

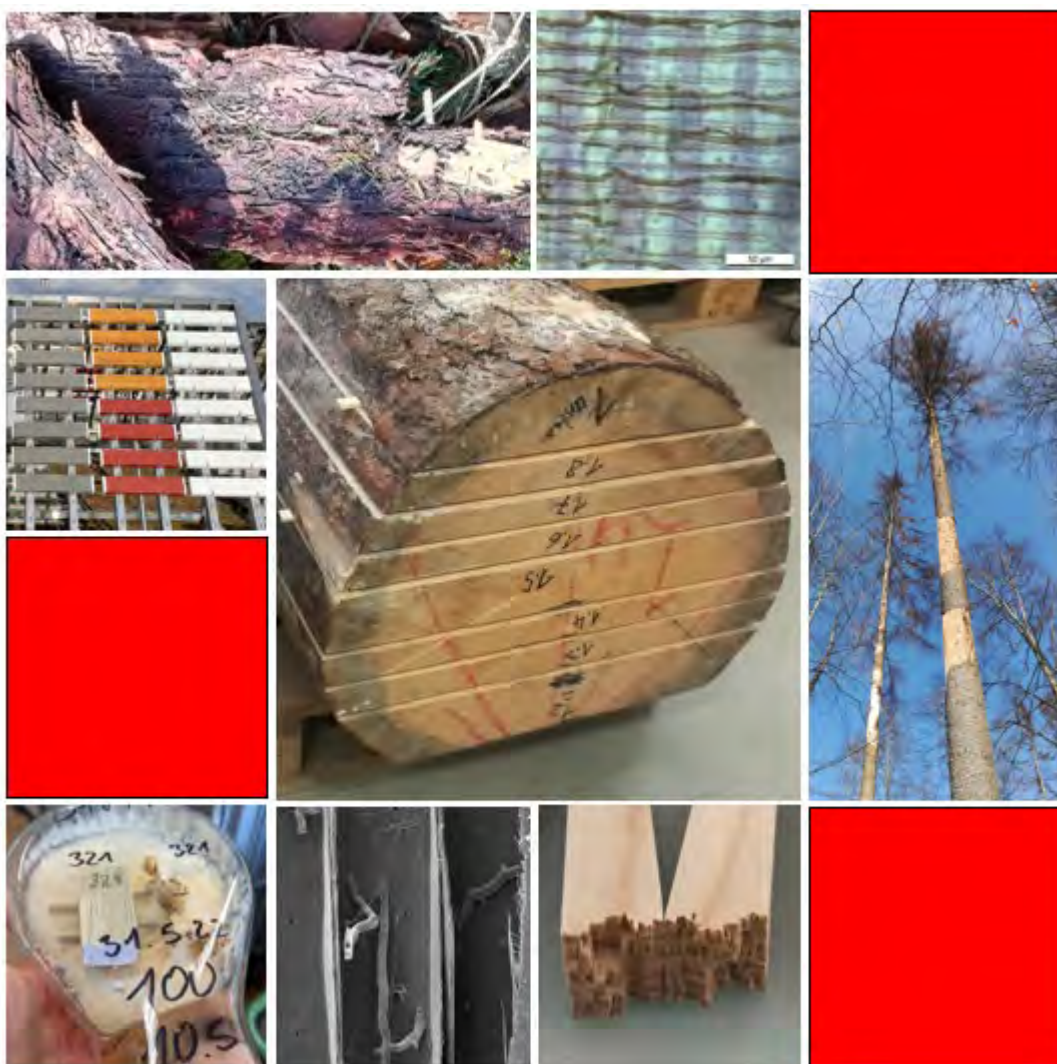
WHFF Projektnummer 2020.03

Bundesamt für Umwelt BAFU

Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH

BlueWood **Oberflächenbehandlung von primär verblautem Käferholz**

Wissenschaftlicher Schlussbericht



Fachlicher Schlussbericht

Projektnummer: 2020.03

Projekt Name: **BlueWood** - Oberflächenbehandlung von primär verblautem Käferholz

Projekt Leitung	Tina Künniger (Projektleiterin und Wiss. Mitarbeiterin Empa)
Projekt Team	Daniel Heer (Techniker Empa) Markus Heeb (Techniker Empa) Roman Elsener (Techniker Empa) Anja Huch (Technikerin Empa) Niklaus Schriber (Bachelor Student ETHZ) David Schönen (Zivildienstleistender) Lewis Douls (Zivildienstleistender) Martin Keller (Konrad Keller AG) Christian Bottlang (Forstrevier Stammheim) Oliver Reinhard (Forstrevier Stammheim) Ismaël Mivalez (VSH und Mivelaz Bois SA) Peter Marty (Gebr. Eisenring AG) Markus Lädach (OLWO AG) Jürg Niebecker (Adler-Lack AG) Wolfram Selzer (Bosshard + Co. AG) Michael Gautschi (Holzindustrie Schweiz) Michael Widmer (VSH) Thomas Troger-Bumann (Wald Schweiz)

Projektstart: 01.10.2020 Projektende: 30.09.2023 Projektdauer: 3 Jahre

Finanzierung WHFF (BAFU)/ KWL: CHF 99'600 Weitere externe Finanzierung: CHF 0

Ort, Datum: Dübendorf, 30.09.2023

Inhalt

1	Kurzfassung	3
	Abstract	5
2	Ausgangslage	7
2.1	Problemstellung	7
2.2	Bedeutung für die Praxis.....	7
2.3	Stand der Forschung	11
3	Projektziel.....	15
4	Zielgruppe	15
5	Projektbeschreibung	16
5.1	Administratives.....	16
5.2	Vorgehen & Arbeitspakete	17
5.3	Zeitplan	19
6	Methoden & Ergebnisse.....	20
6.1	AP2 – Material	20
6.1.1	Holz allgemein – Charge I bis 3.....	20
6.1.2	Holz für künstliche Verblauung – Charge IV.....	30
6.1.3	Holz für industrielle Beschichtung.....	31
6.1.4	Technische Trocknung.....	33
6.1.5	Künstliche Verblauung.....	33
6.2	AP3 – Charakterisierung.....	36
6.2.1	Rohdichte und mittlere Jahrringbreite.....	36
6.2.2	Farbe.....	39
6.2.3	Biegefestigkeit.....	41
6.2.4	Schlagbiegefestigkeit.....	44
6.2.5	Druckfestigkeit	47
6.2.6	Scherfestigkeit	49
6.2.7	Härte nach Brinell	51
6.2.8	Quell- und Schwindmass	53
6.2.9	Wasserdampfadsorption und -desorption.....	57
6.2.10	Flüssigwasseraufnahme und Rücktrocknungsverhalten	60
6.2.11	Aktivierung der Bläue durch Feuchteeinwirkung	67
6.2.12	Sporenbelastung in der Raumluft	76
6.2.13	Sporenbelastung auf gehobelten Oberflächen	78
6.2.14	Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen	81
6.2.15	Orientierende Bestimmung der gefundenen Pilze im Käferholz.....	90
6.3	AP4 – Oberflächliche Entfärbung	98
6.3.1	Chemisches Bleichen	98
6.3.2	Elektromagnetische Wellen und Ultraschall	101
6.3.3	Thermische Behandlung im Ofen	102
6.3.4	Dämpfen.....	104
6.4	AP5 – Beschichtung.....	108
6.4.1	Beschichtungssysteme	109
6.4.2	Trockenschichtdicke	110
6.4.3	Feuchteaufnahme	114
6.4.4	Trockenhaftung	118
6.4.5	Künstliche Bewitterung im QUV.....	119
6.4.6	Freibewitterung	125
7	Zusammenfassung.....	148
8	Schlussfolgerungen.....	151
9	Literatur	153
10	Normen.....	154
11	Abbildungsverzeichnis	155
12	Tabellenverzeichnis.....	159

1 Kurzfassung

In drei grossen Arbeitspaketen wurden die wesentlichen Materialeigenschaften von verblautem Käferholz (ausschliesslich Fichtensplintholz) und dessen Eignung als beschichtete Fassadenschalung untersucht. Für die verschiedenen Testreihen wurden neunzehn Stämme aus dem Forst Stammerberg (ZH) geschlagen. Die Holzernte erfolgte zu verschiedenen Jahreszeiten und nach verschiedenen langen Perioden des Borkenkäferbefalls. Zusätzlich wurden Lamellen aus der Produktion der Industriepartner verarbeitet.

In einem ersten Arbeitspaket wurden die mechanischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften des verblauten Käferholzes ermittelt und die Ergebnisse in Relation zum Zeitpunkt des Käferbefalls diskutiert. In einem weiteren Arbeitspaket wurde überprüft, ob sich chemisches Bleichen, elektromagnetische Wellen und Ultraschall oder eine Behandlung mit Hitze zum oberflächlichen Entfärben der verblauten Bereiche eignen. Im letzten Arbeitspaket wurden sowohl Laborproben als auch Proben aus der industriellen Produktion beschichtet und deren Qualität anhand verschiedener Parameter vergleichend diskutiert. Während künstlicher UV-Bestrahlung sowie einer einjährigen Freibewitterung wurde das Verhalten der beschichteten Lamellen bewertet und mögliche Unterschiede zwischen verblautem Käferholz und Referenz-Proben aus gesunder Fichte diskutiert.

Käferholz, welches umgehend geerntet und weiterverarbeitet wurde, zeigte keine Auffälligkeiten in den mechanischen Eigenschaften. Fichtenholz dagegen, welches zu einem späteren Zeitpunkt nach dem Borkenkäferbefall (2-3 Monate) geerntet wurde, zeigte eine leicht geringere Dichte, eine deutliche Abnahme der Schlagbiegefestigkeit, eine reduzierte Oberflächenelastizität und eine auffällige Anzahl von Proben mit sprödem Bruchverhalten in der 3-Punkt-Biegung. Vor allem die höhere Sprödigkeit des verblauten Käferholzes ist ein deutlicher Hinweis auf einen beginnenden Substanzabbau durch holzerstörende Pilze. Mikroskopische Untersuchungen bestätigten die Anwesenheit von Basidiomyceten sowohl im verblauten als auch im noch unverblauten Splint des Käferholzes.

Die Aufnahme von Flüssigwasser sowohl über das Hirnholz als auch über die Radial- und Tangentialflächen war bei verblautem Käferholz stark erhöht. Das Schwind-/Quellverhalten des verblauten Käferholzes als auch die Adsorption / Desorption im hygroskopischen Feuchtebereich waren dagegen vergleichbar mit denen des Referenzmaterials.

Verblautes Käferholz war in feuchter Umgebung anfälliger auf oberflächlichen Schimmelbefall. Durch den Balken-Blättling wurde es in stärkerem Masse abgebaut als unverblautes Referenzmaterial. Auf frisch gehobelten, verblauten Oberflächen war die Anzahl der keimfähigen Pilzsporen im Vergleich zum nicht verblauten Referenzmaterial leicht erhöht. Die Belastung der Umgebungsluft mit keimfähigen Pilzsporen während der mechanischen Bearbeitung von verblautem Käferholz ist als gering einzustufen.

Die getesteten chemischen Bleichverfahren, welche zumeist aus der Zellstoffproduktion bekannt sind, und auch die Methoden, welche auf elektromagnetischen Wellen oder Ultraschall beruhen, führten nicht zu einer befriedigenden oberflächlichen Entfärbung des verblauten Käferholzes. Grundsätzlich war bei all diesen Verfahren der Zugang zum Melanin in den Hyphen der Bläuepilze ungenügend und die Methoden daher für verblautes Vollholz nicht geeignet.

Der getestete Dämpfprozess führte zu einer verbesserten Farbgebung, jedoch nicht im gleichen Umfang wie die an der Empa durchgeführte Hitzebehandlung mit höheren Temperaturen. Der Dämpfprozess führte jedoch gleichzeitig zu einem schlechteren Verhalten der Proben gegenüber Flüssigwasser und machte sie anfälliger für den Abbau durch Braunfäule Erreger. Daher scheint diese Methode für Holz in der Aussenanwendung nur bedingt geeignet.

Eine kurze Hitzebehandlung im Ofen bei ca. 230°C und die damit verbundene oberflächliche dunkelbraune Färbung des Holzes führte zu einem gleichmässigeren Erscheinungsbild, bei dem die verblauten Bereiche kaum mehr sichtbar waren. Neben der akzeptablen Farbgebung führte die thermische Behandlung auch zu einer Verringerung der Flüssigwasseraufnahme des verblauten Käferholzes und die damit wieder im Bereich der Referenz-Proben lag. Inwieweit sich die Anwendung der Hitzebehandlung in den Produktionsablauf integrieren lässt und ob sie wirtschaftlich rentabel wäre, müsste abgeklärt werden.

Am Käferholz konnten keine praxisrelevanten Unterschiede während der Applikation und Trocknung sowie bei den gebildeten Trockenschichtdicken, den Eindringtiefen und der Trockenhaftung der getesteten Beschichtungen festgestellt werden. Das optische Erscheinungsbild war lediglich bei den gering pigmentierten Beschichtungen etwas unruhiger, da die verblauten Bereiche durch die Beschichtung sichtbar waren.

An allen verblauten Beschichtungsproben wurde eine wesentlich höhere Wasseraufnahme während der Kaltwasserlagerung und somit auch ein höherer Wasseraufnahmekoeffizient als bei den entsprechenden Referenz-Proben ohne Bläue gemessen. Dies bestätigte sich auch in der Freibewitterung, in der die verblauten Proben während des gesamten Jahres bis zu 4% höhere Holzfeuchten aufwiesen.

Nach einem Jahr Freibewitterung waren keine relevanten Unterschiede in der Gesamtpformance der Beschichtungen auf verblauter oder unverblauter Fichte feststellbar. Die Jahrringstellung der Proben als auch die Himmelsrichtung der Bewitterung (NO oder SW) waren die entscheidenden Einflussgrössen auf den bisherigen Gesamtzustand der beschichteten Lamellen. Lediglich die weiss pigmentierte mineralische Beschichtung zeigte nach 1 ½ Jahren Freibewitterung leichte Auffälligkeiten wie Risse und Verfärbungen im Bereich der darunterliegenden verblauten Bereiche.

Beim Einsatz von Bläue als gestalterisches Element im Innenausbau muss mit leichten Farbveränderungen gerechnet werden, da Holzoberflächen ohne als auch mit transparenter Beschichtung unter Sonneneinstrahlung generell etwas nachdunkeln. Verblaute Bereiche können dadurch an visueller Dominanz verlieren.

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen kann man zusammenfassen, dass der Einsatz von verblautem Käferholz als beschichtete Fassadenschalung möglich ist. Ob langfristig die gleichen Standdauern wie auf gesundem Fichtenholz erreicht werden können, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht sicher prognostiziert werden. Daher werden die Freibewitterungsversuche über das Projektende hinaus, bis Ende 2024 weitergeführt.

Kritisch zu bewerten ist der Einsatz von unbehandeltem, verblauten Käferholz als Unterkonstruktion einer Fassadenschalung, da hier ein mögliches Risiko aufgrund erhöhter Holzfeuchte und dem Abbau durch holzerstörende Pilze besteht.

Abstract

The essential material properties of primary blue-stained sapwood of Norway spruce infested by the bark beetle wood (*Ips typographus*) and its durability as coated facades were investigated.

Nineteen stems were harvested at Stammerberg (ZH) for the various test series. The stems were harvested in different seasons of the year and after different periods of bark beetle outbreak. Additionally, wooden lamellae from the production of the industry partners were processed.

In a first work package, the mechanical, physical and biological properties of the blue-stained beetle-infested wood were determined and the results discussed in relation to the time of beetle infestation. In a further work package, treatments such as chemical bleaching, electromagnetic waves / ultrasound and thermal treatment were tested for the superficial decolourization of the blue-stained areas. In the final work package, both laboratory samples and samples from industrial production were coated and their quality was discussed comparatively based on various parameters. During artificial UV irradiation, respectively one year of outdoor weathering, the behaviour and durability of the coated lamellae were evaluated and possible differences between blue-stained beetle wood and reference samples from healthy spruce were discussed.

Spruce, which was harvested and processed immediately after beetle outbreak did not show any abnormal mechanical properties. In contrast, spruce harvested at a later stage after bark beetle attack (2-3 months) showed a slightly lower density, a significant decrease in impact bending strength, a reduced surface elasticity, and a striking number of specimens with brittle fracture behaviour during Three-Point bending. Above all, the increased brittleness of the blue-stained beetle wood is a clear indication of incipient wood degradation by wood-degrading fungi. Microscopic examinations confirmed the presence of basidiomycetes in the blue-stained sapwood but also in the unstained sapwood of the beetle wood.

Blue-stained sapwood showed a strongly increased absorption of liquid water via the end grain as well as via radial and tangential surfaces. In contrast, the shrinkage / swelling behavior of the blue-stained wood as well as the adsorption / desorption within the hygroscopic moisture range were comparable to those of the reference material.

Blue-stained wood was more susceptible to surface mold growth in humid environments and was degraded to a greater extent by the wood degrading fungi *Gloeophyllum trabeum* than reference material. The number of germinable fungal spores was slightly increased on freshly planed, blue-stained surfaces compared to the reference material. The contamination of the ambient air with germinable fungal spores can be classified as low during the mechanical processing of blue-stained beetle-infested wood.

The tested chemical bleaching methods, mainly known from pulp production, and the methods based on electromagnetic waves or ultrasound, did not lead to a satisfactory surface decolourisation of the blue-stained beetle-infested wood. In all these methods, the access to melanin in the hyphae of the blue stain fungi was insufficient and therefore the methods were not suitable for solid wood with blue stain.

The tested steaming process led to an acceptable brown coloration, but not to the same extent as the heat treatment with higher temperatures carried out at Empa. However, the steaming process at the same time resulted in a higher liquid water uptake of the blue-stained samples and made them more susceptible to degradation by brown rot fungi. Therefore, this method seems to have limited suitability for wood in outdoor applications.

In contrast, a short heat treatment with temperatures around 230°C resulted in a uniform dark brown coloration of the wood surface, and thus blue-stained areas were hardly visible. In addition to the acceptable color matching, the thermal treatment also led to a decreased liquid water uptake of the blue stained beetle-infested wood, which was then in the range of the reference samples. If a heat treatment can be integrated in the production process and whether it would be economically viable needs to be clarified.

Application and drying behavior, the dry film thicknesses, the penetration depth and the dry adhesion of the tested coatings on blue-stained samples were comparable to the once on reference material. The optical appearance of the low-pigmented coatings was not uniform, since the bluish areas were visible through the coating film.

All coated, blue-stained samples absorbed significantly more water during cold-water storage and thus a higher water absorption coefficient was measured compared to the corresponding reference samples without blue stain. This was also confirmed during outdoor weathering, where the blue-stained samples showed up to 4% higher wood moisture content throughout the year.

No relevant differences in the overall performance of the coatings on blue stained and reference spruce were observed after one year of outdoor weathering. The annual ring position of the samples as well as the direction of weathering (NE or SW) were the decisive factors influencing the overall performance of the coated lamellae so far. Only a white-pigmented mineral coating showed conspicuities such as cracks and discoloration on the blue-stained areas after 1 ½ years of outdoor weathering.

When using blue stain as a design element in interior finishing, slight color changes must be expected, since natural spruce as well as spruce with transparent coatings generally darken somewhat when exposed to sunlight. Blue areas may lose visual dominance as a result.

Based on the findings it can be summarized, that the use of blue-stained beetle-infested spruce as coated facade is possible. Whether the same durability and service life can be achieved on blue-stained beetle-infested spruce wood cannot be predicted with adequate certainty at this time. Therefore all natural weathering experiments will continue until the end of 2024.

The application of untreated, blue-stained beetle-infested spruce wood as a facade sub-structure must be evaluated more critically, since there is higher risk of an increased wood moisture content and an infestation with wood degrading fungi.

2 Ausgangslage

2.1 Problemstellung

Grosse Teile der Schweizer Wälder sind durch die klimatischen Bedingungen der letzten Jahre geschwächt. Der Borkenkäfer, vor allem der Buchdrucker (*Ips typographus*), konnte sich aufgrund Hitze, Windwurf und Trockenheit stark vermehren und grosse Teile der Schweizer Fichtenwälder befallen (Wermelinger 2004) und es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen wird (Caduff, Brožová et al. 2022).

Um die Ausbreitung des Borkenkäfers und eine weitere Schädigung der Fichtenbestände einzudämmen, kam es besonders in den Jahren (2019 / 2020) zu einer starken Zwangsnutzung. Aus Zeit- und Kapazitätsgründen musste das sogenannte Käferholz teilweise im Bestand entrindet und liegen gelassen werden. Eine starke Verblauung des Holzes bereits im Wald war die Folge.

Vor allem am gelagerten Rundholz kommt es durch die eingeschleppten Bläuepilze zu grossem wirtschaftlichen Schaden. Ist der Zeitraum zwischen dem Fällen und der Weiterverarbeitung im Werk zu gross, können sich die in die Frassgänge eingeschleppten Bläuepilze weiter im Holz ausbreiten und es kommt zu massiven grauen bis blauen Verfärbungen, meist des gesamten Splintes.

Nach Aussagen der Kantonsoberförsterkonferenz KOK waren im Jahr 2019 ca. 90% des geschlagenen Käferholzes mit Primärbläue befallen. Verblautes Käferholz erzielt um ca. 1/3 tiefere Preise auf dem Holzmarkt.

In diversen Untersuchungen wurde gezeigt, dass trotz Befall mit Bläuepilzen die Festigkeitseigenschaften des Holzes erhalten bleiben (Humar, Vek et al. 2008). Es spricht hinsichtlich seiner technologischen Eigenschaften offensichtlich nichts gegen den Einsatz als Bauholz oder Hobelware, sofern die optischen Einschränkungen akzeptiert werden können. Allerdings beziehen sich viele dieser Untersuchungen auf sogenannte Sekundärbläue (Oberflächen- oder Schnittholzbläue) oder Tertiärbläue (Anstrichbläue), die nach dem Einschnitt des Holzes an den Schnittflächen oder nach erneuter Befeuchtung von bereits getrocknetem Holz entsteht.

Lt. Holzhandelsgebräuchen CH sind bei Produkten mit Erscheinungsklassen A und teilweise N bei Bauholz; 1, 2 und teilweise 3 bei Bretter und Kanteln sowie A und N1 bei Hobelware und Schalungen in der Regel Verfärbungen wie Bläue nicht zulässig (Banholzer, Fuhrmann et al. Ausgabe 2010).

Theoretisch könnte demnach verblautes Käferholz aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften problemlos als Holz beispielsweise für Holzschalungen (Erscheinungsklasse N2) und Fassadentäfer (Erscheinungsklasse N1) eingesetzt werden.

Es gibt jedoch wenig Erfahrungen oder Untersuchungen darüber, wie gut sich PRIMÄR verblautes Holz mit herkömmlichen Holzbeschichtungen behandeln lässt und welche Qualitäts- und Anwendungseigenschaften zu erwarten sind. Zudem sind mechanische als auch oberflächenrelevante Eigenschaften nicht ausreichend charakterisiert und quantifiziert.

2.2 Bedeutung für die Praxis

Medienmitteilung der Ostschweizer Waldwirtschaft im Jahr 2019 (Engler 2019):

'In den Ostschweizer Wälder hat sich der Borkenkäfer diesen Sommer regelrecht durch den Wald gefressen. Die Regionen Schaffhausen, Zürcher Weinland und Unterthurgau hat es besonders hart getroffen. In diesen Regionen ist der regionale Holzabsatz von schlechten Qualitäten fast nicht mehr möglich.

*Eine Umfrage bei den Förstern durch die Ostschweizer Waldeigentümer Verbände hat ergeben, dass zurzeit **rund 75'000 fm Käferholz unverkauft im Wald lagern**. Zusätzlich kommen **geschätzte 100'000 fm abgestorbene Käferbäume** dazu, welche sich nicht mehr wirtschaftlich ernten lassen. Die Bäume werden der Natur überlassen. Total hat der Borkenkäfer in einem Jahr das 1.5-fache einer jährlichen Nutzung vernichtet. **Der finanzielle Schaden für den Waldbesitzer ist enorm***

Trotzdem versuchen die Waldeigentümer, die vom Käfer befallenen Bäume so rasch wie möglich zu ernten, damit bis zum Frühjahr die grosse Population etwas eingedämmt werden kann. Die Forstbetriebe melden, dass in den nächsten zwei Monaten zusätzlich nochmals 60'000 fm Käferholz aufgerüstet werden. Damit alles Käferholz verkauft werden kann, benötigt es Geduld. Die Waldbesitzer sind darauf angewiesen, dass das Holz vermehrt auch überregional in der Schweiz abgesetzt

werde kann. Einen Export in die umliegenden Länder ist zurzeit ebenfalls nur sehr erschwert möglich. **Die Branche geht davon aus, dass in Europa 2019 rund 80 Mio. Festmeter Schadholz anfallen.** Dementsprechend sind auch die ausländischen Sägereien mit schlechtem Holz überversorgt. Es kann durchaus Sinn machen gewisse Übermengen unterpreisig abzustossen, um den Markt etwas zu entlasten. Zur Entlastung des Marktes wird Käferholz zu Tiefstpreisen nach Asien exportiert, die Waldbesitzer haben schlichtweg keine anderen Möglichkeiten mehr. Die Rundholzpreise sind aber derart tief, dass mit dieser Massnahme nicht mal mehr die Holzerntekosten gedeckt werden können, geschweige denn die wieder Aufforstung auf den Schadholzflächen.'

Extreme klimatische Bedingungen wie Stürme, langanhaltende Trockenheit und hohe Temperaturen, mit denen wir es in den letzten Jahren vermehrt zu tun haben, schwächen den Wald und machen ihn anfällig gegenüber Schädlingen wie dem Borkenkäfer. Bereits in den Jahren 2001-2006 war der Befall der Schweizer Wälder durch den Borkenkäfer auf einem sehr hohen Niveau ist (Abbildung 1). Während sich in den darauffolgenden Jahren der Befall 'normalisierte', stieg er seit 2015/16 wieder kontinuierlich an.

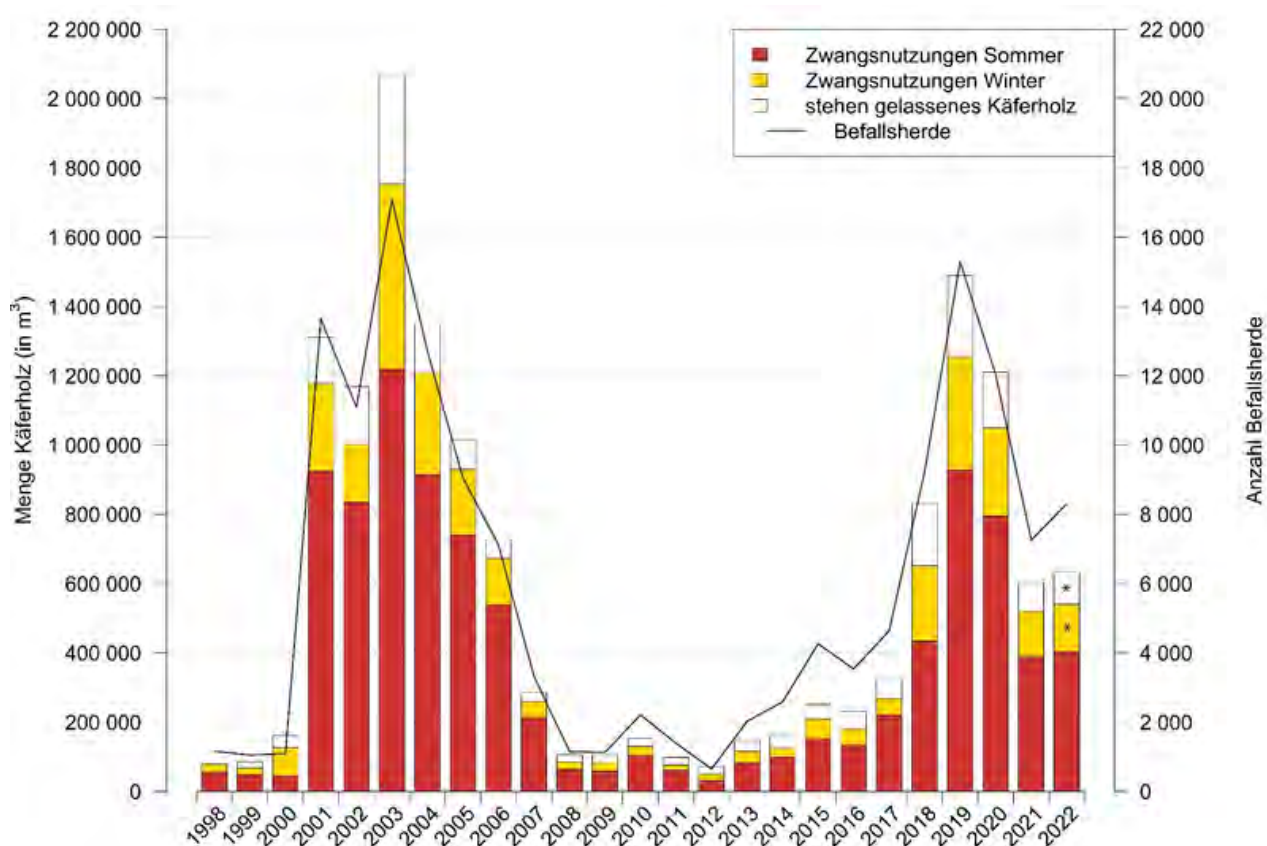


Abbildung 1 Buchdrucker: Menge des Käferholzes und Anzahl der Befallsherde (Käfernester) in der Schweiz von 1998 – 2022 (www.waldwissen.net)

Mit landesweit 651'663 m³ war die durch Zwangsnutzung angefallene, vom Buchdrucker (*Ips typographus*) befallenen Holzmenge 2018 bereits mehr als doppelt so gross wie im Vorjahr 2017 und erreichte damit den höchsten Stand seit 2006 (Stroheker, Forster et al. 2020).

2019 war eine noch höhere Populationsdichte des Borkenkäfers vorhanden und aufgrund des warm-trockenen Sommers konnte sich der Käfer schnell ausbreiten. **Mit ca. 1.5 Millionen m³ Käferholz wurde 2019 der höchste Wert seit 2003 und damit der zweithöchste je registrierte Wert erreicht**, wovon 1.25 Millionen m³ zwangsgenutzt werden mussten (Stroheker, Blaser et al. 2023).

Die kühle und feuchte Witterung in der Schweiz war für den Buchdrucker (*Ips typographus*) im Jahr 2021 ungünstig. Das Jahr 2022 bot ausserordentlich gute Entwicklungs- und Flugbedingungen für die Käfer. Mit 1,6 °C über der Norm von 1991-2020 war **2022 das wärmste Jahr seit dem Messbeginn 1864**. Zudem waren viele Wälder bereits durch starken Hagel im Juni 2021 geschwächt. Nicht abtransportiertes Sturmholz

bot dem Buchdrucker zusätzlichen Lebensraum. 2022 nahm die Zwangsnutzung von Käferholz wieder leicht zu. **Die Zunahme der Befallsherde lässt vermuten, dass der Befall von Fichten im Jahr 2023 erneut stark zunehmen könnte**, sofern die klimatischen Bedingungen mit Hitze und Trockenheit für den Käfer günstig bleiben.

Modellberechnungen zeigen, dass die Käfer durch die Klimaerwärmung zunehmend in der Lage sind, eine zusätzliche Generation pro Jahr mit früherem Ausflug und konzentriertem Ausschwärmen zu produzieren (Jakoby, Lischke et al. 2019). **Eine solche Entwicklung wird voraussichtlich auch in Zukunft zu einer enormen Schädigung der Fichten- und Tannenwälder führen.**

Der hohe Befall durch den Buchdrucker führt zu einer enormen jährlichen Zwangsnutzung, vor allem in den Sommermonaten. Das Holz wird als sogenanntes 'Käferholz' erfasst und vermarktet. Die massiv ansteigende Menge an Käferholz seit Sommer 2018 widerspiegelte sich in fallenden Durchschnittspreisen für Fichte (Abbildung 2). Seit Sept.-Okt. 2016 war bis Sept.-Okt. 2019 ein Preiserückgang von ca. 20% zu verzeichnen, der auch im Jahr 2020 anhielt.

Erst im Jahr 2021 erholten sich die Holzpreise aufgrund steigender Nachfrage von Schnittholz an den internationalen Märkten und einer verknüpften Rohstoffsituation wieder und stiegen bis Okt. 2022 auf durchschnittlich 92 CHF/Fm für Fichte und knapp 80 CHF/Fm für Tanne (Quelle: WaldSchweiz).

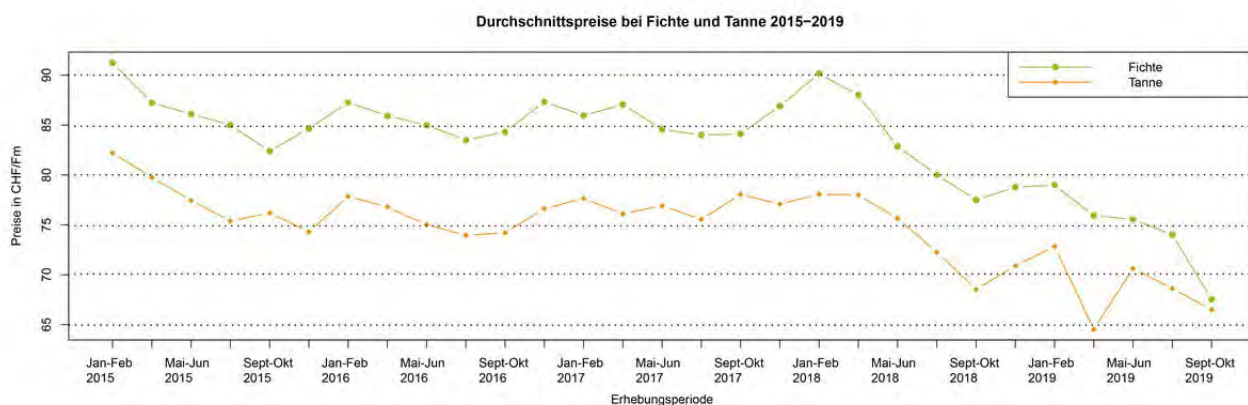


Abbildung 2 Entwicklung der Durchschnittspreise von schweizerischer Fichte und Tanne zwischen 2015 und 2019 (Quelle: WaldSchweiz)

(Ähnliches gilt im Übrigen auch für die Tanne, welche ebenfalls durch die klimatischen Verhältnisse geschwächt, vor allem durch den Tannenborkenkäfer sowie Tannenrüsselkäfer geschädigt wird.)

Tabelle 1 Entwicklung der Fichten-Rohholz-Preise von Mai bis Oktober 2019

Fichten-Rohholz-Preise nach Sortimenten ab Waldstrasse (in Rinde geliefert, ohne Rinde gemessen)				
Mittelwert	Preise in CHF/Fm			Veränderungen zur Vorperiode in %
	Mai-Juni 2019	Juli-August 2019	Sept.-Okt. 2019	
L1 2b B	97.47	96.69	97.33	0.7%
L1 2b C	72.28	69.43	66.38	-4.6%
L1 3 B	95.08	93.56	93.41	-0.2%
L1 3 C	75.16	73.66	71.85	-2.5%
L1 2-4 B-C	75.71	75.19	67.61	-11.2%
L1 4 B	93.94	102.58	96.97	-5.8%
L1 4 C	72.23	74.06	74.64	0.8%
L1 5-6 B	108.72	108.49	108.75	0.2%
L1 5-6 C	68.42	71.58	65.82	-8.8%
L3 2-4 B	92.62	84.23	90.71	7.1%
L3 2-4 C	78.78	74.40	77.86	4.4%
L1 2+ D	49.60	46.25	39.88	-16.0%

Quelle: WaldSchweiz, Agristat, Rohholzpreiserhebung

Käferholz wird in der Regel der Qualität D zugeordnet (Tabelle 1). Das generell niederpreisige Kurzholz (L1) mit dünnen Durchmessern (2) und schlechter Qualität (D) ist zusätzlich von einem starken Preisrückgang betroffen. Dies ist auch auf die Verblauung des Holzes zurückzuführen.

Den Forstbetrieben entsteht durch den Käferbefall mit zusätzlicher Verblauung ein enormer wirtschaftlicher Schaden. Im Sept./Okt. 2019 konnte für Kurzholz mit dünnen Durchmessern und guter Qualität (L1 2b B) bzw. mittlerer Qualität (L1 2b C) ein durchschnittlicher Preis von 97,- CHF resp. 66,- CHF erzielt werden. Durch Käferbefall und Bläue sank der Preis auf knapp 40,- CHF, das heisst, die Forstbetriebe mussten **Mindeereinnahmen von 26,- bis 57,- CHF pro Fm Stammholz** in Kauf nehmen. Geht man von der Annahme aus, dass im Jahr 2019 schweizweit ca. 1.134 Mio. Fm Käferholz durch Zwangsnutzung angefallen sind (davon mindestens 50% Stammholz der oben genannten Qualitäten), wären das wirtschaftliche Verluste in Höhe von mindestens 14.7 Mio. CHF.

Nach Aussagen der Kantonsoberrösterkonferenz KOK waren im Jahr 2019 ca. 90% des geschlagenen Käferholzes mit Bläue befallen.

Durch die zusätzlich zum Käferbefall auftretende Verblauung, teilweise des gesamten Splintes, entstehen nicht nur für die Forstwirtschaft massive finanzielle Mindereinnahmen, sondern auch für die weiterverarbeitende Holzindustrie. Basierend auf der Befragung einiger Holzverarbeitender Betriebe in der Schweiz wird deutlich, **dass verblautes Holz in der Regel für Produkte mit einer geringen Wertschöpfung wie z.B. Pellets/Feuerholz, Verpackungen, Restholz verwendet wird.** Aufgrund der Verblauung werden diese Produkte zusätzlich meist als 'Ware minderer Qualität' ausgewiesen. Dies führt zu **Mindereinnahmen von 10-15%** in diesem bereits niederpreisigen Segment (Quelle: Schilliger Holz AG). Zudem werden Verfärbungen wie Bläue für den 'sichtbaren Bereich' (z.B. KVH-Si oder Fassadentäfer) in der Regel nicht akzeptiert. Verblautes Holz kann somit für viele höherpreisigere Produkte nicht oder nur sehr bedingt eingesetzt werden.

Käferbefall und Primärbläue führten im Jahr 2019 schweizweit schätzungsweise zu mindestens 14.7 Mio. CHF Mindereinnahmen und somit zu einem beträchtlichen finanziellen Schaden für die Forstwirtschaft. Verblauung führt auch bei den Säge- und Hobelwerken zu Verlusten in der Wertschöpfungskette. Eine technische Aufwertung des verblauten Käferholzes durch eine bessere Charakterisierung der Eigenschaften, bzw. durch eine zusätzliche oberflächliche Entfärbung könnte zu einem deutlichen Anstieg der Wertschöpfung sowohl für die Forstbetriebe als auch in der weiteren Holzkette führen.

2.3 Stand der Forschung

Besonders verbreitet in der Schweiz ist der Buchdrucker (*Ips typographus*), ein rindenbrütender Borkenkäfer, der in mutualistischer Symbiose mit diversen pflanzen-pathogenen Bläuepilzen wie beispielsweise *Ophiostoma polonicum* lebt (Christiansen and Solheim 1990). Eine sehr gute Zusammenfassung des bestehenden Wissens über die Wechselwirkungen zwischen Fichte und *I. typographus* aus der Perspektive trockenheitsgestresster Bäume, der Wirtsauswahl und des Kolonisationsverhaltens von Käfern gibt (Netherer, Kandasamy et al. 2021). Durch die Einbeziehung chemo-ökologischer, molekularer und verhaltensbezogener Perspektiven vermittelt diese Studie ein umfassendes Bild dieses komplexen, multitrophischen Systems im Lichte des Klimawandels.

Einmal vom Borkenkäfer befallen, schleppen diese die Sporen, welche sie auf ihrem Körper oder im Magen transportieren, in die Frassgänge ein und infizieren so das Holz mit den entsprechenden Bläuepilzen (Furniss, Solheim et al. 1990). Die Käfer und Larven wiederum nutzen die Pilze in den Frassgängen als Nahrung. Ähnliche Käfer-Pilz-Komplexe sind auch bei anderen Holzarten wie zum Beispiel der Lärche bekannt (Kirisits 2004).

Umfangreiche Studien zur Vielfalt der eingeschleppten Pilze (Mathiesen 1950; Kirschner 2001) zeigen, dass durch *I. typographus* vor allem Bläue erregende *Ophiostoma* Arten in das Holz eingebracht werden, die zur grossen Klasse der Schlauchpilze (Ascomyceten) gehören. Es wurden jedoch auch unbedeutendere holzabbauende Pilze wie z.B. *Ceratocystiopsis* und *Graphium* Arten gefunden, welche ebenfalls zu Verfärbungen aber auch zu Substanzabbau im Holz führen können. Mit einiger Wahrscheinlichkeit tragen Borkenkäfer auch zur Verbreitung von Rotstreifigkeit bei (Kleist 2001).



Abbildung 3 Frassbild des Borkenkäfers (*Ips typographus*)

Zunehmend sind ganze Bestände vom Borkenkäferbefall betroffen, so dass das Holz (auch während der Sommermonate) rasch geerntet werden muss. Aus Zeit- und Kapazitätsgründen wird das befallene Holz teilweise jedoch im Bestand entrindet und liegen gelassen. Ist der Zeitraum zwischen dem Fällen und der Weiterverarbeitung im Werk zu gross, kann sich die in die Frassgänge eingeschleppte Bläue weiter im Splintholz ausbreiten und es kommt zu massiven grauen bis blauen Verfärbungen des Splintholzes (Abbildung 4). Bereits 4 bis 5 Wochen nach dem Borkenkäferbefall kann bis zur Hälfte des Splintholzes befallen sein (Solheim 1992).

Diese bläulichen Verfärbungen werden durch die Anwesenheit der Pilzhyphen in den Holzstrahlen hervorgerufen. Die aus den Hyphen isolierten Pigmente können den Melaninen zugeordnet werden und sind somit hochkondensierte Polymere mit überwiegend aliphatischer Struktur (Zink and Fengel 1988). Die Verfärbungen stellen vor allem ein optisches Problem dar.



