blockscherprüfung nach EN 14080 wässrig imprägnierter Proben nach Kochwechsellagerung entsprechend EN 14374 mit Rücktrocknung auf die Ausgangsholzfeuchte
3. Blockscherprüfung nach EN 14080 an ölig imprägnierten Proben nach Kochwechsellagerung entsprechend EN 14374 mit Rücktrocknung auf die Ausgangsholzfeuchte
4. Bildung des Verhältniswertes der Scherfestigkeiten mit und ohne Tränkung

An einer weiteren Serie werden entsprechend der vorgestellten Prüfsystematik Zugscherversuche durchgeführt und ergänzend zu den Festigkeiten der Holzbruchanteil der jeweiligen Klebefugenfläche in Anlehnung an Künniger (2007) ermittelt. Alle Prüfungen erfolgen an einer servoelektrischen Universalprüfmaschine Walter+Bai mit einer 5 kN Kraftmessdose bei Zugscherprüfungen und einer 35 kN Kraftmessdose bei Blockscherprüfungen. Die Prüfungen erfolgen weggesteuert mit 0,1 mm/s bis zum Bruch (Blockscherprüfung) oder der Bruch erfolgt zwischen 30 s und 90 s (Zugscherversuche).

3.3.1 Zugscherversuche

Aus einer handelsüblichen Furnierschichtholzplatte aus Buche mit Dimensionen (5000(axial) 2400 x 40) mm³ wurden über die Platte verteilt mindestens fünf Stück 150 mm lange Abschnitte entnommen und in der Höhe geteilt. Aus den gewonnenen Plattenteilen wurden anschließend vierlagige Furnierschichtholzstäbe symmetrisch auf eine Endstärke von 10 mm gerichtet, um die zu prüfende Klebefuge in Querschnittsmitte zu situieren (Abbildung 71). Die Geometrie der 75 gefertigten Prüfkörpern entspricht den Vorgaben in EN 302-1 (2013).

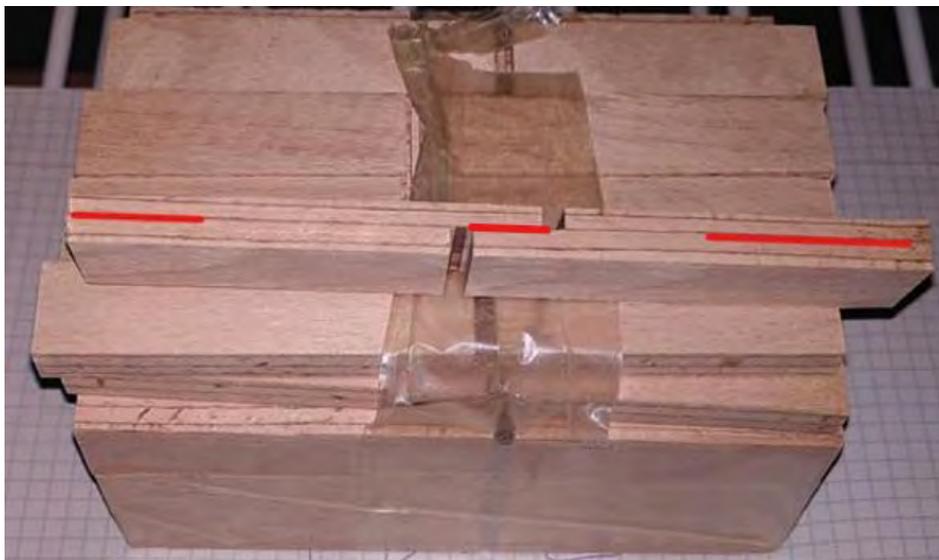


Abbildung 71: Zugscherprüfkörper mit markierter Prüfklebefuge (rot)

Die Stichprobe aus 75 Proben wurde in vier annähernd gleich große Gruppen unterteilt, wobei eine Gruppe als Referenz bis zur Prüfung ohne weitere Vorbehandlung im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte klimatisiert wurde. Die restlichen Gruppen wurden in weiterer Folge einstufig (wässrig) oder zweistufig (wässrig und ölig)

imprägniert und entsprechend den Vorgaben in EN 302-1 (2013) nach der Imprägnierung bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte klimatisiert (Verfahren A1 der EN 302-1) oder kochwassergelagert und rückgetrocknet (Verfahren A5). Eine Übersicht der einzelnen Prüfgruppen sowie der zugehörigen Behandlung gibt Tabelle 31.

Tabelle 31: Prüfgruppen der Zugscherversuche

Gruppe	Tränkung	Vorbehandlung	Anzahl
I Referenz	-	20/65*	18
II	Wässrig	A1*	17
III Referenz	-	A5	15
IV	Wässrig	A5	15
V	Wässrig und ölig	A5	6

* Bei Vorbehandlung A1 handelt es sich wie bei 20/65 um eine Probenlagerung bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte

Hinsichtlich der Zugscherfestigkeit der Verklebung erreichen alle Prüfchargen die in EN 301 (2013) den einzelnen Vorbehandlungsarten zugewiesenen Scherfestigkeiten ($\sigma_M \geq 10$ MPa für Vorbehandlung A1 und $\sigma_M \geq 8$ MPa für Vorbehandlung A5). Eine Wertung der Daten erfolgt aufgrund fallweise nicht normalverteilter Gruppenwerte anhand einer Kruskal-Wallis ANOVA auf einem 5 %-igen Signifikanzniveau mit nachgelagerterem Dunns Test für einen paarweisen Vergleich der Werte. Es ist durch die wässrige Imprägnierung nach erneuter Klimatisierung im Normklima (20 °C / 65 % r.F.) keine signifikante Reduktion der Klebefugenfestigkeit feststellbar (Abbildung 72).

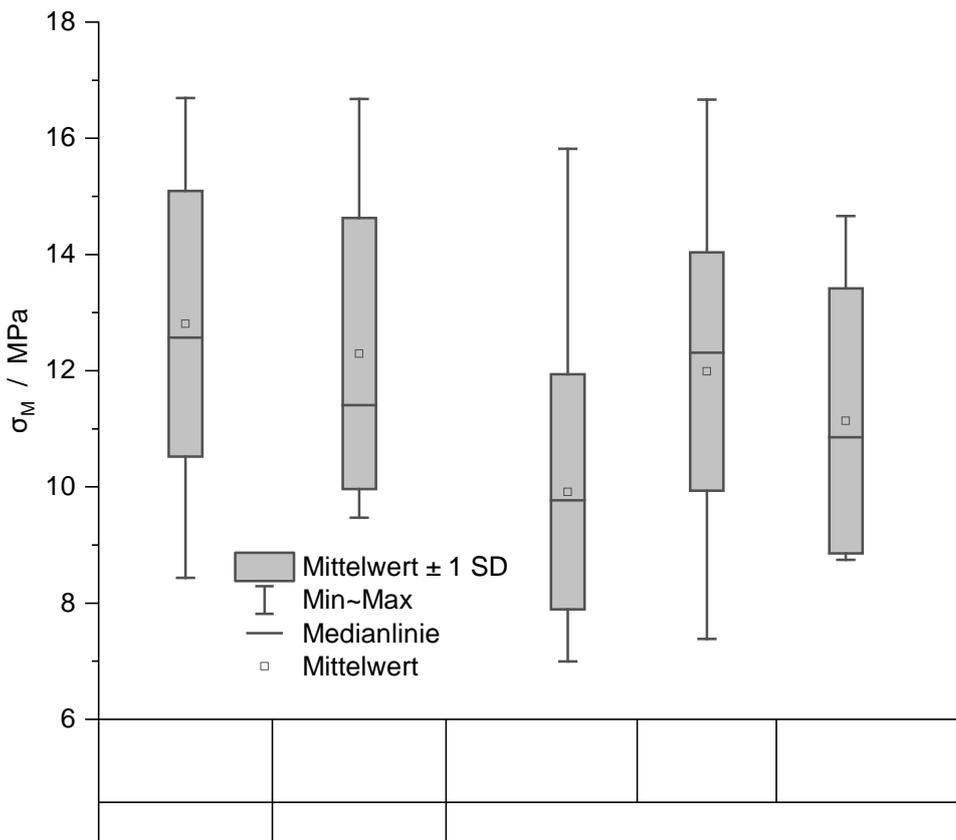


Abbildung 72: Zugscherfestigkeit σ_M unbehandelter, klimatisierter sowie kochwassergelagerter Referenzproben (unbehandelt 20/65, unbehandelt A5) verglichen mit Festigkeiten unbehandelter oder kochwassergelagerter, einfach imprägnierter Proben (wässrig A1 und A5) und kochwassergelagerter zweistufig imprägnierter Proben (wässrig und ölig A5)

Durch eine Kochwasserlagerung verringert sich im Falle unbehandelter Proben die Zugscherfestigkeit gegenüber den klimatisierten Proben signifikant. Zwischen den einzelnen Gruppen der kochwassergelagerten Proben ist kein signifikanter Unterschied der Zugscherfestigkeiten erkennbar, weder eine einstufige noch eine zweistufige Imprägnierung beeinflusst die Verklebungsfestigkeit der Proben. Der Holzbruchanteil WFP der Proben verhält sich vergleichbar zu den Zugscherfestigkeiten und der Mittelwert aller vorbehandelter Proben liegt über dem in EN 14374 (2005) geforderten Mindestwert von 70 % (Abbildung 73).

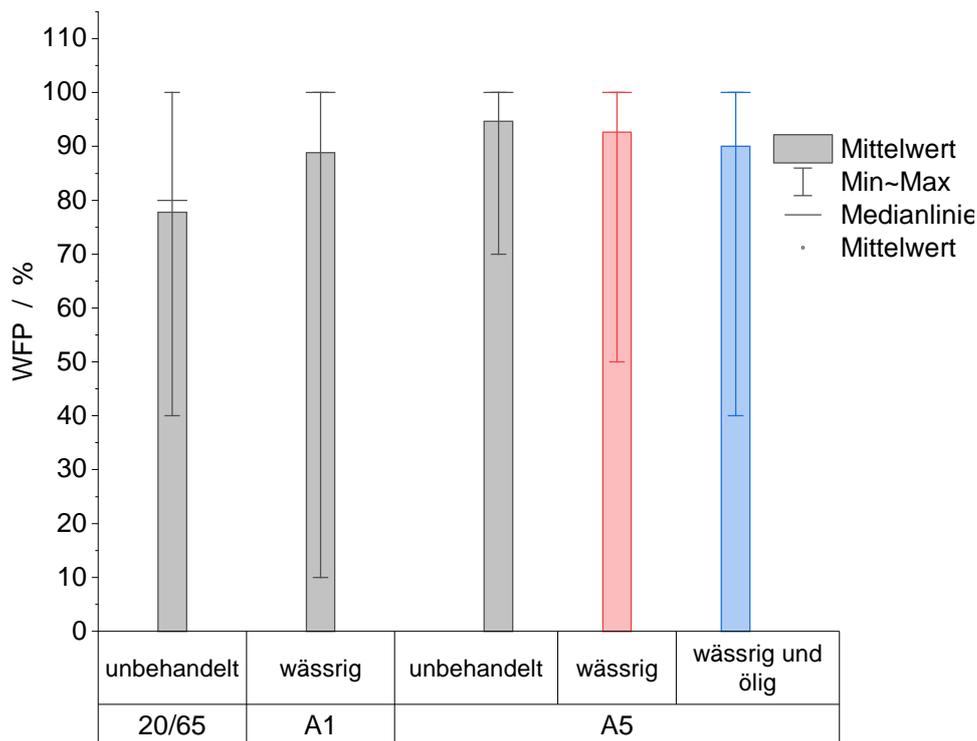


Abbildung 73: Holzbruchanteil WFP unbehandelter, klimatisierter sowie kochwassergelagerter Referenzproben (unbehandelt 20/65, unbehandelt A5) verglichen mit Festigkeiten unbehandelter oder kochwassergelagerter, einfach imprägnierter Proben (wässrig A1 und A5) und kochwassergelagerter zweifach imprägnierter Proben (wässrig und ölig A5)

In Abbildung 74 ist das Ergebnis der in Dill-Langer (2017) vorgeschlagenen Prüfmethode einer Verhältniswertbildung dargestellt. In Anlehnung an die in EN 14374 angegebenen Forderung eines Mindestholzbruchanteils von 70 % wird darin ein Verhältniswert der Scherfestigkeiten von 0,7 auf Mittelwertniveau vorgeschlagen, da dies unempfindlicher gegenüber Ausreißern reagiert. Durch dieses modifizierte Prüfverfahren ist auch bei Furnierschichtholz eine objektive und genau messbare Bewertung der Klebefugenintegrität möglich. Sowohl der Verhältniswert nicht imprägnierter als auch der Wert einfach wässrig imprägnierter Proben liegt deutlich über dem vorgeschlagenen Wert von 70 % (rote Linie). Eine Verhältniswertbildung zweistufig imprägnierter Proben konnte mangels Probenumfang sowie der Unsicherheiten in der Ausgleichsfeuchtebestimmung während der Klimatisierung in Verfahren A1 durch das hydrophobe Materialverhalten nach der zweiten, öligen Tränkung der Werkstücke nicht erfolgen. Ein Vergleich der Zugscherfestigkeiten auf Mittelwertniveau der Zugscherfestigkeit nach Vorbehandlung A5 der ölig imprägnierten Proben zu den

klimateilerten, wässrig imprägnierten Proben nach Vorbehandlung A1 (entspricht einer Klimateilierung im Normalklima ohne Kochwasserlagerung) weist ebenfalls nur einen geringen Festigkeitsverlust von 10 % des Mittelwerts der kochwassergelagerten Proben gegenüber den nicht kochwassergelagerten Proben auf.