Abbildung 4 Frisch gefällte Fichte mit Borkenkäferbefall und starker primärer Bläue

Da sich Bläuepilze hauptsächlich von Proteinen in den Parenchymzellen ernähren (Zink and Fengel 1988), werden sie nicht zu den holzerstörenden Pilzen gezählt. Bei längerer Lagerung leiten die Bläuepilze als sogenannte primäre Besiedler jedoch die Besiedlungs-Sukzessionen des Bastes und des Holzes durch weitere Mikroorganismen ein und werden innerhalb einiger Monate von anderen Pilzarten - darunter auch Fäule-Erreger, die das Holz abbauen – verdrängt (Kirisits 2004).

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts beschäftigte man sich mit den Eigenschaften des verblauten Holzes. (Chapman 1933) untersuchte drei mit Bläuepilzen (*Graphium rigidum* (Pers.) Sacc. und *Ceratostomella pilifera* (Fr.)) künstlich infizierte Kiefernarten (*Pinus echinata* Mill., *Pinus taeda* L., und *Pinus palustris* Mill.). Während die Verblauung keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf Bruchmodul und spezifisches Holzgewicht hatte, war die Zähigkeit des Holzes bis zu 40% reduziert.

Bezüglich des Holzgewichtes kamen (Encinas and Daniel 1997) zu einem interessanten Ergebnis. Sie untersuchten mit tropischen Bläuepilzen (*Lasiodiplodia theobromae*) infiziertes Kautschukbaumholz (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg) als auch Holz der Zitterpappel (*Populus tremula* L.). Zum einen zeigte das mit Bläuepilzen künstlich infizierte Holz eine wesentlich erhöhte Holzfeuchte und zum anderen konnte ein signifikanter Gewichtsverlust gemessen werden (nach 1 Monat 7-12% an Kautschukbaum und 4-8% an Pappel). An beiden Holzarten konnte in einiger Entfernung zu den Pilzhyphen ein Abbau der S2-Schicht in der Zellwand festgestellt werden, welcher hauptsächlich im Frühholz auftrat, wo gelatineartige Fasern häufiger vorkommen und die G-Layer Schicht zuvor abgebaut worden war.

Basierend auf ihren Untersuchungen an der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*), künstlich infiziert mit *Aureobasidium pullulans* und *Sclerophoma pithyophila* (Saprophyt) gehen (Humar, Vek et al. 2008) davon aus, dass Bläuepilze keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes haben, obschon ein leicht erhöhter E-Modul des verblauten Holzes gemessen wurde. FTIR Messungen zufolge zeigten Lignin, Cellulose und Hemicellulose keine strukturellen Veränderungen. Eine neuere Studie ebenfalls aus Slowenien (Kržišnik, Lesar et al. 2018) befasste sich hauptsächlich mit dem Wasseraufnahmeverhalten von verblautem Fichten-Käferholz und dessen Resistenz gegen holzerstörende Pilze (Basidiomyceten). Auch in dieser Studie kam man zum Ergebnis, dass die mechanischen Eigenschaften des verblauten Käferholzes mit den Referenz-Proben vergleichbar sind, obwohl auch in dieser Studie ein signifikant höherer E-Modul an den verblauten Proben gemessen wurde. Während auch das Sorptionsverhalten beider Vergleichsgruppen vergleichbar war, zeigten die verblauten Proben ein wesentlich schlechteres Verhalten gegenüber Flüssigwasser und waren deutlich weniger resistent gegenüber zwei getesteten Basidiomyceten.

In einer vergleichenden Literaturstudie wird zusammengefasst, dass Veränderungen in der Struktur und den Eigenschaften von Holz nach Borkenkäferbefall indirekt durch Verfärbungen und holzerstörende Pilze hervorgerufen werden. Der Grad des Befalls durch die Pilze und die Auswirkung dieses Befalls auf die Holzeigenschaften ist umso größer, je länger die Pilze im Holz wirken (Hýsek, Löwe et al. 2021). In der Publikation wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass wichtige Fragen bezüglich der Holzqualität nach Käferbefall derzeit nicht ausreichend beantwortet werden können und Informationen über die Qualität von Produkten aus Käferholz kaum zur Verfügung stehen.

In einer amerikanischen Publikation (Little, McConnell et al. 2013) werden verschiedene Quellen zitiert, die aufzeigen, dass verblautes Käferholz (Kiefer) in vielen Produkten angewendet werden könnte, wie zum Beispiel Rahmenhölzer für den Leichtbau, Balken und Bretter, zementgebundene Spanplatten, Holz-Kunststoff Composite, Furnier- und Sperrholz. Die Autoren selbst stellten in ihren Untersuchungen fest, dass der Befall mit Primärbläue einen leichten Einfluss auf die Oberflächenenergie (Unterschiede zu nicht verblautem Holz waren geringer als 5 mJ/m²) hat. Luftgetrocknetes verblautes Kiefernholz hatte die geringste, technisch getrocknetes die höchste Oberflächenenergie.

Die genannten veränderten mechanischen Eigenschaften, die erhöhte Wasseraufnahme als auch die reduzierte Oberflächenenergie könnten die Benetzungseigenschaften und die Haftung von Beschichtungen (oder auch Klebstoffen) auf verblautem Holz beeinflussen. Vor allem die unterschiedliche Wasserdynamik als auch die reduzierte Resistenz gegenüber Basidiomyceten könnten sich negativ auf die Dauerhaftigkeit von verblautem Käferholz auswirken.

(Yu, Tang et al. 2011) untersuchten den Einfluss von Verdichtung (Pressen) und thermischer Modifizierung (2h bei 220°C) auf die Eigenschaften und das Aussehen von verblautem Kiefernholz (*Pinus massoniana*). Nach dieser Behandlung war die Bläue auf der Holzoberfläche nicht mehr sichtbar.

Diverse Studien beschäftigen sich mit dem Bleichen von verblautem Kiefernholz für unterschiedliche Anwendungen.

(Hu, Johal et al. 2006) verarbeiteten verblautes (*Ophiostoma piliferum*) Kiefernholz (*Pinus contorta* Dougl.) zu Spänen und weiter zu Zellstoff (thermomechanischer und chemo-thermomechanischer Aufschluss). Sie fanden, bis auf eine geringere Dichte der verblauten Späne, keine wesentlichen Unterschiede beim Energieverbrauch für die Herstellung von verblautem und nicht verblautem Kiefernholz zu Zellstoff als auch bei den Festigkeitseigenschaften. Alkalisches Wasserstoffperoxid eignete sich am besten zum Bleichen des Zellstoffs.

(Evans, Palmer et al. 2007) behandelten technisch getrocknete, verblaute Kiefer (*Pinus contorta* Dougl.) mit verschiedenen Chemikalien: ein handelsübliches 2K-Peroxid Bleichmittel; Natriumhypochlorit (10%); Natriumhypochlorit (10%) und Natriumhydroxid (5%; 1:1) gefolgt von 30% Wasserstoffperoxid; Natriumchlorit (10%) und Harnstoff (20%); Wasserstoffperoxid (30%) und Essigsäure (10%); Natriumphosphat (3%) und Natriumchlorit (9%); Wasserstoffperoxid (30%). Das Bleichen mit Natriumhypochlorit unter milden Bedingungen führte zu den besten Ergebnissen. Allerdings war das Splintholz nach der Behandlung immer noch dunkler als die Vergleichsproben ohne Bläue.

Eine Folgestudie zeigte, dass die Kombination aus Vakuum Plasmabehandlung und anschliessendem Bleichen mit Natriumhypochlorit zu einem noch besseren Ergebnis führte (Jamali and Evans 2013).

(Stirling and Morris 2009) testeten eine Kombination aus 10 min Bleichen mit Hypochloritlösung, Abspülen mit destilliertem Wasser und anschliessender 10 min Bestrahlung mit einer 65 Watt Xenon Lampe an verblauter Kiefer (*Pinus contorta* Dougl.). Die Verfärbung durch Bläue konnte so im Splint komplett entfernt werden, ohne die Farbe des Kernholzes negativ zu beeinflussen. Anschliessend beschichteten sie das entfärbte Holz mit einer Farbe auf Urethanbasis für den Innenbereich. Die getestete Trockenhaftung (Tape Test ASTM 2002) war vergleichbar mit der auf nicht verblautem Holz. Allerdings war nur eine 'kontaktlose' Applikation der Farbe, wie z.B. Sprühen möglich, da die gebleichte Holzoberfläche zu einer chemischen Reaktion mit der Farbe und somit zu einem sofortigen Antrocknen führte.

Es konnte wenig bis keine adäquate Literatur zu den folgenden Fragestellungen gefunden werden:

- Eigenschaften von primär verblautem Käferholz, einheimischer Fichte
- Probleme / Eigenschaften bei der Beschichtung von primär verblauter Fichte
- Eignung der oben genannten Entfärbungsmethoden auf primär verblauter Fichte
- Probleme / Eigenschaften bei der Beschichtung von entfärbten, einheimischen Hölzern

Der Einsatz des verblauten Käferholzes z.B. im Bereich beschichteter Fassadenschalungen erfordert die ausreichende Klärung dieser Fragestellungen.

3 Projektziel

Ziel des Projektes war es, eine Grundlage für die Nutzung von verblautem Käferholz (Fichte *Picea abies*) im beschichteten Fassadenbereich zu erarbeiten.

Die Ziele im Detail waren:

1. Charakterisierung von primär verblautem Holz
 - a. Mechanische Eigenschaften
 - b. Physikalische Eigenschaften
 - c. Biologische Eigenschaften
2. Vergleich der Beschichtungs- und Anwendungseigenschaften von verblautem und nicht verblautem Holz
 - a. Applikationsparameter (z.B. Benetzung, Eindringtiefe, Schichtdicke)
 - b. Nutzungseigenschaften (z.B. Nass- und Trockenhaftung, Dauerhaftigkeit während künstlicher und natürlicher Bewitterung)
 - c. Anfälligkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen
3. Einsatz von Methoden zur oberflächlichen Entfärbung von verblautem, technisch getrocknetem Fichtenholz
 - a. Auswahl und Applikation von zwei geeigneten Methoden
 - b. Auswirkung der Entfärbung auf eine anschliessende Beschichtung
4. Vorschläge für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Dieses Forschungsprojekt soll für die Praxis das nötige Wissen über den Einfluss der Bläue auf eine anschliessende Oberflächenbehandlung des Holzes bereitstellen. Zudem sollten Methoden erarbeitet und getestet werden, bei denen die verblauten Zonen entfärbt werden, um so einen Einsatz des zuvor verblauten Holzes in diversen Bereichen mit höherer Wertschöpfung und optischen Ansprüchen zu ermöglichen.

Ziel war es, erfolgversprechende Ergebnisse möglichst schnell mit der Industrie in die Praxis umzusetzen.

4 Zielgruppe

Die Studie richtet sich an Betriebe entlang der Holzverarbeitungskette, im speziellen an Sägereien, Hobelwerke und Beschichter. Zudem liefert sie wichtige Informationen für betroffenen Forstbetriebe.

Auch für Planer und Architekten, welche den Einsatz von Käferholz erwägen, enthält diese Studie interessante Erkenntnisse.

5 Projektbeschreibung

5.1 *Administratives*

Das Projekt BlueWood wurde durch die **Arbeitsgruppen WoodTec und Bio-engineered Wood der Abteilung Cellulose & Wood Materials der Empa** koordiniert und durchgeführt (Projektleitung Tina Künniger). Als Wirtschaftspartner begleiteten Vertreter der **Verbände 'Holzindustrie Schweiz', 'VSH' und 'Wald Schweiz'** das Projekt inhaltlich und schlugen geeignete Industriepartner für die jeweiligen Arbeitspakete vor.

Im AP 2 unterstützten mit der **'Konrad Keller AG'** und dem **'Forstrevier Stammheim'** zwei engagierte Industriepartner massgebend die Projektarbeiten. Sie stellten das gesamte Holz sowie die entsprechende ManPower bereit.

Die Arbeiten im AP3 wurden ausschliesslich an der Empa durchgeführt. Diese Arbeiten wurden teilweise durch David Schönen und Lewis Douls im Rahmen ihrer Zivildienstpraktika unterstützt.

In seiner Bachelorarbeit testete Niklaus Schriber von der ETH Zürich im Rahmen des AP 4 verschiedene Entfärbungsmethoden und fasste die Ergebnisse in einem separaten Bericht zusammen. Weiterführende Arbeiten wurden ebenfalls an der Empa durchgeführt.

Im AP 5 engagierten sich die Lackhersteller **'Adler-Lack AG'** und **'Bosshard + Co. AG'** sowie die Beschichter **'OLWO AG', 'Gebr. Eisenring AG'** und **'Mivelaz Bois SA'** mit Material und ManPower. Ein Teil der Lamellen wurde an der Empa zugeschnitten und bei den Lackherstellern beschichtet. Der andere Teil der Lamellen wurde inklusive der industriellen Beschichtung durch die Beschichter bereitgestellt. Alle weiteren Arbeiten im AP 5 wurden an der Empa durchgeführt.

Die Arbeiten im AP1 und AP2 wurden durch Eigenmittel der Empa und der Industriepartner/Verbände finanziert. Alle weiteren Arbeiten konnten durch die grosszügige finanzielle Unterstützung von WHFF/BAFU und KWL im Rahmen des 'Aktionsplan Holz' und durch die Mitwirkung der Industriepartner realisiert werden.

5.2 Vorgehen & Arbeitspakete

Im Projekt BlueWood wurde eine speditive, praxisnahe Vorgehensweise gewählt, um den Ansprüchen der Holzindustrie Rechnung zu tragen.

Gemeinsam mit den im Projekt involvierten Verbänden wurde vor Projektbeginn ein Projektplan erarbeitet, der die wesentlichen Arbeitspakete beinhaltet (Abbildung 5).

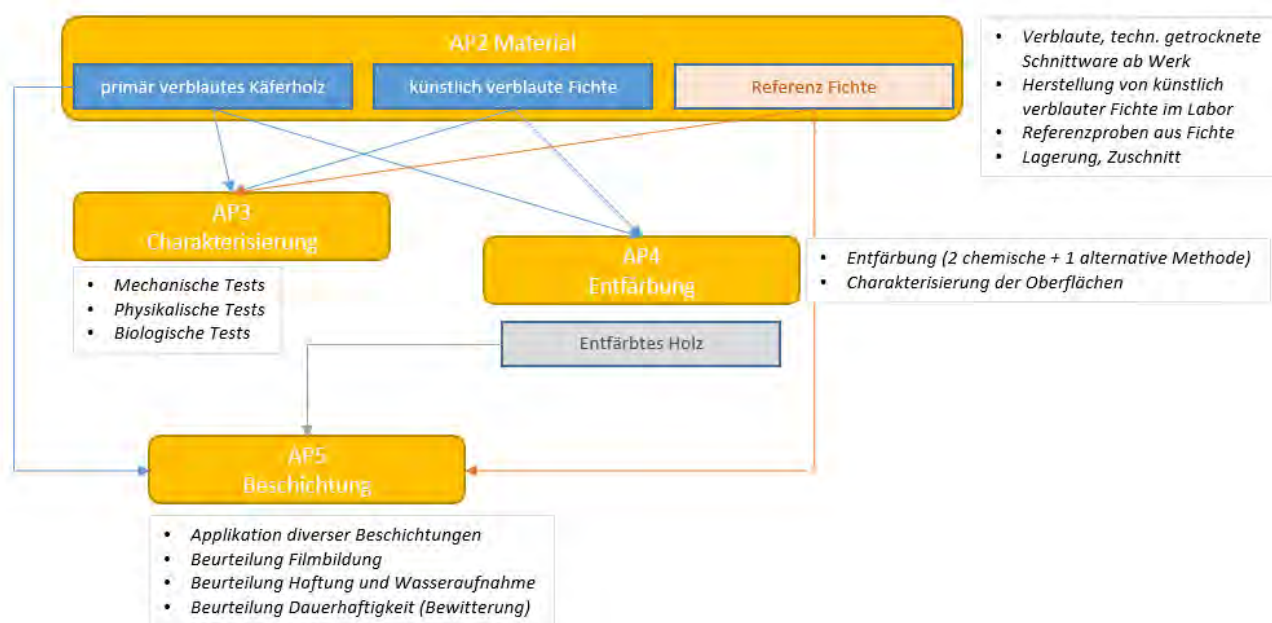


Abbildung 5 Arbeitsablauf im Projekt BlueWood

Für die Arbeitspakete 2 und 5 wurden separate Arbeitsgruppen mit Vertretern aus Verbänden und der Industrie gebildet. Innerhalb dieser Gruppen wurden die Arbeiten für die beiden Arbeitspakete weiter spezifiziert, geplant und durchgeführt.

Mehr Informationen zu den einzelnen Arbeitspaketen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

AP1: umfasste die gesamte Versuchsplanung, basierend auf dem aktuellen Wissenstand und fortlaufend unter Einbezug der aktuellen Testergebnisse im Projekt.

AP2: In Zusammenarbeit mit der Konrad Keller AG, dem Forstrevier Stammheim sowie den beteiligten Verbänden wurden geeignete Bäume im Wald ausgewählt, gefällt und sofort in die Sägerei verbracht. Dort erfolgte der Einschnitt der Stämme und die Auswahl geeigneter Bretter. Die technische Trocknung erfolgte bei der Konrad Keller AG. Der Probenzuschnitt und alle weiteren Bearbeitungen wie z.B. Hobeln erfolgten an der Empa.

Für spezielle Fragestellungen wurde unter kontrollierten Bedingungen Fichte mit geeigneten Primärbläue erregenden Pilzstämmen inkubiert.

AP3: Im Arbeitspaket 3 wurde das primär verblaute Fichtenholz charakterisiert. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung derjenigen Eigenschaften, welche eine Rolle bei der Verwendung des Holzes als beschichtetes Fassadentäfer spielen. Ausgewählte mechanische und physikalische Eigenschaften wurden mit denen von unverblautem, gesunden Fichtenholz verglichen.

Mit Hilfe von Laboruntersuchungen wurde abgeklärt, wie resistent verblautes Käferholz mit und ohne Beschichtung gegenüber holzerstörenden Pilzen (3 Braunfäuleerreger) ist.

Ebenfalls wurde die Sporenbelastung auf der Holzoberfläche sowie in der Umgebungsluft von verblauten Holz gemessen, um ein gesundheitliches Risiko bei dessen Verwendung im Innenbereich abschätzen zu können.

Tabelle 2 Arbeitspakete im Projekt

Arbeitspaket	Inhalt	Methoden
1 Grundlagen	Stand Forschung / Technik	Literaturstudie
	Versuchsplanung	
2 Material	Primär verblautes Käferholz (Fichte)	Techn. getrocknete Schnittware ab Säge-/Hobelwerk
	Künstlich verblautes Holz	Beimpfen von Fichte mit (Primär-) Bläuepilzen an der Empa
3 Charakterisierung von verblautem Käferholz	Mechanische Eigenschaften	Biegung, Druck, Scher, Schlagbiege, Brinell Härte
	Physikalische Eigenschaften	Dichte, Feuchtedynamik, Dimensionsstabilität, Farbe
	Biologische Eigenschaften	Anfälligkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen Aktive Abgabe von Sporen an die Umgebung
4 Entfärbung	Entfärbung durch Bleichen	Bleichen mit Natriumhypochlorit Bleichen mit alkalisches Wasserstoffperoxid Bleichen mit Oxalsäure
	Alternative Entfärbemethoden	IR-Strahlung UV-Strahlung (Wellenlänge 395~405nm) Ultraschall Mikrowelle Dämpfen
	Charakterisierung der Oberflächen nach Entfärbung	Farbe Dauerhaftigkeit der Entfärbung Wasseraufnahme der hitzebehandelten Hölzer
5 Beschichtung	Substrat	verblautes Käferholz, Referenz Fichte
	Beschichtung	14 Beschichtungen (transparent, lasierend, deckend)
	Applikation industriell und im Labor	Messung diverser Parameter (Schichtdicke, Farbe, Trockenhaftung), Bewertung der Qualität
6 Projektleitung	Bewitterung	Künstliche Alterung (QUV) / 1 Jahr natürliche Bewitterung Bewertung Dauerhaftigkeit / Farbe Wasseraufnahme / Holzfeuchte
	Administration	Administrative Projektabwicklung
	Datenauswertung, Berichterstattung	Projektsitzungen, Zwischen- und Abschlussbericht

AP4: Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden diverse Methoden getestet, um deren Eignung zur oberflächlichen Entfärbung der Verblauung zu bewerten. Zusätzlich zu den Laboruntersuchungen wurde ein bei der Konrad Keller AG angewendetes Dämpfverfahren und dessen Eignung als Entfärbungsmethode evaluiert.

AP5: In Abstimmung mit den Industriepartnern (Adler-Lack AG, Bosshard + Co. AG, Gebr. Eisenring AG, Mivelaz Bois SA, OLWO AG) wurden 11 Beschichtungssysteme für den Aussenbereich und 3 Beschichtungssysteme für den Innenbereich ausgewählt und auf verblautem Käferholz als auch auf Referenzmaterial aus gesunder Fichte sowohl industriell bei den Beschichtern, als auch im Anstrichlabor der Lackhersteller appliziert. Die Qualität der Applikation und Schichtbildung, die Wasseraufnahme und das Verhalten während der Bewitterung der Proben wurden untersucht und bewertet.

5.3 Zeitplan

AP	Start: 10/2020												Ende: 09/2023		
	2020				2021				2022				2023		
	4. Quartal	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal
1															
2															
3															
4															
5															
6															
1. Zwischenbericht						2. Zwischenbericht						Schlussbericht			

Das Projekt BlueWood startete planmässig im Oktober 2020.

Am 19. November 2020 fand an der Empa in Dübendorf das Kick-Off-Meeting mit den Verbänden und den Industriepartnern für das AP2 statt. Ziel des Kick-Off-Meetings war das persönliche Kennenlernen der Teammitglieder als auch die Abstimmung der Projekteinhalte. Der Fokus lag auf der Planung der Materialbeschaffung im Wald und der Weiterverarbeitung im Sägewerk.

Der 1. Zwischenbericht wurde Ende 2020 erstellt und beim BAFU eingereicht.

Die erste Phase der Materialbeschaffung (Wald/Sägerei) konnte Ende des 1. Quartals 2021 abgeschlossen werden. Zeitgleich begann an der Empa der Zuschnitt der Proben für AP3 und AP4. Ebenfalls wurden die Proben für die Bereitstellung künstlich verblauter Fichte beimpft und gelagert. Aufgrund erster Testergebnisse wurden im 3. Quartal 2021 zusätzliche Stämme geschlagen, eingesägt und an die Empa verbracht.

Die Versuche zur oberflächlichen Entfärbung (AP4) starteten im 2. Quartal 2021. Die Bachelorarbeit konnte im Juni 2021 abgeschlossen werden.

Am 19. August 2021 fand an der Empa in Dübendorf das Kick-Off-Meeting mit den Industriepartnern für das AP5 statt. Ziel dieses Kick-Off-Meetings war das persönliche Kennenlernen der Teammitglieder als auch die Abstimmung der Arbeitsinhalte im AP5. Der Fokus lag auf der Planung der Materialbeschaffung und Logistik sowie der Auswahl der Beschichtungssysteme.

Die Tests zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (AP3) wurden im Dezember 2021 abgeschlossen. Gleichzeitig starteten die Tests zur Bestimmung der physikalischen und biologischen Eigenschaften. Ende des 1. Quartals 2022 konnte die gesamte Materialbereitstellung inklusive Zuschnitt der Testproben abgeschlossen werden.

Die beschichteten Proben für das AP5 wurden bis Januar 2022 bereitgestellt. Die einjährige Freibewitterung startete im Februar 2022. Eine vorläufige Schlussbewertung erfolgte nach einem Jahr Freibewitterung im Februar 2023. Alle Proben sind weiterhin in der Freibewitterung, um eine bessere Langzeitprognose abgeben zu können. Eine weitere Bewertung der Proben ist für 2024 geplant (ausserhalb dieser Projektfinanzierung).

Der 2. Zwischenbericht wurde im Juni 2022 erstellt und beim BAFU eingereicht.

Sämtliche Arbeiten im AP3 und AP4 konnten bis Ende 2022, die Arbeiten im AP5 im Sommer 2023 abgeschlossen werden.

Der Projektabschluss inklusive wissenschaftlichem Schlussbericht erfolgte fristgerecht im September 2023.

6 Methoden & Ergebnisse

6.1 AP2 – Material

Im gesamten Projekt kam einheimisches Fichtenholz vom Stammerberg, Forstrevier Stammheim zum Einsatz. Das Forstrevier Stammheim wurde ausgewählt, da es in den letzten Jahren besonders stark vom Borkenkäferbefall betroffen war. Auch die als Referenz verwendeten, nicht befallenen Stammabschnitte stammen aus dem Forstrevier Stammheim. Dieses Holz wurde für die AP 2, 3, 4 und 5 verwendet.

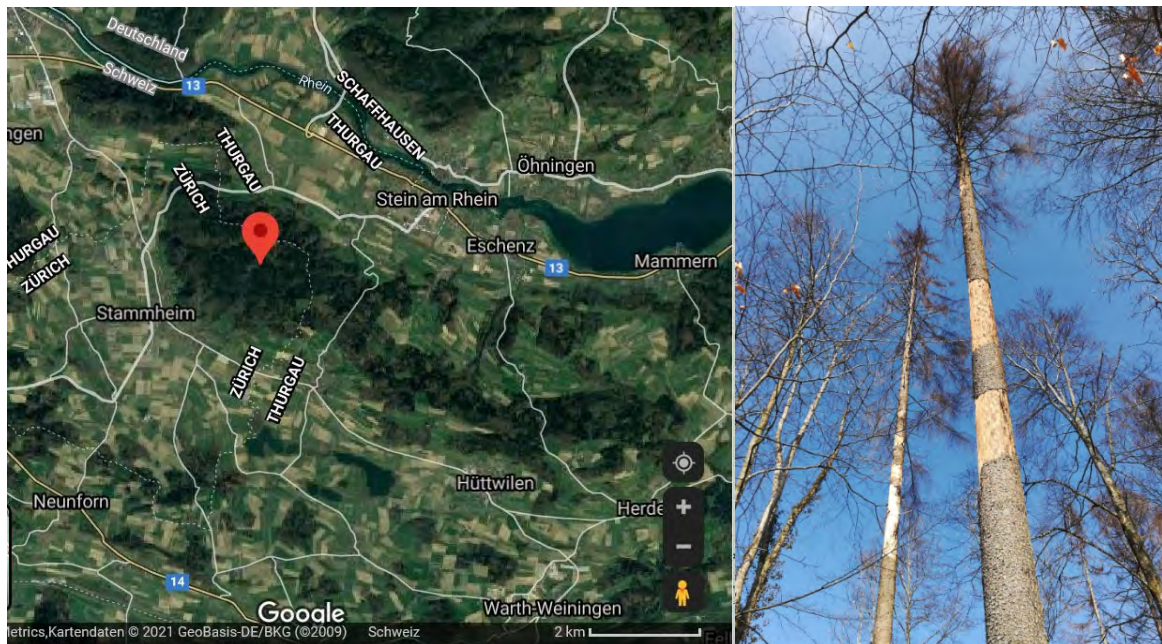


Abbildung 6  Standort Stammerberg (Forstrevier Stammheim)

Die Holzernte erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten und wird im Folgenden als Charge I bis IV bezeichnet. Im AP 5 kam zusätzlich Fichtenholz aus der laufenden Produktion der Beschichter zum Einsatz (siehe Kap.0).

6.1.1 Holz allgemein – Charge I bis 3

Eine Übersicht des eingeschlagenen Käferholzes sowie der Referenzstämme gibt Tabelle 3.

Tabelle 3 Übersicht und Bezeichnung des Holzes aus Charge I bis III

	Referenz A Charge II	Gruppe 1 A Charge III	Gruppe 2 B Charge III	Gruppe 3 B Charge II	Gruppe 4 C Charge I
Typ	Kontrolle	Käferholz	Käferholz	Käferholz	Käferholz
Befall		Juni 2021	Juni 2021	Oktober 2020	Juni 2020
Stämme	5	3	3	6	5
Holzernte	Januar 2021	Juli 2021	Juli 2021	Januar 2021	Oktober 2020
Einschnitt	Februar 2021	Juli 2021	Juli 2021	Februar 2021	November 2020
Sichtbare Verfärbung	Nein	Nein	Bläue	Bläue	Bläue und Rotstreifigkeit

Charge I

Ende November 2020 wurden 20 m³ Erdstämme (Käferholz), welche im Herbst 2020 gefällt wurden, bei der Konrad Keller AG zu 65 mm dicken Brettern eingeschnitten. Die Schnittware wurde direkt nach dem Einschnitt technisch auf 12% Holzfeuchte getrocknet (siehe Kap. 6.1.4).

Nach Abschluss der technischen Trocknung wurden die 20 m³ Schnittware vor Ort vorsortiert.

Dabei musste festgestellt werden, dass ein Teil des bereits eingeschnittenen Käferholzes wegen der längeren Lagerzeiten neben Bläue bereits deutliche Rotstreifigkeit aufwies (Abbildung 7).

Aus diesem Grund wurde aus 5 Stämmen nur eine begrenzte Menge an Brettern (ca. 1 m³) ausgewählt und an die Empa transportiert. Diese Proben werden im weiteren Dokument als C-Proben Charge I oder als Material **Gruppe 4** bezeichnet.

Holz aus Charge I wurde in den mechanischen Tests in AP3 verwendet, um die Eigenschaften von länger gelagertem Käferholz zu erfassen.



Abbildung 7 Brettware verblautes Käferholz Fichte mit bereits einsetzender Rotstreifigkeit

Charge II

Anfang Januar 2021 wurden mehrere ausgewählte Fichten (BHD ca. 40 cm) gefällt, welche ca. seit Herbst 2020 mit dem Borkenkäfer befallen waren. Mehrheitlich war der gesamte Splint bereits am stehenden Baum verblaut (Abbildung 8).



Abbildung 8 Frisch gefällte Fichte mit verblautem Splint

Bedingt durch starke Schneefälle konnten die Stämme erst Anfang Februar 2021 in die Sägerei transportiert werden. Dort erfolgte am 11. Februar 2021 der Einschnitt von 6 geeigneten Stämmen zu 65 mm Brettern (Abbildung 10).

Verblaute Proben aus diesen Stämmen werden im weiteren Dokument als B-Proben Charge II oder als Material **Gruppe 3** bezeichnet.



Abbildung 9 Vorbereitung der verblauten Stämme zum Einschnitt



Abbildung 10 65 mm Fichtenbretter mit breit verblautem Splint

Ebenfalls wurden 5 Referenz-Stämme ohne Käferbefall und ohne Bläue ausgewählt (Abbildung 11), entrindet (Abbildung 12) und zu 65 mm Brettern eingeschnitten.



Abbildung 11 Beispiel Referenzstamm ohne Käferbefall und ohne Verblauung



Abbildung 12 Entrindungsstation mit frisch entrindeten Fichtenstämmen



Abbildung 13 65 mm Bretter ohne Bläue als Referenz

Die unbehandelte Schnittware wurde direkt nach dem Einschnitt technisch auf 12% Holzfeuchte getrocknet und Ende Februar 2021 an die Empa geliefert. Hieraus wurden alle Referenz-Proben geschnitten, die im Folgenden als A-Proben Charge II oder als Material **Referenz** bezeichnet werden.

Holz aus Charge II wurde in allen Arbeitspaketen verwendet. Die A-Proben dienen dabei als Referenzmaterial. Die B-Proben sollen 'typisches' Käferholz zu Zeiten eines Massenausbruchs repräsentieren, in denen es meist nicht möglich ist, frisch befallenes Holz sofort zu fällen und weiterzuverarbeiten.

Charge III

Ende Juli 2021 wurden im Forstrevier Stammheim drei weitere Fichten mit frischem Käferbefall geschlagen (Abbildung 14). Der Splint der Stämme war im oberen Bereich bereits verblaut, wogegen im Bereich Brusthöhe noch keine Verfärbungen sichtbar waren (Abbildung 15). An den unverblauten Bereichen wurden jeweils 1 m Riegel abgetrennt, in Bretter gesägt (Abbildung 16) und zur Empa transportiert.

Hier mussten sie technisch getrocknet werden, da bereits nach wenigen Tagen Lufttrocknung erste leichte Verfärbungen an einzelnen Brettern sichtbar wurden. Diese technisch getrockneten Bretter ohne Verfärbung werden im Folgenden ebenfalls als A-Proben Charge III oder als Material **Gruppe 1** bezeichnet.



Abbildung 14 Einschlag Ende Juli 2021



Abbildung 15 Stamm Nr.1 im oberen Teil verblaut (links) und im unteren Bereich noch unverfärbt (rechts)



Abbildung 16 Einschnitt der Rugel zu Brettern direkt im Wald

Die restlichen 3 Stammabschnitte wurden im Wald belassen. Nach ca. 3 Wochen zeigte eine Kontrolle im Wald, dass die Verblauung im Stamm bereits fortgeschritten war (Abbildung 17).



Abbildung 17 Kontrolle der Stämme 3 Wochen nach dem Fällen

5 Wochen nach dem Schlagen wurden nochmals an jedem Stamm 1 m Rugel abgetrennt, zu Brettern aufgeschnitten und an die Empa verbracht. Das Material wurde 4 Wochen indoor gelagert (Abbildung 18). Einige Bretter wurden anschliessend technisch getrocknet. Das verblaute Material wird als B-Proben Charge III oder als Material **Gruppe 2** bezeichnet.

Holz aus Charge III wurde teilweise in den Arbeitspaketen 3 und 5 verwendet. Die Proben repräsentieren unverblautes (Gruppe 1) sowie verblautes Käferholz (Gruppe 2), welches relativ rasch nach dem Befall geschlagen und weiterverarbeitet wurde.



Abbildung 18 Lagerung an der Empa, welche kurzzeitig eine weitere Verblauung im Stamm begünstigte

Zwei der restlichen im Wald verbliebenen Stämme (Stamm 1 & Stamm 3) wurden zur Sägerei transportiert und dort Anfang Oktober 2021 zu Brettern eingeschnitten. Jeweils ein Brett pro Stamm wurde vor der technischen Trocknung gedämpft.



Abbildung 19 Technisch getrocknete Brettware aus Stamm 1 (Brett 1.2 gedämpft)



Abbildung 20 Technisch getrocknete Brettware aus Stamm 3 (Brett 3.2 gedämpft)

Da aus den drei Stämmen jeweils sowohl unverblautes Referenzmaterial als auch verblautes Material eingeschnitten werden konnte, war es möglich, für ausgewählte Versuche im AP3 und AP5 mit Folgeproben des gleichen Brettes zu arbeiten und somit die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen.

6.1.2 Holz für künstliche Verblauung – Charge IV

Für die künstliche Verblauung im Labor wurden im März 2021 vier gesunde Fichtenstämme (BHD ca. 40 cm) im Forstrevier Stammheim ausgewählt (Abbildung 21) und gefällt.

Der Transport erfolgte unverzüglich in die Sägerei, wo der Einschnitt zu Brettern erfolgte. Anschliessend wurden die noch saftfrischen, 3-5 m langen Bretter an die Empa geliefert und für die künstliche Verblauung vorbereitet.

Die durch künstliche Inkubation verblauten Proben werden im Projekt als D2-Proben bezeichnet (künstliche Verblauung siehe Kap. 6.1.5). Die unverblauten Folgeproben dienen entsprechend als Referenz und werden als D1-Proben bezeichnet.



Abbildung 21 Auswahl geeigneter Fichten im Wald



Abbildung 22 Eingeschnittene, saftfrische Fichtenholzstämme für den Abtransport zur Empa

6.1.3 Holz für industrielle Beschichtung

Für die industrielle Beschichtung wurden verblaute und unverblaute Bretter durch die Empa und direkt durch die Hobelwerke bereitgestellt und entsprechend vorbereitet.

An der Empa wurde Material aus Charge II verwendet (siehe Kap. 6.1.1). Die gehobelten Bretter (Abbildung 23) wurden zum jeweiligen Beschichter transportiert und dort vor der Applikation der Anstriche nochmals geschliffen.



Abbildung 23 An der Empa zugeschnittene, gehobelte Lamellen für die industrielle Beschichtung

Bei den Hobelwerken wurde für den Zuschnitt der Lamellen jeweils technisch getrocknete Ware der Qualität N1 ausgewählt. In den Abbildungen Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 sind diese beispielhaft dargestellt.

Im Gegensatz zu den an der Empa hergestellten gehobelten/ geschliffenen Proben besaßen alle durch die Hobelwerke/ Beschichter bereitgestellten Proben feinstrukturierte Oberflächen.



Abbildung 24 Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. Gebr.Eisenring AG



Abbildung 25 Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. OLWO AG



Abbildung 26 Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. Mivelaz Bois SA.

Die unverblaute Industrieware wird im Folgenden mit IA-Proben, die verblaute Industrieware mit IB-Proben bezeichnet.

6.1.4 Technische Trocknung

Die technische Trocknung der Holzproben (Charge I, Charge II und 2 Stämme der Charge III) auf $u=12\%$ erfolgte bei der Konrad Keller AG. Die Proben wurden nicht chemisch behandelt.

Einige Proben der Charge III wurden an der Empa im Ofen getrocknet, um eventuell bereits vorhandene Pilze abzutöten und eine Verblauung zu verhindern. Die 30 mm dicken Bretter wurden bei 65°C und ca. 30% RH während mindestens 24 Stunden im Ofen behandelt.

Anschließend wurde das Material bis zur Weiterverwendung im Klima 20°C / 65%RH gelagert.

6.1.5 Künstliche Verblauung

Um einige der geplanten mechanischen und biologischen Versuche mit Folgeproben durchführen zu können, sollte gesundes Fichtenholz künstlich mit Bläuepilzen infiziert werden.

Dafür wurden die von der Sägerei gelieferten saftfrischen Fichtenholzbretter (siehe Kap. 6.1.5) in 50 cm lange Abschnitte aufgetrennt und paarweise sortiert. Jeweils ein Brettabschnitt wurde als Referenz zurückgestellt und der entsprechende Folgeabschnitt zur künstlichen Infizierung mit Bläuepilzen bereitgestellt.

Die Referenzabschnitte wurden für die Lufttrocknung witterungsgeschützt im Freien aufgestapelt (Abbildung 27).



Abbildung 27 Lufttrocknung der Referenzabschnitte im Freien

Für die künstliche Verblauung wurde eine Sporen-Suspension aus saftfrischem, stark verblautem Käferholz hergestellt. Dieses Holz wurde in einer Schneidemühle zerkleinert und das pilzhaltige Sägemehl mit Wasser vermischt (Abbildung 28). Bei der mikroskopischen Kontrolle (Neubauer Zählkammer) zeigte die Suspension eine Konzentration von $>10^5$ Sporen / ml Wasser.



Abbildung 28 Herstellung der Suspension mit Bläuepilz-Sporen

Die für die künstliche Verblauung selektierten Abschnitte wurden unmittelbar nach dem Zuschnitt durch Tauchen in die Sporen-Suspension mit Bläuepilzen infiziert (Abbildung 29).



Abbildung 29 Tauchbecken mit Sporen-Suspension

Die getauchten Holzproben wurden im Freiland (Halbschatten auf Waldboden) über Kanthölzern (Querschnitt 80x80 mm), mit sowie ohne Distanzhölzer zu Stapeln von 6-9 Einzelproben aufgeschichtet und abschliessend mit Folie abgedeckt (Abbildung 30). Die Lagerung startete Ende März 2021. Die Stapel wurden wöchentlich auf Feuchteentwicklung und Verblauung kontrolliert.

Die Inkubations-Methode basiert auf der 'Empa SOP-Nr. 1095, Abschnitt 6.1.2'.



Abbildung 30 Lagerung der inkubierten Hölzer

Aufgrund der ungewöhnlich kühlen Witterung im April 2021 inklusive Nachtfrost konnten erst Anfang Mai 2021 erste Anzeichen von Verblauung festgestellt werden. Es konnte nachträglich nicht geklärt werden, ob durch die vielen Frostnächte ein Teil der aufgebrachten und frisch ausgekeimten Pilzsporen frühzeitig abgestorben sind.

Der Versuch lief bis Anfang Juli 2021, musste dann jedoch abgebrochen werden, da an diversen Proben bereits Rotstreifigkeit auftrat.



Abbildung 31 Fichtenbrett mit Bläue, Schimmel und Rotstreichigkeit nach künstlicher Verblauung

Insgesamt zeigte sich, dass die Verblauung im Splint sehr ungleichmässig verteilt war. Gründe hierfür können die tiefen Temperaturen, die Holzfeuchte als auch die Art der möglichen Eindringwege der Pilze in das Holz sein. Die Ausbreitung der Pilze erfolgte methodenbedingt eben nicht radial von der Rinde über die äussersten Jahrringe des Splintholzes durch die Holzstrahlen ins Innere des Querschnittes, sondern vor allem in axialer Richtung entlang der Schnittflächen. Eine gleichmässige Verblauung des gesamten Splintes, wie typischerweise beim Käferholz, konnte an den künstlich infizierten Brettabschnitten nicht erreicht werden.

Zudem waren gegen Ende des Versuches diverse Proben bereits grossflächig von Rotstreichigkeit befallen (Abbildung 31). Auffällig war, dass diese Proben teilweise wenig bis gar nicht verblaut waren.

Aus den oben genannten Gründen wurden einige der künstlich verblauten Brettabschnitte lediglich für biologische Versuche verwendet (Resistenz gegen Holzerstörer, siehe Kap. 6.2.14).

6.2 AP3 – Charakterisierung

Im Arbeitspaket 3 wurde das primär verblaute Fichtenholz charakterisiert. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung derjenigen Eigenschaften, welche eine Rolle bei der Verwendung des Holzes als beschichtetes Fassadentäfer spielen. Abbildung 32 gibt einen Überblick, welche Eigenschaften gemessen und mit Referenzdaten verglichen wurden.



Abbildung 32 Durchgeführte Tests zur Charakterisierung des verblauten Käferholzes

6.2.1 Rohdichte und mittlere Jahrringbreite

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte in Anlehnung an DIN 52182. Die Rohdichte wurde jeweils nach der Lagerung im Normklima 20°C / 65 % RH an allen Proben vor den mechanischen Prüfungen bestimmt. Insgesamt waren das:

- 300 Proben Referenz (A Charge II)
- 44 Proben Gruppe 1 (A Charge III)
- 44 Proben Gruppe 2 (B Charge III)
- 300 Proben Gruppe 3 (B Charge II)
- 168 Proben Gruppe 4 (C Charge I)

Die mittleren Jahrringbreiten aller Proben wurden nach der Formel $JB_m = L/n$ bestimmt.

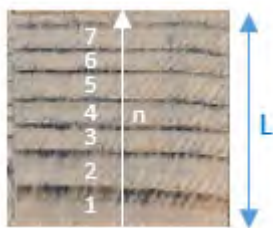


Abbildung 33 Querschnitt zur Bestimmung der mittleren Jahrringbreite
n Anzahl der Jahrringe, *L* Länge der Fläche

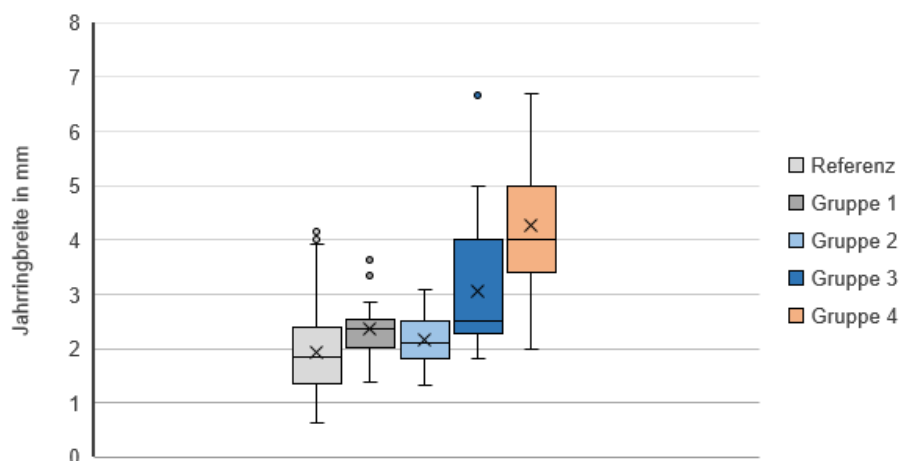


Abbildung 34 Mittlere Jahrringbreiten aller untersuchten Proben-Gruppen

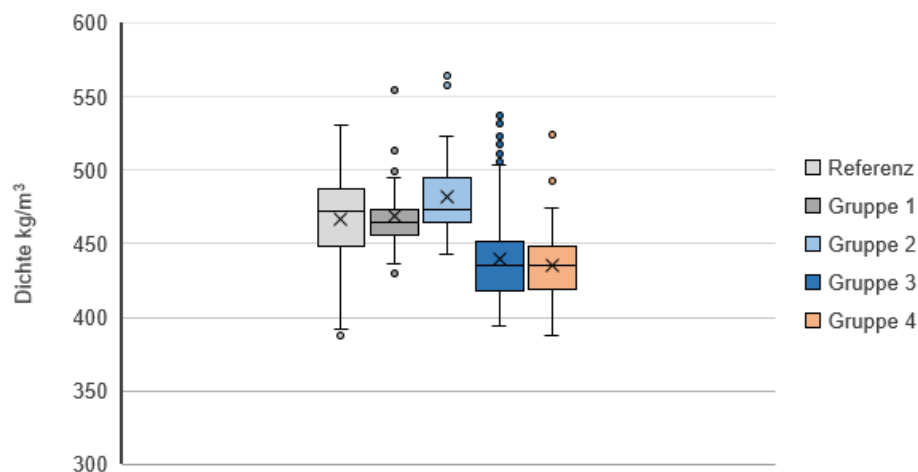


Abbildung 35 Rohdichte ($\mu=12\%$) aller untersuchten Proben-Gruppen

Beim Zuschnitt der Proben aus den vorhandenen Stämmen der Chargen I und II zeigte sich, dass die zufällig ausgewählten Käferholz-Stämme tendenziell im Splint etwas höhere Jahrringbreiten und somit geringere Rohdichten aufwiesen als die ausgewählten Referenzstämme ohne Käferbefall sowie die Stämme aus Charge III. Alle Werte liegen jedoch im Bereich der bekannten natürlichen Streuung der Fichte (Grammel 1990).

Tabelle 4 Mittelwerte der Rohdichten (20/65) der Proben aus Charge I und II

	Alle Proben	Proben mit Jahrringbreite 2-3 mm
Referenz	466.7 $\pm$ 28.9 kg/m ³ (n=300)	469.6 $\pm$ 31.4 kg/m ³ (n=110)
Gruppe 3	440.0 $\pm$ 29.7 kg/m ³ (n=300)	440.2 $\pm$ 34.1 kg/m ³ (n=202)
Gruppe 4	434.8 $\pm$ 20.6 kg/m ³ (n=168)	444.8 $\pm$ 15.8 kg/m ³ (n=26)

Vergleicht man jedoch nur diejenigen Proben miteinander, welche durchschnittliche Jahrringbreiten von 2-3 mm aufweisen, zeigt sich im t-Test (0.05) eine signifikant geringere Rohdichte der verblauten Proben der Gruppen 3 und 4 von mindestens 5 % (Abbildung 36 und Tabelle 4).

Daher liegt die Vermutung nahe, dass es zumindest bei einem Teil der verblauten Proben aus Charge I und II bereits zu einem Abbau von Inhaltstoffen sowie geringfügig zum Abbau von Holzsubstanz gekommen sein könnte.

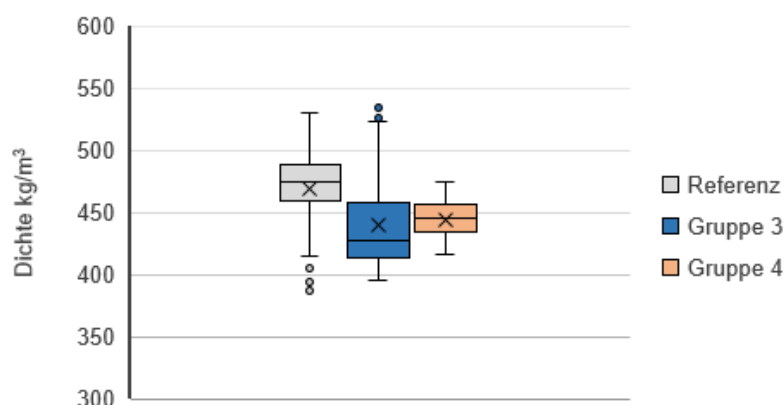


Abbildung 36 Rohdichte der Proben aus Charge I und II mit Jahrringbreiten zwischen 2-3 mm

Bei Käferholz, welches länger im Bestand verbleibt und/oder länger im Wald oder im Sägewerk gelagert wird, kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass holzabbauende Pilze, welche meist gleichzeitig mit den Pilzsporen der Bläuerreger durch die Käfer ins Holz eingebracht werden, zu einem Abbau des Holzes und somit zu einer Reduktion der Rohdichte führen können. Dies könnte auf die Stämme aus Charge I und 2 zutreffen, da diese erst einige Monate nach dem Borkenkäfer-Erstbefall geschlagen wurden. Lichtmikroskopische Untersuchungen stärken diese Annahme. In den Proben aus Gruppe 3 und 4 konnten neben den Bläuepilzen auch Holzerstörer (Stereum Arten), teilweise in großer Anzahl, gefunden werden (Abbildung 37).

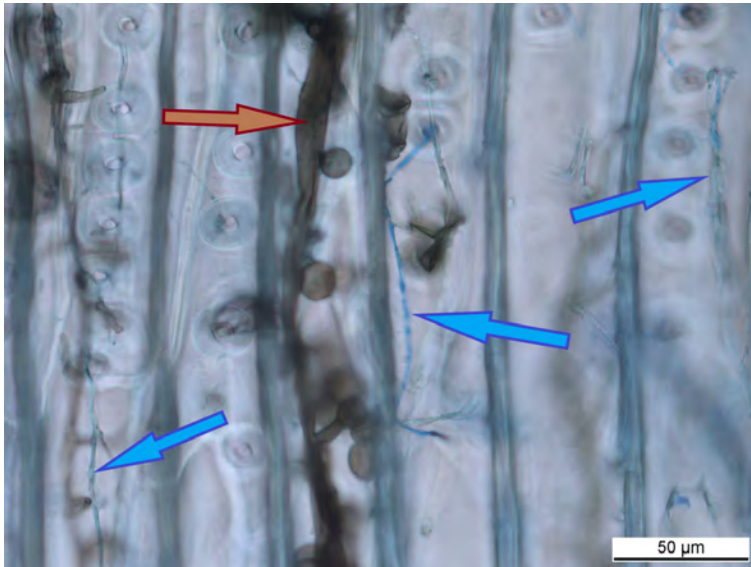


Abbildung 37 Braune Hyphen von Bläue erregenden Pilzen (oranger Pfeil) sowie Hyphen von holzerstörenden Pilzen (blaue Pfeile)

Das Käferholz ohne Bläue (Gruppe 1) sowie die Proben mit beginnender Bläue (Gruppe 2) zeigten dagegen keine wesentlichen Unterschiede in der Rohdichte (Abbildung 35 Rechts). Hier bestätigt sich die Annahme, dass an Fichten mit frischem Befall noch kein Substanzabbau stattgefunden hat.

6.2.2 Farbe

Farbmessungen wurden mit einem portablen Spectrophotometer von Minolta in Kombination mit der Software SpectraMagic NX durchgeführt. Die Messdaten der Farbwerte wurden ohne Glanzeinschluss(SCE) aufgenommen.

Der Helligkeits-Parameter L^* und die Farb-Parametern a^* und b^* liefern ein dreidimensionales Farbschema innerhalb des CIELAB-Farbsystems (Abbildung 38). Zur Quantifizierung von Farbunterschieden zweier Proben bzw. der farblichen Veränderung einer Probe wurde der Farbabstand ΔE nach EN ISO 11664-4 berechnet und ausgewiesen. Eine Farbdifferenz von $\Delta E = 1$ bis 2 wird vom Betrachter in der Regel bereits als Farbunterschied wahrgenommen, wogegen $\Delta E = 5$ und grösser als andere Farbe bewertet wird.

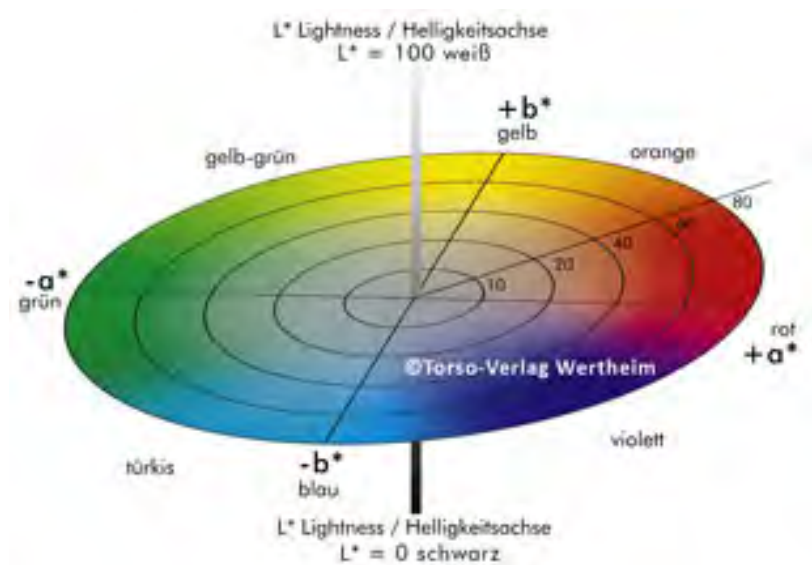


Abbildung 38 $L^*a^*b^*$ Farbraum (Quelle: www.torso.de)

Farbmessungen an unbehandelten Proben ergaben einen durchschnittlichen Farbabstand von $\Delta E = 11.6$ zwischen den Bereichen ohne Verblauung und den Bereichen mit Verblauung (Tabelle 5). Erwartungsgemäss sind die verblauten Bereiche dunkler ($L^* \downarrow$) und tendieren mehr zum grün ($a^* \downarrow$) / blauen ($b^* \downarrow$) Farbspektrum.

Tabelle 5 Durchschnittlicher Farbabstand ΔE zwischen unverblauten und verblauten Bereichen

Bereiche Nicht verblaut			Bereiche verblaut			Farbabstand			
$L^*(SCE)$	$a^*(SCE)$	$b^*(SCE)$	$L^*(SCE)$	$a^*(SCE)$	$b^*(SCE)$	ΔL	Δa	Δb	ΔE
82.7	4.3	23.2	74.1	2.0	15.8	8.6	2.4	7.4	11.6

Mittelwerte aus 100 Einzelmessungen

Ebenfalls zeigten die Ausgangsmessungen, dass Helligkeit und Farbe der verblauten Bereiche aufgrund ihrer Unregelmässigkeit erwartungsgemäss wesentlich stärker streuten als die der unverblauten Bereiche (Abbildung 39).

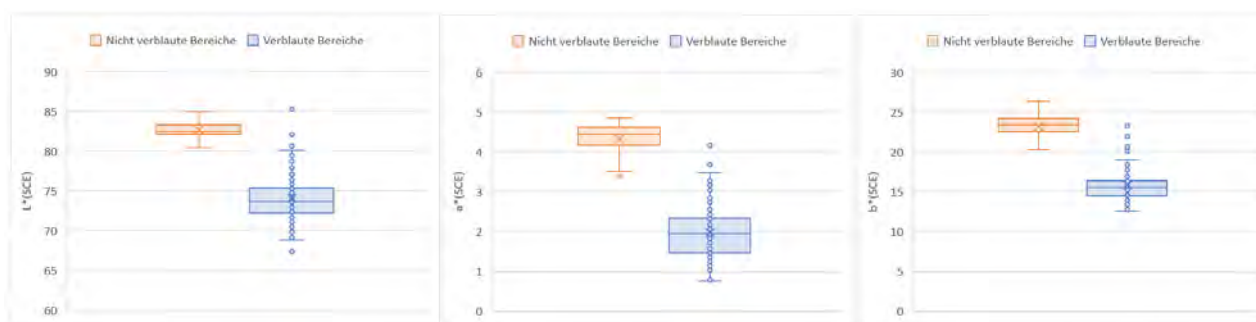


Abbildung 39 Helligkeit L^* und Farbachsen a^* und b^* für unverblaute und verblaute Bereiche der Fichte

6.2.3 Biegefestigkeit

Vor der Prüfung wurden Dichte und Jahrringbreiten der Proben bestimmt.
 Entsprechend der DIN 52186 wurde die Biegefestigkeit mittels 3-P-Biegung gemessen.

ZwickRoell Z100, Kraftmessdose 100 kN, Stützweite 300 mm, Prüfgeschwindigkeit 6 mm/min, Vorkraft 5 N

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)
 18 Gruppe 1 (A Charge III)
 18 Gruppe 2 (B Charge III)
 50 Gruppe 3 (B Charge II)
 28 Gruppe 4 (C Charge I)

Abmessung: L 360 mm x b 20 mm x h 20 mm
 Klima: 20°C / 65 % RH



Abbildung 40 Versuchsaufbau Biegefestigkeit

Die durchschnittliche Rohdichte der Proben war geringfügig verschieden (Abbildung 41). So zeigten die Proben der Gruppen 3 und 4 eine durchschnittlich 5 % bzw. 6 % geringere Dichte als die Referenz-Proben. Weitere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 6.2.1.

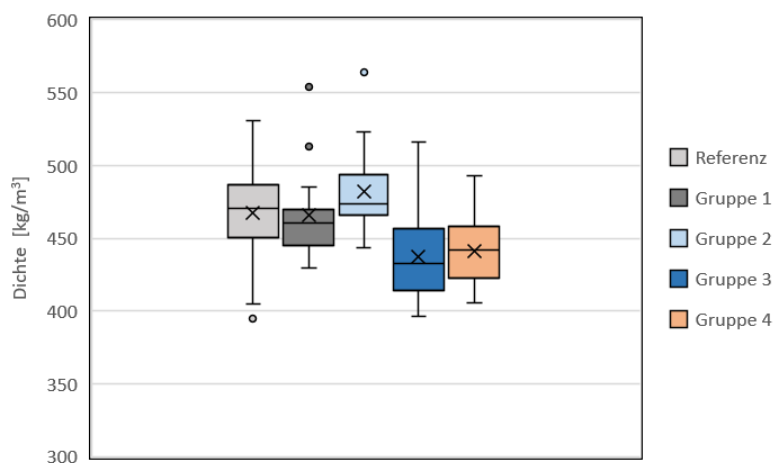


Abbildung 41 Dichte der Biegeproben bei einer Holzfeuchte von u=12%

In den Biegeversuchen zeigten alle Proben Gruppen vergleichbare E-Module MOE.
 Leichte Unterschiede zeigten sich beim Bruchmodul MOR. Der MOR Mittelwert der Proben aus Gruppe 4, welche teilweise auch Rotstreifigkeit aufwiesen, ist mit 10 % deutlich geringer als der mittlere MOR der Referenz-Proben und im t-Test (0.05) signifikant unterschiedlich zu den Referenz-Proben (Tabelle 6 und Abbildung 42).

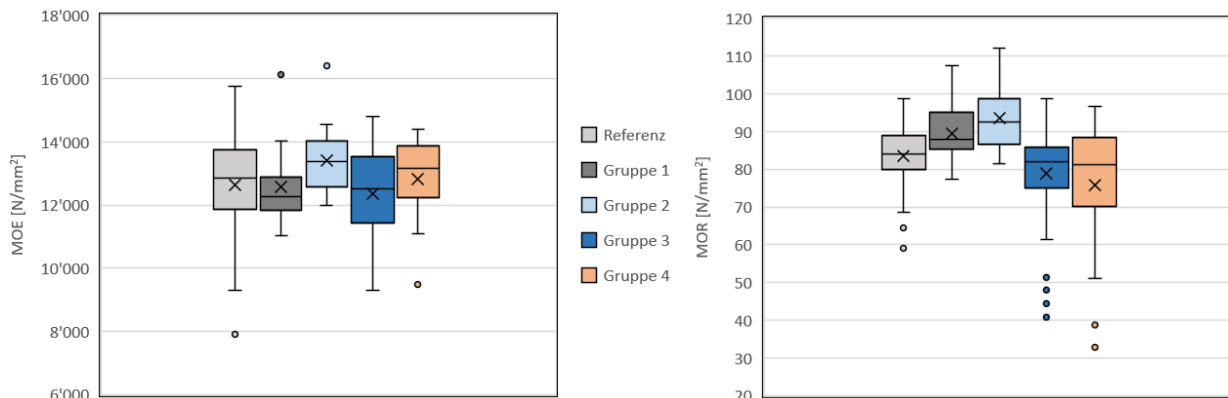


Abbildung 42 Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) 3-P-Biegung

Die Proben der Gruppen 3 und 4 zeigen deutlich mehr Einzelmesswerte mit sehr geringen MOR Werten im Vergleich zu den anderen Proben Gruppen.

Tabelle 6 Mittelwerte Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) 3P-Biegung

	MOR	MOE
Referenz	$84 \pm 8.4 \text{ N/mm}^2 \text{ (n=50)}$	$12.6 \pm 1.62 \text{ kN/mm}^2 \text{ (n=50)}$
Gruppe 1	$89 \pm 7.1 \text{ N/mm}^2 \text{ (n=18)}$	$12.6 \pm 1.15 \text{ kN/mm}^2 \text{ (n=18)}$
Gruppe 2	$93 \pm 8.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (n=18)}$	$13.4 \pm 1.10 \text{ kN/mm}^2 \text{ (n=18)}$
Gruppe 3	$79 \pm 12.8 \text{ N/mm}^2 \text{ (n=50)}$	$12.3 \pm 1.50 \text{ kN/mm}^2 \text{ (n=50)}$
Gruppe 4	$76 \pm 15.6 \text{ N/mm}^2 \text{ (n=28)}$	$12.8 \pm 1.30 \text{ kN/mm}^2 \text{ (n=28)}$

Diese geringere Biegefestigkeit der Proben aus Gruppe 4 kann zum einen mit tendenziell etwas breiteren Jahrringen erklärt werden (Denzler 2007). Vergleicht man nur die Proben mit Jahrringbreiten < 5 mm miteinander, ist der MOR dieser Proben im Durchschnitt um 4 % reduziert. (Glos and Gamm 1987) zeigten bereits, dass weitgehend astfreies Fichtenschnittholz mit Rotstreifigkeit eine um über 15 % verminderte Biegefestigkeit aufwies.

Eine genauere Betrachtung der Messergebnisse zeigte, dass alle Referenz-Proben sowie die Proben der Gruppen 1 und 2, wie in Abbildung 43 links dargestellt, ein zähes Bruchverhalten mit faserigen Bruchflächen aufweisen. 18 % der Proben Gruppe 3 und 43 % der Proben aus Gruppe 4 zeigten dagegen ein eher sprödes Bruchverhalten (Abbildung 43 rechts) mit niedrigeren Standardkräften, geringerer Dehnung und stumpfen Bruchflächen.

Die Jahrringbreite ist kein Indikator für ein sprödes Bruchverhalten und scheidet somit als Erklärung aus. **Sowohl die Proben aus Gruppe 4, als auch in einem etwas geringeren Umfang die Proben der Gruppe 3, zeigen teilweise ein typisches Bruchverhalten, wie es von mit holzabbauenden Pilzen befallenem Holz bekannt ist.** Man muss davon ausgehen, dass es an einem Teil der untersuchten Proben bereits zu einer Strukturveränderung des Holzes gekommen ist, auch wenn die gemessenen Kennwerte MOE und MOR dies noch nicht klar erkennen lassen.

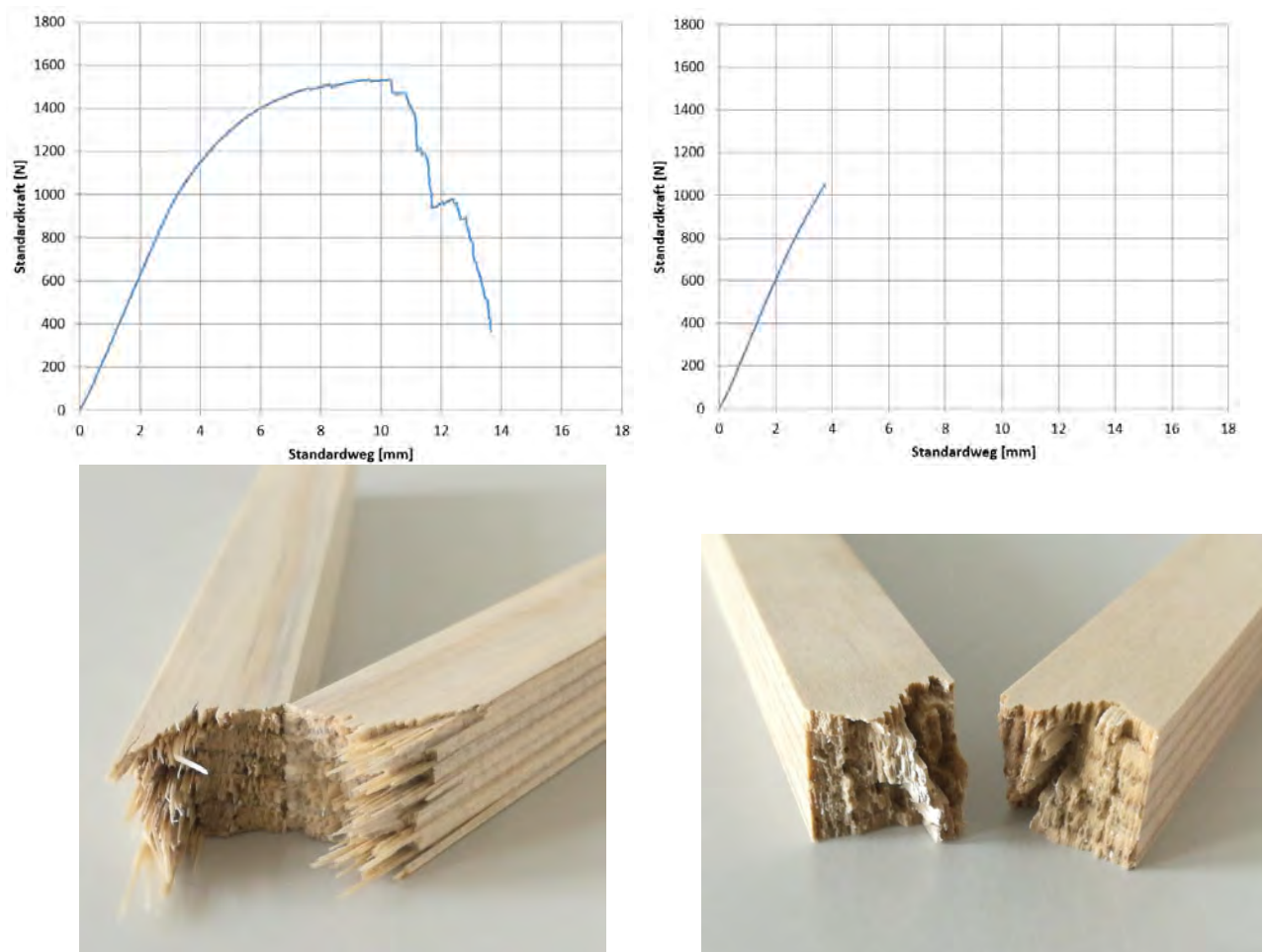


Abbildung 43 Kraft-Weg-Diagramm; links Probe mit zähem Bruchverhalten (faserig); rechts Probe mit sprödem Bruchverhalten (stumpf)

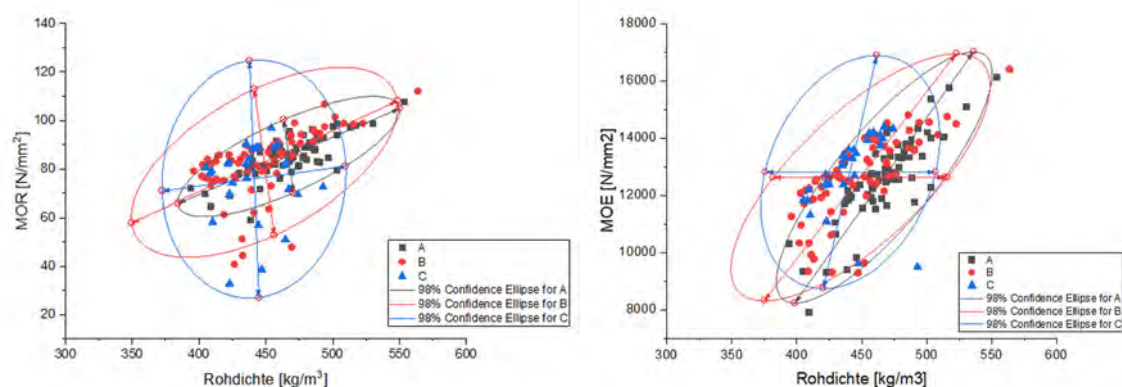


Abbildung 44 2D-Konfidenzellipsen für MOR und MOE in Abhängigkeit der Dichte der Biegeproben (A: Referenz + Gruppe 1; B: Gruppe 2 und 3; C: Gruppe 4)

Form und Ausrichtung der Konfidenzellipsen (Abbildung 44) zeigt eine klare positive Korrelation von und MOR bzw. MOE und der Rohdichte für die Probengruppen. Lediglich die Messdaten der Proben der Gruppe 4 zeigen diese klare Korrelation, vor allem beim Bruchmodul MOR, nicht mehr. Auch diese Auswertung der Messdaten stützt die Vermutung, dass es zumindest bei den teilweise rotstreifigen Proben der Gruppe 4 zu einem Strukturabbau gekommen ist.

6.2.4 Schlagbiegefestigkeit

Vor der Prüfung wurden Dichte und Jahrringbreiten der Proben gemessen. Entsprechend der DIN 52189 wurde die Bruchschlagarbeit bestimmt.

Wolpert Pendelschlagwerk, 150 J Pendel, Auflage/Stützweite 240 mm

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)
18 Gruppe 1 (A Charge III)
18 Gruppe 2 (B Charge III)
50 Gruppe 3 (B Charge II)
28 Gruppe 4 (C Charge I)

Abmessung: L 300 mm x b 20 mm x h 20 mm
Klima: 20°C / 65 % RH



Abbildung 45 Versuchsaufbau Bruchschlagarbeit

Die durchschnittliche Rohdichte der Proben war geringfügig verschieden (Abbildung 46). So zeigten die Proben der Gruppen 3 und 4 eine durchschnittlich 4% resp. 7 % geringere Dichte als die Referenz-Proben. Weitere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 6.2.1.

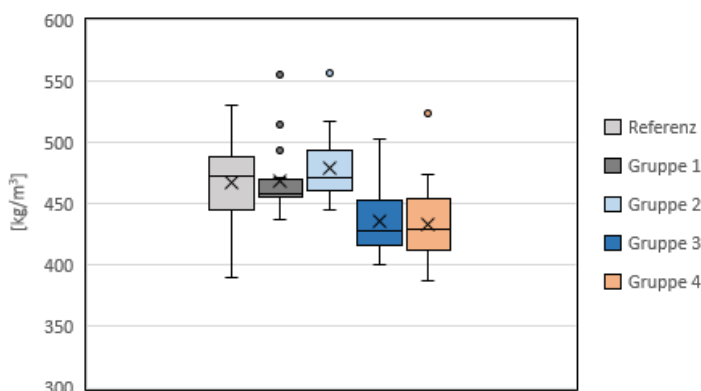


Abbildung 46 Dichte der Schlagbiegeproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$

Bei den Versuchen konnte beobachtet werden, dass diverse Probestäbe nicht vollständig brachen. Dies trat vor allem bei den eher zähen Proben auf (Referenz und Gruppe 1 und 2), aber auch ein Teil der Proben aus Gruppe 3 und 4 war betroffen. An nicht vollständig gebrochenen Stäben kann die durch Reibung an den Auflagern verbrauchte Energie die gemessenen Werte der Bruchschlagarbeit verfälschen (Ghelmeziu 1938). Die so ermittelten Kennwerte sind zu hoch und laut (Burmester 1970) kann dieser Fehler erheblich sein. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse einmal für alle Proben und zusätzlich nur für die vollständig gebrochenen Proben dargestellt.

Die Bruchschlagarbeit der Referenz-Proben sowie die Proben der Gruppen 1 und 2 ist signifikant höher als die der Gruppen 3 und 4 (Abbildung 47). Der Mittelwert aller Proben aus Gruppe 3 ist um 33 % und der aller Proben aus Gruppe 4 um 30 % geringer als der Mittelwert der Referenz-Proben. Betrachtet man nur die vollständig gebrochenen Stäbe der drei Testgruppen, so weisen die Proben der Gruppe 3 um 30 % und die Gruppe 4 um 35 % geringere Mittelwerte im Vergleich zu den Referenz-Proben auf (Tabelle 7).

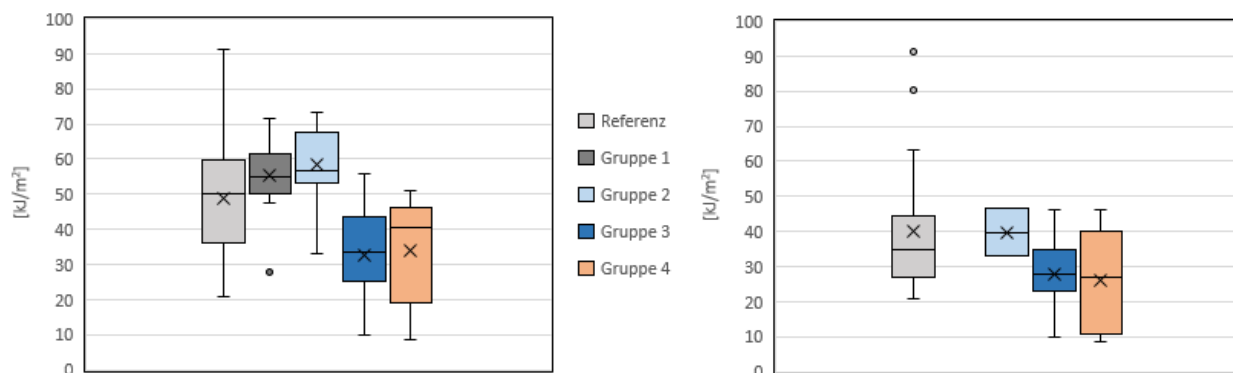


Abbildung 47 Bruchschlagarbeit w ; links: alle Proben; rechts: nur vollständig gebrochene Proben

Tabelle 7 Mittelwerte der Bruchschlagarbeit w

	w (alle Proben)	w (vollständig gebrochene Proben)
Referenz	$48.9 \pm 14.9 \text{ kJ/m}^2$ ($n=50$)	$40.2 \pm 18.7 \text{ kJ/m}^2$ ($n=20$)
Gruppe 1	$55.0 \pm 9.8 \text{ kJ/m}^2$ ($n=18$)	n.m. ($n=1$)
Gruppe 2	$58.5 \pm 10.6 \text{ kJ/m}^2$ ($n=18$)	$39.7 \pm 9.5 \text{ kJ/m}^2$ ($n=2$)
Gruppe 3	$32.5 \pm 11.0 \text{ kJ/m}^2$ ($n=50$)	$27.8 \pm 9.0 \text{ kJ/m}^2$ ($n=36$)
Gruppe 4	$34.1 \pm 14.9 \text{ kJ/m}^2$ ($n=28$)	$26.1 \pm 13.8 \text{ kJ/m}^2$ ($n=17$)

Diese signifikanten Unterschiede können, wie schon im Kap. 0 beschrieben, nicht über die Jahrringbreite oder die Dichte der Proben erklärt werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass ein Strukturabbau durch holzzerstörende Pilze am stärksten in den Kennwerten der Bruchschlagarbeit (und der Zugfestigkeit) sichtbar

wird (Glos and Gamm 1987). Auf bereits beginnenden Strukturabbau weisen auch die Bruchbilder der Proben hin. Über 40 % der gesamten Proben der Gruppen 3 und 4 sind stumpf gebrochen, wogegen alle anderen Proben faserige Bruchbilder zeigten (Beispiele siehe Abbildung 48).

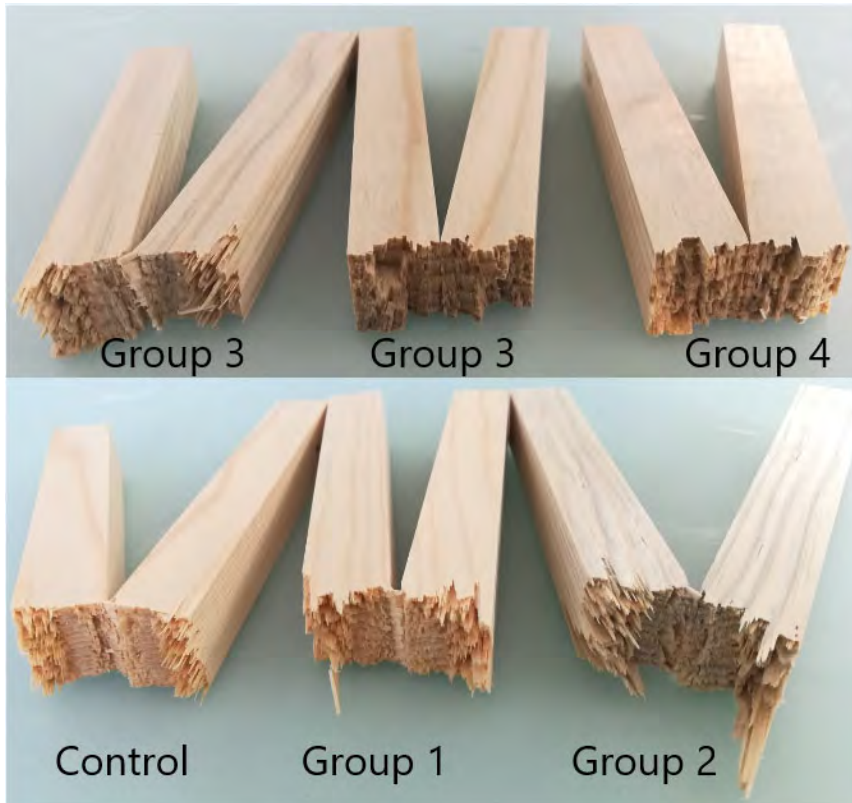


Abbildung 48 Beispiele von faserigen (zähen) und stumpfen (spröden) Brüchen

Es konnte festgestellt werden, **dass Käferholz, welches länger im Bestand verbleibt und/oder länger im Wald oder im Sägewerk gelagert wird (Proben Gruppe 3 und 4), bereits deutliche Festigkeitsverluste von durchschnittlich 35 % im Schlagbiegeversuch aufweisen kann.** Mehr als die Hälfte der verblauten Proben aus Charge II zeigte dabei einen stumpfen Bruch.

Die Käferholz-Proben ohne Bläue (Gruppe 1) sowie mit beginnender Bläue aus Charge III (Gruppe 2) zeigten dagegen keine reduzierte Bruchschlagarbeit im Vergleich zu den Referenz-Proben.

Die Proben der Gruppe 4 mit fortgeschrittenem Pilzbefall zeigten keine positiv lineare Korrelation zwischen Rohdichte und Bruchschlagarbeit (Abbildung 49), wie man sie bei den anderen Proben findet.

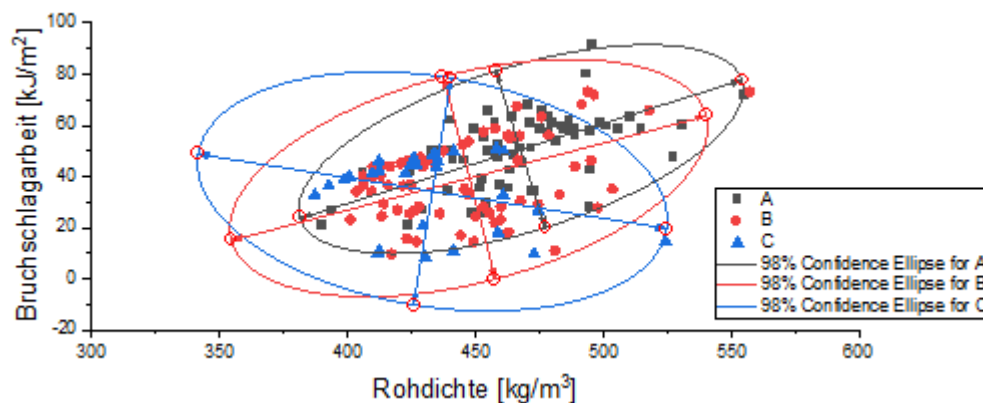


Abbildung 49 2D-Konfidenzellipsen für die Bruchschlagarbeit in Abhängigkeit der Dichte (alle Proben)
 (A: Referenz + Gruppe 1; B: Gruppe 2 und 3; C: Gruppe 4)

6.2.5 Druckfestigkeit

Vor der Prüfung wurden Dichte und Jahrringbreiten der Proben bestimmt.
 Entsprechend der DIN 52185 wurde die Druckfestigkeit parallel zur Faser gemessen.

ZwickRoell Z100, Kraftmessdose 100 kN, Prüfgeschwindigkeit 0.6 mm/min, Vorkraft 50 N

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)
 50 Gruppe 3 (B Charge II)
 28 Gruppe 4 (C Charge I)

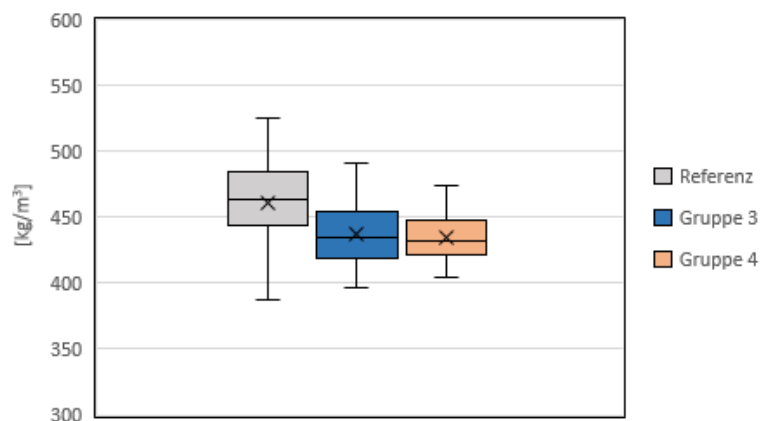
Abmessung: L 40 mm x b 20 mm x h 20 mm

Klima: 20°C / 65 % RH



Abbildung 50 Versuchsaufbau Druckfestigkeit

Die durchschnittliche Rohdichte der Proben war geringfügig verschieden (Abbildung 51). So zeigten die Proben der Gruppen 3 und 4 eine durchschnittlich 5 % bzw. 6 % geringere Dichte als die Referenz-Proben. Weitere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 6.2.1.

Abbildung 51 Dichte der Druckproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$

In den Ergebnissen der Druckversuche spiegeln sich die Unterschiede der Rohdichte wieder (Abbildung 52). Die Proben der Gruppe 3 und 4 zeigten einen durchschnittlich um 3 % bzw. 5 % geringeren Bruchmodul als auch einen um 3 % resp. 2 % geringeren E-Modul.