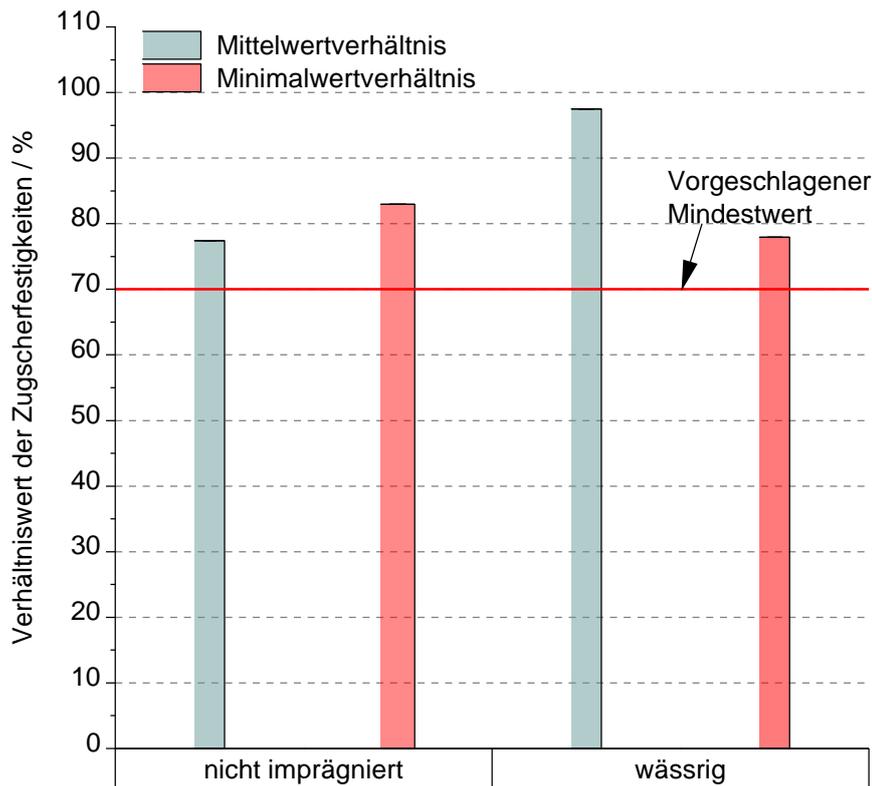


Abbildung 74: Verhältniswert der Zugscherfestigkeiten ohne Vorbehandlung zu kochwassergelagerter Proben auf Mittelwertniveau (grau) oder Minimalwertniveau (rot) nicht imprägnierter (links) und einfach wässrig imprägnierter Proben (rechts)

3.3.2 Blockscherversuche

Für die Klebefugenuntersuchung der imprägnierten Schwellen wurden entlang der einstufig imprägnierten Schwelle in drei Bereichen (Bereich 2, 4 und 6 entsprechend Abbildung 75) über die Querschnittsbreite verteilt (Links L, Mitte M und Rechts R) 79 Blockscherproben der Dimension (50 x 50 x 50) mm³ entnommen. Die Prüfung der Blockscherfestigkeit erfolgte nach EN 14080 (2013) Anhang D mit identer Vorbehandlung der Proben zu den Zugscherversuchen nach Verfahren A1 und A5 der EN 301 (2013). Die Herstellung und

Prüfung der Blockscherproben aus den drei zweistufig imprägnierten Schwellenbauteilen erfolgte analog, jedoch wurde die Lage des Prüflings im Schwellenquerschnitt zufällig gewählt.

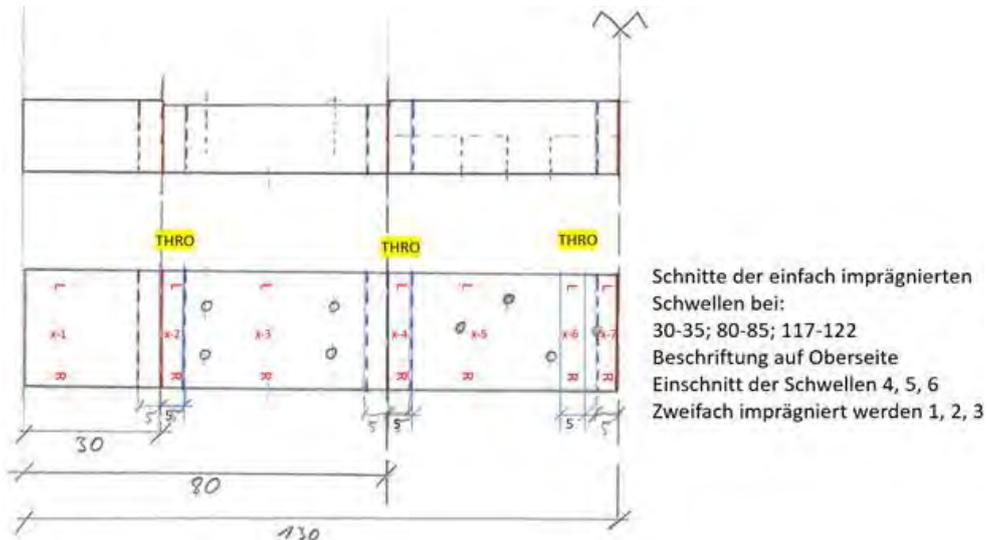
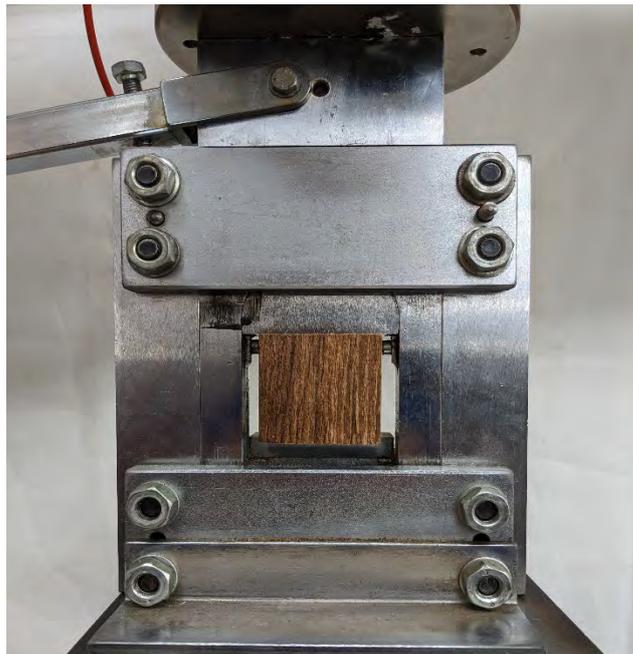


Abbildung 75: Zuschnitt einfach wässrig imprägnierter Schwellen

Für die Herstellung nicht imprägnierter Referenzproben wurden im Zuge der Halbschwellenherstellung 14 Blockscherprüfkörper aus Plattenresten verklebt und auf die geforderten Fertigmaße von (50 x 50 x 50) mm³ gerichtet, in zwei Gruppen unterteilt und entsprechend den vorausgegangenen Erläuterungen entsprechend den Prozessanforderungen der Vorbehandlungsart A1 und A5 klimatisiert und kochwassergelagert sowie anschließend rückgetrocknet. Tabelle 32 gibt einen Überblick über die einzelnen Prüfgruppen.

Gleich zu den Zugscherversuchen wurden an einstufig wässrig als auch an zweistufig wässrig und ölig imprägnierten Probengruppen Blockscherversuche entsprechend EN 14080 Anhang D mit und ohne Vorbehandlung (Vorbehandlung A1 und A5) durchgeführt und untereinander sowie gegen nicht getränkte, bei 20 °C klimatisierte Referenzgruppen verglichen (Abbildung 76).



**Abbildung 76: Blockscherversuchsaufbau
entsprechend EN 14080 Anhang D**

Um eine Aussage über die Verteilung der Blockscherfestigkeiten über die jeweilige Halbschwellenlänge sowie den zugehörigen Querschnitt erhalten zu können, wurden die Gruppen 2 und 4 der Tabelle 32 in Untergruppen entsprechend der Lage und Schwellenachsrichtung (2, 4 oder 6) sowie über die Querschnittsbreite (Links L, Mitte M und Rechts R) entsprechend Abbildung 75 unterteilt.

Tabelle 32: Prüfgruppen Blockscherversuche

Gruppe	Tränkung	Vorbehandlung	Anzahl	Anzahl Untergruppen L/M/R	Anzahl Untergruppen 2/4/6
I Referenz	-	20/65	8		
II	wässrig	A1	45	15 Stk. L 15 Stk. M 15 Stk. R	15 Stk. 2 15 Stk. 4 15 Stk. 6
III Referenz	-	A5	4		
IV	wässrig	A5	34	12 Stk. L 10 Stk. M 12 Stk. R	12 Stk. 2 10 Stk. 4 12 Stk. 6
V	wässrig und ölig	A1	22		
VI	wässrig und ölig	A5	10		

* Bei Vorbehandlung A1 handelt es sich wie bei 20/65 um eine Probenlagerung bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte

Vor einer weiteren statistischen Auswertung wurden die einzelnen Untergruppen der wässrig imprägnierten Gruppen II und IV aufgrund des geringen Stichprobenumfangs auf Normalverteilung überprüft, um die Art der nachfolgenden statistischen Tests festlegen zu können. Da bei der Untergruppe II M auf Basis eines Shapiro-Wilk Testes auf einem Signifikanzniveau von 0,05 die Nullhypothese des Vorliegen einer normalverteilten Grundgesamtheit zurückgewiesen werden muss (DF 15, $p = 0,023$), wurden Vergleiche innerhalb der Untergruppen mittels nicht-parametrischer Kruskal-Wallis Test auf einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Dabei wurde überprüft, ob die Lage des entnommenen Blockscherprüfkörpers in der Schwellenlängsachse und über die Breite einen Einfluss auf die gemessene Scherfestigkeit hat. Der Kruskal-Wallis Test hat ergeben, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Kategorien L, M und R bzw. 2, 4 und 6 der unabhängigen Variablen in Bezug auf die abhängige Variable Blockscherfestigkeit gibt (DF = 11, $H = 10,12$). Mit den vorliegenden Daten wird damit die Nullhypothese nicht abgelehnt, es liegt kein signifikanter Unterschied der Blockscherfestigkeiten innerhalb der Halbschwellen vor (Abbildung 77 und Abbildung 78). Ein Vergleich der Prüfgruppen I - IV im Gesamtlos untereinander (Abbildung 78) ohne Berücksichtigung der Probenlage innerhalb der Schwelle anhand eines Kruskal-Wallis Tests auf einem Signifikanzniveau von 0,05 zeigt trotz geringfügig geringerer Mediane und größerer Streuung der Werte getränkter Proben gegenüber der Referenz keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen (DF 3; $H = 6,13$). Zieht man in die Betrachtung die beiden Prüfgruppen V und VI der zweistufig imprägnierten Proben mit ein, besitzen die ölig getränkten Proben eine signifikant geringere Blockscherfestigkeit (DF = 4; $H = 25,41$) gegenüber den nicht getränkten und wässrig getränkten Gruppen.

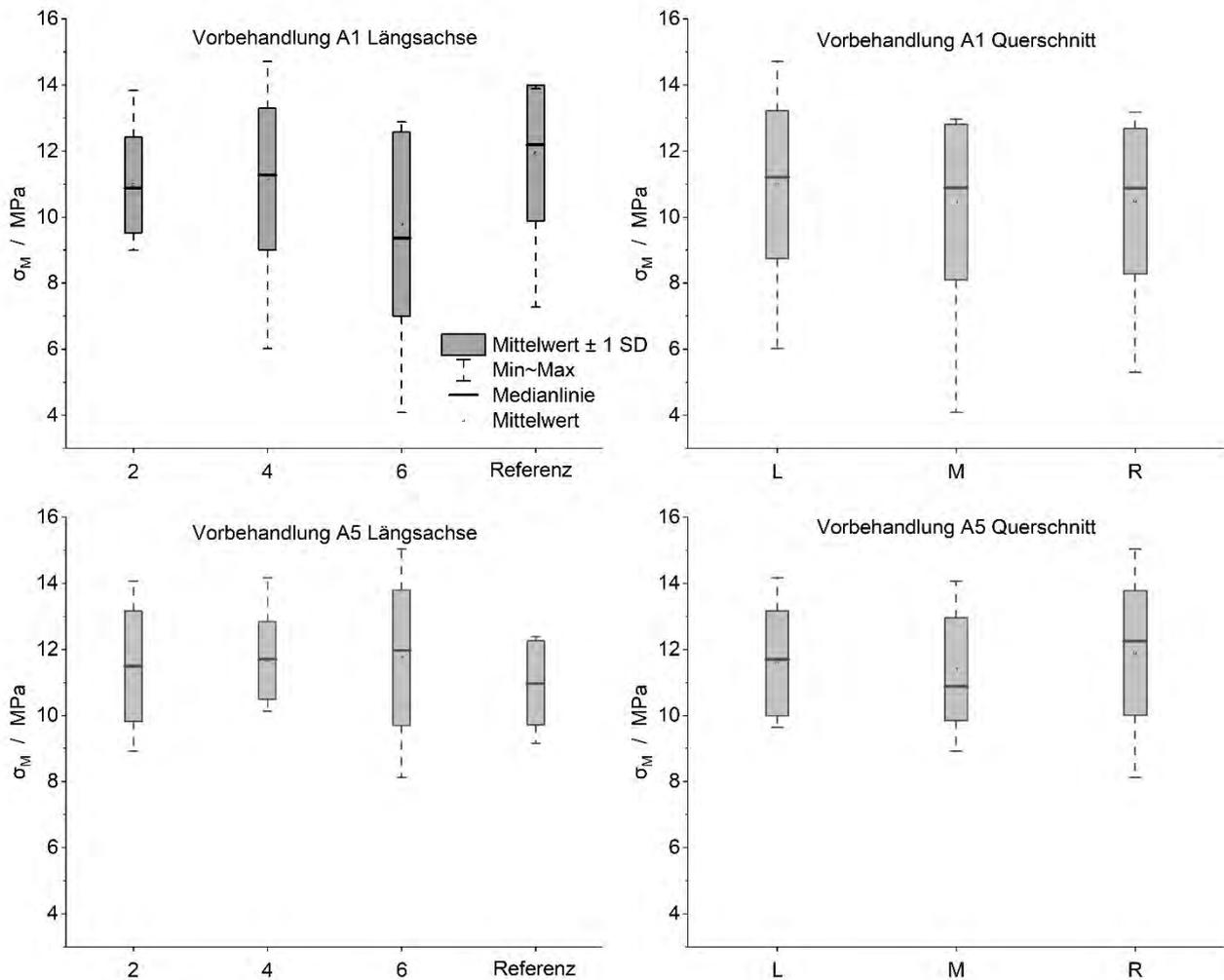


Abbildung 77: Blockscherfestigkeit σ_M einfach wässrig imprägnierter Proben ohne und mit Vorbehandlung (Vorbehandlung A1 und A5) entlang der Schwellenlängsachse der Bereiche 2-4 und über die Querschnittsbreite nach Abbildung 75 Links L, Mitte M und Rechts R verteilt, verglichen zur Referenzgruppe R

Insbesondere beim Vergleich der Verhältniszerte von Blockscherfestigkeiten kochwassergelagerter Proben zu 20 °C / 65 % rel. Feuchte klimatisierter Proben sind insbesondere bei Betrachtung der Minimalwertverhältnisse die stärkere Streuung der Festigkeitsverteilungen getränkter Proben ersichtlich. Auf Basis des gegenüber Ausreißern unempfindlicheren Mittelwertvergleich ist bei wässrig getränkten Proben eine geringfügige Erhöhung des Verhältniszertes erkennbar. Auf Basis des vorausgegangenen nicht-parametrischen Kruskal-Wallis Test sind die Unterschiede nicht signifikant.