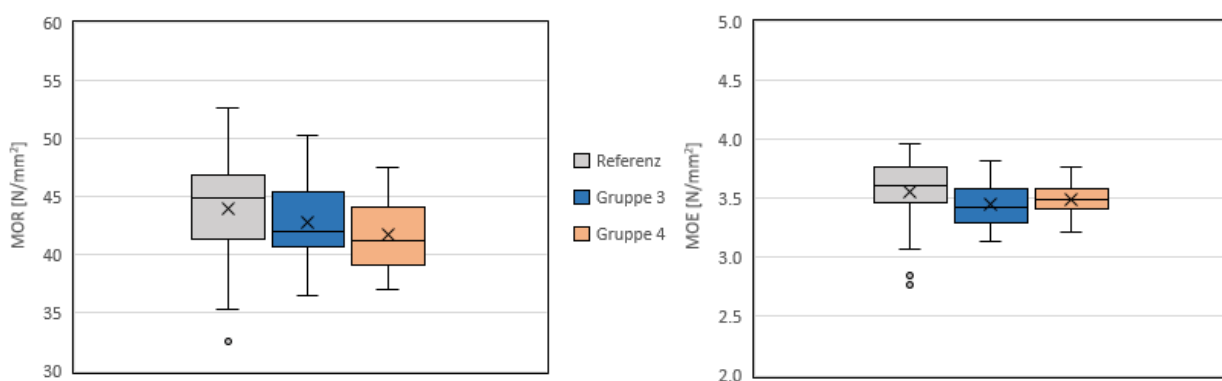


Abbildung 52 Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) Druckversuch

Tabelle 8 Mittelwerte Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) Druckversuch

	MOR	MOE
A-Proben	$44 \pm 4.7 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)	$3.6 \pm 0.28 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)
B-Proben	$43 \pm 3.4 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)	$3.4 \pm 0.17 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)
C-Proben	$42 \pm 3.1 \text{ N/mm}^2$ ($n=28$)	$3.5 \pm 0.14 \text{ N/mm}^2$ ($n=28$)

Form und Ausrichtung der Konfidenzellipsen in Abbildung 53 zeigen eine positive Korrelation von MOR bzw. MOE und der Rohdichte für alle drei Proben-Gruppen.

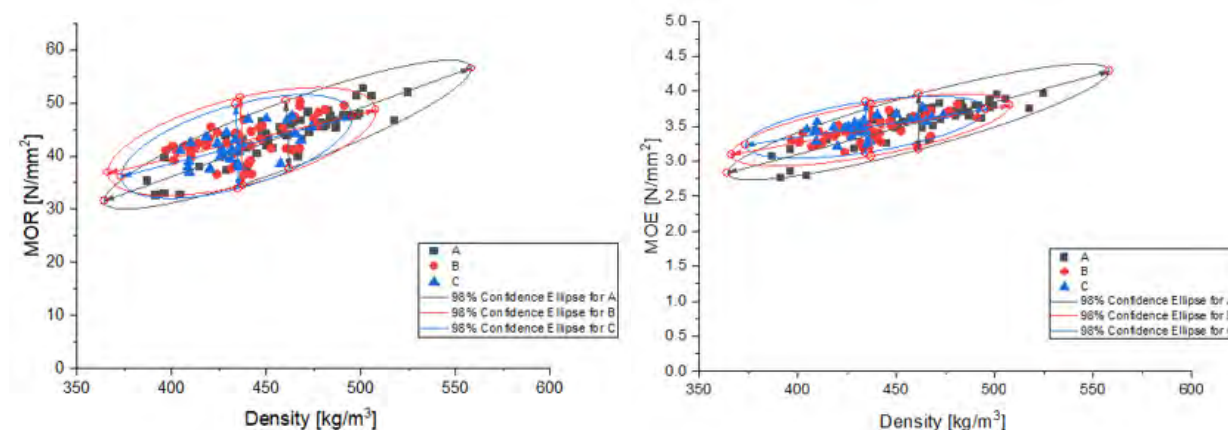


Abbildung 53 2D-Konfidenzellipsen für MOR und MOE in Abhängigkeit der Dichte der Druckproben (A: Referenz; B: Gruppe 3; C: Gruppe 4)

Das Verhalten der getesteten Proben im Druckversuch kann als vergleichbar bezeichnet werden. **Es konnte am Käferholz keine Reduktion der Druckfestigkeit festgestellt werden.**

6.2.6 Scherfestigkeit

Vor der Prüfung wurden Dichte und Jahrringbreiten der Proben bestimmt.

Entsprechend der DIN 52187 wurde die Scherfestigkeit in Faserrichtung longitudinal-radial und longitudinal-tangential bestimmt.

ZwickRoell Z100 mit Kraftmessdose 100 kN, Vorkraft 100 N,

Prüfgeschwindigkeit long.-tangential 1.2 mm/min

long.-radial 2.8 mm/min (Referenz + Gruppe 3), 2.5 mm/min (Gruppe 4)

Probenanzahl: jeweils 50 Referenz (A Charge II)

jeweils 50 Gruppe 3 (B Charge II)

jeweils 28 Gruppe 4 (C Charge I)

Abmessung: L 45 mm x b 50 mm x h 50 mm

Klima: 20°C / 65 % RH

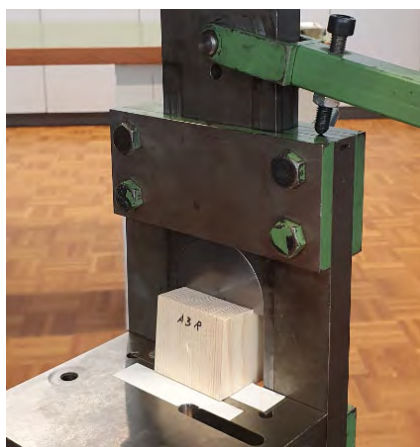


Abbildung 54 Versuchsaufbau Scherfestigkeit

Die durchschnittliche Rohdichte der Proben war geringfügig verschieden (Abbildung 55). So zeigten die Proben der Gruppen 3 und 4 eine durchschnittlich 5 % bzw. 8 % geringere Dichte als die Referenz-Proben. Weitere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 6.2.1.

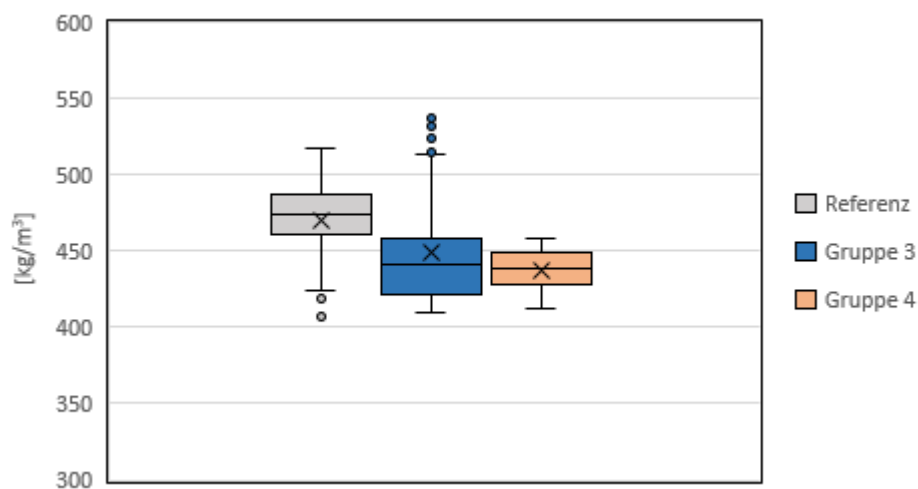
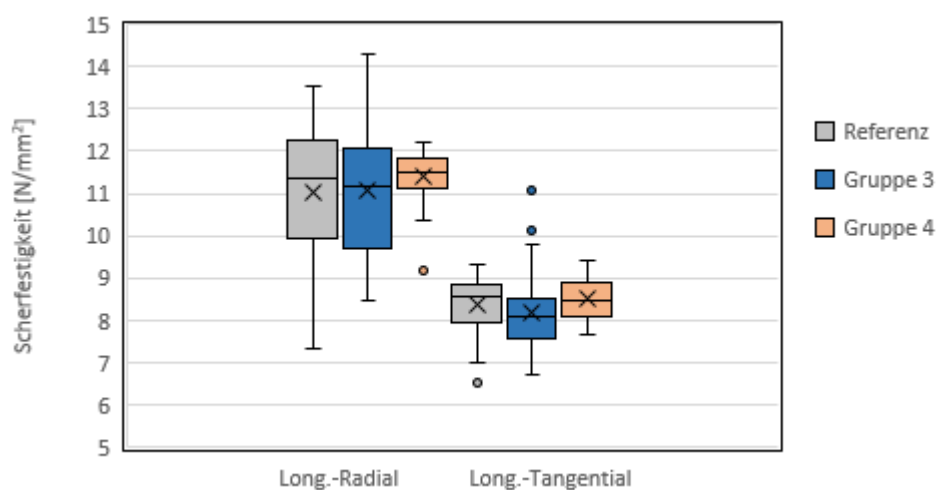
Abbildung 55 Dichte der Scherproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$ 

Abbildung 56 Scherfestigkeit in longitudinal-radialer und longitudinal-tangentialer Richtung

Tabelle 9 Mittelwerte Scherfestigkeit in radialer (τ_R) und tangentialer Richtung (τ_T)

	τ_R	τ_T
Referenz	$11.0 \pm 1.6 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)	$8.4 \pm 0.65 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)
Gruppe 3	$11.1 \pm 1.5 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)	$8.2 \pm 0.84 \text{ N/mm}^2$ ($n=50$)
Gruppe 4	$11.4 \pm 0.6 \text{ N/mm}^2$ ($n=28$)	$8.5 \pm 0.51 \text{ N/mm}^2$ ($n=28$)

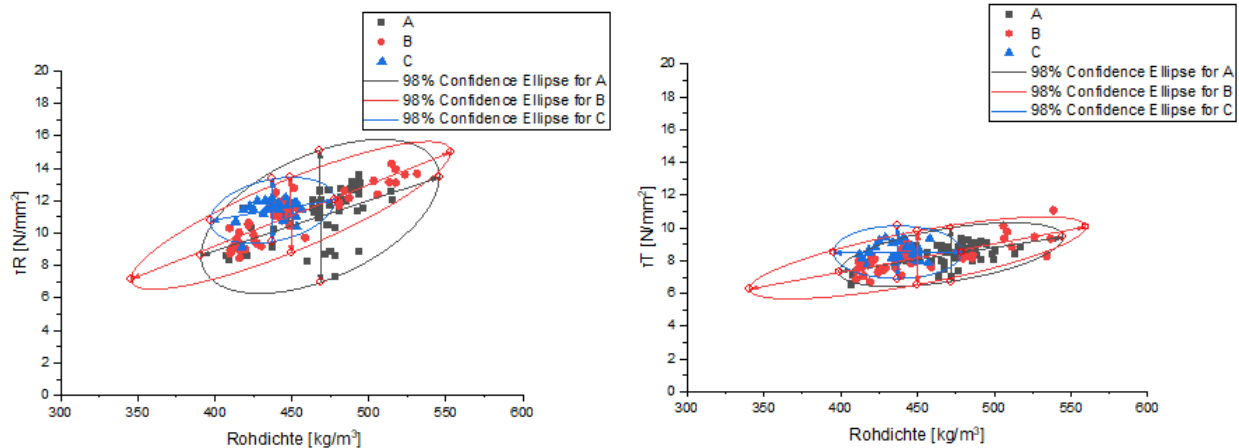


Abbildung 57 2D-Konfidenzellipsen für radiale und tangentiale Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Dichte (A: Referenz; B: Gruppe 3; C: Gruppe 4)

Form und Ausrichtung der Konfidenzellipsen in Abbildung 57 zeigten eine positive Korrelation der long.-radialen Scherfestigkeit und der Rohdichte für alle drei untersuchten Proben-Gruppen. Die Referenz-Proben als auch die Proben der Gruppe 3 zeigten auch in tangentialer Richtung eine positive Korrelation der Scherfestigkeit und der Dichte, welche jedoch geringer ist als bei den gemessenen radialen Scherfestigkeiten. Bei den Proben der Gruppe 4 dagegen konnte keine klare Abhängigkeit der tangentialen Scherfestigkeit von der Dichte festgestellt werden, was jedoch auch der geringeren Varianz der Probendichte geschuldet sein könnte.

Die Scherfestigkeiten der A-, B- und C-Proben können als vergleichbar bezeichnet werden. **Es konnte am Käferholz keine Reduktion der Scherfestigkeiten festgestellt werden.**

6.2.7 Härte nach Brinell

In Anlehnung an DIN EN 1534 wurde die Brinellhärte jeweils an zwei Radial- und zwei Tangentialflächen der Probekörper bestimmt. Die ausgewiesene Härte nach Brinell HB wurde basierend auf der maximalen Kraft sowie dem Eindruck nach der Entlastung (nach der elastischen Rückverformung) berechnet. Ebenfalls wurde anhand der Eindringtiefen und der elastischen Rückverformung die Oberflächenelastizität SE (Surface Elasticity) bestimmt.

ZwickRoell Z100 mit Härtemesskopf 2.5 kN (WN256112), Vorkraft 1 N

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)

18 Gruppe 1 (A Charge III)

18 Gruppe 2 (B Charge III)

50 Gruppe 3 (B Charge II)

28 Gruppe 4 (C Charge I)

Abmessung: L 50 mm x b 50 mm x h 50 mm

Klima: 20°C / 65 % RH



Abbildung 58 Versuchsaufbau Härte nach Brinell

Die durchschnittliche Rohdichte der Proben war geringfügig verschieden (Abbildung 59). So zeigten die Proben der Gruppen 3 und 4 eine durchschnittlich 6 % bzw. 7 % geringere Dichte als die Referenz-Proben. Weitere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 6.2.1.

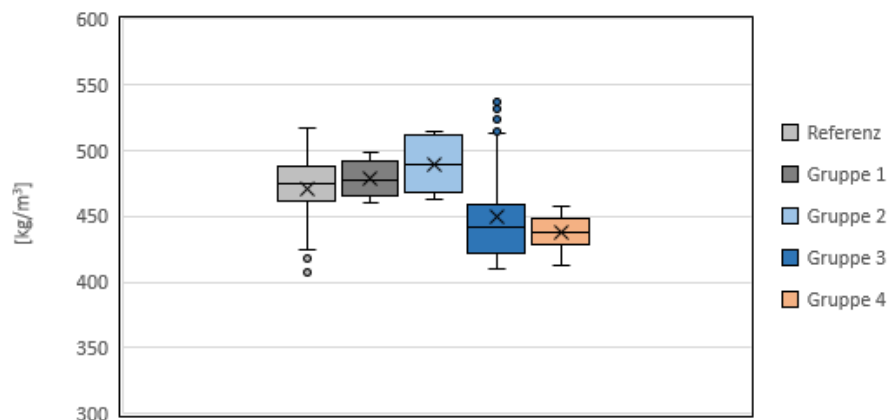


Abbildung 59 Dichte der Proben Härteprüfung bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$

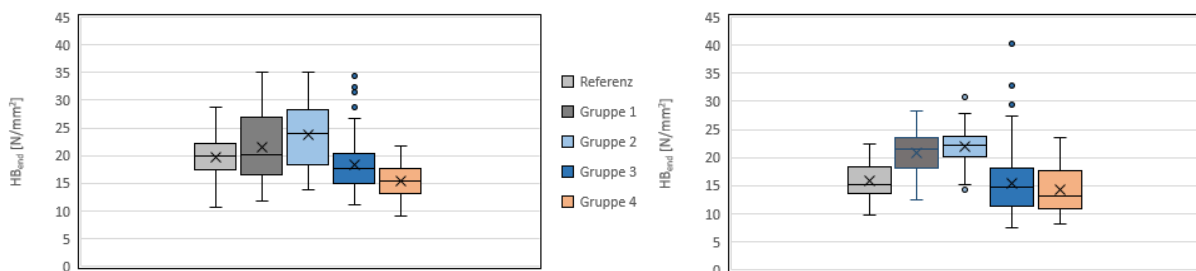


Abbildung 60 Brinell Härte HB in radialer (links) und tangentialer (rechts) Richtung

Die Werte der Härte Messungen an einer Holzoberfläche streuen in der Regel stark. Zwei wesentliche Einflussfaktoren sind hierbei die Dichte und ob die Einzelmessungen auf Früh- oder Spätholz erfolgt sind.

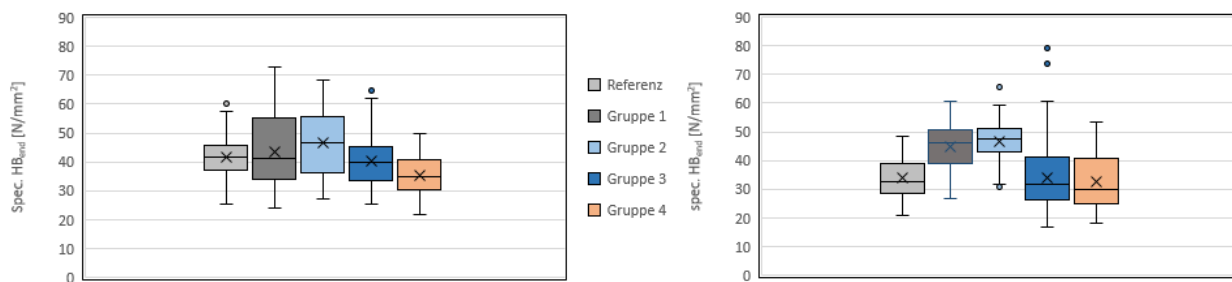


Abbildung 61 Spezifische Brinell Härte sHB in radialer (links) und tangentialer (rechts) Richtung

Bei Einbezug der Dichte der Holzproben kann die spezifische Brinell Härte der Proben als vergleichbar bezeichnet werden, wobei die Proben aus Gruppe 1 und 2 sogar etwas besser performten als die Referenzproben.

Tabelle 10 Mittelwerte der Brinell Härte HB, der spezifischen Brinell Härte sHB sowie der Oberflächenelastizität SE jeweils radial und tangential

	HB _R N/mm ²	HB _T N/mm ²	SE _R %	SE _T %	sHB _R N/mm ²	sHB _T N/mm ²
Referenz	19.6 ±3.7	15.9 ±3.1	38.4 ±4.8	38.7 ±7.4	41.8 ±6.8	33.8 ±6.2
Gruppe 1	21.4 ±6.0	20.9 ±3.7	34.6 ±6.2	38.5 ±8.3	43.4 ±12.4	44.3 ±9.2
Gruppe 2	23.8 ±5.7	21.9 ±3.0	37.1 ±6.4	39.4 ±4.2	46.5 ±11.1	46.8 ±6.5
Gruppe 3	18.3 ±4.9	15.3 ±5.4	33.9 ±5.7	30.5 ±9.0	40.4 ±8.5	34.0 ±11.1
Gruppe 4	15.4 ±3.0	14.2 ±4.2	31.0 ±5.1	29.0 ±8.9	35.2 ±6.6	32.5 ±9.3

Unterschiede der Proben zeigten sich am deutlichen im elastischen Rückverformungsverhalten. Die elastische Rückverformung SE der verblauten Proben aus Gruppe 3 (B Charge II) ist gegenüber den Referenzproben um 21 % (tangential) und um 12 % (radial) reduziert. Die Proben der Gruppe 4 wiesen die schlechteste elastische Rückverformung auf. Sie war 19 % (radial) bzw. 25 % (tangential) geringer als die der Referenzproben.

Verblautes Käferholz, welches länger im Bestand verbleibt und/oder länger im Wald oder im Sägewerk gelagert wurde, zeigte eine eingeschränkte Oberflächenelastizität. Dies bedeutet, dass sich Druckstellen, welche durch mechanische Belastung (z.B. Hagel) entstehen, schlechter zurückbilden.

Die Referenzproben sowie die Käferholzproben ohne Bläue (Gruppe 1) sowie mit beginnender Bläue (Gruppe 2) zeigten dagegen keine relevanten Unterschiede in der Brinell Härte und in der Oberflächenelastizität.

6.2.8 Quell- und Schwindmass

Entsprechend der DIN 52184 wurde die radialen und tangentialen Quell- und Schwindmasse bestimmt.

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)

50 Gruppe 3 (B Charge II)

28 Gruppe 4 (C Charge I)

Abmessung: L 10 mm x b 20 mm x h 20 mm

Klima: 20°C / 65 % RH

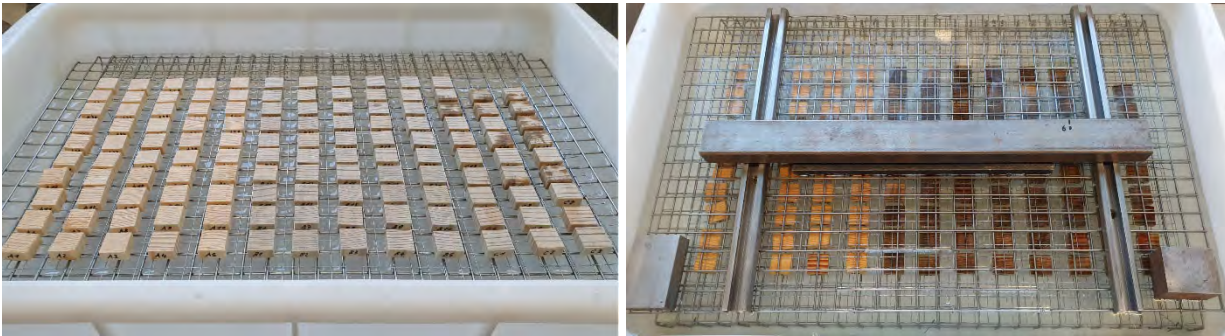


Abbildung 62 Versuchsaufbau Wasserlagerung

Entsprechend der Norm wurden alle Proben bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten und 20°C bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Hier zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede in den sich einstellenden Holzfeuchten (Abbildung 63).

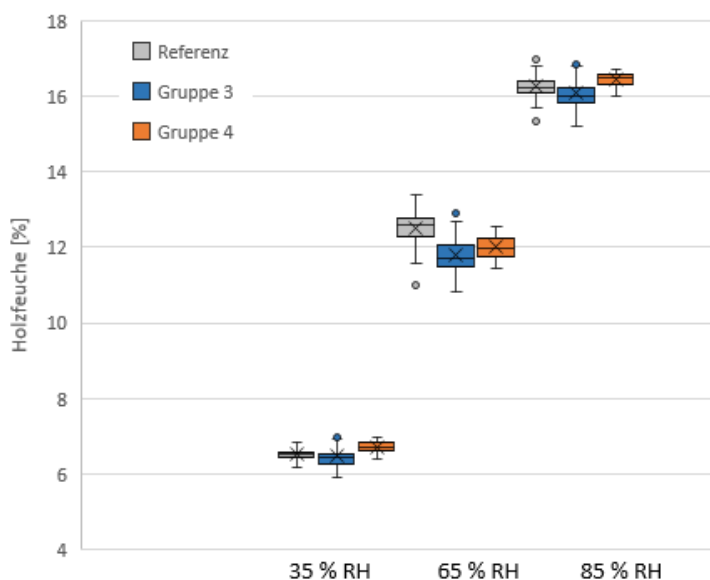


Abbildung 63 Holzfeuchte nach Konditionierung im Normklima bei 20°C und verschiedenen Luftfeuchtigkeiten

Folgende Kennwerte zur Beurteilung der Dimensionsstabilität wurden berechnet:

- Lineares Quellmass α
- Max. lineares Quellmass $\alpha_{\max}$
- Quellungskoeffizient h
- Differentielle Quellung q

Dabei beschreibt das **Lineare Quellmass** die Massänderung des Holzes in einer definierten Hauptrichtung, in unserem Fall in radialer und tangentialer Richtung.

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Die Abmessungen l_0 , l_1 und l_2 beziehen sich auf 0=Darrtrocken, 1= 35% RH und 2= 85% RH.

Das **Max. lineare Quellmass** dagegen umfasst den maximalen Bereich von Darrtrocken (l_0 und l_1) bis hin zum nassen Zustand nach Wasserlagerung (l_2).

Der **Quellungskoeffizient** beschreibt das prozentuale Quellmass des Holzes pro 1% Änderung der rel. Luftfeuchte RH. Er wird im Projekt ebenfalls für die Hauptrichtungen radial und tangential und für den praxisrelevanten Luftfeuchte Bereich von 35% - 85% RH angegeben.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

Die Abmessungen l_0 , l_T und l_F beziehen sich dabei auf 0=Darrtrocken, T= 35 % RH und F= 85 % RH.

φ_F bezeichnet die rel. Luftfeuchte im feuchten Klima (85 % RH) und φ_T die rel. Luftfeuchte im trockenen Klima (35 % RH).

Die **Differentiellen Quellung** bezieht sich, nicht wie der Quellungskoeffizient auf die Luftfeuchte, sondern entsprechend auf die gemessene Holzfeuchte (u_F und u_T) im feuchten und im trockenen Klima.

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

In Tabelle 11 sind die Kennwerte bezüglich Quellverhalten für die drei Proben-Gruppen in radialer und tangentialer Richtung zusammengefasst.

Tabelle 11 Quellverhalten der Proben in radialer und tangentialer Richtung

	Radial			Tangential		
	Referenz	Gruppe 3	Gruppe 4	Referenz	Gruppe 3	Gruppe 4
Lineares Quellmass	1.82	1.41	1.45	3.68	3.43	3.62
Max. lineare Quellmass	4.81	3.74	3.90	10.58	9.90	10.76
Quellungskoeffizient	0.036	0.028	0.029	0.074	0.069	0.072
Differentielle Quellung	0.19	0.15	0.15	0.38	0.36	0.37

Die Mittelwerte der Dimensionsänderung bei 20°C im Bereich bis 85 % relative Luftfeuchtigkeit können für alle drei Proben-Gruppen als vergleichbar bezeichnet werden.

Durch die Wasserlagerung konnten ebenfalls keine praxisrelevanten Unterschiede im Quellverhalten der drei Proben-Gruppen festgestellt werden (Abbildung 64).

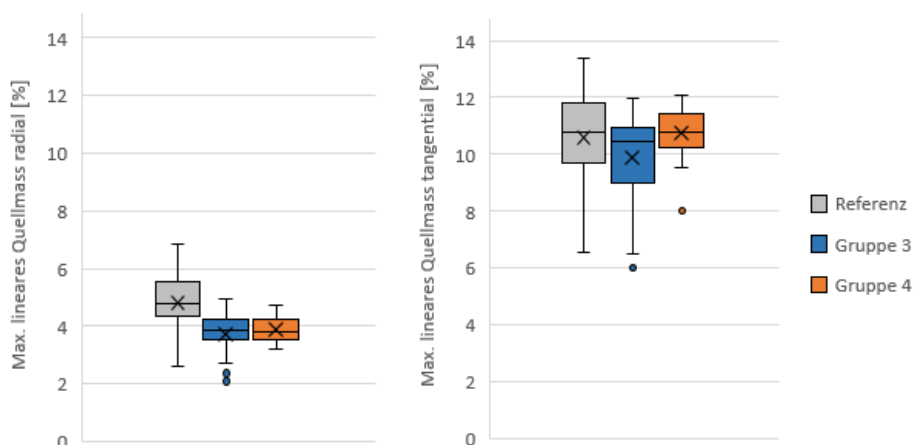


Abbildung 64 Max. lineares Quellmass in radialer und tangentialer Richtung nach Wasserlagerung

Abbildung 65 zeigt eine positive Korrelation von Rohdichte und Max. linearem Quellmass aller Proben. Diese ist in radialer als auch in tangentialer Richtung für alle getesteten Gruppen vergleichbar.

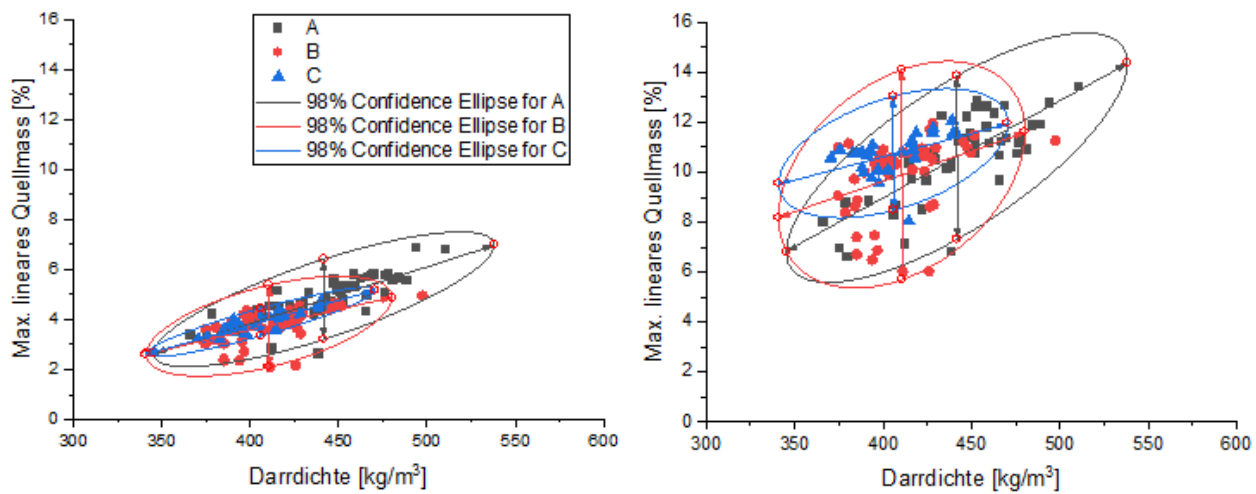


Abbildung 65 Korrelation von Darrdichte und Max. linearem Quellmass (links radial, rechts tangential) (A: Referenz, B: Gruppe 3, C: Gruppe 4)

Trotz einer vergleichbaren Dimensionsänderung nahmen die C-Proben (Gruppe 4) während der Wasserlagerung, prozentual auf das Darrgewicht bezogen, mehr Wasser auf als die Referenz A-Proben (Abbildung 66). Diese Beobachtung deckt sich auch mit den Ergebnissen in Kap. 6.2.10.

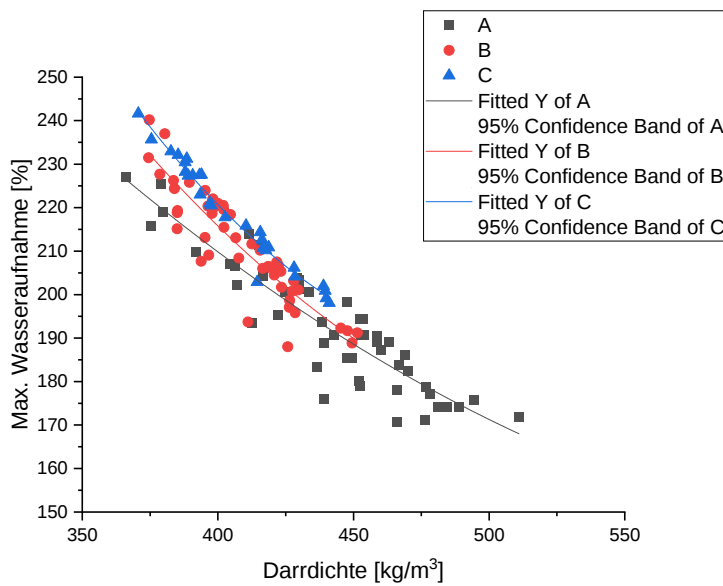


Abbildung 66 Maximale Wasseraufnahme der Proben nach Wasserlagerung

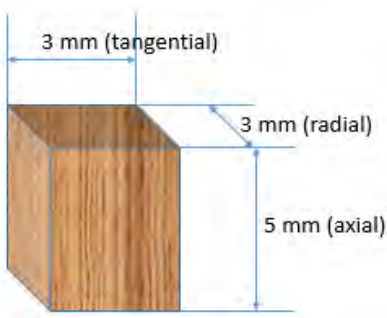
6.2.9 Wasserdampfadsorption und -desorption

Das Wasserdampfaufnahme- und Abgabeverhalten der unbehandelten Holzproben wurde mittels DVS (Dynamic Vapor Sorption) ermittelt. Zum Einsatz kam hierbei ein VTI-SA+ Dampfsorptionsmessgerät der Firma TA Instruments – Waters LLC.



Abbildung 67 VTI-SA+ Dampfsorptionsmessgerät; Probenkammer mit Waagschale und Holzprobe

Für die Messungen wurden jeweils 3 Referenz-Proben und 3 verblaute Proben aus Gruppe 3 verwendet, welche bezüglich der Jahrringstruktur vergleichbar waren.



Probenanzahl: 3 Referenz (A Charge II), 3 Gruppe 3 (B Charge II)

Abmessung: L 5 mm x b 3 mm x h 3 mm (L x T x R)

An den Proben wurde zuerst die Desorption und anschließend die Adsorption gemessen.

Vor Beginn der Messungen wurden die Proben mindestens 14 Tage bei 20°C über Wasser in einem geschlossenen Behälter konditioniert, um eine möglichst gute Feuchtesättigung der Proben zu erreichen. Für die anschließenden DVS Messungen wurden, angelehnt an (Glass, Boardman et al. 2018), folgende Parameter gewählt:

Temperatur	20°C
RH	95 %, 65 %, 35 %, 5 %, 35 %, 65 %, 95 %
Stopp Kriterium	0.001 wt % min ⁻¹ während 60 min → maximal 1000 min pro RH Stufe
Data Logging Interval	1 min oder 0.01 wt %

Das Startgewicht der Proben im gesättigten Zustand betrug zwischen 25 mg bis 40 mg.

Zur Bestimmung des Darrgewichtes wurden nach Beendigung der Messreihen alle Proben im DVS bei 60°C und 0% RH während 1 Stunde getrocknet, bei 25°C und 0 % RH während 30 Minuten konditioniert und anschliessend gewogen. Basierend auf dem ermittelten Darrgewicht wurden die Holzfeuchten berechnet:

$$\text{Holzfeuchte [\%]} = \frac{\text{Holz feucht [g]} - \text{Holz darrtrocken [g]}}{\text{Holz darrtrocken [g]}} \cdot 100 [\%]$$

In Abbildung 68 ist am Beispiel der Referenz-Probe A9 der Verlauf der DVS Messungen dargestellt. Pro RH Stufe wurde jeweils die definierte maximale Messzeit von 1000 min ausgeschöpft, da das gewählte Stopp Kriterium von 0.001 wt % min⁻¹ während 60 min innerhalb der 1000 min nicht erreicht wurde. Die Grafik zeigt jedoch, dass anhand der vorliegenden Daten eine gute Aussage bezüglich des Sorptionsverhaltens vorgenommen werden kann, da der systematische Fehler aller Messungen vergleichbar ist (Mittelwert < 0.5 % Holzfeuchte).

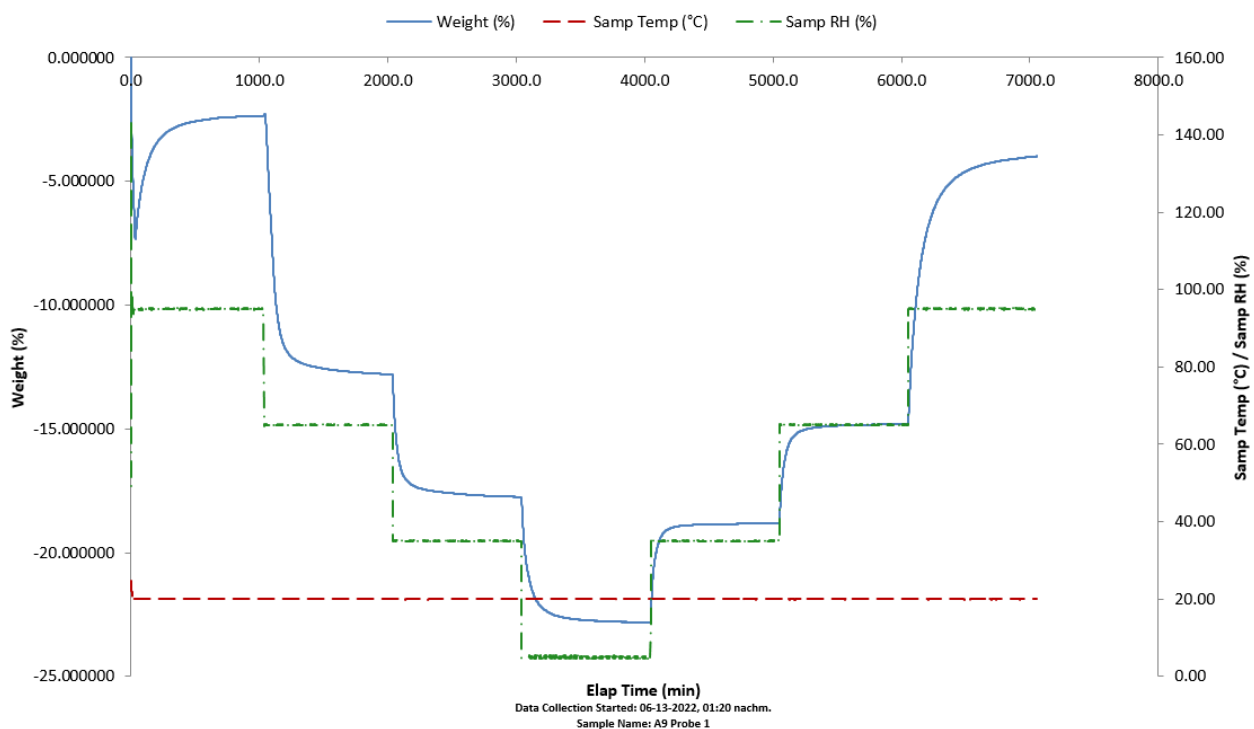


Abbildung 68 Desorption/Adsorption einer Referenz-Probe (A9)

Die Sorptionsisothermen aller Proben sind in Abbildung 69 dargestellt. Im gemessenen hygroskopischen Feuchtebereich (bis 99 % RH) findet die Feuchteänderung des Holzes vornehmlich innerhalb der Zellwände statt. Die Hysterese zwischen Desorptions- und Adsorptionsisotherme ist hauptsächlich durch die Anatomie des Holzes erklärbar (Thybring and Fredriksson 2021).

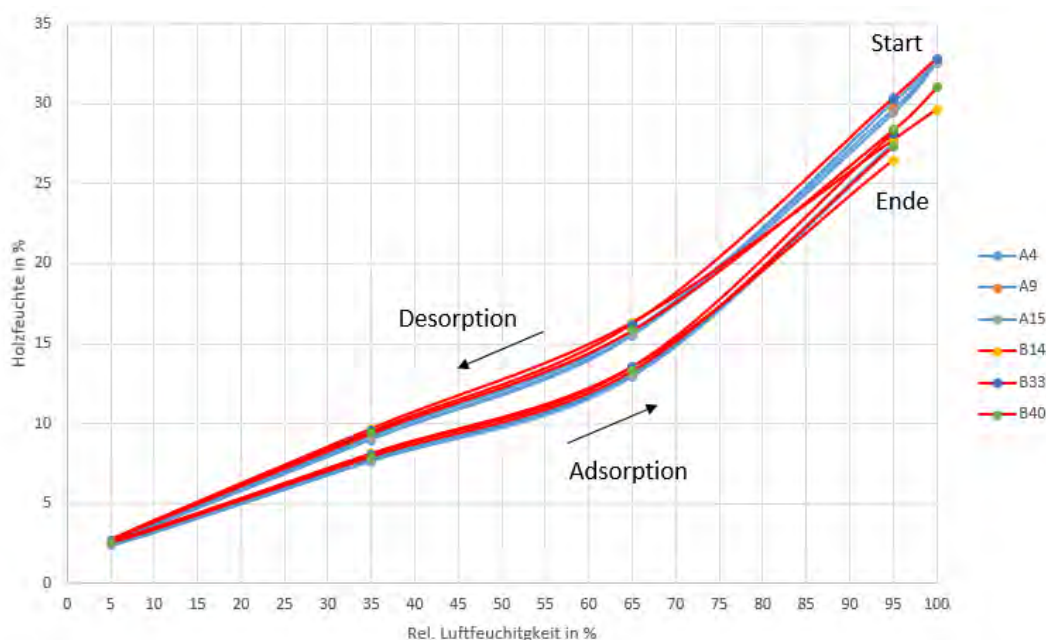


Abbildung 69 Hysterese der Desorption-/Adsorptionsisothermen der A- und B-Proben im hygroskopischen Feuchtebereich

Aufgrund der Inhomogenität des Holzes zeigen sich geringe Unterschiede in den Messdaten der einzelnen Proben. Ein praxisrelevanter Unterschied im Sorptionsverhalten von Referenz-Proben (A) und der verblauten Proben aus Gruppe 3 (B) konnte jedoch nicht festgestellt werden.

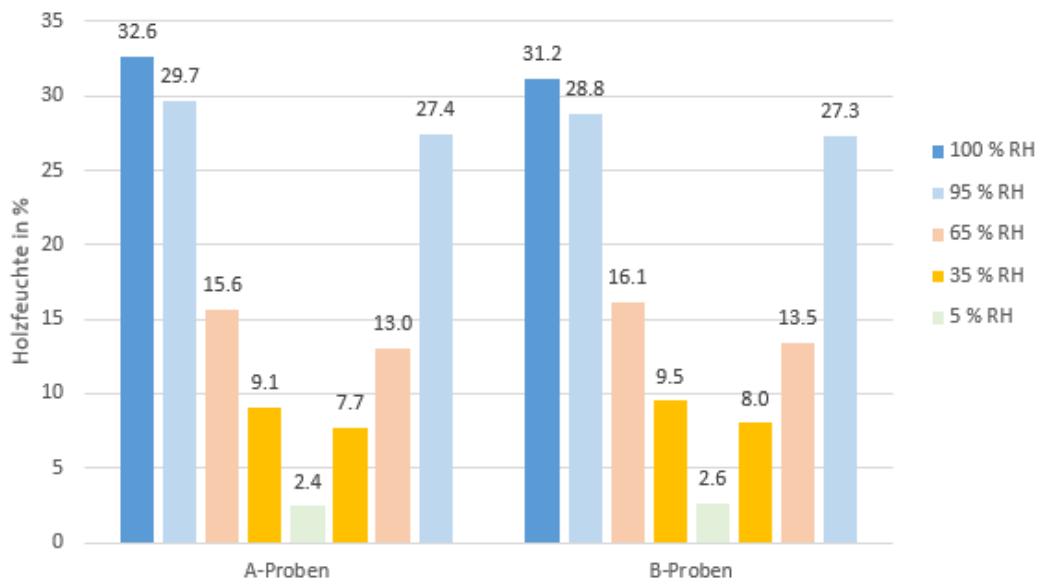


Abbildung 70 Mittlere Holzfeuchten bei 5%, 35%, 65% und 95% RH

Die Ergebnisse zeigen, dass die **Dynamik der Wasseraufnahme und -abgabe innerhalb des hygroskopischen Feuchtebereiches durch eine Besiedlung des Holzes durch Bläuepilze nicht signifikant verändert wird.**

Diese Erkenntnisse decken sich sehr gut mit den Ergebnissen in Kapitel 6.2.8 bezüglich des Quell- und Schwindverhaltens in feuchter bzw. trockener Umgebungsluft.

6.2.10 Flüssigwasseraufnahme und Rücktrocknungsverhalten

Das Flüssigwasseraufnahme- und Abgabeverhalten der unbehandelten Holzproben wurde sowohl kapillar über das Hirnholz (Saugversuch) als auch über die Tangentialflächen (Tauchversuch) ermittelt.

Zur Beurteilung wurden 360 mm lange Referenz-Proben und verblaute Proben der Gruppe 3 (B Charge II) ausgewählt. Diese wurden jeweils in zwei Einzelproben getrennt, welche für die kapillare Wasseraufnahme in axialer Richtung und für den Tauchversuch zur Wasseraufnahme über die Tangentialflächen verwendet wurden. Die so entstandenen Folgeproben erlauben eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Zusätzlich wurden einige gedämpfte Proben getestet, deren Eigenschaften im Kap. 6.3.4 beschrieben werden. Ebenfalls getestet wurden einige hitzebehandelte Proben (Thermo), siehe Kap. 6.3.3.

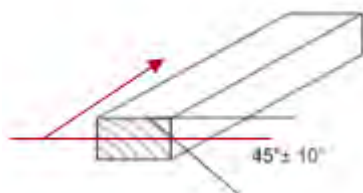
Der Vollständigkeit halber wurde nachträglich noch an einigen unverblauten Käferholzproben (Gruppe 1; A Charge III) die kapillare Wasseraufnahme getestet, die zum Teil technisch und zum Teil luftgetrocknet waren. Hierbei ging es abzuklären, ob noch nicht verblautes Käferholz bereits ein verändertes Saugverhalten aufweist und ob dabei die Art der Trocknung (luft- oder technisch getrocknet) eine wesentliche Rolle spielt.

➤ Kapillaren Wasseraufnahme in axialer Richtung (Saugversuch)

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)
 50 Gruppe 3 (B Charge II)
 3 Proben verblaut, gedämpft (Charge III, siehe Kap. 6.3.4)
 3 Proben Kernholz nicht verblaut, gedämpft (Charge III, siehe Kap. 6.3.4)
 3 Referenz-Proben hitzebehandelte (A Charge II)
 3 Proben Gruppe 3 hitzebehandelte (B Charge II)
 9 Proben Gruppe 1 (A Charge III) technisch getrocknet
 6 Proben Gruppe 1 (A Charge III) luftgetrocknet

Abmessung: L 210 mm x b 50 mm x h 25 mm (A und B Charge II, A Charge III, Kernholz gedämpft)
 L 250 mm x b 50 mm x h 20 mm (Proben gedämpft, Proben hitzebehandelt)

Klima: 20°C / 65 % RH



L 210 mm x b 50 mm x h 25 mm

Abbildung 71 Proben Saugversuch axial

Die 14 Tage im Klima 20°C/ 65%RH auskonditionierten Proben wurden nach dem Wägen in ein Gefäß mit gefärbtem Wasser (0.03 % 'Neolan Blau' von Ciba in H₂O) eingestellt (Abbildung 72). Die Wasserfüllhöhe zu Beginn betrug 10 mm und sank während des Versuchs nur geringfügig ab.

Nach 24 Stunden konnten die Proben für 1 Stunde auf einem Gitter abtropfen und wurden danach nochmals gewogen. Die Proben wurden anschließend 14 Tage im Klima 20°C/ 35 % RH rückgetrocknet. Eine Gewichtskontrolle erfolgte nach 7 und 14 Tagen.

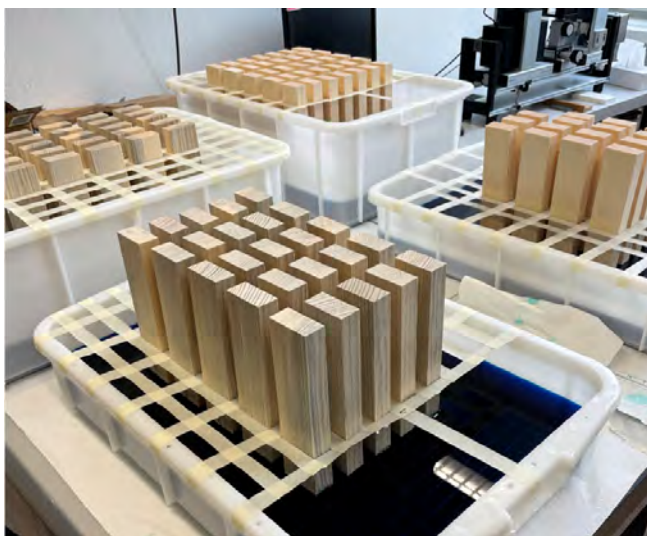


Abbildung 72 Saugversuch zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme in axialer Richtung

Die Proben wurden danach längs aufgetrennt (roter Pfeil in Abbildung 71) und die durch das Wasser eingefärbte Fläche mittels des Bildverarbeitungsprogrammes 'Scientific Color' bestimmt (Beispiel siehe Abbildung 73). Als maximale Fläche wurden 0.021 m^2 definiert ($2 \times$ Probenfläche $50 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$). Der in Tabelle 12 angegebene Wert für die 'Gefärbte Fläche in %' bezieht sich auf diesen Maximalwert. Zusätzlich wurde die maximale Saughöhe bestimmt und angegeben.

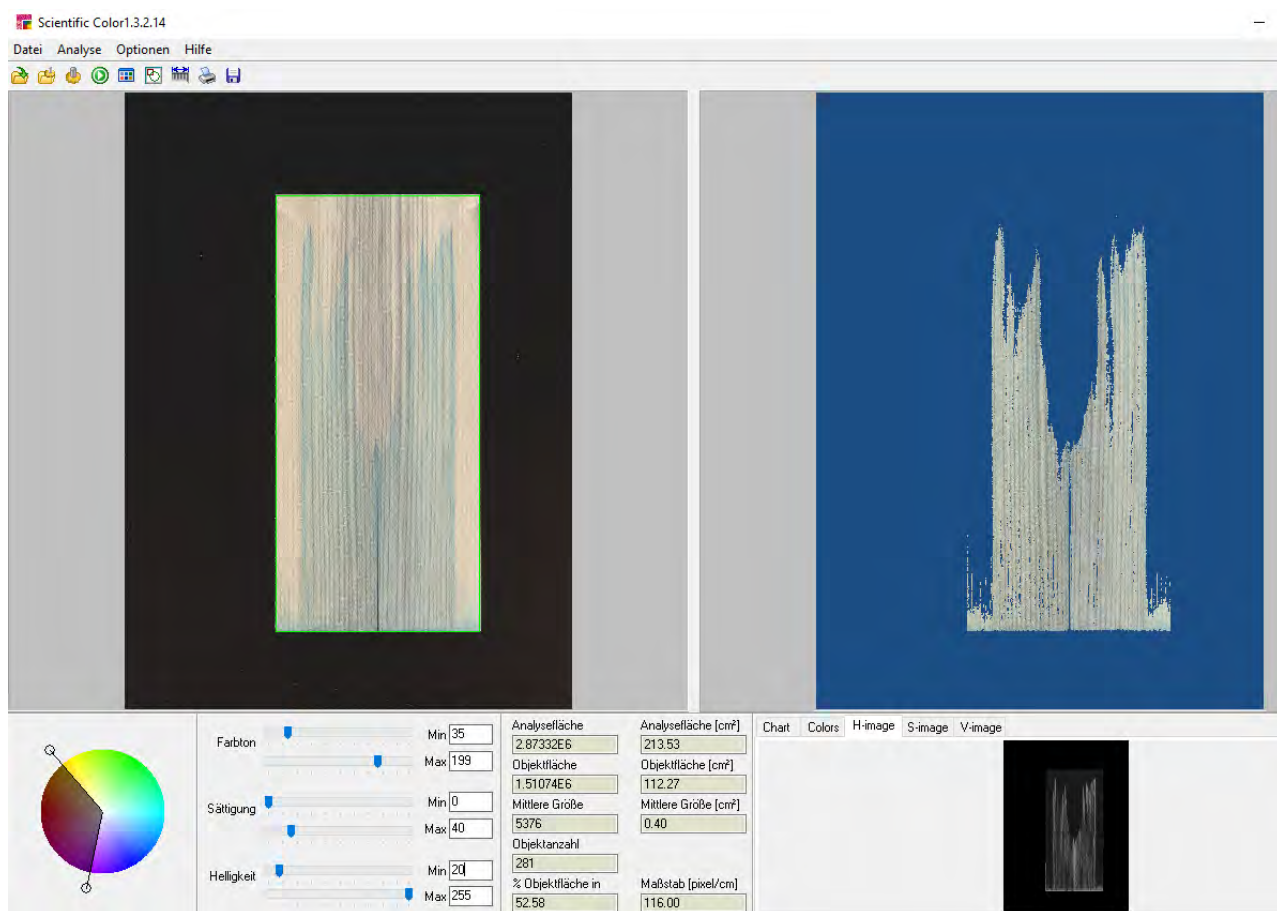


Abbildung 73 Auswertung der gefärbten Fläche mittels der Software 'Scientific Color'; Beispiel

Tabelle 12 Mittelwerte der Messdaten für den 24 h Saugversuch

	Referenz	Gruppe 1 Techn. getrocknet	Gruppe 1 Luftgetrocknet	Gruppe 3	Gruppe 2 Gedämpft	Gruppe 2 Kern gedämpft	Referenz Thermo	Gruppe 3 Thermo
Grundfläche [m ²]	0.0012	0.0010	0.0010	0.0012	0.0010	0.0013	0.0010	0.0010
Dichte [kg/m ³]	462	509	488	455	454	457	445	476
Wasseraufnahme 24 h [kg/m ²]	7.5	10.1	13.8	28.2	78.7	22.3	8.1	11.5
Wasseraufnahme 24 h [%] ¹⁾	7.7	9.5	13.3	30.0	68.4	23.5	7.2	9.9
Wasserabgabe nach 2 Wo im 20°C/35 % RH [%] ¹⁾	10.4	12.1	16.3	32.1	67.9	25.6	7.2	9.9
Max. Steighöhe [mm]	54.3	48.8	67.2	153.8	227.3	112.0	27.7	47.7
Gefärbte Fläche [%] ²⁾	11.4	13.7	21.6	33.4	59.2	19.0	3.1	6.2

¹⁾ Prozentuale Aufnahme bzw. Abgabe bezogen auf das Ausgangsgewicht der Proben

²⁾ Bezogen auf eine einheitliche Gesamtfläche von jeweils 0.021 m² (210 mm x 50 mm; siehe Abbildung 73)

In Tabelle 12 werden die Messergebnisse für die axiale Wasseraufnahme nach 24 Stunden angegeben. In Abbildung 74 wird entsprechend die während 24 Stunden aufgenommene Wassermenge pro m² Hirnholzfläche graphisch dargestellt. Erkennbar ist eine signifikant höhere Wasseraufnahme der verblauten Proben der Gruppe 3 im Vergleich zu den Referenz-Proben. Während die Referenz-Proben im Durchschnitt 7.7% Wasser (bezogen auf das Ausgangsgewicht der Proben) aufnahmen, war es bei den verblauten Proben mit durchschnittlich 30% fast die 4-fache Menge. Die Ergebnisse der Referenz-Proben sind vergleichbar mit den in der Literatur zu findenden Angaben für das kapillare Saugverhalten von Fichten Splintholz über die Hirnholzflächen, wie z.B. 8.8% Wasseraufnahme während 24 h bei (J. Sell 1988).

Die technisch getrockneten Proben aus unverblautem Käferholz (Gruppe 1) zeigten ein vergleichbares Saugverhalten wie die Referenz-Proben. Dagegen zeigten die luftgetrockneten unverblauten Käferholzproben (Gruppe 1) bereits eine erhöhte Wasseraufnahme, die mit durchschnittlich 13.3% fast doppelt so hoch war, wie die der Referenz-Proben. Mit durchschnittlich 13.3% war sie jedoch noch wesentlich geringer als die Wasseraufnahme der entsprechend verblauten Käferholzproben aus Gruppe 3.

Die industriell gedämpften verblauten Proben (Behandlung siehe Kapitel 6.3.4) nahmen mit durchschnittlich 68.4% wesentlich mehr Wasser auf als alle anderen getesteten Varianten. Das Dämpfen der verblauten Fichte führte zwar zu einer gewünschten Farbveränderung, aber gleichzeitig wurde das Holz dadurch wesentlich hydrophiler, was für einige Anwendungen im Außenbereich problematisch sein könnte. Auch zusätz-

liche Messungen mit gedämpftem Kernholz ohne Bläue stützen diese Einschätzung. Das gedämpfte Kernholz nahm mit durchschnittlich 23.5% die dreifache Menge an Wasser im Vergleich zum unbehandeltem, unverblauten Splintholz (Referenz) auf.

Im Gegensatz zum Dämpfen wurde das verblaute Holz durch die einstündige Hitzebehandlung bei 230°C im Klimaschrank (siehe Kap. 6.3.3) wesentlich resistenter gegenüber Flüssigwasser. Die Wasseraufnahme der verblauten Proben von durchschnittlich 9.9% lag nur leicht über dem Wert der unverblauten Referenz-Proben. Die Hitzebehandlung führte somit neben einer attraktiven Farbentwicklung auch zu einer massiven Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme über die Hirnholzflächen.

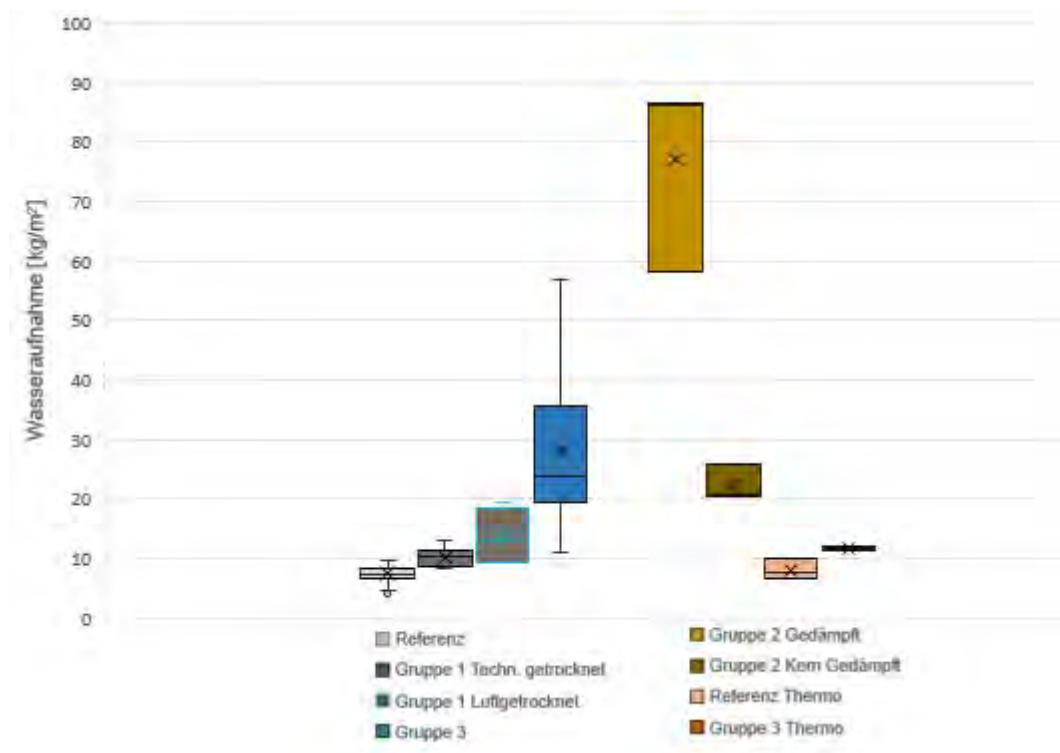


Abbildung 74 Wasseraufnahme im Saugversuch; axial über Hirnholz während 24 Stunden



Abbildung 75 Beispiele für die durch kapillar eingesaugtes Wasser verfärbten Proben (von links: Referenz, Gruppe 1 techn. getrocknet, Gruppe 1 luftgetrocknet, Gruppe 3 techn. getrocknet, Gruppe 2 gedämpft, Gruppe 2 Kernholz gedämpft, Referenz hitzebehandelt, Gruppe 3 hitzebehandelt)

Mit Hilfe des gefärbten Wassers konnte das Saugverhalten auch visuell ausgewertet werden. Die gefärbten Flächen korrelierten mit den aufgenommenen Wassermengen pro m² positiv linear miteinander (Referenz-Proben: R²=0.83, Proben Gruppe 3: R²=0.91).

Nach 2 Wochen Lagerung der Proben im Klima 20°C/ 35% RH hatten alle Proben die durch den Saugversuch aufgenommene Feuchtigkeit wieder abgegeben. **Es kann somit davon ausgegangen werden, dass verblautes Käferholz zwar wesentlich mehr Wasser über die Hirnholzflächen aufnimmt, es jedoch bei trockenen Klimaverhältnissen auch wieder abgibt.**

➤ Wasseraufnahme und -abgabe über die Tangentialflächen (Tauchversuch)

Zur Beurteilung der Wasseraufnahme und -abgabe über die tangentialen Flächen wurde der Feuchteaufnahmezyklus durch Tauchen sowie der Feuchteabgabezyklus nach DIN CEN/TS 16818 durchgeführt.

Probenanzahl: 50 Referenz (A Charge II)
50 Gruppe 3 (B Charge II)
3 Proben verblaut, gedämpft (Charge III, siehe Kap. 6.3.4)
3 Referenz-Proben hitzebehandelte (A Charge II)
3 Proben Gruppe 3 hitzebehandelte (B Charge II)

Abmessung: L 150 mm x b 50 mm x h 25 mm
L 150 mm x b 50 mm x h 20 mm (gedämpfte und hitzebehandelte Proben)

Klima: 20°C / 65 % RH

Die Hirnholzflächen der Proben wurden 3-fach mit einem 2K-PU Lack versiegelt. Die Proben wurden anschließend 14 Tage im Klima 20°C/ 65 % RH gelagert.

Nach der Wägung des Ausgangsgewichtes wurden die Proben vollständig unter Wasser getaucht (Abbildung 76) und entsprechend der Norm nach vorgegebenen Zeitabständen (10 min, 1 h, 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h, 144 h) gewogen. Entsprechend folgte nach 144 h Wasseraufnahme die Wasserabgabe im Klima 20°C / 65% RH, wobei ebenfalls in vorgegebenen Zeitabständen (1 h, 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 168 h) das Gewicht protokolliert wurde.



Abbildung 76 Tauchversuch zur Bestimmung der Wasseraufnahme über die Tangentialflächen

Abschließend wurden alle Proben 24 h bei 103°C im Trockenschrank gedarrt. Basierend auf dem Darrgewicht konnte die Holzfeuchte berechnet werden.

Tabelle 13 Mittelwerte der Messdaten für den 144 h Tauchversuch (und 168 h Rücktrocknung)

	Referenz	Gruppe 3	Gruppe 2 Gedämpft	Referenz Thermo	Gruppe 3 Thermo
Fläche in m ²	0.0224	0.0224	0.0211	0.0211	0.0213
Wasseraufnahme in g	21.5	31.9	46.5	13.8	20.9
Wasseraufnahme in kg/m ²	0.96	1.42	2.20	0.65	0.98
Wasseraufnahme in % ¹⁾	25.0	38.0	64.9	20.2	28.5
Wasserabgabe in % ¹⁾	21.6	33.6	59.3	15.0	22.2

¹⁾ Prozentuale Aufnahme bzw. Abgabe bezogen auf das Ausgangsgewicht der Proben

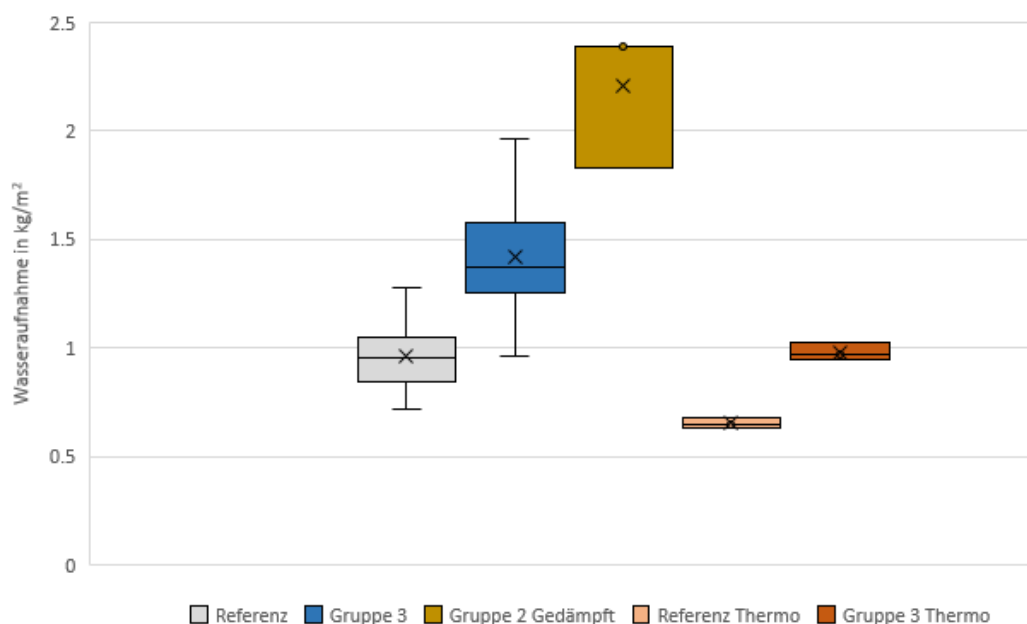


Abbildung 77 Wasseraufnahme im Tauchversuch; über Tangentialflächen während 144 Stunden

In Abbildung 77 wird die während 144 Stunden aufgenommene Wassermenge pro m² Tangentialfläche dargestellt. Auch hier zeigt sich eine deutlich höhere Wasseraufnahme der verblauten Proben (Gruppe 3) im Vergleich zu den Referenz-Proben. Während die Referenz-Proben im Durchschnitt 25% Wasser (bezogen auf das Ausgangsgewicht der Proben) aufnahmen, waren es bei den verblauten Proben durchschnittlich 38%.

Die zusätzlich gedämpften verblauten Käferholzproben (Gruppe 2 Gedämpft) nahmen, wie schon im Saugversuch zu beobachten war, die grössten Wassermengen auf, wogegen eine Hitzebehandlung der Proben (Thermo) zu einer deutlichen Reduktion der Wasseraufnahme sowohl bei den Referenz- als auch bei den verblauten Proben führte.

Aus den Messdaten wurde der Wasseraufnahmekoeffizient A_w berechnet, indem die Wasseraufnahme je Quadratmeter (W in g/m²) gegen die Quadratwurzel aus der verstrichenen Prüfzeit ($\sqrt{t}$) aufgetragen wurde. Bei Holzfeuchten unterhalb der Fasersättigung ist diese Abhängigkeit nahezu linear. Der Wasseraufnahmekoeffizient A_w entspricht der Steigung der linearen Funktion (siehe Abbildung 78).

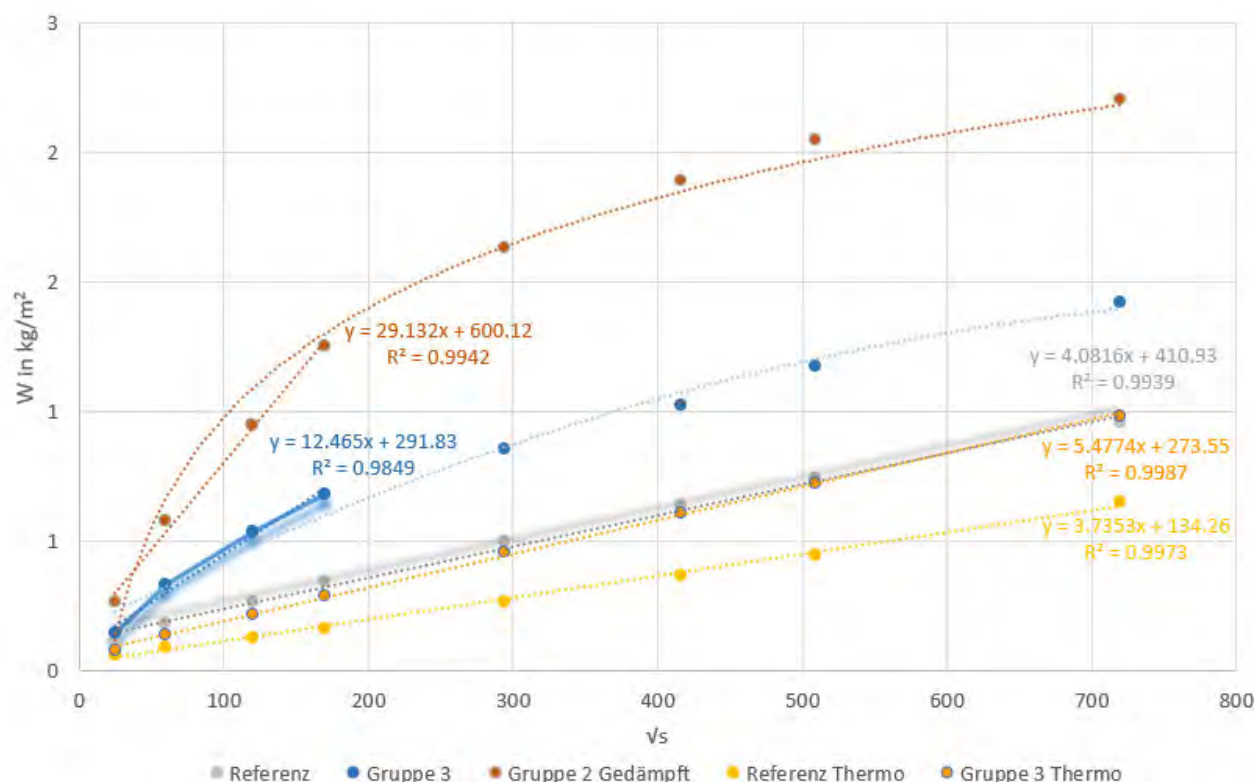


Abbildung 78 Wasseraufnahme pro m² Tangentialfläche in Abhängigkeit der Zeit

Der berechnete Wasseraufnahmekoeffizient A_w der Referenz-Proben ist mit 4.1 g/(m²* √s) vergleichbar mit den in der Literatur zu findenden Angaben. Beispielsweise in (Niemz 2005) wird dieser mit 4 g/(m²* √s) für Wasseraufnahme über die Tangentialflächen angegeben.

Die verblauten Proben aus Gruppe 3 nehmen das Wasser deutlich schneller und in größeren Mengen auf. Der Wasseraufnahmekoeffizient A_w der verblauten Proben ist mit 12.5 g/(m²* √s) dreimal so hoch wie der Wert der Referenz-Proben ohne Bläue (siehe Tabelle 14).

Wie schon bei den Saugversuchen über die Hirnholzflächen nahmen die zusätzlich gedämpften verblauten Proben (Gruppe 3 Gedämpft) auch über die Tangentialflächen wesentlich mehr und schneller Wasser auf als alle anderen Varianten.

Tabelle 14 Wasseraufnahmekoeffizient bei Wasseraufnahme über Tangentialflächen

	Referenz	Gruppe 3	Gruppe 2 Gedämpft	Referenz Thermo	Gruppe 3 Thermo
A_w g/(m ² * √s)	4.08	12.46	29.13	3.73	5.48

Wie in Abbildung 79 dargestellt haben sich bereits nach wenigen Stunden Wassereinwirkung bei allen Proben deutlich höhere Holzfeuchten eingestellt, die bis zum Ende der Wasserlagerung nach 144 Stunden kontinuierlich anstiegen. Trotz einer anfänglich schnellen Feuchteabgabe bei Rücktrocknung im Klima 20°C / 65% RH konnte keine der Proben nach 1 Woche das ursprüngliche Ausgangsgewicht erreichen.

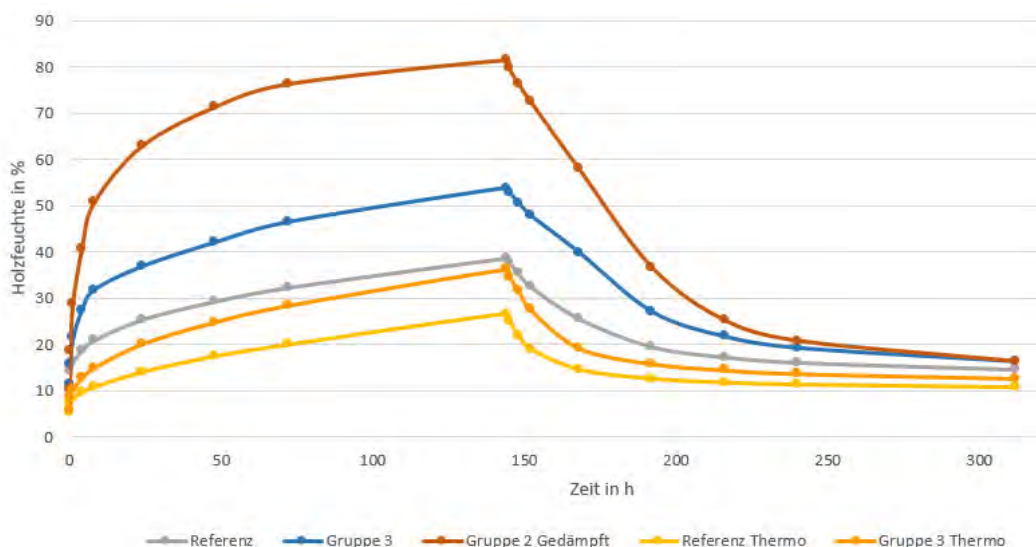


Abbildung 79 Holzfeuchteänderung der Proben bei Wasseraufnahme und -abgabe

Die Ergebnisse der Saug- als auch der Tauchversuche zeigen, dass verblautes Käferholz deutlich mehr Wasser aufnimmt als das unverblaute Referenzmaterial. Jedoch ist das verblaute Holz auch in der Lage, diese Feuchtigkeit wieder abzugeben.

Die in Kap. 6.3.3 beschriebene Hitzebehandlung konnte die Wasseraufnahme bei den verblauten Proben um 30% bis 40% reduzieren. Diese Werte waren damit vergleichbar mit denen der unbehandelten Referenz-Proben. Ein Dämpfprozess dagegen, wie in Kap. 6.3.4 beschrieben, führte zu einer massiven Erhöhung der Wasseraufnahme.

6.2.11 Aktivierung der Bläue durch Feuchteeinwirkung

In diesem Versuch wurde überprüft, ob die Bläuepilze bei erneuter Durchfeuchtung des Holzes wieder aktiv werden können.

Probenanzahl: Box 1 5 Proben Referenz (A Charge II Wintereinschlag), 'sterilisiert'
 Box 2 5 Proben Gruppe 3 (B Charge II Wintereinschlag), techn. getrocknet
 Box 3 5 Proben Gruppe 4 (C Charge II Wintereinschlag), techn. getrocknet
 Box 4 5 Proben Gruppe 2 (B1 Charge III Sommereinschlag), techn. getrocknet
 5 Proben Gruppe 2 (B2 Charge III Sommereinschlag), luftgetrocknet
 Box 5 5 Proben Gruppe 1 (B3 Charge III Sommereinschlag), nicht verblaut, techn. getrocknet
 5 Proben Referenz (A Charge II Wintereinschlag), techn. getrocknet

Abmessung: L 150 mm x b 100 mm x h 10 mm
 Klima: 23°C / ≈100 % RH

Als Referenz wurde technisch getrocknete, unverblaute Fichte ausgewählt. Ein Teil dieser Proben wurde vor dem Test für 4 h bei 50°C desinfiziert, um vorhandene Pilze und Mikroorganismen im Holz zu deaktivieren bzw. abzutöten. Anschließend wurden diese Proben für ca. 30 Sekunden in eine Lösung mit Pilzsporen (Herstellung siehe Kap. 6.1.5) getaucht, um eine Infektion mit Bläuepilzen zu simulieren. Diese Proben sollten im Versuch als Kontrolle dienen und darüber Aufschluss geben, ob das in den Kisten herrschende feuchte Klima ggf. eine Entwicklung der Bläuepilze begünstigt.

Der andere Teil der Referenz-Proben wurde direkt (ohne Vorbehandlung) getestet. Weiterhin wurden technisch getrocknete, stark verblaute Proben (Gruppe 2, B1 und Gruppe 3), verblaute Proben mit Rotstreifigkeit (Gruppe 4) und Käferholzproben ohne Verblauung (Gruppe 1, B3) ausgewählt. Zusätzlich wurden einige luftgetrocknete verblaute Proben (Gruppe 2, B2) getestet, um zu sehen, ob sich technisch getrocknete Proben und luftgetrocknete Proben unterschiedlich verhalten.

Die Proben wurden in 5 verschiedenen sterilen Kunststoffboxen auf einem Feuchtesubstrat (Vermikulit; Körnergrösse 3-6 mm; Wassergehalt ca. 300 %G) während 12 Wochen gelagert. In den Boxen herrschte ein Klima von 23°C und nahezu 100 % RH.

Die Proben wurden zu Beginn und am Ende des Versuchs gewogen. Nach dem Versuch wurden die Proben 14 Tage im Klima 20°C / 35 % RH rückgetrocknet und anschließend visuell beurteilt. Danach wurden alle Proben mit einem feuchten Lappen leicht gereinigt, um oberflächlichen Schimmelpilzbewuchs zu entfernen. Abschließend wurden alle Proben 4 Wochen im Klima 20°C / 65 % RH gelagert und nochmals gewogen und visuell beurteilt. Als Basis für die Berechnung der Holzfeuchte wurde das Darrgewicht jeder Probe durch Trocknung bei 103°C im Ofen bestimmt.



Abbildung 80 Ausgangszustand der Proben und Zuteilung zu den Boxen 1 bis 5

Bereits **nach einer Woche** Lagerung im gesättigten feuchten Klima zeigten die Proben in Box 4 einen oberflächlichen Bewuchs mit Schimmelpilzen. Dieser war besonders stark an den verblauten Proben aus dem Sommereinschlag ausgeprägt (Gruppe 2, **B2**), welche vor dem Versuch nur luftgetrocknet wurden (Abbildung 81, Proben auf der linken Seite). Der Pilzbefall konzentrierte sich vor allem auf die verblauten Bereiche, an denen offensichtlich eine höhere Holzfeuchte herrschte als an den nicht verblauten Bereichen. Die Proben in den anderen Boxen zeigten zu diesem Zeitpunkt noch keine Veränderung.



Abbildung 81 Verblaute Proben der Gruppe 2 (B1 technisch getrocknet, B2 luftgetrocknet) nach 1 Woche Lagerung im Klima 23°C/≈100% RH (Box 4)

Nach zwei Wochen zeigten auch die Proben aus Gruppe 4 mit starker Bläue und teilweise Rotstreifigkeit einen deutlichen oberflächlichen Schimmelbefall (Abbildung 82, Proben in Box 3).



Abbildung 82 Proben der Gruppe 4 (C) nach 2 Wochen Lagerung im Klima 23°C/≈100% RH (Box 3)

Nach drei Wochen Lagerung im gesättigten feuchten Klima zeigten die verblauten Proben (B) in Box 2 (Abbildung 83) und die unverblauten Käferholzproben (Gruppe 1, B3) sowie die Referenz-Proben in Box 5

(Abbildung 84) einen beginnenden oberflächlichen Schimmelpilzbefall. Ebenfalls war zu diesem Zeitpunkt gut zu beobachten, dass die unverblauten Käferholz-Proben (Gruppe 1, B3) wesentlich feuchter aussahen als die Referenz-Proben in derselben Box 5.



Abbildung 83 Proben der Gruppe 3 (B) nach 3 Wochen Lagerung im Klima 23°C/≈100% RH (Box 2)



Abbildung 84 Unverblaute Käferholz-Proben (Gruppe 1,B3) und Referenz-Proben (A) nach 3 Wochen Lagerung im Klima 23°C/≈100% RH (Box 5)

Nach 12 Wochen Lagerung im gesättigten feuchten Klima zeigten alle Proben einen starken Schimmelpilzbewuchs auf den verblauten Bereichen. Besonders stark ausgeprägt war dieser auf den luftgetrockneten, verblauten Proben (B2) als auch auf den Proben mit beginnender Rotstreifigkeit (C) (siehe Abbildung 85). Lediglich die technisch getrockneten Referenz-Proben (A) waren praktisch nicht bewachsen (Abbildung 86).

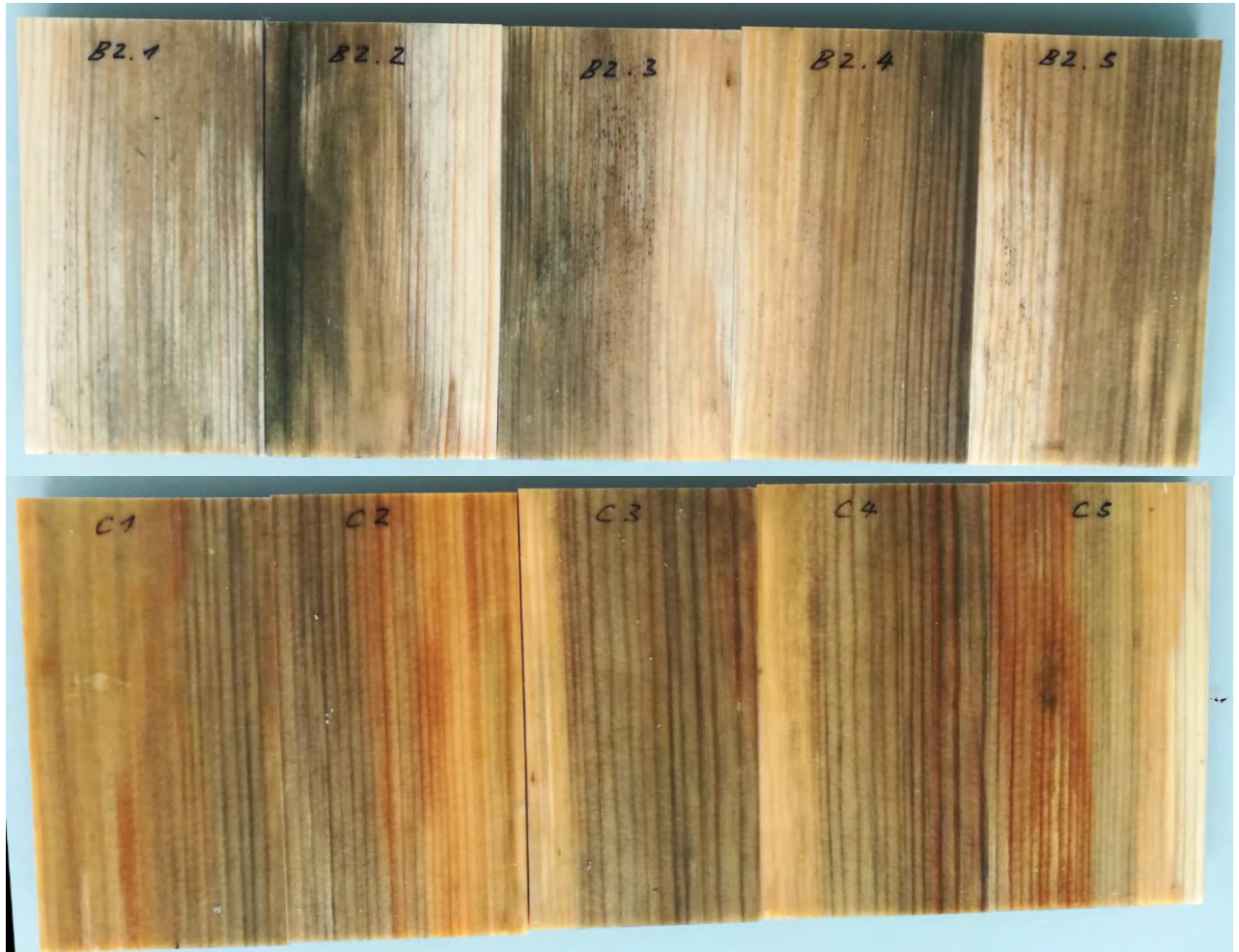


Abbildung 85 B2-Proben und C-Proben im feuchten Zustand direkt nach dem Versuch



Abbildung 86 Referenz-Proben im feuchten Zustand direkt nach dem Versuch

Am Ende des Versuches wurden die Proben gewogen, um die aufgenommene Menge an Wasser zu bestimmen. Alle Proben haben während der 12-wöchigen Lagerung in den verschlossenen Boxen ihr Gewicht durch Feuchtaufnahme mehr als verdoppelt (Abbildung 87).

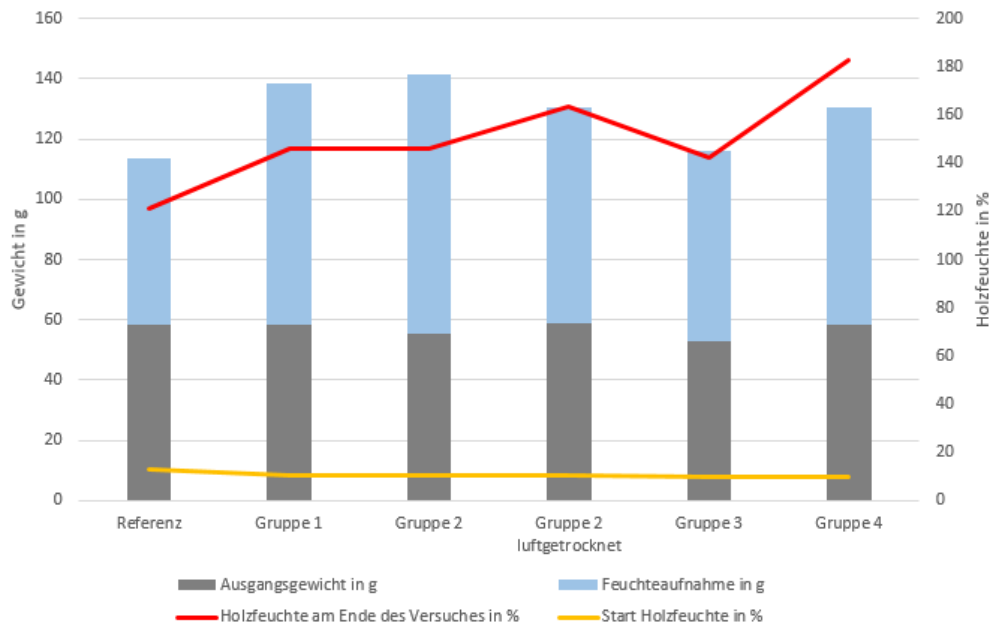


Abbildung 87 Feuchtaufnahme während der 12-wöchigen Lagerung in der Box; inklusive der Holzfeuchte zu Beginn und am Ende des Versuches

Nach dem Vergleich der Daten zeigte sich, dass die Proben mit den höchsten Holzfeuchten auch den stärksten Bewuchs mit Schimmelpilzen aufwiesen.