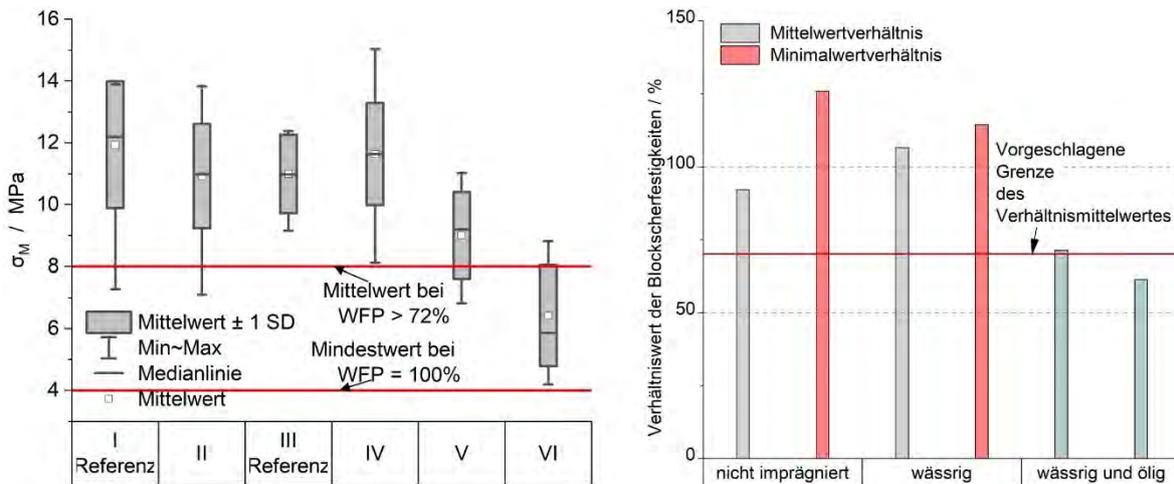


Abbildung 78: Blockscherfestigkeit σ_M aller Probengruppen mit Angabe des in EN 14080 geforderten Mindest- und Mittelwertes der Blockscherfestigkeit (links) sowie Verhältniswert der Blockscherfestigkeiten ohne Vorbehandlung zu kochwassergelagerter Proben auf Mittelwertniveau (grau) oder Minimalwertniveau (rot) nicht imprägnierter (links) und einfach wässrig imprägnierter Proben (rechts)

Die signifikant geringere Blockscherfestigkeit ölig imprägnierter Proben im Vergleich zur Referenz oder einstufig wässrig imprägnierter Proben muss im Falle weiterer Bestrebungen zur Verwendung von Furnierschichtholz aus Buche als Bahnschwellen neben den dynamischen Einflussfaktoren eingehend untersucht werden. Eine mögliche Hypothese ist die Erklärung durch eine holzfeuchtebedingte Veränderung der Scherfestigkeit des Holzes. Durch eine auf die wässrige Imprägnierung erfolgte nachfolgende ölige Imprägnierung wurde die Holzfeuchte der Halbschwellen nach der wässrigen Imprägnierung nur bis zur Tränk reife für die anschließende ölige Hydrophobierung rückgetrocknet. Dadurch sind nach der wässrigen Imprägnierung im Vergleich zur Ausgleichsfeuchte bei Normklimalagerung (20 °C / 65 % rel. Feuchte) mehr Wassermoleküle in den Zellwänden gebunden, welche aber nach der zweiten Tränkstufe mit einem öligen Holzschutzmittel bei Normklimalagerung nicht ausreichend ausdiffundieren können und sich insgesamt ein höhere Holzfeuchte und damit eine geringere Scherfestigkeit einstellt. Eine weitere Hypothese zur Erklärung der verringerten Scherfestigkeit ölig imprägnierter Proben sind Aspekte der Einwirkungsdauer der Imprägniersubstanzen auf die Klebefuge. Infolge des langen Zeitraums (ca. 10 Monate) zwischen Schwellenimprägnierung und Klebefugenprüfung der Gruppen V und VI (Tabelle 32) kann es sich auch um einen zeitabhängige Einfluss der Tränkmittel auf die Festigkeit der Verklebung handeln, was durch weitere Langzeitversuche differenzierter betrachtet werden muss. Jedenfalls kann

auf Basis der durchgeführten Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass weder eine einstufige, wässrige Imprägnierung PRF-verklebter Furnierschichtholzbauteile aus Buche noch eine anschließende ölige Imprägnierung nach Rücktrocknung auf die Tränk reife kurzfristig eine Beeinträchtigung der Klebefugenintegrität darstellt.

3.4 Mechanische Untersuchungen

3.4.1 Schraubenausziehversuche

Zur Beurteilung des zweistufig imprägnierten Furnierschichtholzes hinsichtlich seiner statischen Eignung als Werkstoff zur Herstellung von Holzschwellen wurden weitere Schraubenauszugsversuche an zweistufig imprägnierten Furnierschichtholzschwellen durchgeführt. Die Versuchsdurchführung und die konstruktive Durchbildung sowie Herstellung der Prüflinge ist in Abschnitt 2.2.6 ab Seite 26 des Berichtes beschrieben.

Tabelle 33 zeigt eine Zusammenfassung der gemessenen Schraubenauszugskräfte bei Versagen und der aus den Messprotokollen ermittelten Steifigkeiten der Schraubenverbindung aller durchgeführten Versuche.

Die im Zuge des Projekts zweistufig imprägnierten Furnierschichtholzschwellen wurden bei einem Normklima von 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte bis zum Einstellen der Ausgleichsfeuchte gelagert. Die mit Kreosot imprägnierten Vollholzschwellen wurden im Freien unter Dach gelagert und die unbehandelten Buchenfurnierschichtholzschwellen bis zur Versuchsdurchführung im Innenraum, was sich in der Verhältnismäßig niedrigen Holzfeuchte widerspiegelt. In Abhängigkeit der Imprägnierstufe ist im Falle der Furnierschichtholzschwellen eine Reduktion der Schraubenauszugsfestigkeit erkennbar. Eine zweistufige Imprägnierung reduziert diese im Vergleich zur kreosotimprägnierten Vollholzschwelle deutlich, die Maximallast liegt aber noch deutlich über der in EN 13146-10 geforderten Prüflast von 30 kN je Schwellenschraube. Aufgrund des in Abschnitt 3.2 erläuterten deutlich geänderten Sorptionsverhaltens zweistufig imprägnierter Furniere kann der geringere Schraubenauszugswiderstand in einer durch die zweistufige Imprägnierung deutlich erhöhten Ausgleichsfeuchte des Furnierschichtholz begründet sein.

Tabelle 33: Resultate der Schraubenauszugsversuche

Material	Imprägnierung	F _{max} [kN]	c [kN/mm]	Holzfeuchte
LVL	Einstufig	77,4	55,1	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Einstufig	75,5	34,4	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Einstufig	73,6	40,9	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Einstufig	75,5	39,3	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Zweistufig	70,6	45,3	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Zweistufig	62,1	54,5	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Zweistufig	67,4	43,9	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
LVL	Zweistufig	65,2	NA	Ausgleichsfeuchte 20 °C, 65 % rel. Feuchte
Vollholz	Kreosot (Prüfkörper S2 BU1)	90,9	49,3	gemessen: 16.6 %
Vollholz	Kreosot (Prüfkörper S3 BU1)	88,6	92,7	gemessen: 20.1 %
Vollholz	Kreosot (Prüfkörper S4 BU1)	72,8	55,4	gemessen: 20.4 %
LVL	NA	111,5	147,9	gemessen: 8.6 %

3.5 Vierpunktbiegeversuche

3.5.1 Prüfkörpererteilung

Um die Festigkeit der Verklebung der Furnierschichtholzschwellen unter Einfluss verschiedener Temperaturstufen evaluieren zu können, wurden Kleinprüfkörper hergestellt. Diese sollten experimentell auf das Versagen durch Schubspannung untersucht werden. Die Prüfkörper wurden mittels Formatkreissäge aus 40 mm dicken LVL-Platten geschnitten und in drei Klassen unterteilt:

A ... nicht imprägniert / unbehandelt

W ... nur einstufig mit HSM 1 imprägniert

O ... zweistufig imprägniert, in der ersten Imprägnierstufe mit HSM 1 und nach entsprechender Trocknungsdauer in zweiter Stufe mit HSM 2 imprägniert

Die Details zum Imprägnierverfahren sind in Abschnitt 3.1.2 erläutert.

Die untersuchten Temperaturstufen, denen alle drei Prüfkörperklassen A, W und O ausgesetzt wurden sind -20 °C, 0 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C. Dadurch sollen repräsentative Temperaturen aufgegriffen werden, denen Holzschwellen während ihrer Liegedauer ausgesetzt sein können. Die Prüfkörper haben die Dimensionen L x B x H = (600 (axial) x 50 x 40) mm³ und wurden für geometrisch modifizierte

Vierpunktbiegeversuche ausgelegt. Die Anzahl der Prüfkörper wurde so festgelegt, dass pro Klasse und Temperaturstufe neun Prüfkörper für die Testserie zur Verfügung stehen, also insgesamt 135 Prüfkörper zuzüglich Prüflingen für die Vorversuche. Daraus ergibt sich folgende Probeneinteilung (Tabelle 34):

Tabelle 34: Prüfkörperanzahl je Serie

	A	W	O
	nicht imprägniert	einstufig imprägniert	nicht imprägniert
-20 °C	9	9	9
0 °C	9	9	9
20 °C	9	9	9
40 °C	9	9	9
60 °C	9	9	9

3.5.2 Versuchsaufbau des Vierpunktbiegeversuches

Versuche, die einen Prüfkörper reiner Schubspannung aussetzen sollen, sind aufwendig zu realisieren. Eine experimentelle Variante, um ein reines Schubspannungsfeld mit repräsentativer Ausdehnung zu erzeugen, sind Torsionsversuche. Um torsionsinduzierte Schubspannungen in den Klebefugen testen zu können, sollten die Klebefugen senkrecht zum Momentenvektor angeordnet sein, also senkrecht zur Prüfkörperlängsachse. Durch die angestrebten Imprägnierverfahren und den in Vorversuchen festgestellten Verzug des Furnierschichtholzes bei derartig gestalteten Prüfkörpern, vor allem bedingt durch die wässrige Tränklösung in der ersten Imprägnierstufe mit HSM 1, wurden alternative experimentelle Anordnungen angestrebt. Zur Aufrechterhaltung der Temperaturkonditionierung der Prüfkörper ohne die Umgebung des laufenden Versuchs klimatisieren zu müssen, wurde eine Versuchsmethode gewählt, die einerseits rasches Einbauen des Prüfkörpers in den experimentellen Aufbau ermöglicht. Weiters sollte vermieden werden, eventuelle versuchsrelevante Messsensorik nach EN 408 (2012) an den Prüfkörpern anbringen zu müssen, die zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Brettschichtholz angeklebte Stahlplatten fordert, da dies zumindest bei ölig imprägnierten Prüfkörpern schwer umzusetzen war. Um das Verhalten der Klebefuge unter reiner Schubspannung evaluieren zu können, wurde ein geometrisch angepasster Vierpunktbiegeversuch gewählt, der weitgehend frei von parasitären Spannungskomponenten eben diesen gewünschte konstante Schubspannungsverteilung ermöglicht. Ein Vergleich von symmetrischen Dreipunkt- und Vierpunktbiegeversuchen

(Abbildung 79) soll die geometrische Abhängigkeit der Querkraft und somit der auftretenden Schubspannungen in Ebenen parallel zu den Klebefugen veranschaulichen. Für beide Versuche sollte eine einheitliche Stützweite l gelten. Beim Dreipunktbiegeversuch wird die einzige Variable von der einwirkenden Kraft F verkörpert. Sowohl das Biegemoment als auch die Querkraft hängen nur von F , das Moment auch von l ab. Beim Vierpunktbiegeversuch kommt zusätzlich der Parameter a hinzu. Dieser beschreibt den Abstand der Lasteintragungspunkte zueinander. Die Querkraft hängt auch bei diesem Versuchsaufbau nur von der einwirkenden Kraft F ab, das Moment zusätzlich noch vom Parameter a .

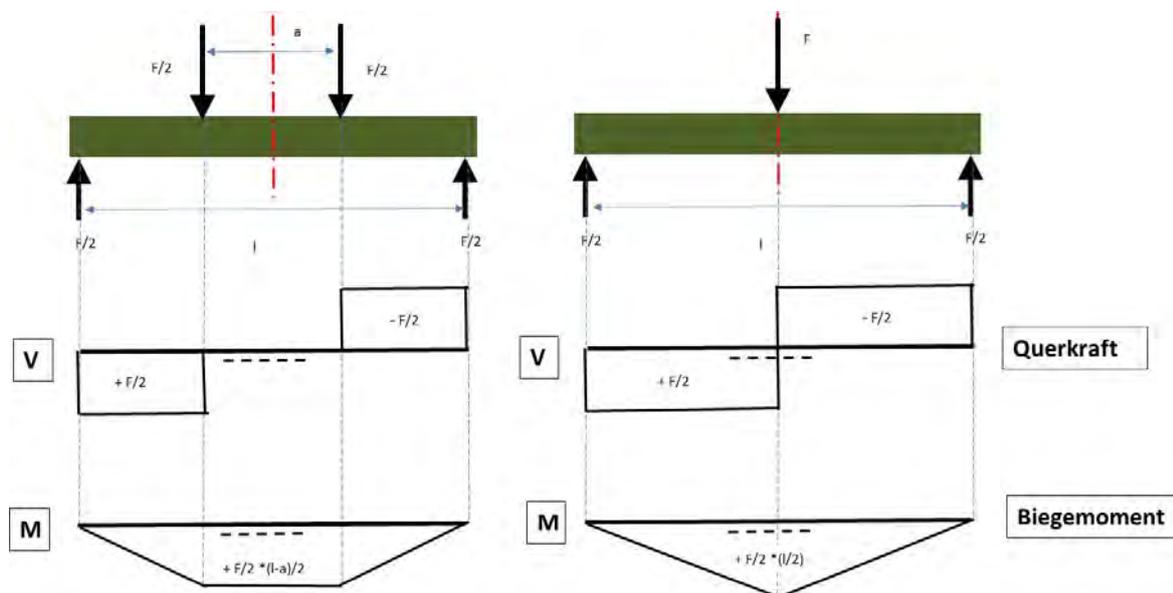


Abbildung 79: Vergleich von Anordnung und auftretender Schnittgrößen bei Drei- und Vierpunktbiegeversuch

Abbildung 80 zeigt die Entwicklung Querkraft bei variablem Abstand a . Die Einwirkende Kraft F wird in diesem Diagramm für jedes a so berechnet, dass das dabei auftretende Moment konstant bleibt. Die steigende auftretende Querkraft mit steigendem Abstand a ist deutlich erkennbar.