Es zeigte sich ebenfalls, dass sich die zu Beginn des Versuches vorhandenen Bläue auf den Proben flächennässig nicht signifikant vergrösserte, jedoch teilweise intensiver erschien, wie die folgenden Fotos zeigen (Abbildung 88).



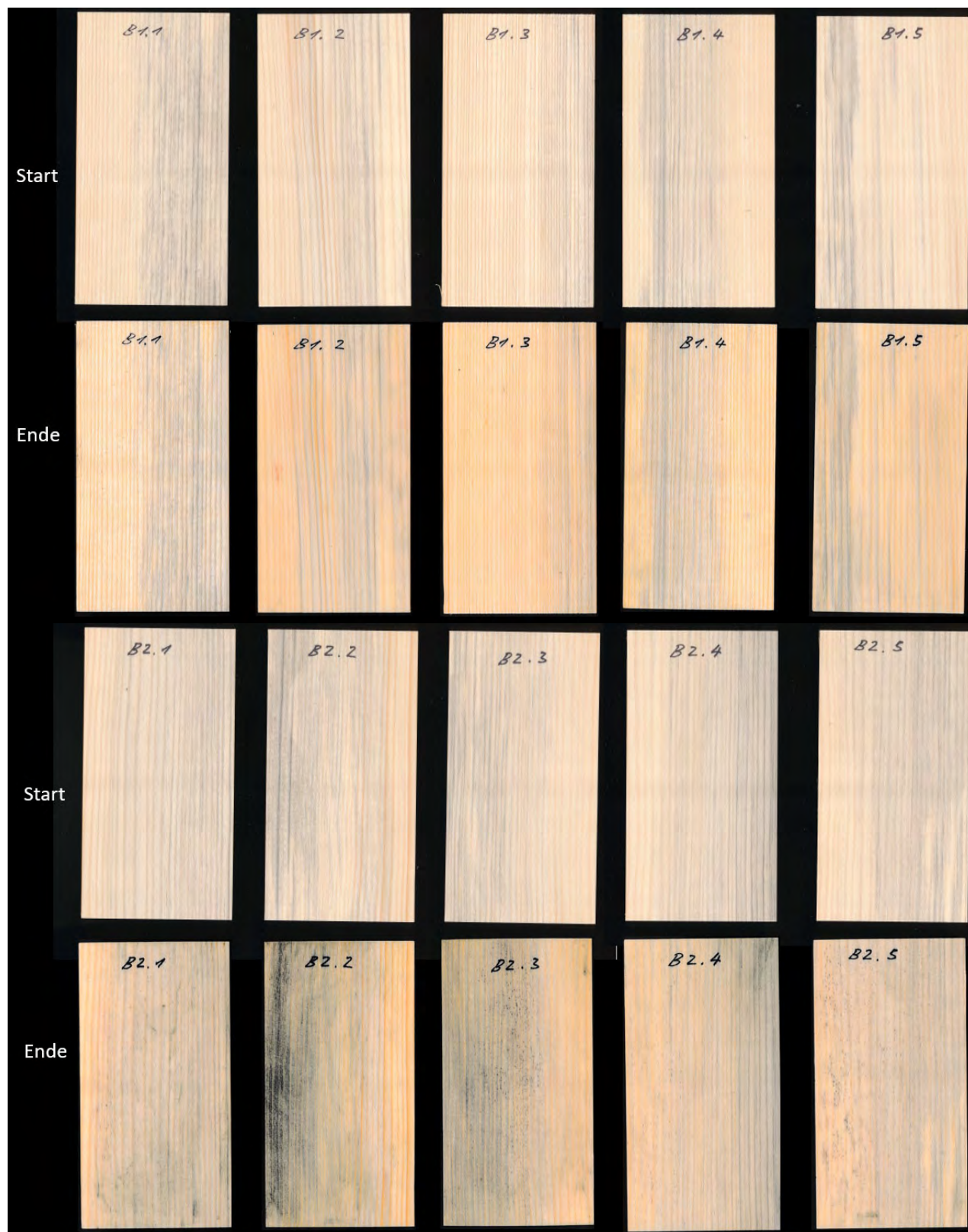




Abbildung 88 Proben vor und nach der 12-wöchigen Lagerung in der Box

Lediglich das zu Beginn noch unverblaute Käferholz (Gruppe 1, B3) zeigte nach dem Versuch eine Ausbildung von Bläue an mindestens zwei der fünf zuvor unverblauten Proben (Abbildung 89).



Abbildung 89 Ausbildung von Bläue an einigen der zuvor unverblauten Käferholz-Proben während der 12-wöchigen Lagerung in der feuchten Box

Dieser Versuch zeigte, dass noch unverblautes Käferholz selbst nach der technischen Trocknung Bläue ausbilden kann, sofern die Bedingungen wie Feuchte und Temperatur für den Pilz günstig sind. Bereits verblaute Bereiche bildeten bei ausreichender Feuchtigkeit schneller und intensiveren Schimmelpilzbefall aus.

Eine relativ rasche Verblauung konnten wir im Übrigen auch an den Proben aus dem Sommereinschlag (Charge III) beobachten. Die Bretter aus noch unverblautem Käferholz zeigten bereits nach kurzer Lagerung im Freien unter Dach (an der Empa) erste Anzeichen von Bläue und mussten daher sofort technisch getrocknet werden, um ein weiteres Fortschreiten der Verblauung zu verhindern.

6.2.12 Sporenbelastung in der Raumluft

Dieser Versuch, sowie die daraus gewonnenen Informationen sind vor allem bezüglich der Arbeitsplatzbelastung bei der mechanischen Bearbeitung von verblautem Käferholz wichtig, obwohl es für biologische Arbeitsstoffe derzeit keine Grenzwerte gibt (TRBA/TRGS 406). Für die Sporenbelastung in Innenräumen existieren ebenfalls keine Grenzwerte. Diverse Organisationen geben jedoch Empfehlungen bezüglich der Raumluftbelastung mit Schimmelpilzsporen (z.B. CEC, Commission of European Communities: < 50/m³ sehr niedrig, < 200/m³ niedrig, < 1000/m³ mittel, < 10.000/m³ hoch, > 10.000/m³ sehr hoch; **SUVA**: < 1000/m³ akzeptable Arbeitsplatzbelastung). Bei der Beurteilung der Ergebnisse orientierten wir uns an diesen Werten.

Die Untersuchungen wurden mit einem Luftkeimsammler MAS-100 NT der Firma Merck KGaA Darmstadt durchgeführt (Abbildung 90). Die Versuchsbehälter wurden vor jeder Versuchsanordnung und Messung gründlich gereinigt und zusätzlich mit Ethanol 70% desinfiziert.



Abbildung 90 Luftkeimsammler MAS-100 NT mit Anschluss an die Testbox

Probenanzahl: 3 Proben Referenz (A Charge II), luftgetrocknet
 3 Proben Gruppe 1 (A Charge III), techn. getrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B1 Charge III), techn. getrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B2 Charge III), luftgetrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B Charge III), techn. getrocknet und gedämpft
 3 positive Blindproben (Oberfläche von Käferholz, stark verblaut und verschimmelt nach Waldlagerung)
 3 Leerkontrolle (Luft in leerer gereinigter Box)

Abmessung: L 50 mm x b 65 mm x h 30 mm

Klima: 20°C / 65 % RH

Nährboden: 20 g Malzextrakt (OXOID Code L39)
 20 g Agar (OXOID Agar Bacteriological Code L13)
 1000 ml entionisiertes Wasser
 Das Nährmedium wurde gemischt, aufgekocht und anschließend im Dampf Autoklaven bei 121°C während 20 min sterilisiert. Nach Abkühlung im Wasserbad auf 45°C wurde das Nährmedium in sterile Kunststoffpetrischalen (Ø 9 cm) gefüllt (20-25 ml pro Petrischale). Der sterile Nährboden in den Petrischalen wurde bis zur Verwendung im Kühlschrank bei 3-5°C aufbewahrt.

Von jeder zu untersuchenden Probengruppe wurden 3 repräsentative Holzproben herausgeschnitten und nach Bestimmung der genauen Probenvolumina und Akklimatisationsgewichte (20°C/65%rF) mit einer Retsch-Schneidemühle (Maschenweite <2mm) entsprechende Sägemehlproben vorbereitet.

In Anlehnung an die VDI 4300 Bl. 10 wurden von jeder Sägemehl-Sammelprobe zwei verschiedene Konzentrationen in Raumluft (10 g/m³ und 100 g/m³) untersucht. Dafür wurde die entsprechende Menge Sägemehl in spezielle, vor elektrostatischer Aufladung geschützte Kunststoffbehälter (WEZ Art. 144-342: Blackline ESD-Eurobehälter) gefüllt und darin gut aufgeschüttelt.

Anschliessend wurde über einen Schlauch ein definiertes Luftvolumen (5 l, 10 l und 50 l) aus der Box angesaugt und über die Petrischale mit dem Nährsubstrat (Malzagar-Nährboden) geführt.

Die auf diese Weise auf dem Nährboden gesammelten Pilzsporen wurden anhand von Auswuchsversuchen d.h. nach einer Inkubationszeit von 5 – 6 Tagen bei Raumtemperatur (20-25°C) ausgezählt und anschliessend die Anzahl der auskeimfähigen Pilz-Sporen pro Raumluftvolumen ermittelt.

Zur Überprüfung der Methode wurden zusätzlich Leer- als auch positive Blindproben getestet.

Über 90% der gesamthaft mikroskopisch nachweisbaren Sporen (in Lösung) waren keimfähig. Die aufgeführten Resultate in Tabelle 15 beziehen sich auf die keimfähigen Sporen in der Raumluft.

Tabelle 15 Auszählung der keimfähigen Sporen in der Luft

	Menge Sägemehl in g/m³ Luft	Anzahl ausgewachsener Pilzsporen pro Luftvolumen									Anzahl Sporen/m³ Mittelwert	Anzahl Sporen/m³ Mittelwert (log)
		5 Liter			10 Liter			50 Liter				
Referenz, luftgetrock- net	10	0	0	0	0	2	1	1	1	1	40	1.6
	100	2	2	2	2	3	4	4	3	2	253	2.4
Käferholz verblaut, luftgetrock- net	10	0	0	1	0	1	1	0	2	1	51	1.7
	100	1	1	4	2	3	3	4	3	6	251	2.4
Käferholz un- verblaut, techn. ge- trocknet	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0.3
	100	0	0	0	0	0	0	2	2	1	11	1
Käferholz verblaut, techn. ge- trocknet	10	0	0	1	0	1	0	0	2	1	36	1.6
	100	1	1	4	2	3	3	4	3	6	64	1.8
Käferholz verblaut, gedämpft	10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0.3
	100	0	0	0	0	0	1	2	0	1	18	1.3
Positive Blindprobe	10	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>10000	>4
	100	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>10000	>4
Leerkontrolle	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	4	0.6

Die Nullproben (Leerkontrolle) ergaben eine minimale Sporen-Belastung von < 5/m³. Die positiven Blindproben ergaben erwartungsgemäss eine sehr hohe Sporen-Belastung mit > 10'000/m³.

Die Sporenbelastung in der Raumluft ist bei simulierter mechanischer Bearbeitung des untersuchten luftgetrockneten Fichtenholzes (Aufschütteln von feinen Spänen) mit durchschnittlich ca. 250/m³ bei einer Einwage von 100 g Sägemehl pro 1 m³ Luft als mittel bis niedrig einzustufen.

Bei den luftgetrockneten Proben zeigten sich keine relevanten Unterschiede zwischen dem verblauten Käferholz und den unverblauten Referenz-Proben (siehe Abbildung 91).

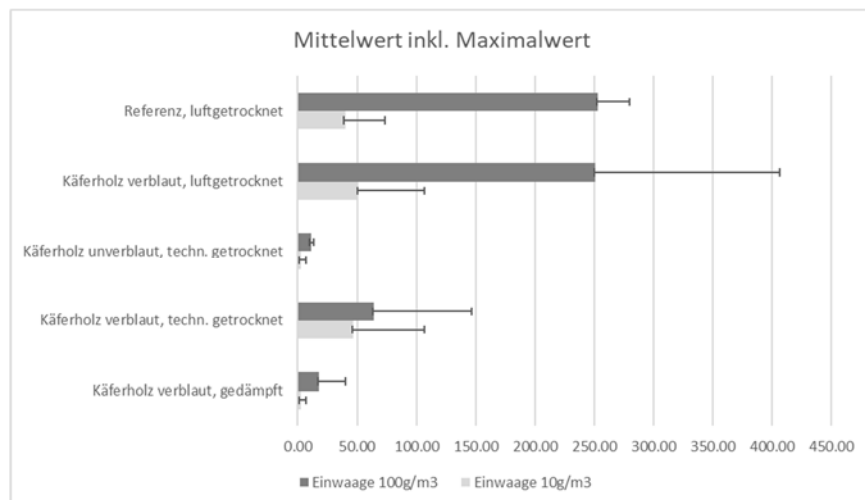


Abbildung 91 Anzahl der keimfähigen Sporen pro m³ Luft; Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen sowie der jeweilige maximale Einzelmesswert

Durch die technische Trocknung des Holzes wurde die Belastung mit keimfähigen Sporen signifikant verringert. Die Belastung durch verblautes, technisch getrocknetes Käferholz ist mit Werten < 64/m³ als gering einzustufen. Durch Dämpfen der verblauten Proben konnte diese Belastung nochmals verringert werden und lag mit sehr geringen Werten < 20/m³ im Bereich von technisch getrocknetem, nicht verblautem Fichtenholz. Unverblautes, technisch getrocknetes Käferholz zeigte ebenfalls eine sehr geringe Belastung durch keimfähige Sporen.

Eine Belastung der Raumluft durch keimfähige Sporen während der Verarbeitung von technisch getrocknetem, verblautem Käferholz ist als gering bis sehr gering einzustufen. Die Sporenbelastung bei der Verarbeitung von luftgetrocknetem Fichtenholz ist um ein vielfaches höher, unabhängig davon, ob das Holz verblaut ist oder nicht. **Alle Werte liegen weit unterhalb der von der SUVA als maximal akzeptable Belastung (< 1000/m³) deklarierten Luftbelastung mit Schimmelpilzsporen.**

6.2.13 Sporenbelastung auf gehobelten Oberflächen

Durch die Untersuchung der Sporenbelastung auf gehobelten Oberflächen sollte abgeklärt werden, ob durch den Einsatz / die Nutzung von verblautem Käferholz in Innenanwendungen (z.B. Möbel oder Küchenbretchen usw.) ein hygienisches Risiko besteht.

Die Beurteilung der Sporenbelastung auf gehobelten Oberflächen wurde mit Hilfe von Abklatschversuchen durchgeführt.

Probenanzahl: 3 Proben Referenz (A Charge II), luftgetrocknet
 3 Proben Gruppe 1 (A Charge III), techn. getrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B1 Charge III), techn. getrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B2 Charge III), luftgetrocknet
 3 Proben Gruppe 2 (B Charge III), techn. getrocknet und gedämpft
 3 positive Blindproben (Proben B1, B3, B5 nach Feuchtelagerung, siehe Kap. 6.2.11)

Abmessung: L 50 mm x b 65 mm x h 30 mm

Klima: 20°C / 65 % RH

Nährboden: 20 g Malzextrakt (OXOID Code L39)
20 g Agar (OXOID Agar Bacteriological Code L13)
1000 ml entionisiertes Wasser
Das Nährmedium wurde gemischt, aufgekocht und anschließend im Dampf Autoklaven bei 121°C während 20 min sterilisiert. Nach Abkühlung im Wasserbad auf 45°C wurde das Nährmedium mit sterilen Pipetten in Abklatschpetrischalen aus Kunststoff (Ø 6 cm; Fa. Greiner) bis zum Maximum gefüllt. Nach Erstarren des sterilen Nährbodens in den Schalen wurden diese bis zur Verwendung im Kühlschrank bei 3-5°C aufbewahrt.

Von jeder zu untersuchenden Probengruppe wurden 3 repräsentative Holzproben ausgewählt und vor sowie nach dem Hobeln der Oberfläche untersucht. Als positive Blindproben dienen ausgewählte Holzproben mit starkem Pilzbewuchs aus dem in Kap. 6.2.11 beschriebenen Versuch 'Aktivierung der Bläue durch Feuchteinwirkung' (siehe Abbildung 93 links).

Die sterilen Nährböden wurden leicht auf die zu untersuchenden Oberflächen gedrückt, um die dort befindlichen Pilzsporen zu übertragen (beispielhaft dargestellt in Abbildung 92).

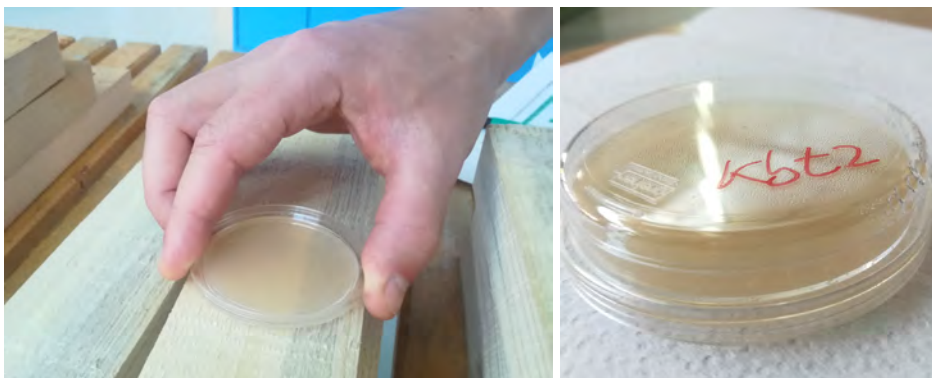


Abbildung 92 Andrücken des Nährbodens auf einer Oberfläche (links);
Verschlossener Testbehälter (rechts)

Nach dem Abklatsch wurden die Behälter verschlossen und im Brutschrank bei 22°C und 70% RH während 5-7 Tagen inkubiert.

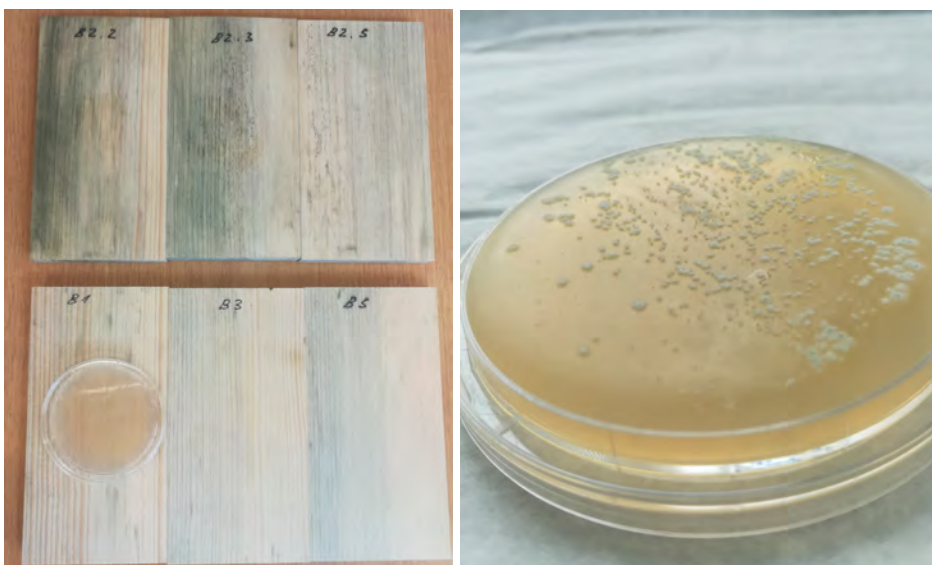


Abbildung 93 Positive Blindprobe; Abklatsch auf frisch gehobelten Oberflächen (links);
Nährboden mit Bewuchs nach der Inkubation (rechts)

Nach der Inkubation wurden die aus den einzelnen Sporen ausgewachsenen Kolonien gezählt (entsprechend Rastereinteilung auf Abklatschplattenboden; 16 x 1cm²). Ein Beispiel einer Abklatschplatte mit Bewuchs ist in Abbildung 93 dargestellt.

Tabelle 16 Auszählung der ausgewachsenen Kolonien

	Oberfläche	Anzahl ausgewachsener Pilzsporen pro 16 cm ²									Anzahl Sporen /16cm ² Mittelwert	Anzahl Sporen/m ² Mittelwert
		Probe 1			Probe 2			Probe 3				
Referenz, luftgetrocknet	sägerau	3			6			2			3.7	2.3*E3
	gehobelt	1	3	11	1	1	21	2	1	4	5.0	3.1*E3
Käferholz verblaut, luftgetrocknet	sägerau	19			19			15			17.7	1.1*E4
	gehobelt	19	11	9	4	3	9	10	2	3	7.8	4.9*E3
Käferholz un- verblaut, techn. ge- trocknet	sägerau	2			8			9			6.3	4.0*E3
	gehobelt	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0.4	2.8*E2
Käferholz verblaut, techn. ge- trocknet	sägerau	1			1			2			1.3	8.3*E2
	gehobelt	1	3	2	6	12	8	0	0	0	3.6	2.2*E3
Käferholz verblaut, gedämpft	sägerau	0			0			6			2.0	1.3*E3
	gehobelt	0	1	2	0	0	0	2	0	1	0.7	4.2*E2
Positive Blindprobe	gehobelt	47			58			59			54.7	3.4*E4

Die sägerauen Oberflächen zeigten erwartungsgemäss meist höhere Werte als die frisch gehobelten Proben, da gelagerte Oberflächen zusätzlich mit Anflugsporen aus der Umgebung kontaminiert sind. Die Messwerte für die sägerauen Oberflächen sind daher nur orientierend aufgeführt.

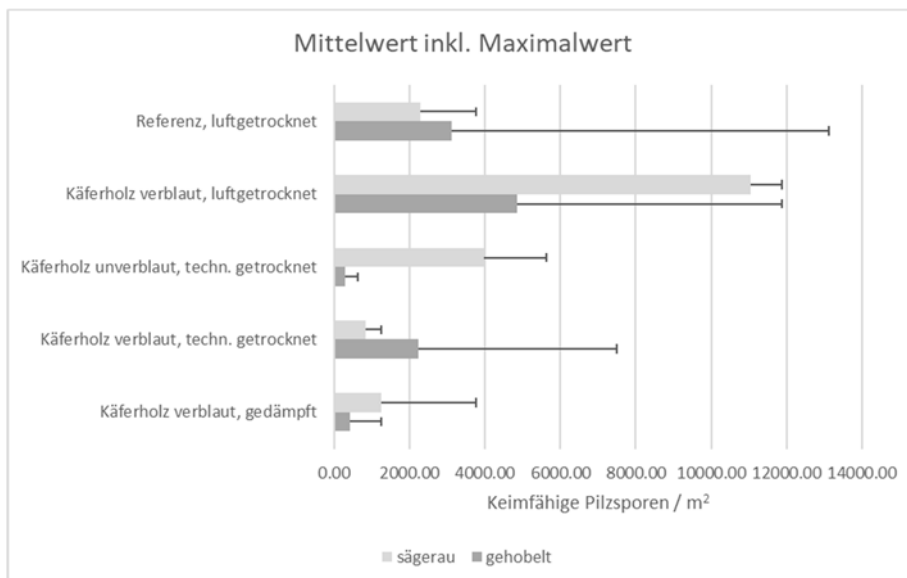


Abbildung 94 Anzahl der keimfähigen Sporen pro m² Fläche; Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen (sägerau) bzw. 9 Einzelmessungen (gehobelt) sowie der jeweilige maximale Einzelmesswert

Bei den frisch gehobelten Oberflächen wies das luftgetrocknete, verblaute Käferholz mit einem Mittelwert von 4.9*10³ die höchste Sporenbelastung pro m² Fläche auf (vergleiche dunkle Balken in Abbildung 94). Das luftgetrocknete Fichtenholz (Referenz) ergab eine etwas geringere Belastung von 3.1*10³ Sporen/m² Fläche.

Beim Abklatschtest zeigten sich ähnliche Tendenzen, wie schon bei der Untersuchung der Raumluftbelastung. **Die Belastung von luftgetrocknetem Fichtenholz mit keimfähigen Pilzsporen ist höher als die von technisch getrocknetem Holz.** Die technische Trocknung reduziert die Anzahl der keimfähigen Sporen deutlich. Die positiven Blindproben (techn. getrocknet, gehobelt, mit starkem Bläue- und Schimmelbefall) zeigten eine etwa 10-fach bis 100-fach höhere Belastung als alle anderen untersuchten, technisch getrockneten Proben.

Die technisch getrockneten und gehobelten Oberflächen der verblauten Proben (Gruppe 2) enthielten etwa die 10-fache Menge an keimfähigen Sporen, im Vergleich zu den unverblauten Käferholzproben (Gruppe 1). Durch das Dämpfen konnte die Sporenbelastung des verblauten Holzes nochmals reduziert werden und war dann in der vergleichbaren Grössenordnung wie die unverblauten Proben.

Da es jedoch keine Grenzwerte für die mikrobielle Belastung von Oberflächen durch Pilze (keimfähige Sporen/m² Oberfläche) gibt, ist eine Einordnung der oben aufgeführten Messwerte schwierig.

6.2.14 Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen

Zur Beurteilung einer möglichen erhöhten Anfälligkeit von verblautem Käferholz gegen holzerstörende Basidiomyceten wurden vergleichende Prüfungen der pilzwidrigen Wirkung einer biozidhaltigen und einer biozidfreien Beschichtung in Anlehnung an die Norm EN 113 sowie RAL GZ 830 (2007) im Originalzustand sowie nach 2-monatiger Freibewitterung durchgeführt.

Proben:	Referenz Fichte (D1 Charge IV), luftgetrocknet Künstlich verblaute Fichte (D2 Charge IV), luftgetrocknet Proben Gruppe 2 (B1 Charge III Sommereinschlag), techn. getrocknet Proben Gruppe 2 (B2 Charge III Sommereinschlag), luftgetrocknet Proben Gruppe 1 (B3 Charge III Sommereinschlag), nicht verblaut, techn. getrocknet Kontrollproben Fichte Splint (ab Holzlager Empa, gefällt 2015), techn. getrocknet Proben Referenz Kiefer Splint (ab Holzlager Empa, gefällt 2015), techn. getrocknet
Beschichtung:	Farblose, wasserbasierte Öllasur (biozidhaltig: IPBC 0.5-1.0 Gew. %; BIT < 0.05%) Farbloser, wässriger 1K-Holzlack (biozidfrei) Anstrich 2-fach
Pilzarten:	als potenzielle Braunfäuleerreger (an Fichten- oder Kiefern Splintholz): - <i>Coniophora puteana</i> (Empa Stamm 62) – BAM Ebw. 15 - <i>Gloeophyllum trabeum</i> (Empa Stamm 100) – BAM Ebw. 109 - <i>Oligoporus placenta</i> (Empa Stamm 229) – FPRL 280
Pilzexposition:	jeweils 1 Prüfprobe und 1 Kontrollprobe pro Kolleschale (mit 75 ml Nährmedium) Inkubationszeit 16 Wochen
Nährmedium:	40 g Malzextrakt (OXOID Code L39) 25 g Agar (OXOID Agar Bacteriological Code L13) 1000 ml entionisiertes Wasser Das Nährmedium wurde gemischt, aufgekocht, in die Kolleschalen eingefüllt und anschließend im Dampf Autoklaven bei 121°C während 20 min sterilisiert. Abkühlung im Raumklima.
Abmessung:	L 50 mm x b 25 mm x h 15 mm
Klima:	23°C / 65 % RH (Vorkonditionierung) 22°C / 70 % RH; unter Lichtausschluss (Inkubation)

Für die Versuche wurde geeignetes Splintholz aus den oben aufgeführten Probengruppen ausgewählt (Vorgaben siehe EN 113 Abschnitt 7.2). Pro Probenserie wurde Material vorselektiert, welches eine vergleichbare Jahrringstruktur und Dichte aufwies. Innerhalb einer Probenserien wurden jeweils 6 Proben pro Variante (3

verschiedene Pilze + Klimakontrolle) getestet, die jeweils aus mindestens zwei verschiedenen Bäumen stammten.

Alle Kontrollproben aus gesunder Fichte waren unbehandelt, nicht vorgealtert und die Hirnflächen waren nicht versiegelt.

Die Hirnflächen der Testprobekörper wurden vor der Schutzmittelapplikation zweimal im Abstand von 24 Stunden mit Nuvovern ACR, Emaillack glänzend, weiss (= 2-Komponenten-Polyurethanlack der Fa. Mäder Lacke AG, CH-8956 Killwangen) abgedichtet. Anschliessend wurden die Probekörper zweifach, allseitig mit den ausgewählten Beschichtungen (entsprechend Herstellervorgaben) gestrichen. Alle für die Freibewitterung vorgesehenen Probekörper wurden nach Beendigung der zweimonatigen Freibewitterung nochmals an den Hirnflächen versiegelt.

Es wurden sowohl Proben im Neuzustand als auch nach 2-monatiger Freibewitterung (Abbildung 95) getestet. Die Freibewitterung dient dabei der Alterung der Beschichtung und zur Auslaugung von Wirkstoffen, so dass die Wirksamkeit der Produkte unter praxisrelevanten Bedingungen beurteilt werden konnten.

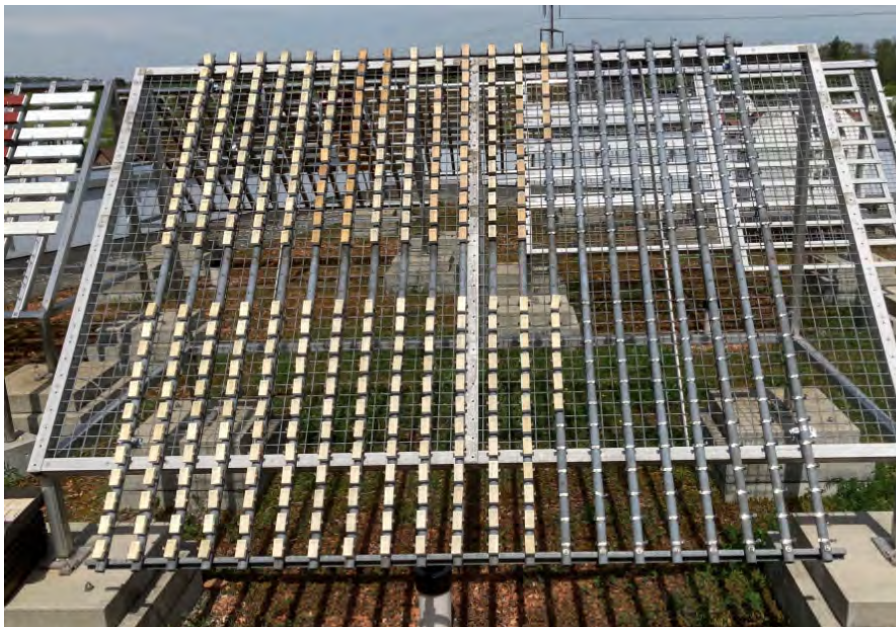


Abbildung 95 Freibewitterung der Prüfkörper (Mai – Juni 2022)

Pro Serie wurden zusätzlich jeweils 6 Klimakontroll-Proben (Abbildung 96) hergestellt, mit deren Hilfe über die Darmmethode das theoretische Anfangsdarrgewicht der Proben-Serie bestimmt wurde.



Abbildung 96 Klimakontrollen vor dem Darren

Die mit sterilem Nährmedium gefüllten Kolleschalen wurden mit den entsprechenden Pilzkulturen beimpft.



Abbildung 97 Kolleschalen mit Nährmedium vor dem Beimpfen mit Pilzkulturen;
rechts: Prüfprobe und Kontrollprobe auf Glasbänkchen

Sobald die Pilzkulturen den Nährboden in den Kolleschalen komplett überwachsen hatten, wurde unter sterilen Bedingungen jeweils eine Prüfprobe und die entsprechende Kontrollprobe auf einem Glasbänkchen in die Kolleschale eingebaut (Abbildung 97). Anschliessend wurden die Kolleschalen wieder verschlossen und im Klima inkubiert.

Nach der 16-wöchigen Pilzexposition wurden alle Proben ausgebaut, beurteilt, oberflächlich von Pilzmycel gereinigt und auf Filterpapier im Raumklima vorgetrocknet. Abschliessend wurden die Proben gedarrt und der Masseverlust bestimmt.



Abbildung 98 Proben nach Versuchsende

Der erreichte Schutz (gemäss Anforderungen in EN 113, Ausgabe 1996) wurde als ausreichend deklariert, wenn:

- der mittlere, korrigierte Gewichtsverlust der 6 Probehölzer $\leq 3 \%$ war und
- höchstens ein Probeholz (1/6) einen Gewichtsverlust von $\geq 3 \%$ aber $\leq 5 \%$ aufwies.

Die Beurteilung der Wirksamkeit der Beschichtung in Abhängigkeit vom Untergrund erfolgte anhand der Masseverluste. Die Ergebnisse für alle Probenreihen sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17 Beurteilung der Wirksamkeit gegen Basidiomyceten basierend auf dem Masseverlust

Holz-provenienz	Produkt	Wasserbasierte Öllasur (biozidhaltig) 180g/m ²						Wässriger 1K-Holzlack (biozidfrei) 180g/m ²						unbehandelt		
	Prüfzustand	Original; ohne Alterung			2 Mt. Freibewitterung			Original; ohne Alterung			2 Mt. Freibewitterung			Original; ohne Alterung		
	Empa Prüfpilz Nr.	62	100	229	62	100	229	62	100	229	62	100	229	62	100	229
D1 Fichte unverblaut, luftgetr.	Verblauungsgrad	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Wassergehalt in %	36.3	40.5	30.1	35.2	38.2	61.7	37.8	64.4	66.9	37.4	49.7	72.1	44.6	63.1	81.6
	Gew.-Verlust in %	0.3	0.2	0.5	1.0	2.1	25.4	8.5	0.6	26.5	7.9	0.7	29.2	11.7	2.4	28.9
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	1/6	1/6	6/6	6/6	0/6	6/6	5/6	0/6	6/6	6/6	1/6	6/6
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	6/6	0/6	6/6	4/6	0/6	6/6	6/6	1/6	6/6
	Bewertung +/-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
D2 Fichte künstlich verblaut, luftgetr.	Verblauungsgrad	3.4	2.9	2.7	2.5	2.8	2.8	3.1	2.9	2.6	3.0	2.8	2.5	2.8	2.8	2.9
	Wassergehalt in %	32.6	33.9	29.1	32.9	35.7	63.6	35.3	74.3	66.1	32.9	42.1	74.1	44.6	55.5	89.2
	Gew.-Verlust in %	0.4	0.4	0.3	0.5	0.7	24.2	5.2	1.4	24.7	3.5	1.0	30.3	12.4	1.8	24.4
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	0/6	1/6	6/6	4/6	1/6	6/6	2/6	1/6	6/6	6/6	2/6	6/6
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	3/6	0/6	6/6	2/6	0/6	6/6	6/6	1/6	6/6
	Bewertung +/-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Gruppe 1 Käferholz unverblaut, techn. T.	Verblauungsgrad	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	--	--	--	0.0	0.0	0.0
	Wassergehalt in %	30.5	33.7	28.7	33.6	38.8	78.6	34.2	79.0	61.7	--	--	--	42.6	52.3	94.7
	Gew.-Verlust in %	0.1	0.1	0.3	1.0	2.0	22.1	4.5	0.4	20.8	--	--	--	10.6	1.2	30.3
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	0/6	1/6	6/6	3/6	0/6	6/6	--	--	--	2/2	0/2	2/2
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	3/6	0/6	6/6	--	--	--	2/2	0/2	2/2
	Bewertung +/-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	--	--	--	-	+	-
Gruppe 2 Käferholz verblaut, luftgetr.	Verblauungsgrad	3.5	3.7	3.6	3.7	3.8	3.9	3.8	3.7	3.5	--	--	--	3.1	2.9	3.0
	Wassergehalt in %	30.7	35.1	29.5	33.3	42.1	72.8	37.9	89.7	60.1	--	--	--	51.4	63.7	105.6
	Gew.-Verlust in %	0.5	0.2	0.4	0.4	1.5	24.5	8.4	0.2	16.4	--	--	--	18.7	4.2	26.4
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	6/6	0/6	6/6	--	--	--	2/2	1/2	2/2
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	6/6	6/6	0/6	6/6	--	--	--	2/2	1/2	2/2
	Bewertung +/-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	--	--	--	-	-	-
Gruppe 2 Käferholz verblaut, techn. T.	Verblauungsgrad	3.1	3.3	3.3	3.2	3.3	3.4	3.7	3.5	3.6	3.7	3.7	3.6	3.4	3.4	3.4
	Wassergehalt in %	31.0	32.8	29.7	34.0	51.2	71.2	35.5	83.8	60.5	35.3	48.8	77.4	50.4	58.8	100.7
	Gew.-Verlust in %	0.3	0.3	0.2	0.3	2.9	24.2	5.9	0.0	19.6	4.6	8.0	29.9	13.1	30.7	34.5
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	0/6	2/6	6/6	5/6	0/6	6/6	3/6	2/6	6/6	6/6	6/6	6/6
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	2/6	6/6	4/6	0/6	6/6	3/6	2/6	6/6	5/6	6/6	6/6
	Bewertung +/-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Gruppe 2 Käferholz verblaut, techn. T. + gedämpft	Verblauungsgrad	2.9	3.1	3.3	3.1	3.0	3.3	3.3	3.1	3.0	3.0	3.0	3.3	3.9	3.9	3.8
	Wassergehalt in %	38.2	38.4	32.4	34.3	45.1	83.3	44.4	90.7	71.8	40.5	52.4	80.9	44.9	54.2	104.8
	Gew.-Verlust in %	0.4	0.3	0.2	1.2	7.3	22.4	11.3	2.6	31.2	8.2	20.2	28.6	7.2	13.8	30.9
	Anzahl Werte >3%	0/6	0/6	0/6	1/6	3/6	6/6	6/6	1/6	6/6	6/6	6/6	6/6	5/6	6/6	6/6
	Anzahl Werte >5%	0/6	0/6	0/6	0/6	2/6	6/6	5/6	1/6	6/6	6/6	6/6	6/6	3/6	6/6	6/6
	Bewertung +/-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

62 = *Coniophora puteana*; 100 = *Gloeophyllum trabeum*; 229 = *Oligoporus placenta*

Alle rot markierten Varianten zeigten keine ausreichende Wirkung gegenüber den getesteten Pilzen.

Die Kontrollproben aus gesunder Fichte ohne jegliche Behandlung wurden durch die drei getesteten Pilze unterschiedlich stark abgebaut (Abbildung 99). Folgende Mittelwerte wurden über sämtliche Kontrollproben ermittelt:

- *Coniophora puteana* (Empa Stamm 62) 11 ± 5.7 Gew.%
- *Gloeophyllum trabeum* (Empa Stamm 100) 19 ± 15.0 Gew.%
- *Oligoporus placenta* (Empa Stamm 229) 31 ± 9.2 Gew.%

Fichte wird vom Balken-Blättling (*Gloeophyllum trabeum*) bekanntermassen relativ ungleichmässig abgebaut. Dies bestätigt auch die grosse Standardabweichung der Messdaten. Daher werden Versuche für Produktzulassungen in der Regel auf KiefernSplint und nicht auf Fichte durchgeführt. Bei der Diskussion der Ergebnisse wurde diese grössere Schwankungsbreite des Gewichtabbaus durch den Balken-Blättling berücksichtigt.

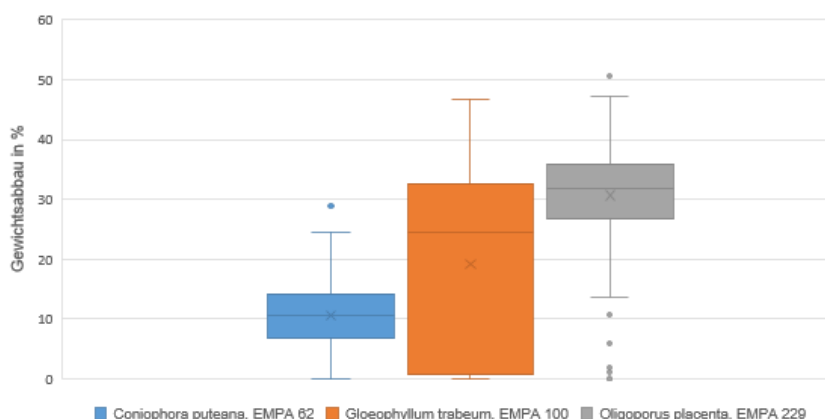


Abbildung 99 Mittlerer Gewichtsverlust aller Kontrollproben nach 16-wöchiger Pilzexposition

Grundsätzlich muss angemerkt werden, dass die Testkörper einen Einfluss auf den Gewichtsabbau der Kontrollproben haben können und umgekehrt. Der Pilz wird in der Kolleschale tendenziell immer das für ihn attraktivere Substrat bevorzugen.

➤ Biozidhaltige Öllasur

Im Originalzustand zeigte die biozidhaltige Öllasur eine gute Wirksamkeit gegenüber allen drei getesteten Braunfäuleerregern (siehe Abbildung 100, links), unabhängig von der Qualität des Untergrundes (verblaut / nicht verblaut).

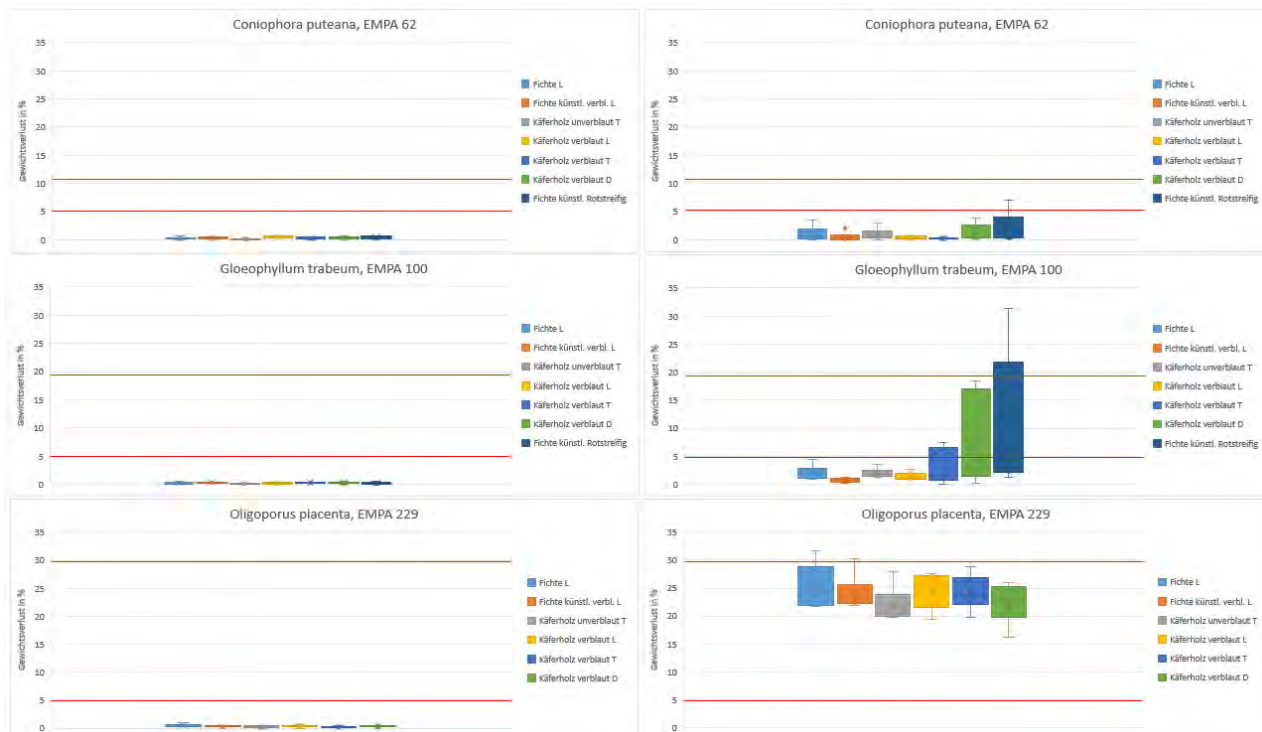


Abbildung 100 Wirksamkeit der biozidhaltigen Öllasur gegen ausgewählte Braunfäuleerreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung
braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte
rote Linie: Grenzwert 5 Gew.% Gewichtsverlust
 (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)

Beispielhaft zeigt Abbildung 101 Kolleschalen nach dem Versuch mit den drei Braunfäuleerregern. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Pilze gebührenden Abstand zur jeweils mit Biozid behandelten Probe hielten, während auf den unbehandelten Kontrollproben Myzel und teilweise bereits Fruchtkörper ausbildet wurden.



Abbildung 101 Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition;
 von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling;
 im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidhaltiger Öllasur und versiegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung)
 im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt

Nach einer 2-monatigen Freibewitterung war die Öllasur gegenüber dem Braunen Kellerschwamm (*Coniophora puteana*; 62) immer noch voll wirksam. Die verblauten Proben waren zu diesem Zeitpunkt noch ausreichend geschützt. Lediglich die Proben mit Rotstreifigkeit zeigten bereits einen beginnenden Substanzabbau (siehe Abbildung 100, rechts oben).

Unterschiede zwischen den verschiedenen Untergründen zeigten sich beim Versuch mit dem Balken-Blättling (*Gloeophyllum trabeum*; 100). Während die biozidhaltige Beschichtung auf den unverblauten Fichten-Proben und auch auf dem luftgetrockneten, verblauten Käferholz nach wie vor wirksam war, konnte sie den beginnenden Substanzabbau auf den technisch getrockneten und auf den gedämpften, verblauten Käferholz-Proben nicht mehr verhindern (siehe Abbildung 100, rechts Mitte). Die mittleren Gewichtsverluste der gedämpften Käferholz-Proben (7 Gew. %) und der rotstreifigen Proben (10 Gew. %) waren dabei am höchsten, aber immer noch deutlich tiefer als die Kontrollproben ohne Beschichtung (19 Gew. %).

Den Angriff des Rosafarbenen Saftporlings (*Oligoporus placenta*; 229) konnte die biozidhaltige Beschichtung im gealterten Zustand nicht mehr verhindern (Abbildung 102).

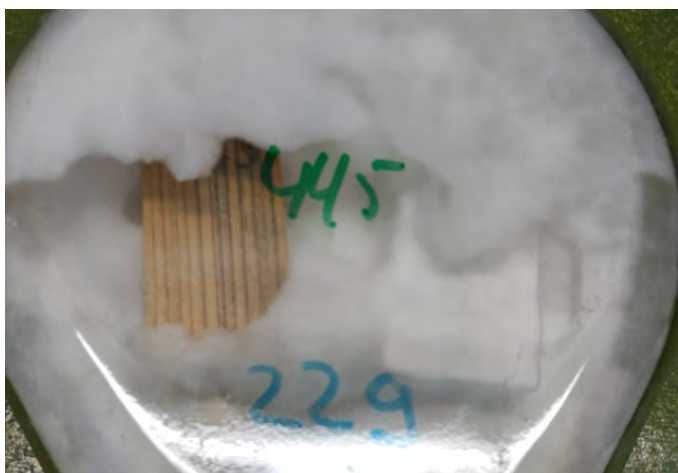


Abbildung 102 Kolleschale mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition mit Rosafarbenem Saftporling
 links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidhaltiger Öllasur und versiegelten Hirnflächen (nach 2-monatiger Bewitterung)
 rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt

Das Myzel des Saftporlings umschoss die verblaute Käferholz-Probe bereits teilweise. Aufgrund der Restaktivität der bioziden Beschichtung war jedoch die obere Prüfproben-Fläche noch nicht komplett überwachsen. Sowohl die unverblaute Fichte als auch das verblaute Käferholz wurden durch den Saftporling bereits deutlich und in einer vergleichbaren Grössenordnung (zwischen 20- 30 Gew. %) abgebaut. Die mittleren Gewichtsverluste waren jedoch noch unterhalb denen der Kontrollproben (30 Gew. %), da die bioziden Substanzen nach 2-monatiger Freibewitterung noch nicht vollständig aus der Beschichtung abgebaut bzw. ausgewaschen waren.

➤ Biozidfreier Holzlack

Bereits im Originalzustand konnte der Holzlack ohne biozide Ausrüstung einen beginnenden Substanzabbau durch den Braunen Kellerschwamm (*Coniophora puteana*; 62) nicht verhindern (siehe Abbildung 103, links oben). Dem Angriff des Rosafarbenen Saftporlings (*Oligoporus placenta*; 229) konnte sie nichts entgegenzusetzen (siehe Abbildung 103, links unten). Besonders stark wurden jeweils die gedämpften Proben abgebaut.

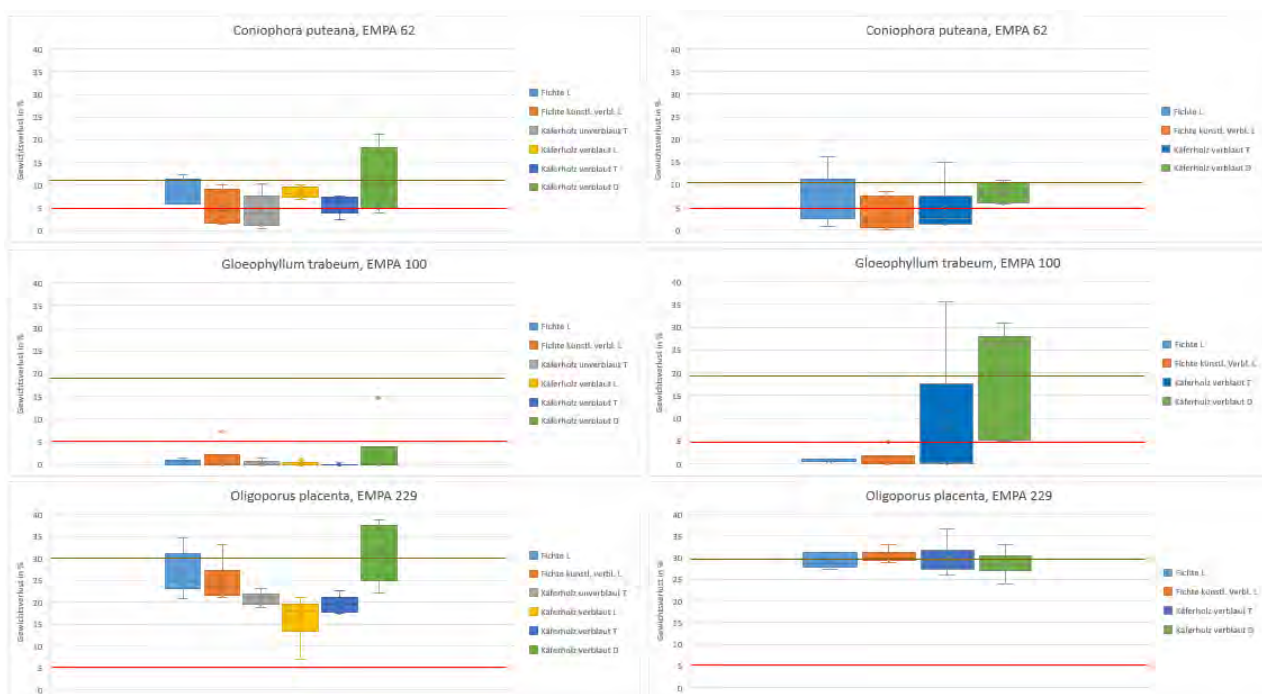


Abbildung 103 Wirksamkeit des biozidfreien Holzlackes gegen ausgewählte Braunfäuleerreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung
 braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte
 rote Linie: Grenzwert 5 Gew. % Gewichtsverlust
 (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)

Der Balken-Blättling (*Gloeophyllum trabeum*; 100) dagegen konnte an den Proben mit Beschichtung im Originalzustand innerhalb der 16 Wochen keine Substanz abbauen. Es war jedoch zu beobachten, dass der Pilz begann, sich bereits oberflächlich auf den Proben auszubreiten (siehe Abbildung 103, links Mitte).

Eine intakte Beschichtung kann somit bereits durch die Absperrowirkung einen gewissen Schutz gegen Pilzbefall bieten, auch wenn sie nicht biozid eingestellt ist. Diese physikalische Schutzwirkung ist jedoch nicht bei allen Pilzarten in der gleichen Intensität gegeben.



Abbildung 104 Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition;
 von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling;
 im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidfreier Beschichtung und
 versiegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung)
 im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt

Durch die 2-monatige Freibewitterung wurde die Beschichtung gealtert, so dass die Absperrwirkung nicht mehr voll zur Wirkung kam. Einige Proben aus verblautem Käferholz (technisch getrocknete als auch gedämpfte) wurden durch den Balken-Blättling bereits stark abgebaut, während die Proben der gesunden Fichte als auch das künstlich verblauten Holzes noch ausreichend gegen einen Pilzangriff geschützt waren (siehe Abbildung 103, rechts Mitte).

➤ Ohne Beschichtung (Mantelflächen unbehandelt; Hirnflächen versiegelt)

Bereits im Originalzustand wurden die Proben ohne beschichtete Mantelflächen durch die Pilze angegriffen und teilweise deutlich abgebaut (Abbildung 106, links). Der Gewichtsverlust durch den Braunen Kellerschwamm (*Coniophora puteana*; 62) als auch durch den Rosafarbenen Saftporling (*Oligoporus placenta*; 229) lag jeweils im Bereich der Kontrollproben aus komplett unbehandelter Fichte. Auch die gealterten Proben zeigten einen vergleichbaren Gewichtsverlust.

Wie schon beim Versuch mit der biozidfreien Beschichtung konnte auch in diesem Versuch beobachtet werden, dass eine biozidfreie Beschichtung oder wie hier die Versiegelung der Hirnholzflächen bereits zu einem gewissen physikalischen Schutz des Holzes gegen das Eindringen eines Pilzes führen kann. In Abbildung 105 ist das beispielsweise beim Braunen Kellerschwamm auf der Prüfprobe deutlich sichtbar. Das Myzel wächst hier nicht über die versiegelten Hirnflächen, sondern konzentriert sich auf die unbehandelten Mantelflächen.

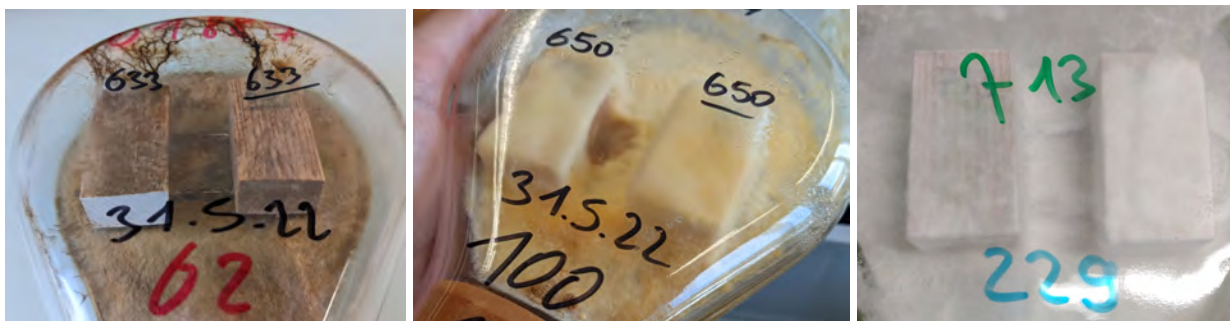


Abbildung 105 Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition;
 von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling;
 im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz ohne Beschichtung aber mit ver-
 siegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung)
 im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt

Die verblauten Käferholz-Proben zeigten schon im Originalzustand einen deutlichen Substanzabbau durch den Balken-Blättling (*Gloeophyllum trabeum*; 100), der teilweise bereits über dem Mittel der Kontrollproben lag (Abbildung 106, links Mitte). Noch ohne deutlichen Substanzabbau zeigten sich dagegen die Referenz-Proben und die Käferholzproben ohne Bläue.

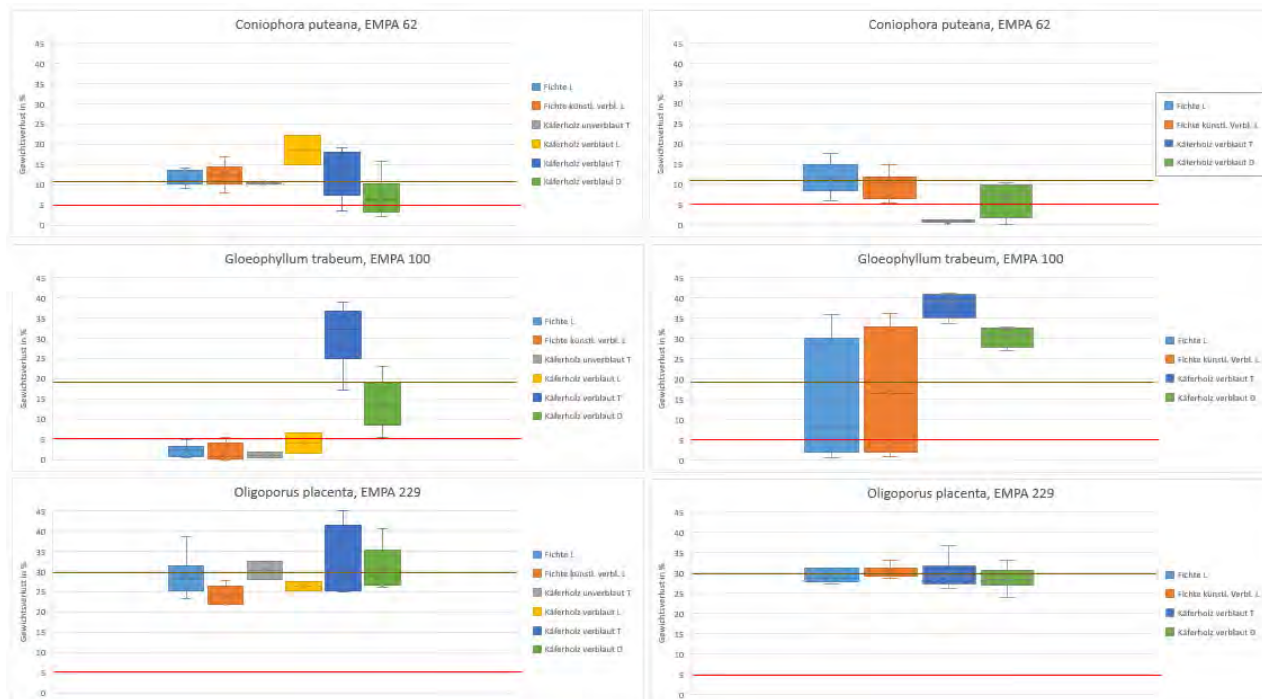


Abbildung 106 Wirksamkeit der unbehandelten Proben gegen ausgewählte Braunftäuleerreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung
braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte
rote Linie: Grenzwert 5 Gew. % Gewichtsverlust
 (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)

Nach 2-monatiger Freibewitterung wurden alle verblauten Käferholz-Proben massiv durch den Balken-Blättling abgebaut (Abbildung 106, rechts Mitte). Der Gewichtsverlust lag mit durchschnittlich 38 Gew. % deutlich über dem der Kontrollproben (19 Gew. %).

Auch die gedämpften, verblauten Käferholzproben wurden stark abgebaut (30 Gew. %).

Bei der luftgetrockneten Fichte als auch bei der künstlich verblauten Fichte wurden einzelne Proben bereits stark durch den Balken-Blättling abgebaut (maximaler Gewichtsverlust 36 Gew. %), wogegen andere noch ohne Gewichtsverlust (< 3 Gew. %) blieben. Mit durchschnittlichen Gewichtsverlusten von 14 Gew. % resp. 17 Gew. % waren sie jedoch mit den Kontrollproben vergleichbar, die ebenfalls grössere Schwankungen aufwiesen (vgl. Abbildung 99).

Zusammenfassend kann man sagen, dass gesunde Fichte sowie verblautes Käferholz in vergleichbarem Ausmass durch die Braunftäuleerreger Brauner Kellerschwamm (*Coniophora puteana*) sowie Rosafarbener Saftporling (*Oligoporus placenta*) abgebaut wurden.

Der Balken-Blättling (*Gloeophyllum trabeum*) konnte verblautes Käferholz früher und in stärkerer Intensität abbauen. Eine Behandlung durch Dämpfen machte das verblaute Käferholz in den meisten Fällen noch attraktiver für den Balken-Blättling.

Auch Kržišnik et al. (2018) fand statistisch höhere Gewichtsverluste am verblautem Käferholz durch die Braunftäuleerreger *Gloeophyllum trabeum* (41.6 Gew. %) und *Fibroporia vaillantii* (20.1 Gew. %). Der in unserer Studie ermittelte mittlere Gewichtsverlust von 38 Gew. % durch den Balken-Blättling stimmt sehr gut mit deren Ergebnissen überein. **Kržišnik fand in seiner Studie keinen statistisch signifikanten Unterschied für den Abbau durch Weissfäuleerreger (*Trametes versicolor*).**

6.2.15 Orientierende Bestimmung der gefundenen Pilze im Käferholz

Die orientierende Bestimmung der gefundenen Pilzarten erfolgte aufgrund makroskopischer und mikroskopischer Merkmale (Barnett 1960) sowie bei den Basidiomyceten durch eine ergänzende DNA-Sequenz-Analyse.

Lichtmikroskopie

20-30 µm dünne Quer- und Längsschnitte (radial und tangential) wurden mit einem Schlittenmikrotom aus kleinen Holzblöcken der Gruppe Nr. 1 und aus gebrochenen Proben (3-P-Biegung) der Gruppen Nr. 3 und 4 geschnitten. Die Schnitte wurden mit 2 %iger wässriger Astra-Blau- und anschließend mit 2 %iger wässriger Safranin Lösung gefärbt. Die Hyphen der Bläuepilze (Ascomyceten) sind dunkelbraun pigmentiert, während die nicht verholzten Teile wie z.B. die nicht pigmentierten Hyphen der holzabbauenden Pilze (Basidiomyceten) blau gefärbt sind. Zusätzlich wurden auch die extrahierten Sporenlösungen untersucht.

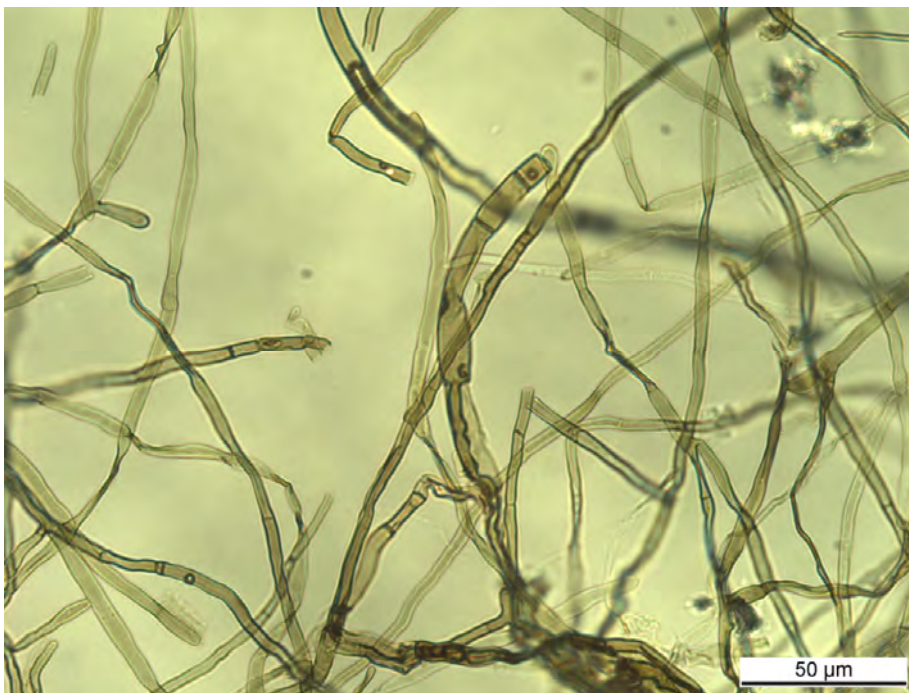


Abbildung 107 Braun pigmentierte Hyphen eines Bläueerregers

Die in Abbildung 107 dargestellten braunen Hyphen verursachen die typische Verfärbung des Holzes, welches aufgrund der Lichtbrechung blau bis grau erscheint. Die Hyphen wachsen über die Holzstrahlen (Abbildung 108) ins Innere des Stammes, gelangen von dort über die Kreuzungsfeldtüpfel in die Tracheiden und verbreiten sich von dort aus in axialer Richtung weiter.

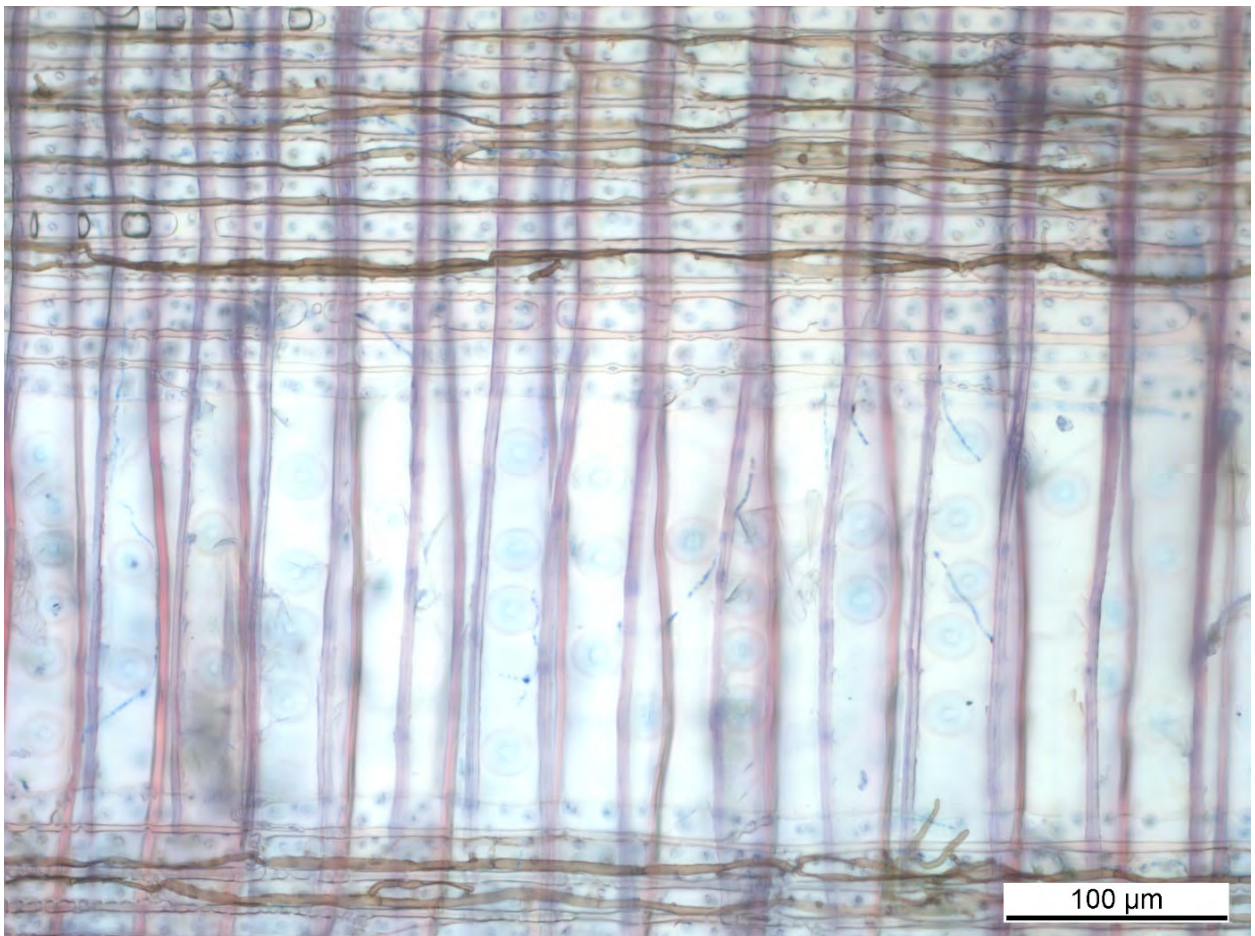


Abbildung 108 Kreuzungsfelder mit diversen braunen Bläuehyphen in den Holzstrahlen sowie dünne, blau gefärbte Hyphen von Basidiomyceten

In den Sporenlösungen wurden neben diversen Schimmelpilzen (Abbildung 110, Abbildung 111) und Bläuerregern (Abbildung 109) auch Hyphen von Basidiomyceten, vermutlich *Stereum*-Arten (Abbildung 112), gefunden.

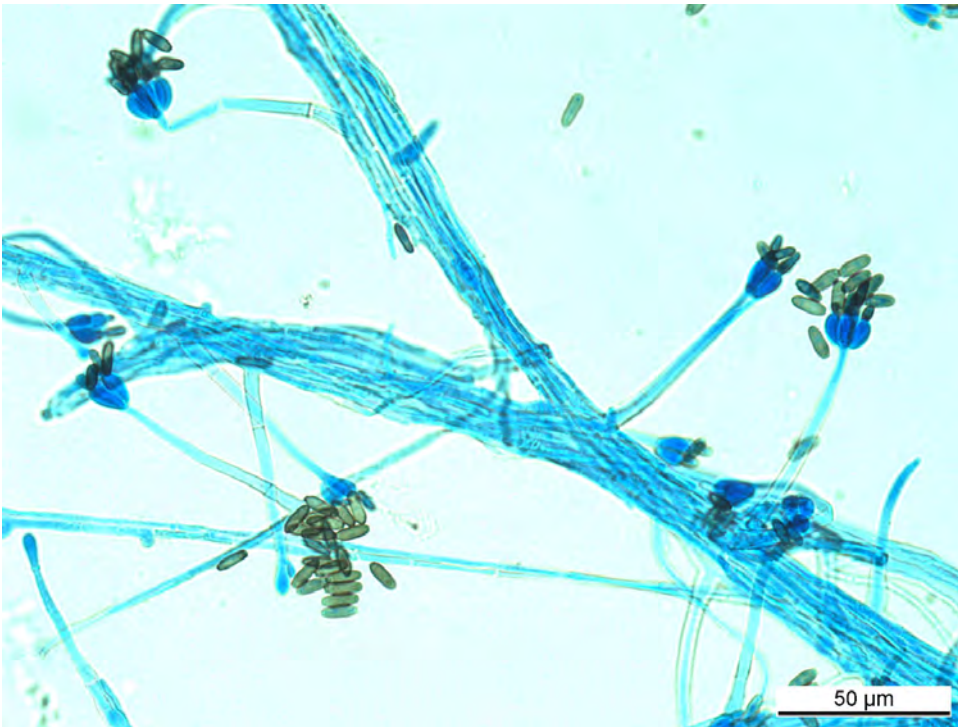


Abbildung 109 Hyphen und pigmentierte Konidio-Sporen eines Bläuerregers, vermutlich *Ophiostoma*

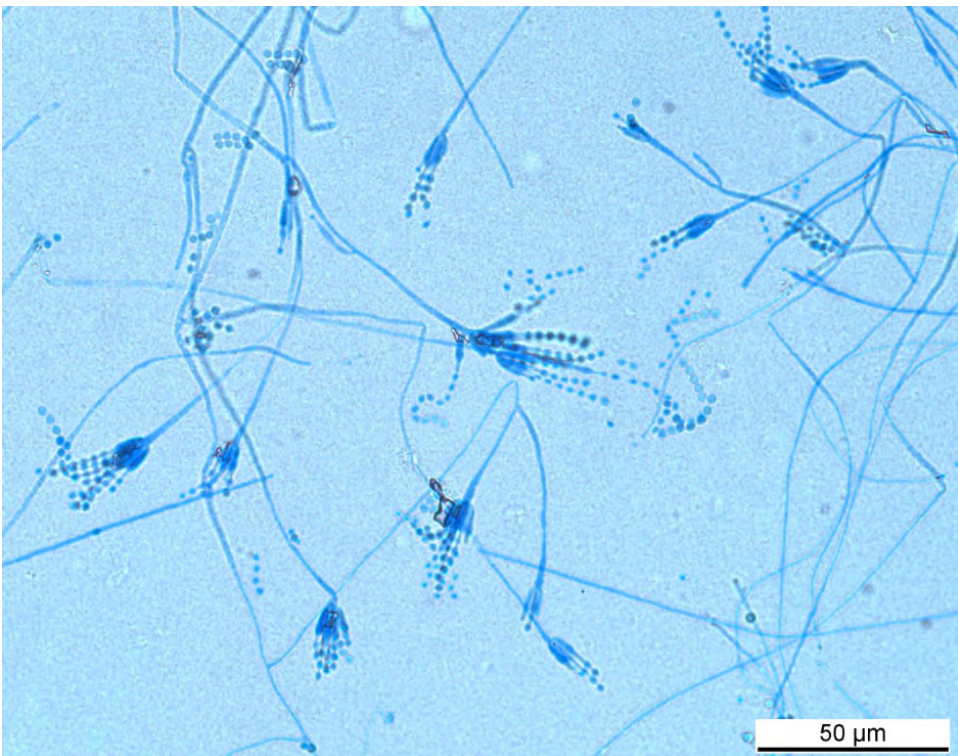


Abbildung 110 Unpigmentierte Hyphen und Sporen eines Schimmelpilzes, vermutlich *Penicillium*

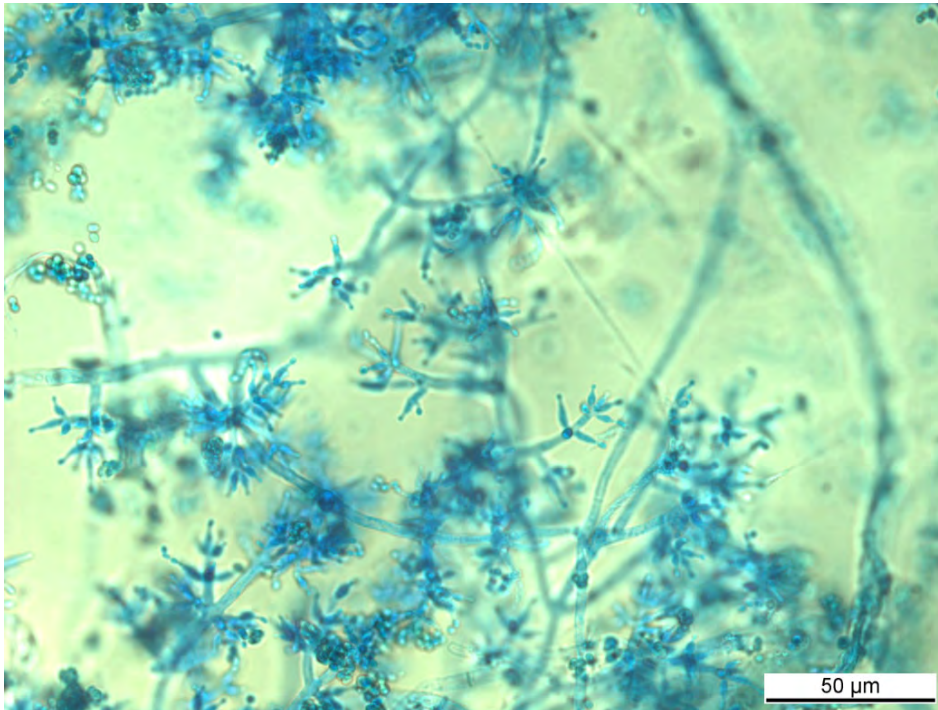


Abbildung 111 Blau gefärbte Hyphen und Sporen eines Schimmelpilzes, vermutlich Trichoderma

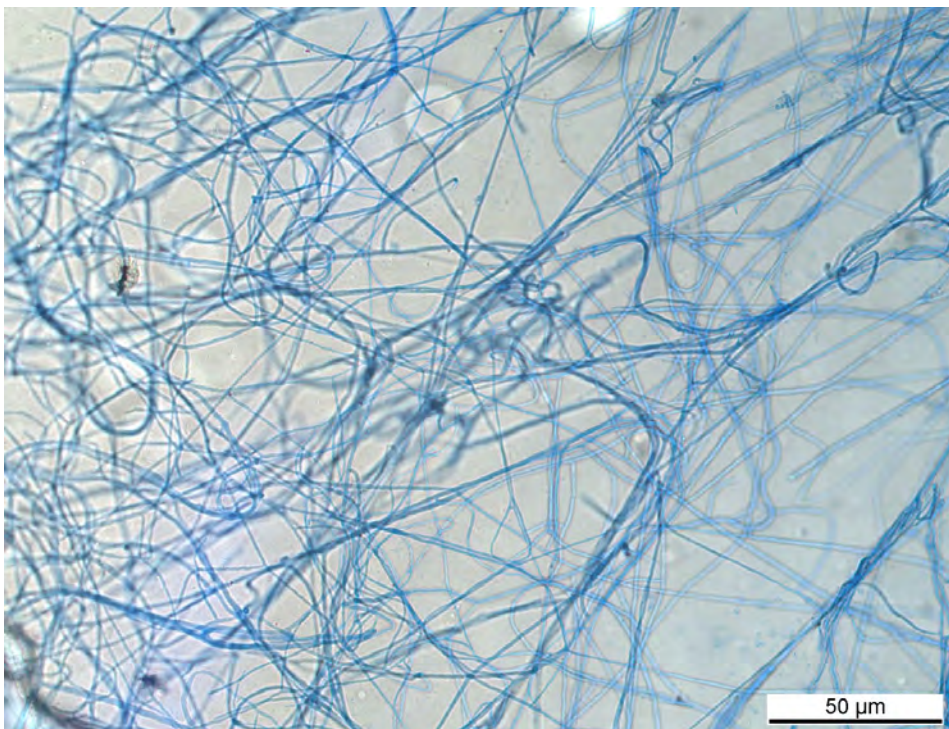


Abbildung 112 Blau gefärbte Hyphen eines Basidiomyceten, vermutlich Stereum

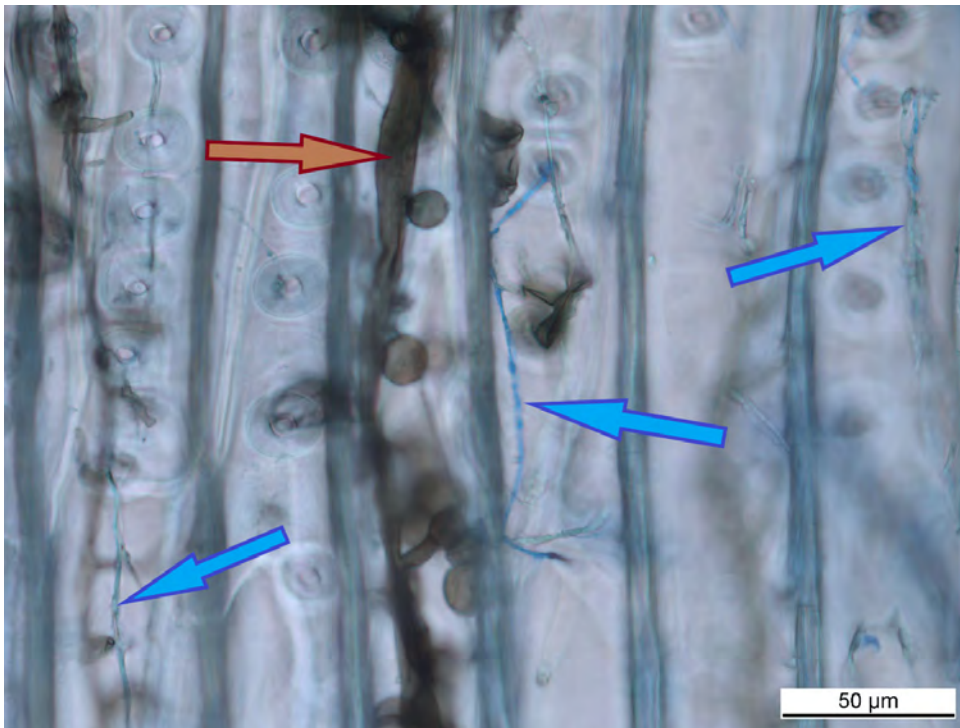


Abbildung 113 Tracheiden mit braunen Bläuehyphen (oranger Pfeil) und blaue gefärbten Hyphen von Basidiomyceten (blaue Pfeile)

Bei den Dünnschnitten konnten ebenfalls Basidiomyceten gefunden werden, die teilweise in benachbarten oder in den selben Tracheiden vorkamen, wie die Bläuepilze (Abbildung 113).

Rasterelektronenmikroskopie

Aus einigen Proben der Gruppen 3 und 4 wurden kleine Würfel herausgetrennt, auf Kohlenstoffhalter geklebt und mit 7 nm Platin beschichtet. Anschliessend wurden die Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Bläuehyphen sind in vielen Tracheiden zu finden. Sie wachsen von den Holzstrahlen aus durch die Kreuzfeldtüpfel in die Tracheiden und verbreiten sich von dort weiter durch die Hoftüpfel von Tracheide zu Tracheide (Abbildung 114). Gegebenenfalls durchstossen sie auch Zellwände, um in die nächste Tracheide zu gelangen.