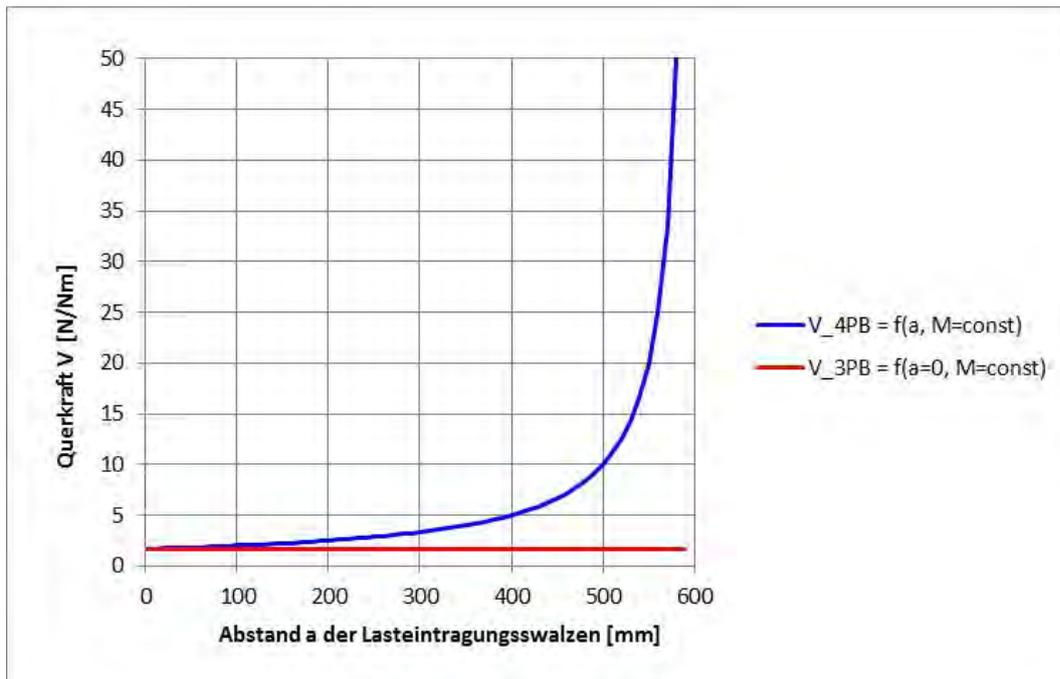


Abbildung 80: Querkraftentwicklung bei einem Vierpunktbiegeversuch mit steigendem Abstand a

Folgende Anforderungen sollten durch den Versuchsaufbau erfüllt sein:

- Ein ausreichendes, gleichförmiges Schubfeld soll sich zwischen Auflager und Lasteinwirkungspunkt entwickeln, um ein eindeutiges Schubversagen zu ermöglichen.
- Die Kapazität der Prüfmaschine darf dabei nicht überschritten werden
- Die Durchbiegung des Prüfkörpers darf nicht an die Grenzen des Prüfaufbaus kommen
- Die Dimensionen der Prüfkörper müssen dementsprechend festgelegt werden.

Alle dazu erforderlichen Materialkennwerte wurden konservativ angenommen. Die Kapazität der Prüfmaschine von 100 kN wurde für die Berechnungen auf 80 kN limitiert. Daraus folgt eine maximal erreichbare Querkraft von 40 kN beim Vierpunktbiegeversuch.

Die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ und die charakteristische Schubfestigkeit wurden entsprechend den Herstellerangaben mit $f_{m,k} = 80$ MPa und $f_{v,k} = 8$ MPa angesetzt.

Abbildung 81 zeigt eine analytisch durchgeführte Abschätzung der maximal auftretenden Durchbiegungen mit den festgelegten Prüfkörperabmessungen $L \times B \times H = 600$ (axial) $\times 50 \times 40$ mm³. Die Aufgrund des experimentellen Aufbaus maximal mögliche Durchbiegung w_{\max} von 68 mm werden nicht überschritten.

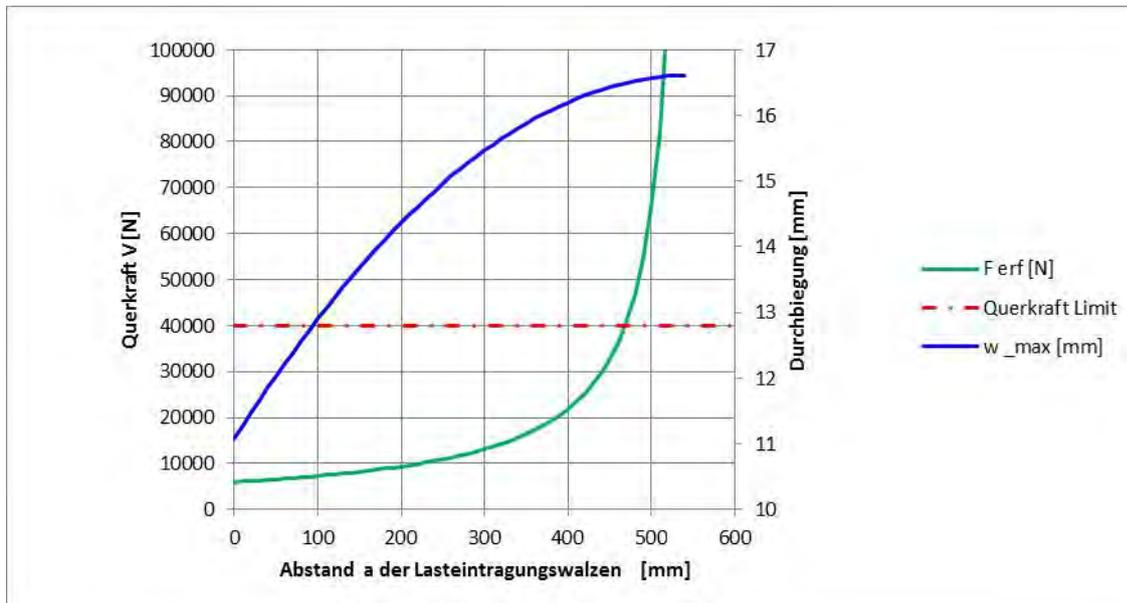


Abbildung 81: Querkraft bei Erreichen des Versagemoments und die zugehörige Durchbiegung beim Vierpunktbiegeversuch

Dabei wurde der Abstand der Lasteintragungswalzen zueinander von 160 mm bis 400 mm variiert. Die Auflagerwalzen wurden dabei unverändert mit einem Abstand von 560 mm belassen, was einem Randabstand von 20 mm entspricht. Im Zuge dieser Parameterstudie wurde die Wahrscheinlichkeit auf Schubversagen vor einem Versagen auf Biegung neben Durchbiegung und Ausbildung des Schubfelds bewertet. Die Berechnung erfolgte mit orthotropem, linearen Materialgesetz. Zwischen den belasteten Walzen und dem Auflager wurde eine Kontaktformulierung mit wirksamer Reibung etabliert. Die Berechnung wurde mit geometrischer Nichtlinearität durchgeführt. Tabelle 35 beschreibt die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie. Von links nach rechts sind folgende Größen angegeben:

a beschreibt, wie bereits bekannt, den Abstand der Lasteintragungswalzen zueinander

F gibt die einwirkende Kraft pro Walze an und entspricht somit der auftretenden Querkraft

u entspricht der maximalen vertikalen Verformung des Prüfkörpers

σ_{11} ist die maximal auftretende Spannung in Längsrichtung des Prüfkörpers

τ_{13} ist die maximale Schubspannung. Sie tritt zwischen Auflager und Lasteinwirkungspunkt auf

Die Faktoren EF, σ_{11} und EF, τ_{13} geben die Prozent der jeweils erreichten Festigkeit bei Normierung des Spannungszustandes auf Biegeversagen an.

Die grün hervorgehobene Zeile gibt die ausgewählte Konfiguration an. Der Abstand a beträgt hier 360 mm. Wenn der aus der Simulation gewonnene Spannungszustand so skaliert wird, dass σ_{11} den Wert der Biegefestigkeit $f_{m,k}$ erreicht, also $EF, \sigma_{11} = 100 \%$, dann lässt sich feststellen das die skalierte Schubspannung τ_{13} die Schubfestigkeit $f_{v,k}$ bereits um den Faktor 1,584 übertroffen hat. Daraus lässt sich folgern, dass diese geometrische Konfiguration eher zum Versagen aufgrund der Schubspannung führt als zum Versagen durch Biegung. Somit stellt sich diese Konfiguration als geeignet heraus.

Tabelle 35: Ergebnisse der FE-Parameterstudie

Abstand der Lasteintragungswalzen	Gesamte Einwirkung	Durchbiegung	Normalspannung	Schubspannung	Biegefestigkeit	Schubfestigkeit
					$f_{m,k} = 80 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,k} = 8 \text{ N/mm}^2$
a	F	u	σ_{11}	τ_{13}	EF, σ_{11}	EF, τ_{13}
[mm]	[N]	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]	[%]	[%]
400	30400	14.43	108.4	23.6	100	217.7
360	22300	15.09	112.4	17.8	100	158.4
320	17600	15.45	115.9	14.08	100	121.5
300	15930	15.5	117	12.74	100	108.9
280	14540	15.47	117.7	11.62	100	98.7
240	12390	16.31	118.8	9.86	100	83.0
200	10790	17.12	119.9	8.56	100	71.4
160	9557	17.72	120.9	7.57	100	62.6

Abbildung 82 zeigt den maßgebenden Schubspannungsverlauf τ_{13} , der sich zwischen Auflager und Lasteinwirkungspunkt (in der Abbildung markiert) entwickelt. Da diese Spannungen als erste Komponente des Spannungstensors die betreffende Festigkeit überschreiten werden, ist in diesen Bereichen mit dem Ansatz des Schubversagens zu rechnen.

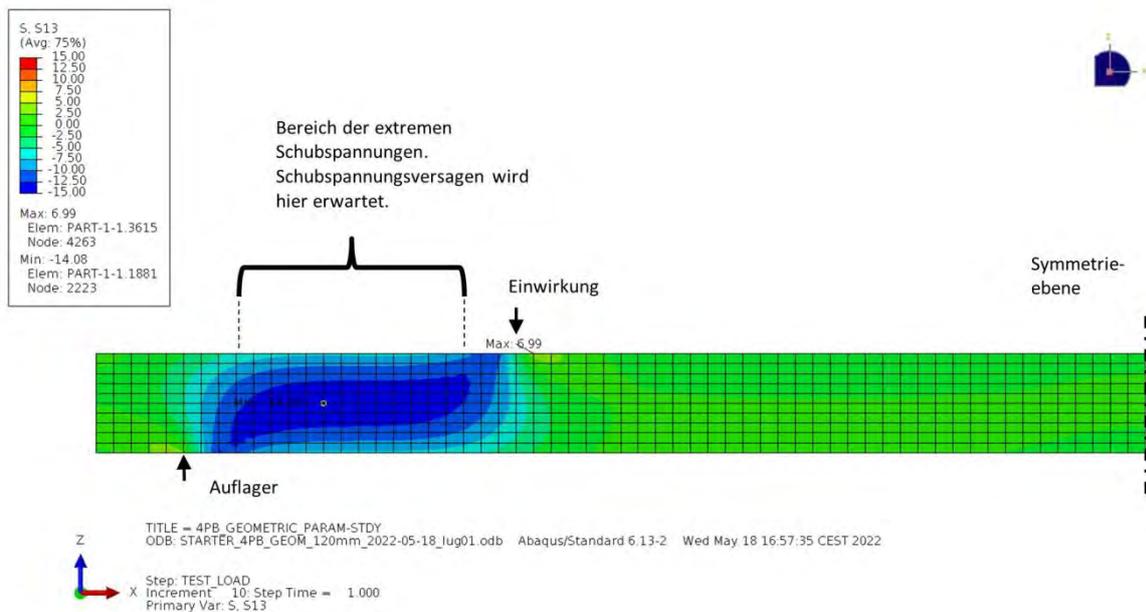


Abbildung 82: Schubspannungen τ_{13}

Abbildung 83 zeigt die vertikalen Verformungen. Diese liegen im Größenordnungsbereich der analytischen Vorbemessung.

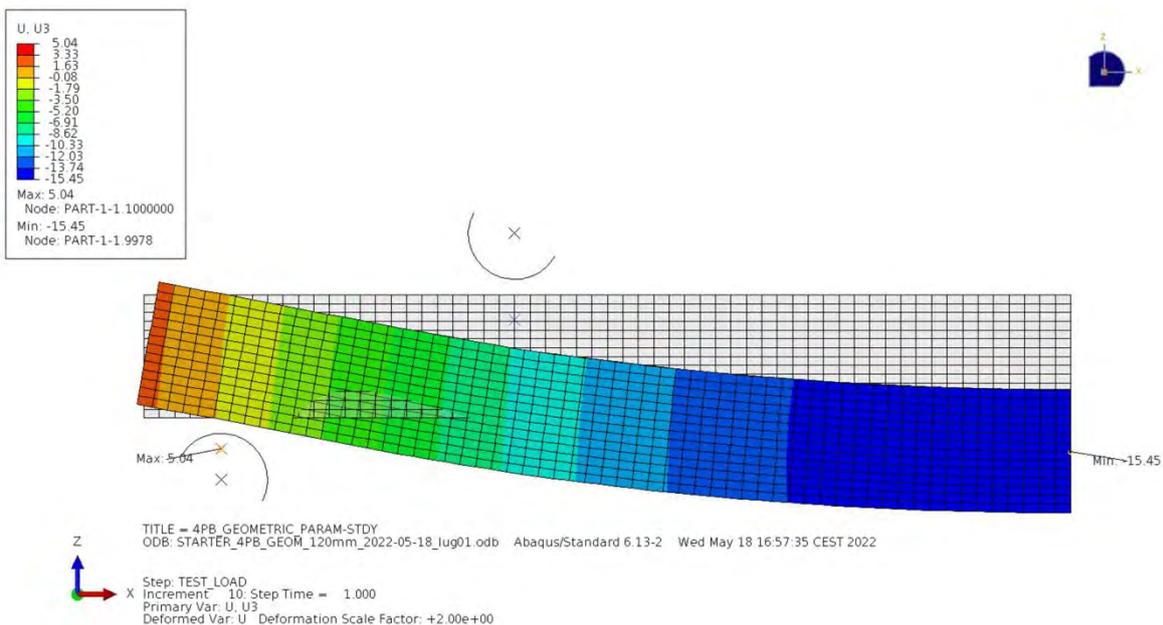


Abbildung 83: Vertikalverformung

Abbildung 84 zeigt die durch Biegung hervorgerufenen Normalspannungen.

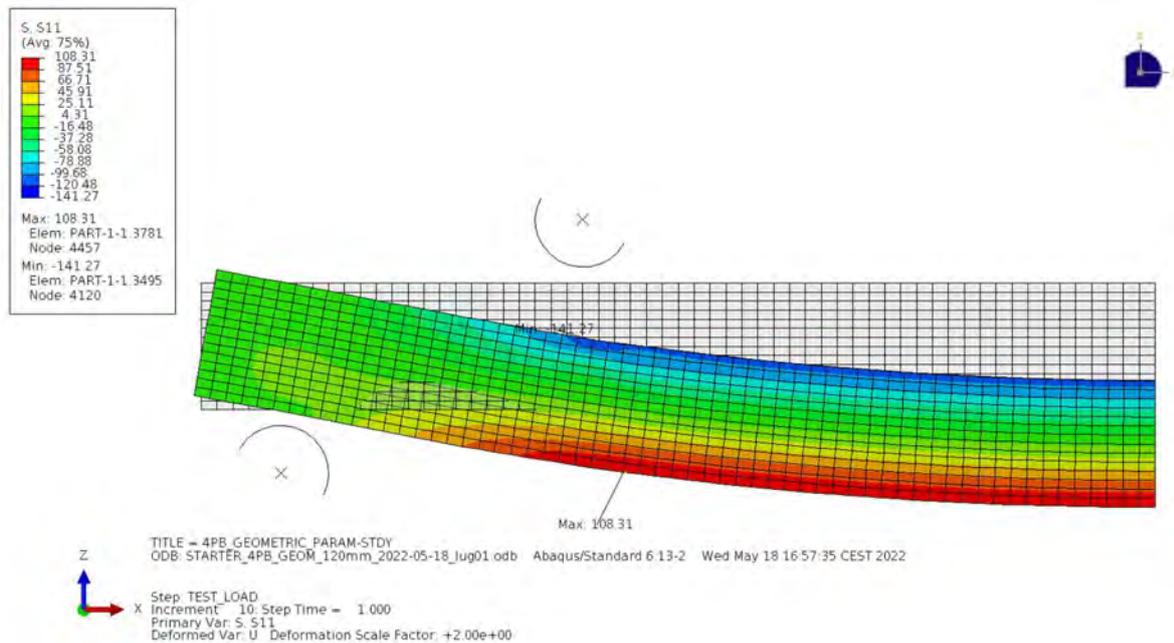


Abbildung 84: Normalspannung σ_{11}

3.5.3 Prüfkörperfertigung

Die Prüfkörper wurden mit einer Formatkreissäge auf die Maße $L \times B \times H = 600$ (axial) $\times 50 \times 40 \text{ mm}^3$ zugeschnitten. Die Imprägnierung der Prüfkörper (siehe Abbildung 85 nach Imprägnierung mit Holzschutzmittel 1) erfolgte aus logistischen Gründen gemeinsam mit den Großprüfkörpern entsprechend Abschnitt 3.1.2. Auch die Lagerung bis zur Temperaturkonditionierung erfolgte gemeinsam im Normalklima bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65% relativer Luftfeuchtigkeit. Um die Holzfeuchte möglichst wenig zu beeinflussen, wurden die Prüfkörper während der Konditionierung luftdicht in Kunststoffsäcken verpackt. Erst unmittelbar vor der Prüfung wurden sie wieder aus den Kunststoffsäcken entnommen.

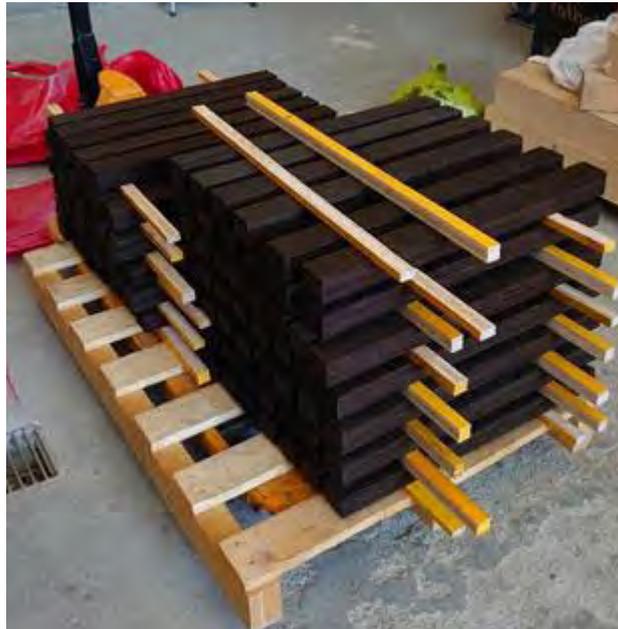


Abbildung 85: Mit Holzschutzmittel 1 getränkte Prüfkörper für Vierpunktbiegeversuche

3.5.4 Massenentwicklung der Prüfkörper

Nach dem Zuschnitt der Kleinprüfkörper wurden diese randomisiert den betreffenden Prüfkörperklassen zugeteilt und beschriftet. Die Prüfkörper der Klasse A, die nicht imprägniert wurden, wurden dauerhaft bis zur Prüfung im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Prüfkörper der Klassen W und O, die in einem ersten Schritt mit HSM 1 imprägniert werden sollten, wurden mit der wässrigen Tränklösung zum Zeitpunkt P1 imprägniert (Abbildung 86) und erfuhren demzufolge eine Erhöhung der Masse. Nach der Imprägnierung wurden die Prüfkörper der Klassen O und W ebenfalls im Normalklima gelagert. Zum Zeitpunkt P2 wurden die imprägnierten Prüfkörper einer technischen Trocknung unterzogen. W wurden daraufhin wieder im Normalklima gelagert, O wurden weiter technisch getrocknet. Zum Zeitpunkt P3 wurden die Prüfkörper der Klasse O in der zweiten Stufe mit HSM 2 imprägniert und anschließend bis zur Prüfung zum Zeitpunkt P4 mit den anderen Prüfkörpern der Klassen A und W im Normalklima gelagert.

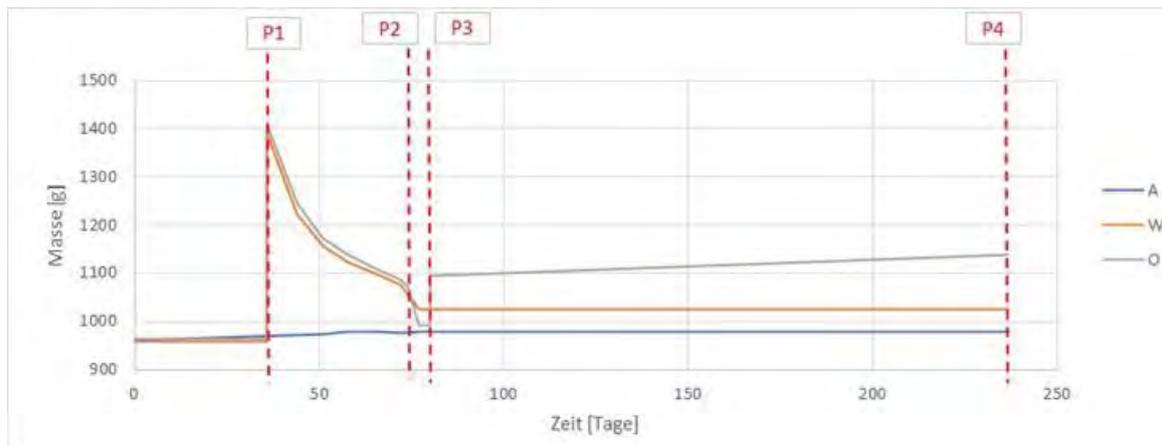


Abbildung 86: Zeitlicher Verlauf der Masseentwicklung der Prüfkörper

Abbildung 86 zeigt den zeitlichen Verlauf der Entwicklung der Masse. Zwischen P3 und P4 blieb die Masse der Prüfkörper A und W annähernd konstant. Die Prüfkörper O haben an Feuchtigkeit in etwa die Masse wieder aufgenommen, die sie in der verlängerten technischen Trocknung gegenüber den Prüfkörpern W zusätzlich verloren haben. Nach Erreichung der Massenkonstanz wurde mit der Durchführung der Vierpunktbiegezugprüfungen begonnen.

3.5.5 Bestimmung der Konditionierungsdauer

Um einerseits die Dauer der Konditionierung abschätzen zu können, wurden die Vorgänge der Temperaturkonditionierung simuliert. Dazu wurden FE-Modelle erstellt, um den Wärmetransport darstellen zu können. Um die Wärmeleitung realistisch darstellen zu können, wurden die Wärmeleitfähigkeiten mit einem *Taurus TCA 300 DT* bestimmt. Zu diesem Zweck wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 40 mm verwendet, um die Dimension in den drei Hauptrichtungen des Furnierschichtholzes, die den prinzipiellen Hauptrichtungen des Holzes (axial in Faserrichtung, tangential in Furnierebene senkrecht zur Faserrichtung und radial senkrecht Faserrichtung und Klebefugen), zugeordnet werden können, experimentell ermitteln zu können. In Tabelle 36 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst.

Tabelle 36: Gemessene Wärmeleitfähigkeit des Furnierschichtholzes

Gemessene Wärmeleitfähigkeit LVL				
Richtung	λ Mittelwert	1. Messung	2. Messung	3. Messung
	[W/m K]	[W/m K]	[W/m K]	[W/m K]
axial	1.286	1.258	1.289	1.312
tangential	0.206	0.205	0.206	0.208
Radial	0.220	0.218	0.219	0.222

Zunächst wurde die Dauer der Konditionierungsvorgänge, ausgehend von einer Raumtemperatur von 20 °C, auf die gewünschte Temperaturstufen (-20 °C, 0 °C, 40 °C, 60 °C) simuliert. Dazu wurden prismatische Prüfkörper mit den entsprechenden Abmessungen und der orthotropen Materialorientierung modelliert (Tabelle 37).

Tabelle 37: Konditionierungsdauer der Prüfkörper

Ausgangs-temperatur	Ziel-temperatur	Dauer der Konditionierung
[°C]	[°C]	[h]
20	-20	32.0
20	0	28.9
20	40	20.5
20	60	23.1

Die Prüfkörper wurden von der Konditionierung in einem thermischen Isolationsbehälter von der Konditionierungskammer zur Prüfmaschine transportiert. Der Einbau des Prüfkörpers und die anschließende Prüfung bis zum Bruch dauert in der Regel vier bis höchstens sechs Minuten. Um die Notwendigkeit einer klimatisierten Einhausung um den Versuchsaufbau zu prüfen, wurde für die Prüfkörper der Abbau der Konditionierung untersucht. In diesen Fällen betrug die Starttemperatur den Konditionierungswert, wogegen die Umgebungstemperatur mit 20 °C angesetzt wurde.

Abbildung 87 zeigt ein Schnittbild des auf -20 °C konditionierten Modells. Nach 257 s herrschen im überwiegenden Teil des Prüfkörpers immer noch nahezu -19.8 °C. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine zusätzliche Klimatisierung während des laufenden Versuchs als nicht zwingend notwendig eingestuft.

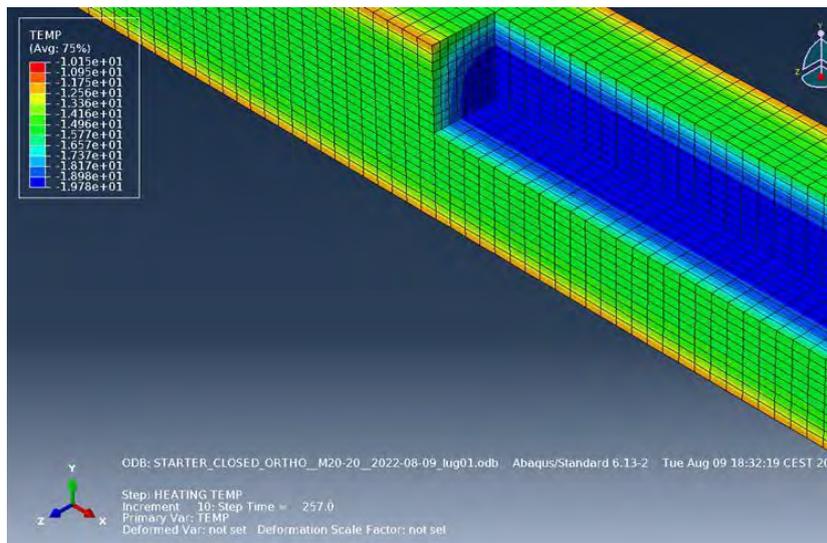


Abbildung 87: Abbau der Konditionierung von -20 °C im Normalklima des Labors (+20 °C)

3.5.6 Versuchsdurchführung

Der realisierte Versuchsaufbau entspricht einem Vierpunktbiegeversuch. Der Abstand der Lasteinleitungspunkte wurde mit 360 mm angesetzt. Dadurch ist Schubversagen zu erwarten, wie bei Vorversuchen gezeigt werden konnte. Abbildung 88 zeigt den Versuchsaufbau mit eingebautem Prüfkörper. An der Oberseite des Prüfkörpers wurde mittig eine Schiene aus Aluminium mit einer kleinen Schraube befestigt. Diese Schiene, die über die Breite des Prüfkörpers zu beiden Seiten gleich hinausragt, erlaubt den Spitzen der Tauchanker beider eingesetzten Wegaufnahme die Verformung der Mitte des Prüfkörpers zu erfassen. Das Profil und die Abmessungen der Schiene wurden daher so gewählt, dass die Abweichung der gemessenen Durchbiegung im Vergleich zur tatsächlichen Durchbiegung vernachlässigbar ist. Der Versuchsaufbau wurde konzipiert und eingerichtet, um schnelles Einbauen der Prüfkörper unter Zuhilfenahme von Lehren und Schablonen zu ermöglichen. Hierbei wurde sowohl die Positionierung der Prüfkörper auf den Auflagerwalzen, die Einrichtung der Einwirkungswalzen als auch der beiden Wegaufnahme berücksichtigt.