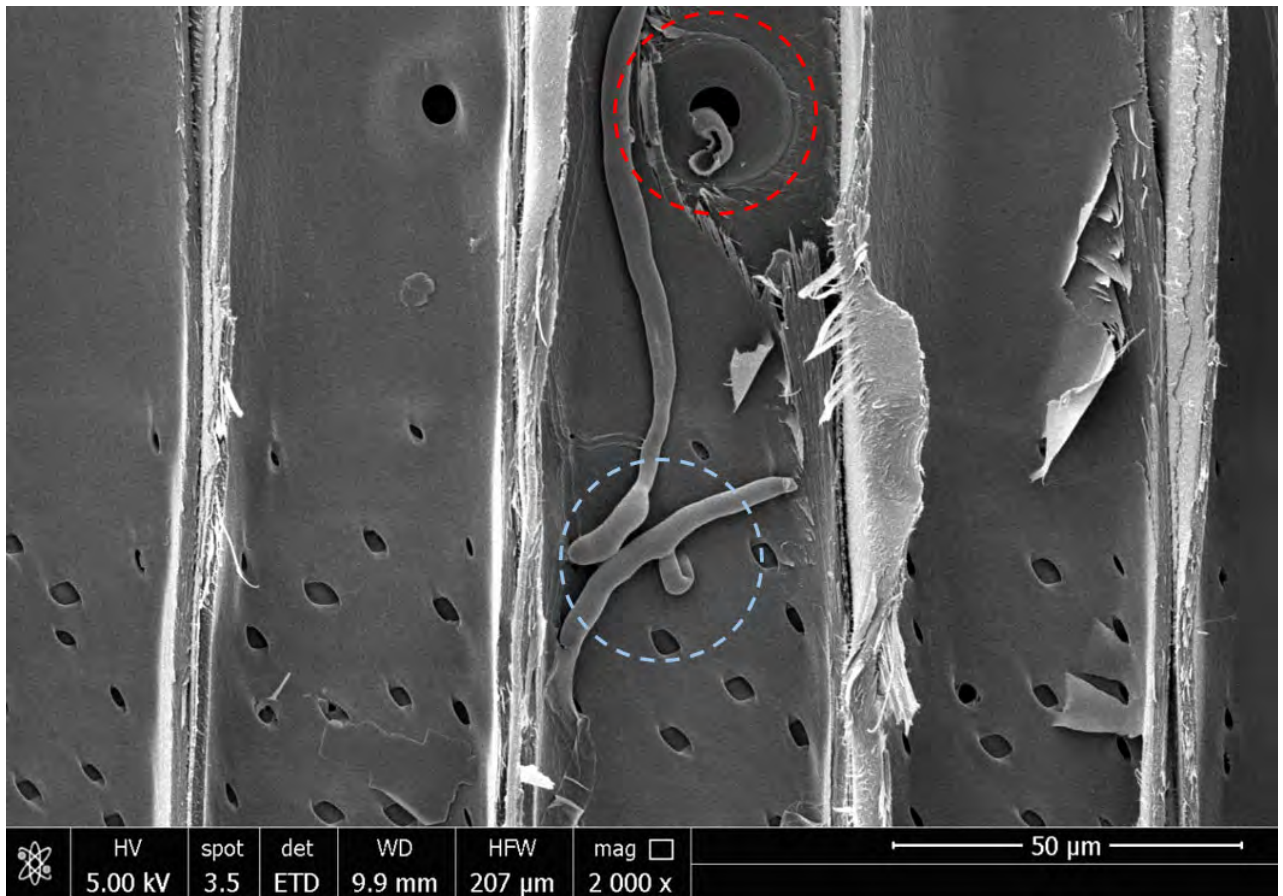


Abbildung 114 Hyphen wachsen durch die Kreuzfeldtüpfel (blau) als auch durch die Hoftüpfel (rot)

In den verblauten Splintholzproben waren neben den dicken Bläuehyphen auch dünnere Hyphen zu finden, welche den Basidiomyceten zugeordnet werden können (Abbildung 115). Viele Basidiomyceten bilden charakteristische Schnallen über den Querwänden (Septen) aus (siehe Abbildung 116).

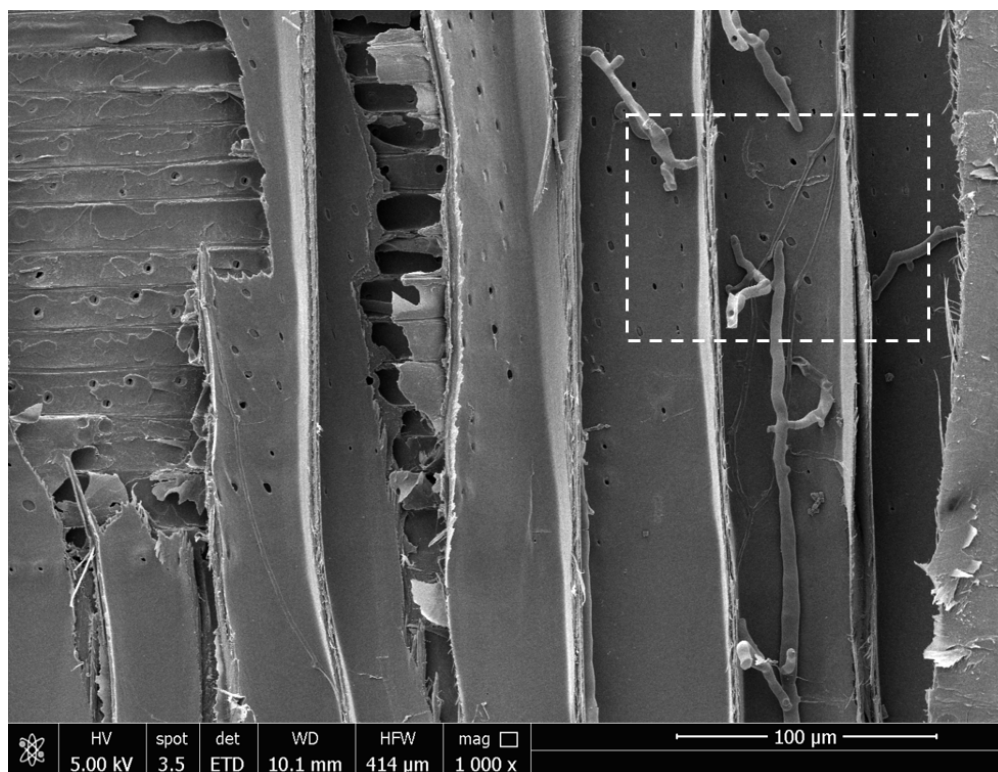


Abbildung 115 Tracheiden mit Kreuzfeldtöpfeln und Hyphen von Bläuepilzen sowie von Basidiomyceten; weiss markierter Bereich siehe Abbildung 116)

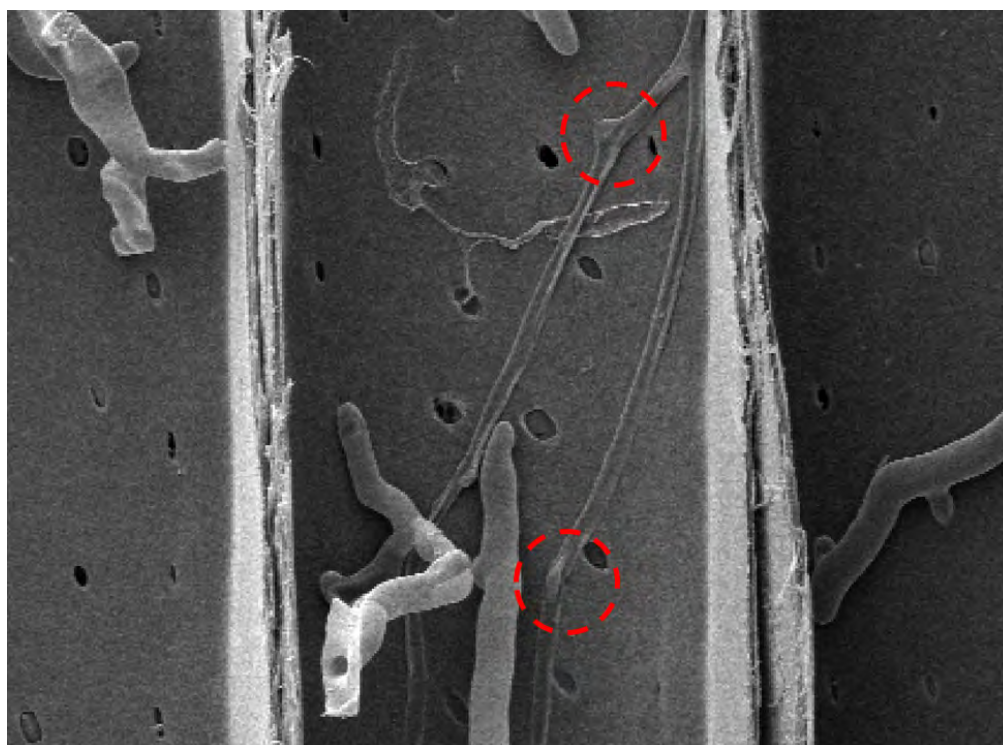


Abbildung 116 Dünne Hyphen mit für Basidiomyceten charakteristischen Schnallen (rot markiert)

Sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch unter dem Rasterelektronenmikroskop konnten in den verblauten Splintholzproben sowohl Hyphen von Bläuepilzen als auch Hyphen von holzabbauenden Basidiomyceten gefunden werden. Diese kamen oft nebeneinander in denselben Tracheiden vor.

Bestimmung mittels DNA-Sequenz-Analyse

Für eine genauere Zuordnung der gefundenen Basidiomyceten wurde eine DNA-Sequenz-Analyse diverser Proben (Pilzisolat) durch die Firma Biolytix (www.biolytix.ch) durchgeführt.

Bei der **DNA-Sequenz-Analyse** (DNA-Sequenzierung) wird durch molekularbiologische Methoden die Basenabfolge in der DNA bestimmt und bioinformatisch mit anderen DNA-Sequenzen verglichen. Die Ähnlichkeit der Sequenzen gibt Aufschluss über die Verwandtschaft zweier Organismen. Gleichzeitig können so unbekannte Organismen mit bekannten DNA-Sequenzen in Datenbanken abgeglichen und so bestimmt werden.

Auszüge aus den Testberichten der Fa. Biolytix:

" Der vorliegende Pilz zeigte bei der DNA-Sequenz-Analyse mit anschliessendem NCBI-Datenbank-Vergleich die höchste Übereinstimmung mit in der Datenbank hinterlegten DNA-Sequenzen von Vertretern von *Xylobolus sp.* und *Stereum sp.* (höchste Übereinstimmung von 99.79%, mit 1336 von 1339 Basenpaaren für eine hinterlegte DNA-Sequenz von *Xylobolus subpileatus* und für eine DNA-Sequenz von *Stereum ostrea*);
Namen: *Xylobolus* und *Stereum* Synonyme

Der vorliegende Pilz zeigte bei der DNA-Sequenz-Analyse mit anschliessendem NCBI-Datenbank-Vergleich die höchste Übereinstimmung mit in der Datenbank hinterlegten DNA-Sequenzen von Vertretern von *Xylobolus sp.* und *Stereum sp.* (höchste Übereinstimmung von 99.78%, mit 1338 von 1341 Basenpaaren für eine hinterlegte DNA-Sequenz von *Stereum ostrea*; 99.78% Übereinstimmung mit 1337 von 1340 Basenpaaren für eine DNA-Sequenz von *Xylobolus subpileatus* und eine ebenso hohe Übereinstimmung für eine in der Datenbank vorhandene DNA-Sequenz von *Stereum gausapatum*).
Namen: *Xylobolus* und *Stereum* Synonyme. "

Alle analysierten Proben konnten den Basidiomyceten; Familie der Schichtpilzverwandten (Gattung *Stereum* und Gattung *Xylobolus*) zugeordnet werden.

Eine genaue Bestimmung der jeweiligen Art war unter den gegebenen Umständen (Probenumfang und Testaufwand) jedoch nicht möglich.

Die automatische Zuordnung (mit einer prozentualen Übereinstimmung von knapp 99.8%) der untersuchten Proben zu typischen DNA-Sequenzen verschiedener Arten, welche bereits in der Datenbank gespeichert waren, ergab keine für Fichte typischen *Stereum*-Arten. Der oben aufgeführte Mosaikschichtpilz (*Xylobolus subpileatus*) sowie die *Stereum*-Arten Zottiger Eichenschichtpilz (*Stereum gausapatum*) und Braunsamtiger Schichtpilz (*Stereum ostrea*) kommen vor allem an Laubholz vor.

Die DNA-Sequenz-Analyse bestätigte, trotz der fehlenden Zuordnung zu einer Art, unsere mikroskopische Bestimmung der Hyphen und Sporen und die Zuordnung zur Gattung *Stereum*. Pilze der Gattung ***Stereum* sind Weissfäuleerreger**, das heisst, sie können Lignin aufspalten und abbauen und damit das Holz schädigen.

Einige *Stereum*-Arten wie z.B. der Blutende Schichtpilz (*Stereum sanguinolentum*) sind bei Fichte für die sogenannte Rotstreifigkeit verantwortlich, wie sie auch bei unseren Proben der Gruppe 4 bereits gut sichtbar war. Rotstreifigkeit signalisiert eine starke Gefährdung der Holzqualität (Kleist, 2001).

6.3 AP4 – Oberflächliche Entfärbung

Im AP4 wurden diverse Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur oberflächlichen Entfärbung des verblauten Fichtenholzes diskutiert und getestet. Dabei kamen bekannte Methoden zum Einsatz, die in anderen Bereichen wie z.B. Faser- und Papierherstellung, Textiltechnik, aber auch Kosmetik und Medizin bereits erfolgreich angewendet werden. Ein Überblick zu den verschiedenen Methoden gibt Abbildung 117.

Die Verfahren 'Chemisches Bleichen', 'Elektromagnetische Wellen' sowie 'Ultraschall' wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht. Sämtliche Angaben bezüglich Material und Methoden sowie die detaillierten Ergebnisse können in der Bachelorarbeit (Schriber 2021) nachgelesen werden.

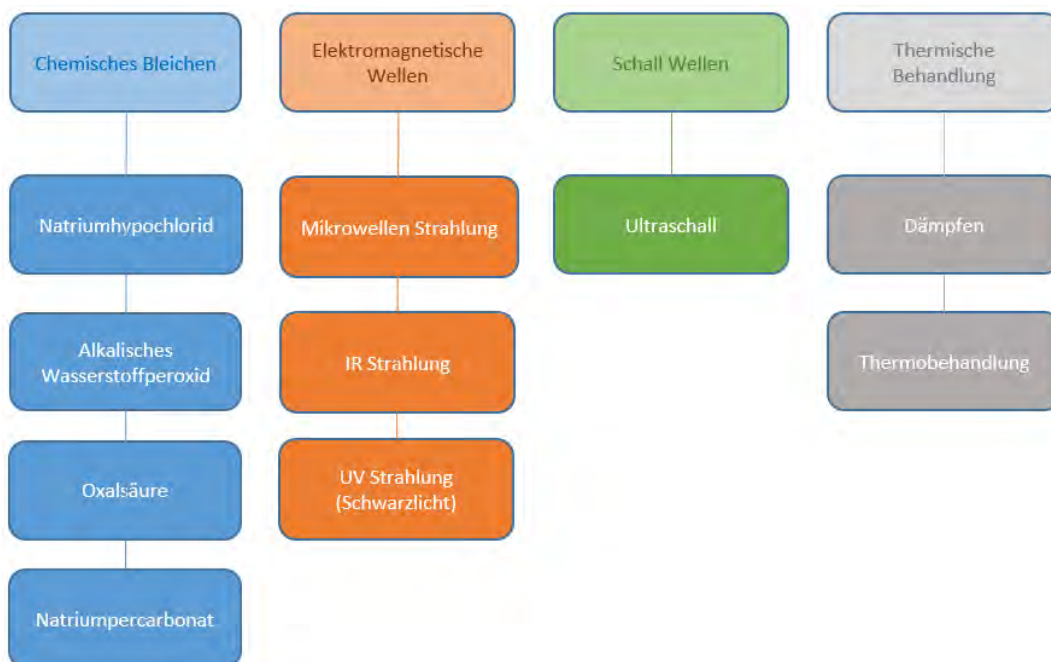


Abbildung 117 Getestete Methoden zur oberflächlichen Entfärbung der verblauten Fichte

In den folgenden Unterkapiteln wird aufgezeigt, ob sich der erhebliche Farbabstand ΔE durch die verschiedenen Verfahren verringern lässt.

6.3.1 Chemisches Bleichen

Für das chemische Bleichen der verblauten Oberflächen wurden folgende Bleichmittel ausgewählt:

- Natriumhypochlorit
- Alkalisches Wasserstoffperoxid
- Oxalsäure
- Natriumpercarbonat

Die Bleichmittel wurden in verschiedenen Konzentrationen und Mengen aufgetragen. Einige der benetzten Oberflächen wurden anschließend mit UV- bzw. IR-Strahlung behandelt, um den Bleichprozess zu intensivieren und das Ergebnis zu verbessern.

Weiterführende Informationen über Material, Methoden und Ergebnisse siehe (Schriber 2021).

Die wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst:

- Chemisches Bleichen mit 1%iger bzw. 6%iger Oxalsäure führte zu einer ungewollten rötlichen Verfärbung der Oberfläche. Der Farbabstand ΔE zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen änderte sich durch die Behandlung nicht (Abbildung 118).

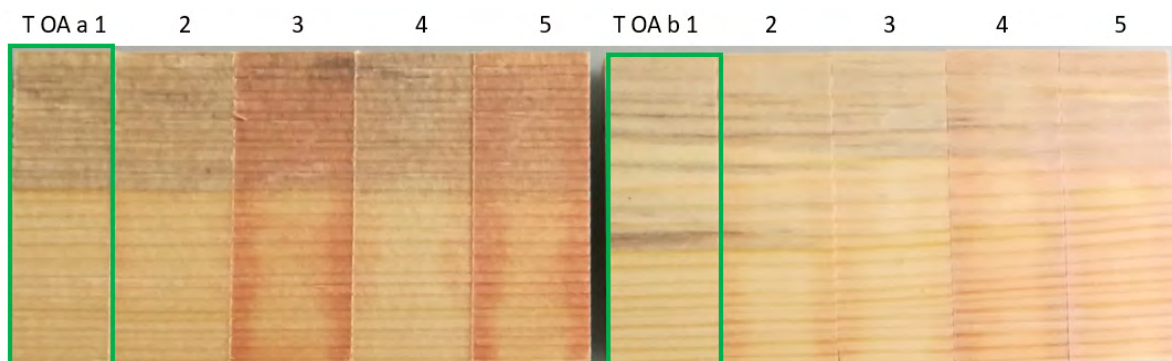


Abbildung 118 Proben nach dem Bleichen mit Oxalsäure
(unbehandelte Original-Probe grün markiert)

Bleichen mit Oxalsäure ist für eine Entfärbung der Verblauung an Vollholz nicht geeignet.

- Chemisches Bleichen mit 1%igem bzw. 5%igem Wasserstoffperoxid und anschliessende 30 Sekunden Behandlung mit IR-Strahlung führte zu ungleichmässigen Farbänderungen und teilweise sehr rauen Oberflächen (Abbildung 119). Der Farbabstand ΔE zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen reduzierte sich um maximal 6 Einheiten von $\Delta E = 13.9$ auf $\Delta E = 7.7$ (Probe e).

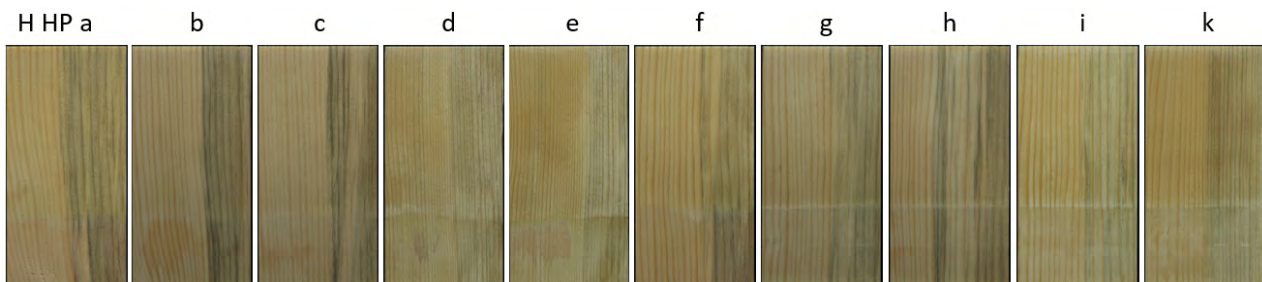


Abbildung 119 Proben nach dem Bleichen mit Wasserstoffperoxid und IR-Bestrahlung
(Probengrösse 150 mm x 74 mm)

Bleichen mit Wasserstoffperoxid ist für eine Entfärbung der Verblauung an Vollholz nicht geeignet.

- Chemisches Bleichen mit 5%igem bzw. 14%igem Natriumhypochlorit und anschliessender 30 Sek. Behandlung mit IR-Strahlung führte zu den besten Ergebnissen (Abbildung 120). Der Farbabstand ΔE zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen reduzierte sich um maximal 7 Einheiten von $\Delta E = 12.2$ auf $\Delta E = 5.4$ (Probe d).

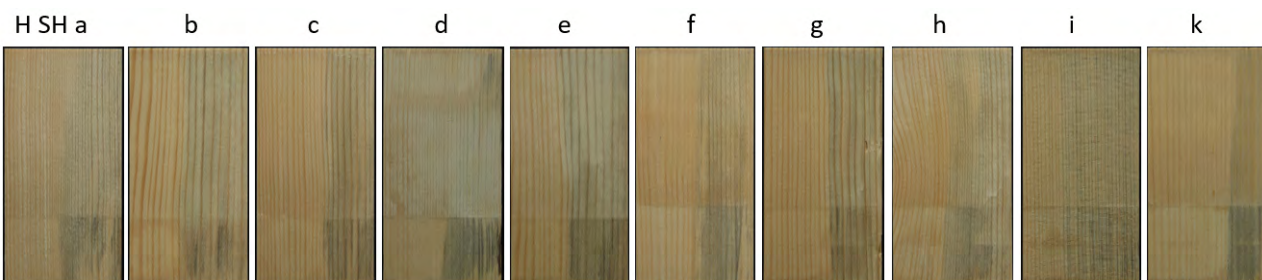


Abbildung 120 Proben nach dem Bleichen mit Natriumhypochlorit und IR-Bestrahlung
(Probengrösse 150 mm x 74 mm)

Gleichzeitig führte die Behandlung mit 14%igem Natriumhypochlorit zu sehr rauen Oberflächen mit Ablagerungen (Abbildung 121). Bleichen mit Natriumhypochlorit zeigt bezüglich der Entfärbung der Verblauung an Vollholz ungenügende Ergebnisse.

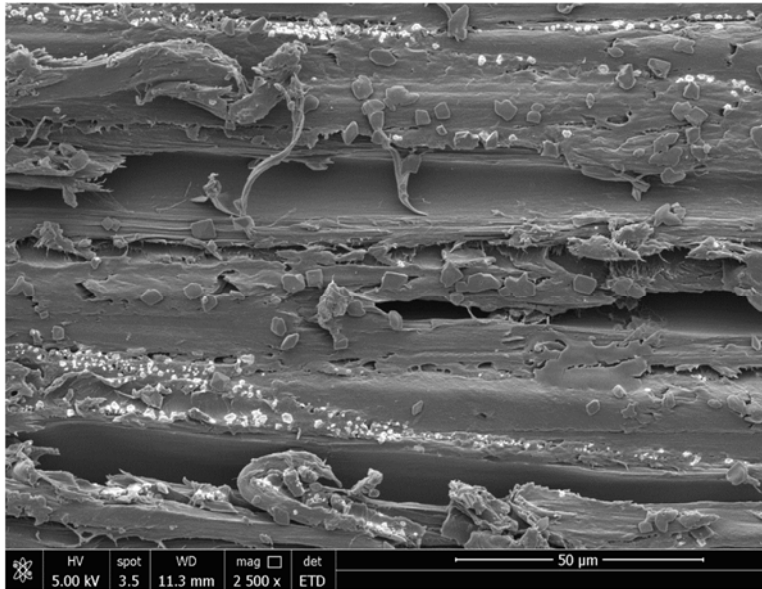


Abbildung 121 REM-Aufnahme; Ablagerungen nach Bleichen mit Natriumhypochlorit

- Chemisches Bleichen mit 10%igem Natriumpercarbonat führte zu einer gelbgrünen Verfärbung der Holzoberfläche mit relativ starken Salzablagerungen und einer ungleichmäßigen, ungenügenden Entfärbung der verblauten Bereiche (Abbildung 122). Daher wurden keine weiteren Versuche durchgeführt.



Abbildung 122 Unbehandelt (links) und nach Behandlung mit Natriumpercarbonat-Lösung (rechts)

Bleichen mit Natriumpercarbonat ist als Entfärbungsmethode an Vollholz ebenfalls ungeeignet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die schlechte Tränkbarkeit der Fichte einer der wesentlichen Gründe für die schlechte Performance beim chemischen Bleichen darstellt. Die Chemikalien dringen über die Radial- und Tangentialflächen nur ungenügend in die Holzstruktur ein und können somit einen erheblichen Teil der mit Melanin gefüllten Pilzhyphen nicht erreichen. Gleichzeitig wird über die Querschnittsflächen (Hirnholz) zu viel Material aufgenommen und führt in den angrenzenden Bereichen meist zu ungewollten Farbveränderungen.

Keine der getesteten Methoden zeigte zufriedenstellende Ergebnisse, die eine Integration des Bleichprozesses in die Lamellen-Produktion rechtfertigen würde.

6.3.2 Elektromagnetische Wellen und Ultraschall

- **Keine Methode aus den Bereichen 'Elektromagnetische Wellen' und 'Ultraschall' konnte eine zufriedenstellende Entfärbung der verblauten Bereiche erreichen.**

Die anregende Strahlung konnte meist nicht mit ausreichender Intensität an das Melanin gelangen, da ein Großteil der Strahlung bereits von der Holzmatrix absorbiert wurde.

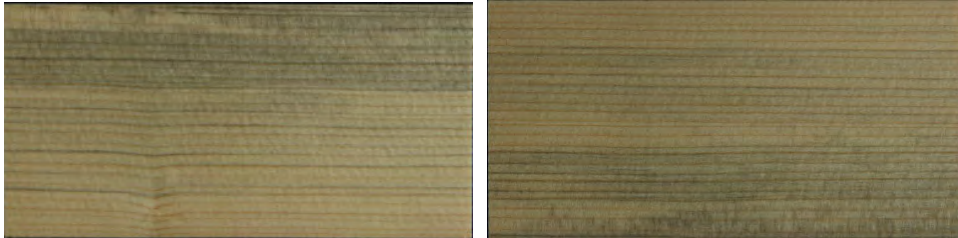


Abbildung 123 Behandlung mit Blitzlampe (links) und Ultraschall (rechts)



Abbildung 124 UV-LED-Lampe (links ohne; rechts nach 30 min)



Abbildung 125 IR-Strahlung (oberer Bereich Original; unten nach 3, 4, 5, 6 min IR-Strahlung)

Die Behandlung mit IR-Strahlung führte erwartungsgemäss zu einer pyrolytischen Zersetzung der Holzoberfläche mit einem beginnenden Abbau von Lignin und Polyosen. Die Holzoberfläche färbte sich braun (Abbildung 125). Allerdings zeigte sich, dass die verblauten Bereiche wesentlich stärker auf die Wärmestrahlung reagierten als die nicht verblauten Bereiche. Es war daher nicht möglich, über die gesamte Probe einen einheitlichen braunen Farbton zu erzeugen. Ursprünglich verblaute Bereiche zeigten immer eine dunklere braune Färbung als das restliche Holz. Zudem hoben sich bereits nach 4 min kleinere dunkle Flecken ab, die durch eine Reaktion des Harzes zu erklären sind.

6.3.3 Thermische Behandlung im Ofen

Für eine oberflächliche Farbänderung wurden gehobelte Proben ($u=12\%$) mit einer Abmessung von 150 mm x 75 mm x 20 mm im Ofen bei 230°C für 45 min wärmebehandelt.

Probenserie 1 mit 6 Proben fungierte als Referenzmaterial ohne Bläue (Abbildung 126). Die Probenserien 2 und 3 mit jeweils 8 Proben (Abbildung 127) wurden aus verblautem Material der Charge II (siehe Kap. 6.1.1) zugeschnitten.

Alle Proben innerhalb einer Serie sind Folgeproben, wobei jeweils jede zweite Probe thermisch behandelt wurde. So war auch nach der Behandlung ein sehr guter optischer Vergleich der Farbentwicklung möglich.



Abbildung 126 Referenz-Proben ohne Bläue; Serie 1
(Probe 1,3 und 5 Original; Probe 2, 4 und 6 thermisch behandelt)



Abbildung 127 Proben der Serie 2 und 3 mit Bläue
(Proben 1,3, 5 und 7 Original; Probe 2, 4, 6 und 8 thermisch behandelt)

Die oberflächliche Farbänderung war im Vergleich zur Behandlung mit IR-Strahlung wesentlich gleichmäßiger. Äste zeichneten sich jedoch nach der Hitzebehandlung durch das Austreten von Harz deutlicher ab (siehe Abbildung 127). Im Inneren der Proben zeigte sich eine stärkere Braunfärbung der verblauten Bereiche (siehe Abbildung 128), was bedeutet, dass bei einer mechanischen Nachbehandlung der Oberflächen (z.B. Hobeln) der Unterschied zwischen nicht verblauten und verblauten Bereichen wieder etwas stärker zu sehen wäre.



Abbildung 128 Querschnitte aufgetrennter Proben von Serie 1, 2 und 3
(Die weiss gestrichelte Linie zeigt in etwa den Verlauf der Grenze zwischen unterblauten Bereichen links und verblauten Bereichen rechts)

An den unbehandelten und an den thermisch behandelten Proben wurden Farbmessungen durchgeführt. Pro Probe der Serie 1 wurden jeweils 6 Einzelmessungen durchgeführt. Pro Probe der Serien 2 und 3 wurden jeweils 3 Einzelmessungen im unverblauten (A) und 6 resp. 3 Einzelmessungen im verblauten (B) Bereich vorgenommen.

Tabelle 18 Ergebnis der Farbmessung an den technisch getrockneten Brettern vor und nach 45 min Hitzebehandlung bei 230°C (A unverblaut, B verblaut)

VOR der Hitzebehandlung				NACH der Hitzebehandlung			
SCE	L*	a*	b*	SCE	L*	a*	b*
A Serie 1	83.18	4.42	23.37	A Serie 1	53.79	11.65	26.80
A Serie 2+3	84.64	3.63	22.00	A Serie 2+3	52.70	10.93	23.56
B Serie 2+3	76.88	1.90	16.04	B Serie 2+3	51.69	10.15	21.96

Mittelwerte aus jeweils 18 Einzelmessungen (Serie 1), 12 bis 24 Einzelmessungen (Serie 2), 12 Einzelmessungen (Serie 3)

Wie schon bei der IR-Bestrahlung wurde auch bei der Wärmebehandlung im Ofen durch eine pyrolytische Zersetzung der Holzoberfläche eine Braunfärbung erreicht. Durch die Hitzebehandlung wurden alle Proben dunkler ($L^* \downarrow$) und zugleich rötlicher ($a^* \uparrow$) und weniger bläulich ($b^* \uparrow$).

Durch die Hitzebehandlung veränderte sich die Holzoberfläche aller Proben deutlich, mit einer durchschnittlichen Farbänderung von $\Delta E = 30$ bis 33 für die unverblauten Bereiche (A) und $\Delta E = 27$ für die verblauten Bereiche (B).

Tabelle 19 Farbabstand ΔE der technisch getrockneten Brettern vor und nach 45 min Hitzebehandlung bei 230°C (A unverblaut, B verblaut)

Delta E	SCE		SCI	
	Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
A Serie 1	30.48	1.88	30.67	1.88
A Serie 2+3	32.82	2.94	32.81	2.86
B Serie 2+3	27.21	1.78	27.21	1.78

Die Daten basieren auf den Messwerten in Tabelle 18

Vor der Hitzebehandlung war die Farbdifferenz zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen im Durchschnitt bei $\Delta E = 10$. Durch die Behandlung reduzierte sich diese Farbdifferenz auf einen Wert von $\Delta E = 2$.

Der Farbabstand zwischen den verblauten und den unverblauten Oberflächen verringerte sich durch die Hitzebehandlung signifikant. Bei einem gemessenen Farbabstand von $\Delta E = 2$ ist dieser kaum noch durch das menschliche Auge wahrnehmbar.

Neben der sehr positiv zu bewertenden Farbentwicklung ist jedoch mit einem Masseverlust und einer Dimensionsänderung der Proben zu rechnen. Nach 4 Wochen Lagerung im Normklima 20/65 konnten die in Tabelle 20 dargestellten Dimensions- und Masseverluste gemessen werden.

Tabelle 20 Dimensions- und Masseänderung durch Hitzebehandlung

	Dimensionsänderung in %		Masseänderung
	longitudinal	radial/tangential	in %
Serien 1	-0.01	-1.7	-7.8
Serien 2+3	0.03	-2.0	-6.9

Hitzebehandlung 45 min bei 230°C

Dieser Masseverlust ist vergleichbar zu den in der Literatur beschriebenen Kennzahlen (Icel, Guler et al. 2015).

Durch eine kurzzeitige Hitzebehandlung der verblauten Proben kann neben einer akzeptableren Farbgebung auch eine massive Reduktion der Flüssigwasseraufnahme in den verblauten Bereichen erreicht werden (siehe Kap. 6.2.10).

Negative Auswirkungen auf die Applikation der Testbeschichtungen wurden nicht beobachtet.

6.3.4 Dämpfen

Der Dämpfprozess wurde in einer kleinindustriellen Anlage durchgeführt. Das Holz wurde während 14 Tagen bei milden Temperaturen unter 100°C mit reinem Wasserdampf behandelt, um eine sanfte Farbänderung zu erreichen und um die Dimensionsstabilität des Holzes zu verbessern.

Im ersten Versuch wurden drei technisch getrocknete Bretter (Material Gruppe 3, $u=12^\circ$) gedämpft. Die Oberfläche der drei Bretter war jeweils zur Hälfte feingesägt und zur anderen Hälfte gehobelt. Nach dem Dämpfen wurden die Oberflächen nochmals entsprechend des Ausgangszustandes überarbeitet. Abbildung 129 zeigt die drei verblauten Bretter vor und nach dem Dämpfen.

Vor und nach dem Dämpfen wurde die Farbe an den Brettoberflächen gemessen. Pro Brett wurden 20 Einzelmessungen vorgenommen, jeweils 10 im verblauten und 10 im unverblauten Bereich. Mit Hilfe einer Schablone wurde sichergestellt, dass die Ausgangsmessung und die Messung nach dem Dämpfen an derselben Stelle durchgeführt wurden.



Abbildung 129 Bretter vor dem Dämpfen (links) und nach dem Dämpfen (rechts); oberer Bereich: feingesägt; unterer Bereich: gehobelt

Bereits ohne Farbmessungen wurde deutlich, dass ein Dämpfen von technisch getrockneter Schnittware nicht zum gewünschten Ergebnis führt. Die Bereiche mit Verblauung waren auch nach dem Dämpfen deutlich sichtbar. Dies bestätigen die Farbmessungen an den drei Brettern vor und nach dem Dämpfen (Tabelle 21).

Tabelle 21 Ergebnis der Farbmessung an den technisch getrockneten Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)

VOR dem Dämpfen				NACH dem Dämpfen			
SCE	L*	a*	b*	SCE	L*	a*	b*
A gehobelt	82.91	3.80	21.74	A gehobelt	69.96	9.24	29.73
B gehobelt	74.53	2.62	16.47	B gehobelt	64.44	7.70	23.70
A feingesägt	84.15	2.87	18.78	A feingesägt	70.30	8.82	30.44
B feingesägt	76.50	1.87	14.82	B feingesägt	63.46	7.79	25.19

Mittelwerte aus jeweils 30 Einzelmesspunkten

Erwartungsgemäss waren vor dem Dämpfen die verblauten Bereiche (B) der Proben etwas dunkler ($L^* \downarrow$) und bläulicher ($b^* \downarrow$) als die unverblauten Bereiche (A).

Durch das Dämpfen wurden alle Proben dunkler ($L^* \downarrow$) und zugleich rötlicher ($a^* \uparrow$) und weniger bläulich ($b^* \uparrow$). Durch das Dämpfen veränderte sich die Farbe aller Proben deutlich, mit einer durchschnittlichen Farbdifferenz zwischen $\Delta E = 13$ bis 19 (Tabelle 22).

Tabelle 22 Farbabstand ΔE der technisch getrockneten Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)

Delta E	SCE		SCI	
	Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
A gehobelt	16.32	1.46	16.35	1.64
B gehobelt	13.39	1.55	13.39	1.49
A feingesägt	19.04	0.96	19.20	0.95
B feingesägt	17.77	1.38	17.90	1.36

Die Daten basieren auf den Messwerten in Tabelle 21.

Vor dem Dämpfen war die Farbdifferenz zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen im Durchschnitt bei $\Delta E = 9$ bis 10. Auch nach dem Dämpfen war eine deutliche Farbdifferenz von $\Delta E = 8$ bis 9 zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen messbar.

Bei bereits technisch getrockneter Schnittware änderte sich der Farbabstand zwischen den verblauten und den unverblauten Bereichen durch das Dämpfen nur unwesentlich.

Aufgrund dieser unbefriedigenden Ergebnisse wurde der **Versuch an waldfischem Holz (Material Gruppe 2) wiederholt**. Die Farbmessungen wurden an gehobelten Abschnitten der Bretter 1.1, 1.2 und 1.3 sowie der Bretter 3.1, 3.2 und 3.3. (vergleiche Abbildung 19 und Abbildung 20 in Kap. 6.1.1) durchgeführt. Es wurden jeweils die aufeinanderliegenden Flächen des ungedämpften und des gedämpften Bretterpaares miteinander verglichen (Abbildung 130). Pro Brett wurden 20 Einzelmessungen vorgenommen, jeweils 10 im verblauten und 10 im unverblauten Bereich.

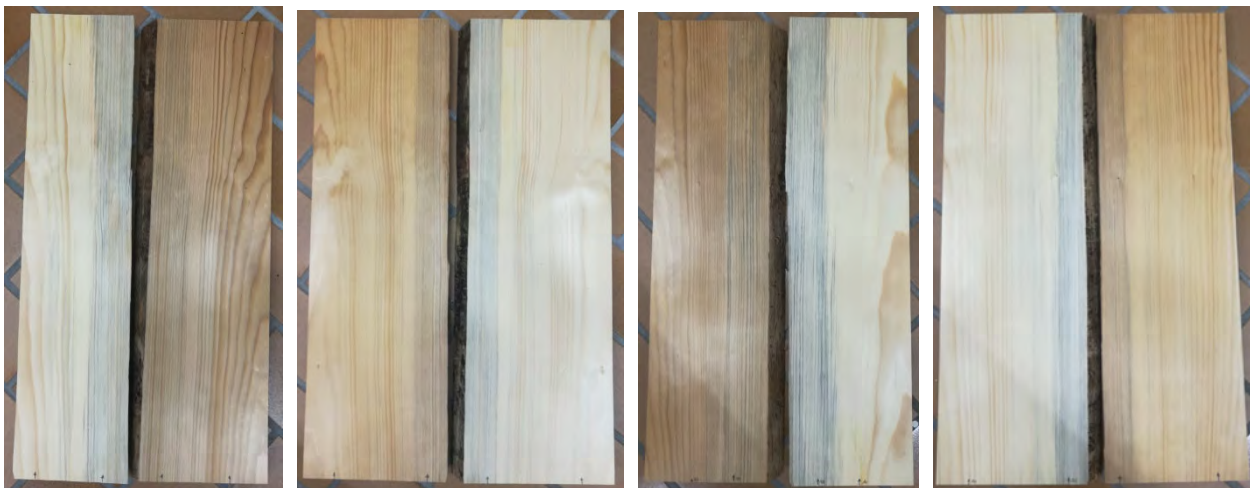


Abbildung 130 Bretterpaare gedämpft und ungedämpft (Brettpaare 1.1/1.2, 1.2/1.3, 2.1/2.2, 2.2/2.3)

Das Dämpfen von waldfischem Holz resultiert in wesentlich stärkeren Farbänderungen, im Vergleich zum Dämpfen von bereits technisch getrockneter Schnittware.

Tabelle 23 Ergebnis der Farbmessung an waldfrischen Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)

VOR dem Dämpfen				NACH dem Dämpfen			
SCE	L*	a*	b*	SCE	L*	a*	b*
A gehobelt	81.75	5.14	24.59	A gehobelt	68.81	9.51	26.99
B gehobelt	76.14	1.99	16.12	B gehobelt	66.14	7.32	22.77

Mittelwerte aus jeweils 40 Einzelmesspunkten

Wie bereits bei den technisch getrockneten Brettern waren auch an den waldfrischen Brettern vor dem Dämpfen die verblauten Bereiche (B) der Proben dunkler ($L^* \downarrow$) und bläulicher ($b^* \downarrow$) als die unverblauten Bereiche (A).

Durch das Dämpfen wurden alle Proben dunkler ($L^* \downarrow$) und zugleich rötlicher ($a^* \uparrow$) und weniger bläulich ($b^* \uparrow$). Durch das Dämpfen veränderte sich die Farbe aller Proben deutlich, mit einer durchschnittlichen Farbänderung von $\Delta E = 13$ bis 14 (Tabelle 24).

Tabelle 24 Farbabstand ΔE der waldfrischen Bretter vor und nach dem Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)

Delta E	SCE		SCI	
	Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
A gehobelt	14.08	3.57	14.15	3.53
B gehobelt	13.29	2.07	13.35	2.06

Die Daten basieren auf den Messwerten in Tabelle 23.

Vor dem Dämpfen war die Farbdifferenz zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen im Durchschnitt bei $\Delta E = 11$. Auch nach dem Dämpfen war eine sichtbare Farbdifferenz von $\Delta E = 6$ zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen messbar.

Der Farbabstand zwischen den verblauten und den unverblauten Bereichen verringerte sich durch das Dämpfen von waldfrischen Brettern merklich. Bei einem gemessenen Farbabstand von $\Delta E = 6$ ist dieser jedoch immer noch gut durch das menschliche Auge wahrnehmbar.

Das Dämpfen von waldfrischer Schnittware führt zu einer Verringerung des Farbunterschiedes zwischen unverblauten und verblauten Bereichen, hebt diesen aber nicht auf.

6.4 AP5 – Beschichtung

Die Arbeitsschwerpunkte in diesem Arbeitspaket (Abbildung 131) lagen vor allem in der Analyse der Applikation- und Filmbildung (Eindringtiefe, Schichtdicke und Trockenhaftung) als auch in der Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beschichtungen auf verblautem Käferholz.

Ein Teil der Proben wurde in der künstlichen Bewitterung (QUV), der andere Teil in der natürlichen Freibewitterung gealtert, um die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen auf verblautem Holz bzw. auf entfärbten Holz im Vergleich zu den unverblauten Referenz-Proben beurteilen zu können. Zusätzliche Messungen der Wasseraufnahme und –abgabe gaben Aufschluss darüber, ob die Bläue unterhalb des Anstrichs zu einer vermehrten Wasseraufnahme und eventuell Speicherung von Feuchtigkeit im Holz führt.



Abbildung 131 Arbeiten im AP5

Für die Arbeiten im AP5 wurden Lamellen an der Empa (vgl. Kap. 6.1.1) und aus der laufenden Produktion der Hobelwerke (vgl. Kap. 0) bereitgestellt.

Diese wurden bei den Industriepartnern (Lackhersteller und Hobelwerke/Beschichter) beschichtet und anschliessend an der Empa zu jeweils 4 Folgeproben pro Lamelle für die einzelnen Tests zugeschnitten (Abbildung 132).