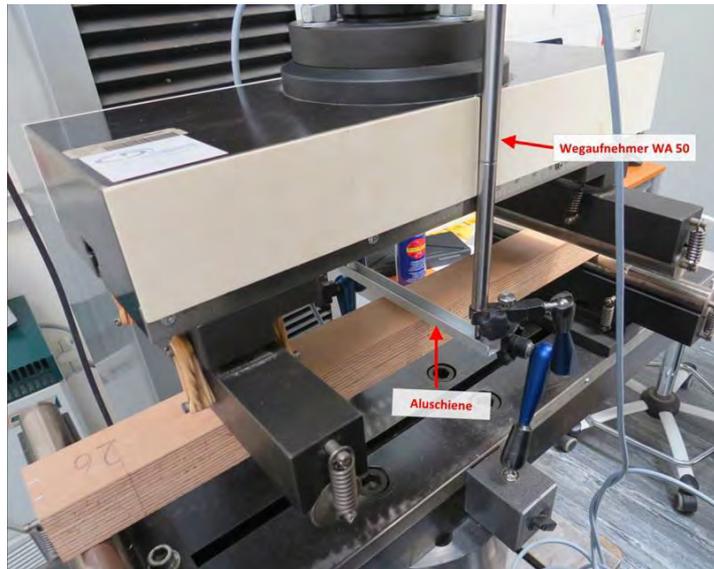


Abbildung 88: Versuchsaufbau Vierpunktbiegeversuch

Nach abgeschlossenem Einbau des Prüfkörpers wurde ein zweistufiges Prüfprogramm gestartet. Zuerst wurde der Kontakt der Einwirkungswalzen mit dem Prüfkörper etabliert. Dazu wurde das bewegliche Kreuzjoch der Prüfmaschine, an dem die tarierte Kraftmessdose mit dem Träger der Einwirkungswalzen angebracht war, in einer schnellen Bewegung nach unten geführt, bis eine Kontaktkraft zwischen 50 N und 100 N diese Bewegung automatisch stoppte. Danach wurde direkt mit dem eigentlichen Prüfvorgang begonnen. Um den Versuch speziell im Bereich nach dem erfolgten Bruch besser kontrollieren zu können, erfolgte die Belastung weggesteuert. Die Geschwindigkeit der Bewegung des Kreuzjochs nach unten wurde mit 3 mm/min festgelegt. Das entspricht in etwa einer Lastrate von 7500 N/min. Nach erfolgtem Versagen wurde der Versuch manuell gestoppt, um das Versagensbild fotografisch festhalten zu können.

3.5.7 Ergebnis der Vierpunktbiegeversuche

Direkt nach dem beendeten Versuch wurden die Prüfkörper hinsichtlich ihres Versagens überprüft. Bei Versagen zufolge Schubspannung wurde die Bruchfläche bewertet, ob Versagen in der Klebefuge oder im Holz eintrat. Hierbei ist das Ergebnis eindeutig: Bei allen Arten der Imprägnierung und bei allen Temperaturstufen trat Schubversagen stets in den Furnieren auf und nie in der Klebefuge (Abbildung 89 und Abbildung 90).

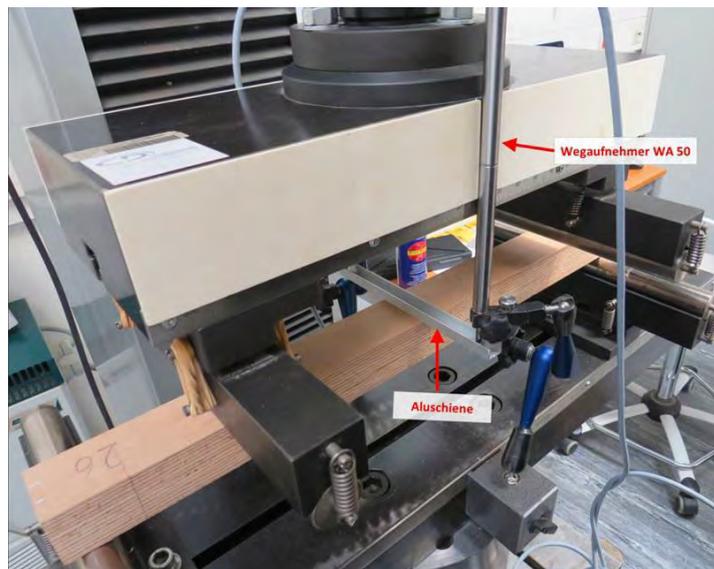


Abbildung 89: Typisches Versagensbild: unbehandelter Prüfkörper, eindeutiges Schubversagen



Abbildung 90: Typisches Versagensbild: eindeutiges Schubversagen. Unbehandelter Prüfkörper. Bei allen Prüfkörpern verlief die Bruchfläche im Holz. Ein Versagen des Klebers konnte nicht nachgewiesen werden

Aus den aufgezeichneten Messdaten (Prüfkraft und Durchbiegung in Feldmitte zu beiden Seiten des Prüfkörpers zur Beseitigung etwaiger Verdrehungen) wurde die maximale auftretende Kraft bestimmt, um die Schubspannung bei Versagenseintritt zu ermitteln sowie

der Elastizitätsmodul des Furnierschichtholzes, der die Biegeverformung beschreibt. Somit wurde der globale Biegeelastizitätsmodul ermittelt, welcher auch die Schubdeformationen beinhaltet. Die Bestimmung der maximalen auftretenden Kraft erfolgt durch Ermittlung des Maximums in der tarierten digitalen Aufzeichnung des Versuchs. Daraus lässt sich die maximale Schubspannung im Querschnitt und zugeordnet in den Ebenen parallel zu den Klebefugen τ_{LR} aus der bekannten Beziehung für rechteckige Querschnitte mit der Querkraft $V = F/2$ bestimmen:

$$\tau_{lr} = \frac{3V}{2bh}$$

Der Elastizitätsmodul kann mittels gemessenen Kraft- und Verformungsverläufen berechnet werden. Dazu wird, wie in Abbildung 91 dargestellt, in einem ersten Schritt ein linearer Abschnitt der Zeit-Kraft-Kurve ermittelt, der nur in einem Bereich mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit und gültiger linearer Elastizität auftreten kann. Dieses Vorgehen dient dazu, den Einfluss eventueller viskoser Phänomene gering und in ähnlicher Größenordnung für alle Prüfkörper zu halten. Daraus ergeben sich zu den limitierenden Zeitpunkten die beiden begrenzenden Kraftpunkte F_0 und F_1 .

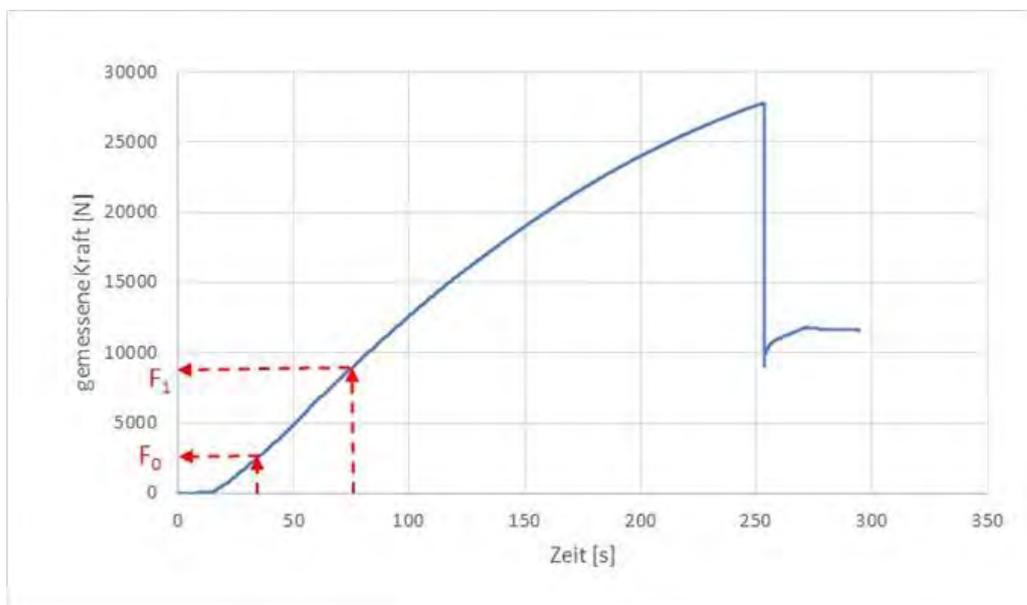


Abbildung 91: Zeitlicher Verlauf der aufgebrachtten Kraft F während des Versuchs

Die Ermittlung des globalen Elastizitätsmoduls erfolgt nach den u.a. in EN 408 (2012) angegebenen Grundlagen der technischen Mechanik.

Die folgenden Diagramme Stellen die Ergebnisse der beschriebenen Werte dar. Auf der horizontalen Achse sind die maximalen erreichten Schubspannungen dargestellt. Die vertikale Achse zeigt die errechnete Steifigkeit in Form des globalen Elastizitätsmoduls. Die Konditionierung ist der Form der Punktmarkierung und die Art der Imprägnierung ist an der Farbe der Punktmarkierung abzulesen. Die Bezeichnungen A, W und O wurden in Abschnitt 3.5.1 erläutert. Abbildung 92 zeigt alle Resultate. Da die Darstellung zunächst unübersichtlich erscheinen kann, wurden in den Abbildung 93 bis Abbildung 97 werden jeweils die Ergebnisse der jeweiligen Konditionierungsstufe dargestellt. Um die Einordnung in den Kontext der gesamten Ergebnisse zu erleichtern, wurden die jeweils nicht hervorgehobenen Datenpunkte grau gefärbt. Bereits in Abbildung 92 wird der grundlegende Trend deutlich, dass mit abnehmender Temperatur die Prüfkörper an Steifigkeit und Festigkeit zunehmen.

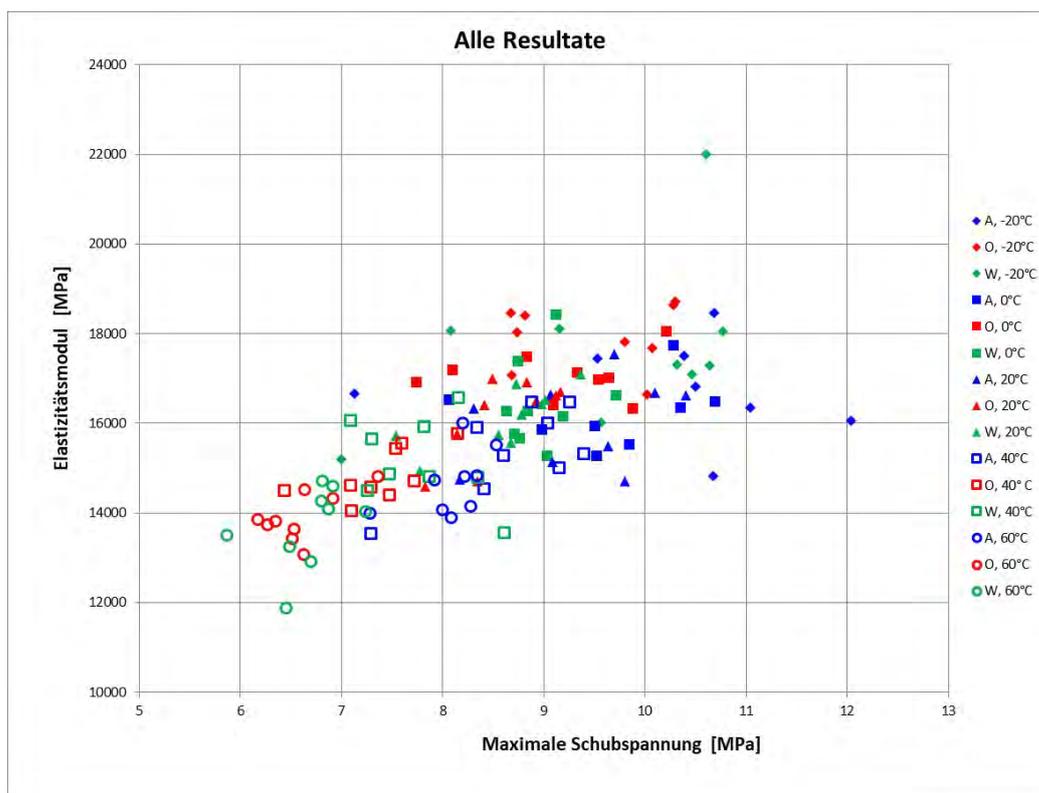


Abbildung 92: Auswertung aller Prüfkörper

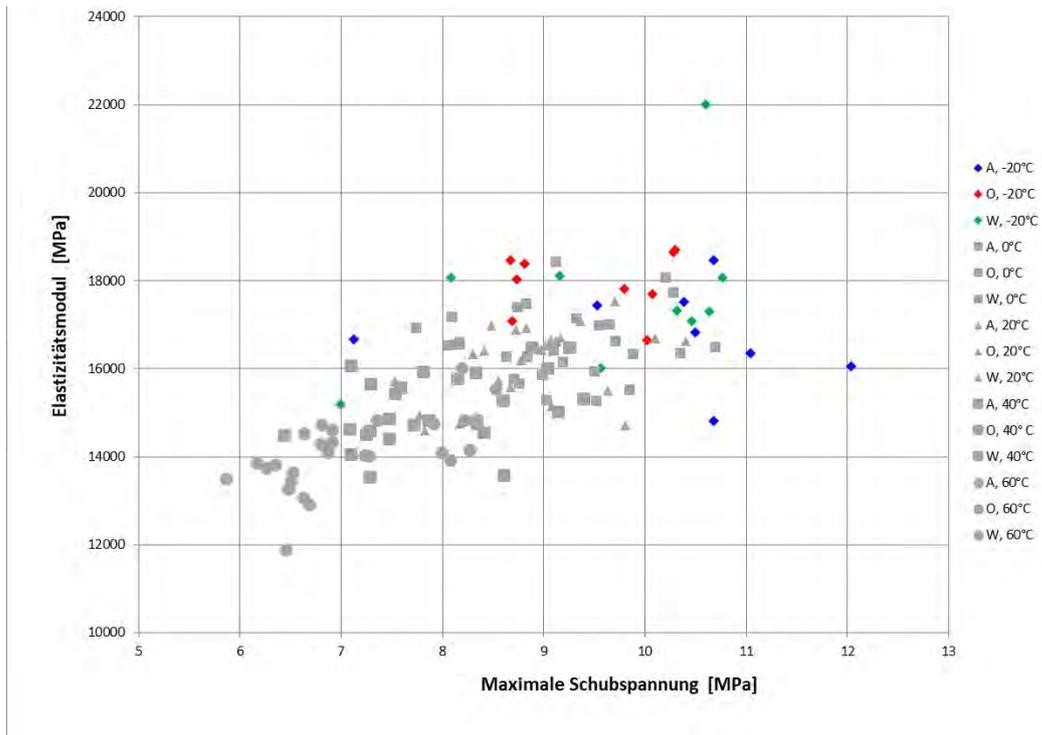


Abbildung 93: -20 °C hervorgehoben

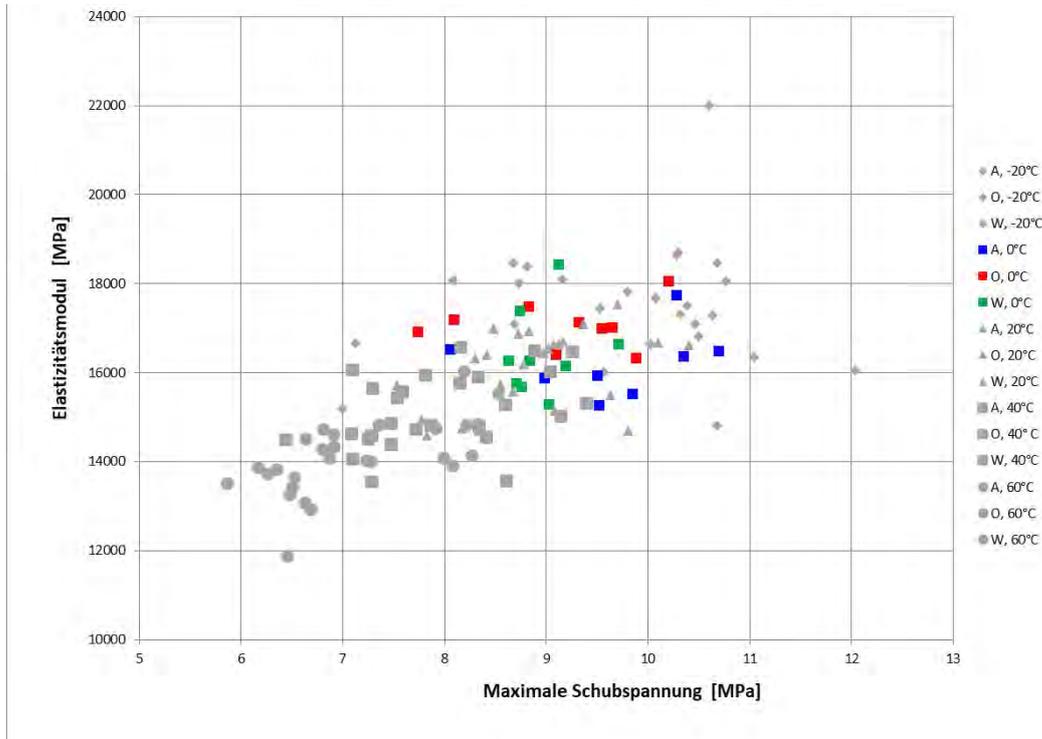


Abbildung 94: 0°C hervorgehoben

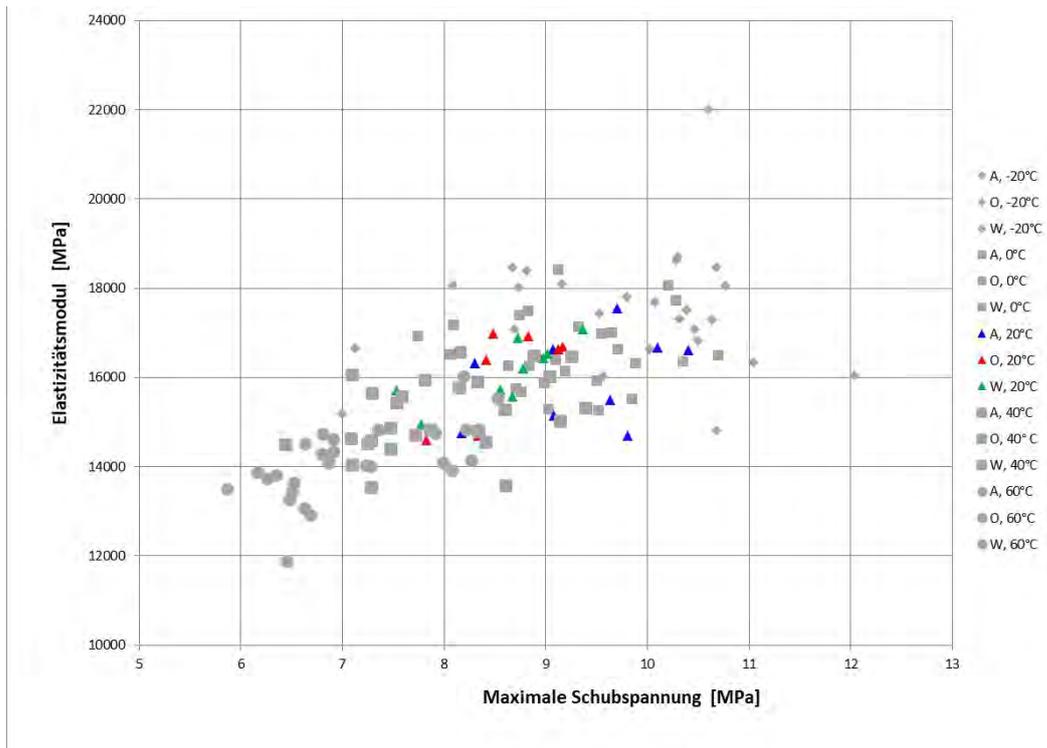


Abbildung 95: +20 °C hervorgehoben

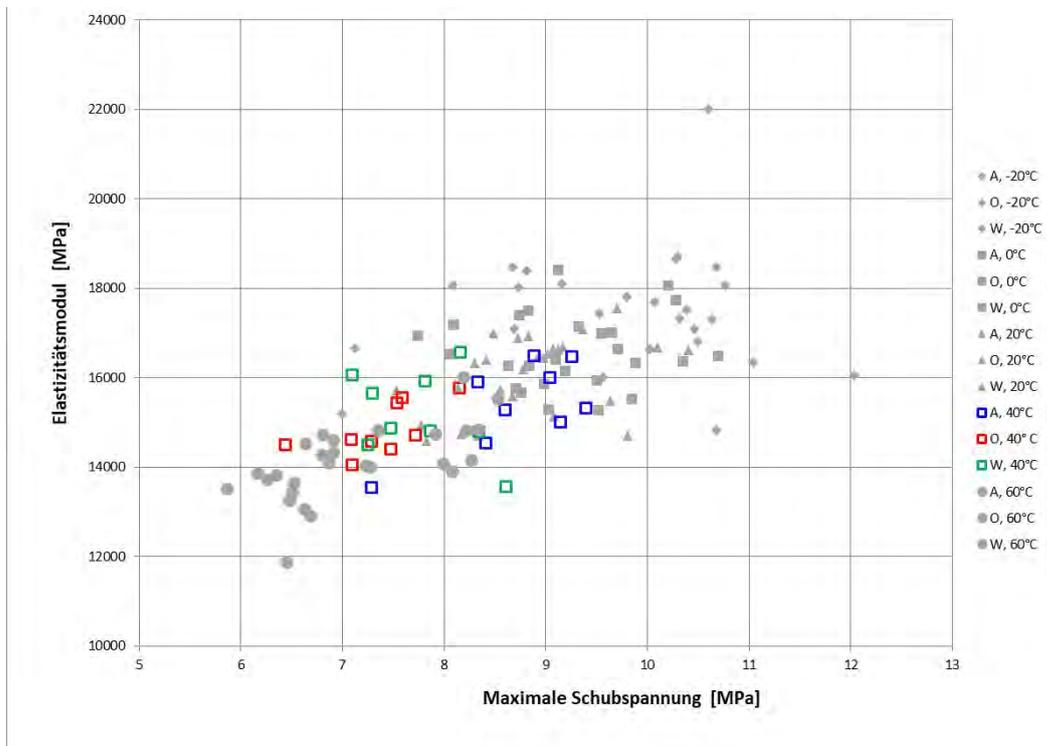


Abbildung 96: +40 °C hervorgehoben

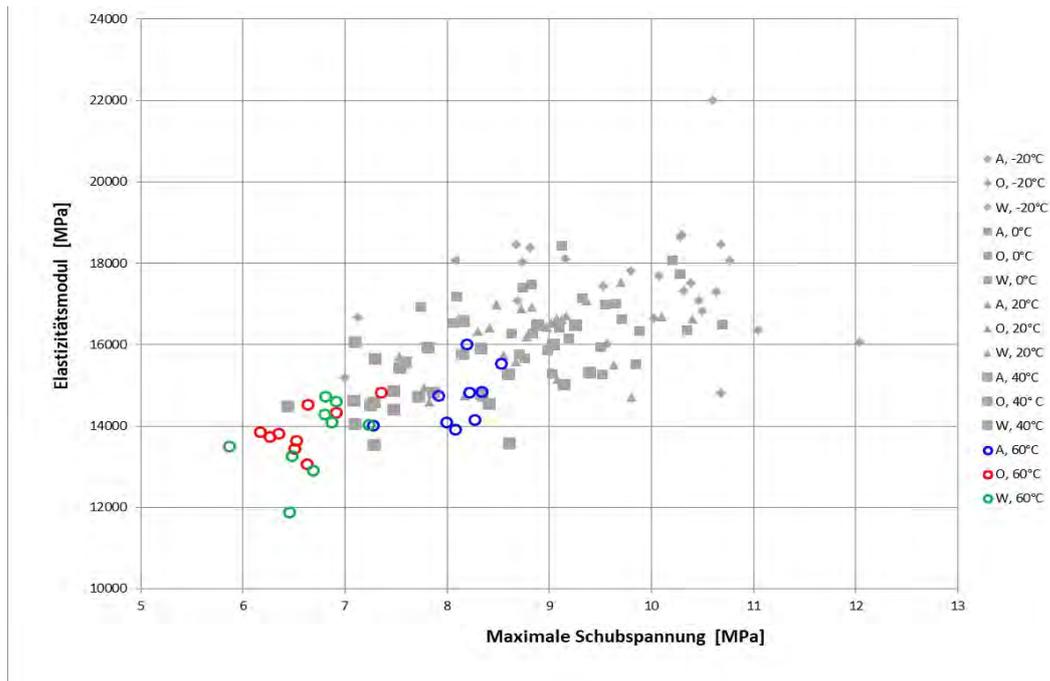


Abbildung 97: +60 °C hervorgehoben

Abbildung 98 und Tabelle 38 zeigen die Mittelwerte der jeweiligen Prüfkörperklassen. Im Diagramm sind die Mittelwerte in den Kontext der individuellen Versuchsergebnisse, die als Punktwolke im Hintergrund liegen, eingeordnet.

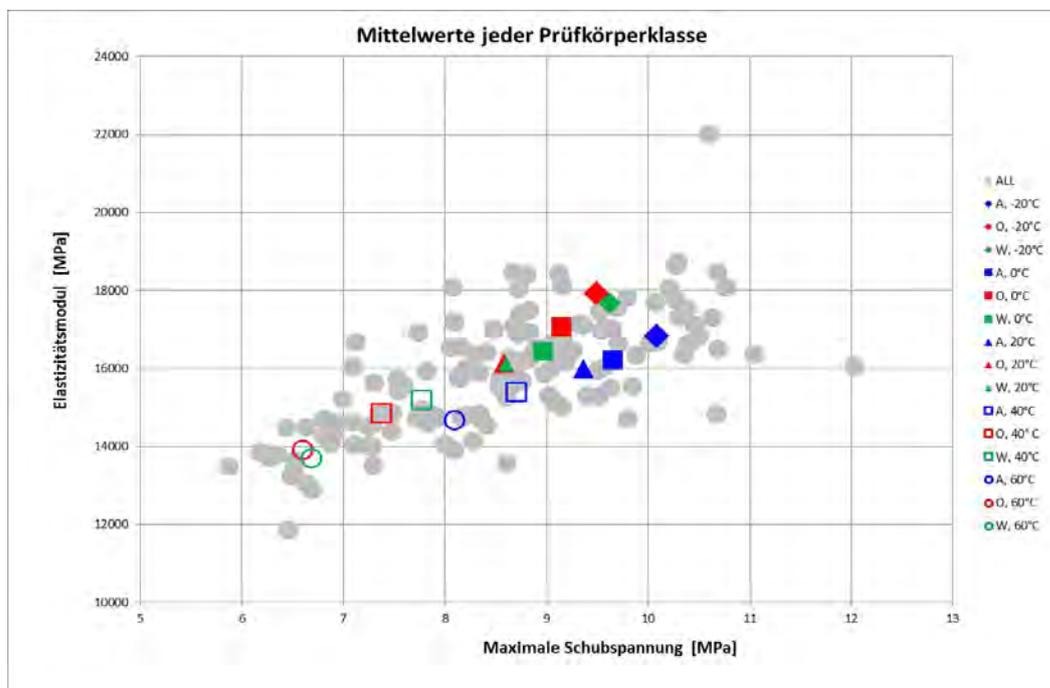


Abbildung 98: Mittelwerte aller Prüfkörperklassen im Kontext mit der Gesamtheit

Tabelle 38: Mittelwerte und Standardabweichungen der Prüfkörperklassen

Imprägnierung	Temperatur [°C]	E [MPa]	max τ [MPa]	Standardabweichung E [MPa]	Standardabweichung τ [MPa]
A	-20	16834	10,08	1046	1,44
O		17940	9,49	714	0,74
W		17684	9,62	1898	1,32
A	0	16213	9,65	763	0,85
O		17058	9,15	525	0,81
W		16429	8,97	962	0,34
A	20	15990	9,36	999	0,77
O		16137	8,58	915	0,46
W		16125	8,60	687	0,59
A	40	15379	8,71	956	0,65
O		14831	7,38	592	0,48
W		15178	7,77	929	0,53
A	60	14654	8,10	728	0,36
O		13895	6,60	552	0,36
W		13676	6,69	911	0,38

3.5.8 Zusammenfassung der mechanischen Versuche

Im Rahmen der Untersuchungen wurden signifikante Unterschiede zwischen unbehandeltem und imprägniertem (einstufig sowie zweistufig) Buchenurnierschichtholz zu beobachten, wobei innerhalb der Imprägnierstufen keine signifikante Änderung der Eigenschaften festgestellt wurde. Die maximal aufnehmbare Schubspannung ist bei unbehandelten Prüfkörpern stets höher als bei imprägnierten Prüfkörpern. Zusätzlich vergrößert sich die relative Differenz der maximalen Schubspannung mit steigender Temperatur. Mit steigender Temperatur sinkt der Elastizitätsmodul der imprägnierten Proben im Vergleich zur unbehandelten Proben. Bei tiefen Temperaturen ist die Steifigkeit der imprägnierten Proben höher als die unbehandelter Proben. Beim Vergleich der beiden Probegruppen W und O konnte kein signifikanter Unterscheid beobachtet werden. Aus diesem Grund wird vermutet, dass der Imprägniervorgang mit Holzschutzmittel 1 die Eigenschaften der Holzprüfkörper durch die Erhöhung der Holzfeuchte maßgeblich beeinflusst. Dies sollte aber bei zukünftigen Versuchen abgeklärt werden (Versuchsserie mit zweistufig imprägnierten Probekörpern mit Holzschutzmittel 2).

3.6 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Im Rahmen der Untersuchungen zur Eignung zweistufig imprägnierten Buchenfurnierschichtholzes als Bahnschwellen wurden Prüfungen zur Ermittlung der biologischen Dauerhaftigkeit, der Auswirkung einer zweistufigen Holzschutzmittelimprägnierung auf die Verklebungsintegrität des Furnierschichtholzes sowie Prüfungen der mechanischen Eigenschaften durchgeführt.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen unbehandeltem Buchenfurnierschichtholz und einstufig sowie zweistufig imprägniertem Furnierschichtholzschwellen. Innerhalb der beiden Imprägnierstufen wurden jedoch keine signifikanten Veränderungen der mechanischen Eigenschaften festgestellt. Unbehandeltes Holz wies stets eine höhere maximale Schubspannung auf als imprägniertes Holz. Zudem nahm die relative Differenz der maximalen Schubspannung mit steigender Temperatur zu. Mit höherer Temperatur sank der Elastizitätsmodul der imprägnierten Proben im Vergleich zu den unbehandelten Proben. Bei niedrigen Temperaturen war die Steifigkeit der imprägnierten Proben höher als die der unbehandelten Proben. Es wird vermutet, dass bereits nach der ersten Imprägnierstufe die Eigenschaften der Furnierschichtholzschwellen maßgeblich durch die Erhöhung der Holzfeuchte beeinflusst wurden.

Bei Dauerhaftigkeitsprüfungen mit Basidiomyceten wurde festgestellt, dass ein wirksamer Schutz in der äußeren Zone von zweistufig imprägnierten Furnierschichtholz-Bahnschwellensegmenten erreicht werden kann. Analysen der Wirkstoffe in den Buchenfurnierschichtholzschwellen ergaben, dass das Material nur einen der erforderlichen Wirkstoffe für die Verwendungszertifizierung der ÖBB nicht enthielt. In der Außenzone wurde der vorgegebene Grenzwert für Cyproconazol nicht erreicht. Ein hoher Masseverlust und eine geringe Dauerhaftigkeitseinstufung der Innenzonen könnten auf eine geringe natürliche Dauerhaftigkeit des Materials und ein geringes Eindringen des Holzschutzmittels zurückzuführen sein. Es wurde keine merkbar erhöhte zu erwartende Gebrauchsdauer für das zweistufig-imprägnierte Furnierschichtholzmaterial in der Außenzone festgestellt.

Hinsichtlich der Verklebungsintegrität sollte neben der dynamischen Beanspruchung der Klebefuge auf die geringere Blockscherfestigkeit ölig imprägnierter Proben im Vergleich zur Referenz oder einstufig wässrig imprägnierter Proben genauer untersucht werden. Eine

mögliche Erklärung dafür könnte eine holzfeuchtebedingte Veränderung der Scherfestigkeit des Holzes sein. Durch die nachträgliche ölige Imprägnierung nach der wässrigen Imprägnierung blieb die Holzfeuchte der Halbschwellen nur bis zur Tränkreife für die ölige Hydrophobierung erhalten. Dadurch blieben im Vergleich zur Ausgleichsfeuchte bei Normalklimalagerung (20 °C / 65 % rel. Feuchte) mehr Wassermoleküle in den Zellwänden gebunden, die nach der zweiten Imprägnierungsstufe mit dem öligen Holzschutzmittel bei Normalklimalagerung nicht ausreichend ausdiffundieren konnten. Dies führte insgesamt zu einer höheren Holzfeuchte und einer geringeren Scherfestigkeit. Eine weitere mögliche Erklärung für die verringerte Scherfestigkeit ölig imprägnierter Proben könnte der Einfluss der Einwirkungsdauer der Imprägniersubstanzen auf die Klebefuge sein. Der lange Zeitraum (ca. 10 Monate) zwischen Schwellenimprägnierung und Klebefugenprüfung könnte auch einen zeitabhängigen Einfluss der Tränkmittel auf die Festigkeit der Verklebung haben. Dieser Aspekt sollte in weiteren Langzeitversuchen genauer untersucht werden. Insgesamt kann jedoch auf Basis der bisherigen Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass weder eine einstufige, wässrige Imprägnierung noch eine nachträgliche ölige Imprägnierung nach Rücktrocknung kurzfristig die Integrität der Klebefugen von PRF-verklebten Furnierschichtholzbauteilen aus Buche beeinträchtigt.

4 LITERATURVERZEICHNIS

- Alfredsen G, Brischke C, Marais BN, Stein RFA, Zimmer K, Humar M (2021) Modelling the Material Resistance of Wood—Part 1: Utilizing Durability Test Data Based on Different Reference Wood Species. *Forests* 12:558. <https://doi.org/10.3390/f12050558>
- Armstrong FH, Savory JG (1959) The Influence of Fungal Decay on the Properties of Timber. Effect of Progressive Decay by the Soft Rot Fungus, *Chaetomium globosum*, on the Strength of Beech. *Holzforschung* 13:84–89.
<https://doi.org/10.1515/hfsg.1959.13.3.84>
- Boettcher P (1985) Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzpfehlgründungen in Abhängigkeit von der Holzerstörung im Untergrund: (Studies on the load-bearing behaviour of wooden pilings as a function of the subsoil wood deterioration). Bauforschung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Bösing J (2022) Dimensionsstabilisierung von Holz mit Polyethylenglykoldimethacrylat: Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Parameter auf das maximale Quell- und Schwindmaß: (Dimensional stabilisation of wood with polyethylene glycol dimethacrylate: Investigating the influences of different parameters on the maximum degree of swelling and shrinkage). Bachelor Thesis, Technische Hochschule Rosenheim
- Brischke C (2007) Untersuchung abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile: Studies on decay-influencing factors for service life prediction of timber products subjected to moisture. Dissertation, Universität Hamburg
- Brischke C, Rapp AO, Welzbacher CR (2007) The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact. *Wood Material Science and Engineering* 2:15–21.
<https://doi.org/10.1080/17480270701273015>
- Brischke C, Meyer L, Olberding S (2014) Durability of wood exposed in ground - Comparative field trials with different soil substrates. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86:108–114
- Brischke C, Alfredsen G, Humar M, Conti E, Cookson L, Emmerich L, Flæte PO, Fortino S, Francis L, Hundhausen U, Irbe I, Jacobs K, Klamer M, Kržišnik D, Lesar B, Melcher E, Meyer-Veltrup L, Morrell JJ, Norton J, Palanti S, Presley G, Reinprecht L, Singh T, Stirling R, Venäläinen M, Westin M, Wong AHH, Suttie E (2021) Modelling the Material Resistance of Wood—Part 2: Validation and Optimization of the Meyer-Veltrup Model. *Forests* 12:576. <https://doi.org/10.3390/f12050576>

- CEN/TS 15083-2 (2005) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten — Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzerstörende Pilze, Prüfverfahren — Teil 2: Moderfäulepilze. European Committee for Standardization, Brussels
- CEN/TS 16637-2 (2014) Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 2: Horizontal dynamic surface leaching test. European Committee for Standardization, Brussels
- Christian Bohn (2009) Verwendung von biotechnologisch durch den Rotfäulepilz *Heterobasidion annosum* in vivo degradiertem Fichtenholz als Rohstoff für die Herstellung von Holzwerkstoffen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Dill-Langer G (2017) Hochleistungsverbundträger aus Vollholz- und Furnierschichtholzlamellen. In: Forum Holzbau (ed) 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017. Forum Holzbau, pp 1–14
- DIN EN 16637-2 (2021) Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- EN 113-2 (2021) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Prüfverfahren in Bezug auf Holz zerstörende Basidiomyceten – Teil 2: Bewertung der natürlichen oder verbesserten Dauerhaftigkeit;. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 1382 (2016) Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 14080 (2013) Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 14374 (2005) Timber structures - Structural laminated veneer lumber - Requirements. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 252 (2015) Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 301 (2013) Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures — Classification and performance requirements. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 302-1 (2013) Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 325 (2012) Holzwerkstoffe – Bestimmung der Maße der Prüfkörper;. European Committee for Standardization, Brussels

- EN 383 (2007) Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 384 (2010) Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 408 (2012) Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels
- EN ISO 18122 (2015) Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes (Solid biofuels - Determination of ash content). European Committee for Standardization
- Fleckenstein M, Biziks V, Mai C, Militz H (2018) Modification of beech veneers with lignin phenol formaldehyde resins in the production of laminated veneer lumber (LVL). Eur. J. Wood Prod. 76:843–851. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1275-7>
- Frihart CR (2004) The Challenge of Bonding treated Wood. International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products:351–358
- Frihart CR (2005) Adhesive Bonding and Performance Testing of Bonded Wood Products. Journal of ASTM International 2:1–12
- Frihart CR (2009) Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. Journal of Adhesion Science and Technology 23:601–617.
<https://doi.org/10.1163/156856108X379137>
- Goodell B, Daniel G, Liu J, Mott L, Frank R (1997) Decay resistance and microscopic analysis of wood-cement composites. Forest Products Journal 47:75–80
- Hirschmüller S, Marte R, Pravida J, Flach M (2018a) Inhibited wood degradation of cement-coated beech Laminated Veneer Lumber (LVL) for temporary in-ground applications. European Journal of Wood and Wood Products 76:1483–1494.
<https://doi.org/10.1007/s00107-018-1325-9>
- Hirschmüller S, Pravida J, Marte R, Flach M (2018b) Long-term material properties of circular hollow laminated veneer lumber sections under water saturation and cement alkaline attack. Wood Material Science and Engineering 81:1–15.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1434830>
- Hirschmüller S, Unterberger S, Larbig H (2020) Wood Treatment: European Patent Application(EP 3 895 863 A1)
- Jung B, Roffael E (2002) Über die Acidität einheimischer Holzarten: (The acidity of domestic wood species). Holz als Roh- und Werkstoff 60:154.
<https://doi.org/10.1007/s00107-001-0278-5>

- Koddenberg T, Zauner M, Miltz H (2019) REM und μ CT-Aufnahmen von Holz nach Pilzbefall im Labortest - Erste Ergebnisse. In: Fachausschuß Holz (ed) Deutsche Holzschutztagung: (German wood protection meeting), pp 115–125
- Künniger T (2007) Automatische Bestimmung des prozentualen Faserbruchanteils bei der industriellen Klebfestigkeitsprüfung (Automatic determination of the wood failure percentage in industrial bond strength testing): Final report. FFWH project ID 2006.05. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Dübendorf
- Liese W (1964) Über den Abbau verholzter Zellwände durch Moderfäulepilze. Eur. J. Wood Prod. 22:289–295. <https://doi.org/10.1007/BF02608320>
- Marais BN, van Niekerk PB, Brischke C (2021) Studies into Fungal Decay of Wood in Ground Contact—Part 2: Development of a Dose–Response Model to Predict Decay Rate. Forests 12:698. <https://doi.org/10.3390/f12060698>
- ÖNORM B 1995-1-1 (2019) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institute, Vienna
- Papadopoulos AN, Bikiaris DN, Mitropoulos AC, Kyzas GZ (2019) Nanomaterials and Chemical Modifications for Enhanced Key Wood Properties: A Review. Nanomaterials (Basel) 9. <https://doi.org/10.3390/nano9040607>
- Schmidt O (1994) Holz- und Baumpilze. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Schramm G (1952) Eisenbahnschwellen. In: Stumpf B (ed) Jahrbuch des Eisenbahnwesens. Carl Röhrig, Frankfurt am Main, pp 93–115
- Schwarze F, Engels J (2011) Holzersetzende Pilze in Bäumen: Strategien der Holzersetzung, 2nd edn. Nomos; Rombach, Baden-Baden
- Timell TE, Eriksson K-EL, Blanchette RA, Ander P (1990) Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg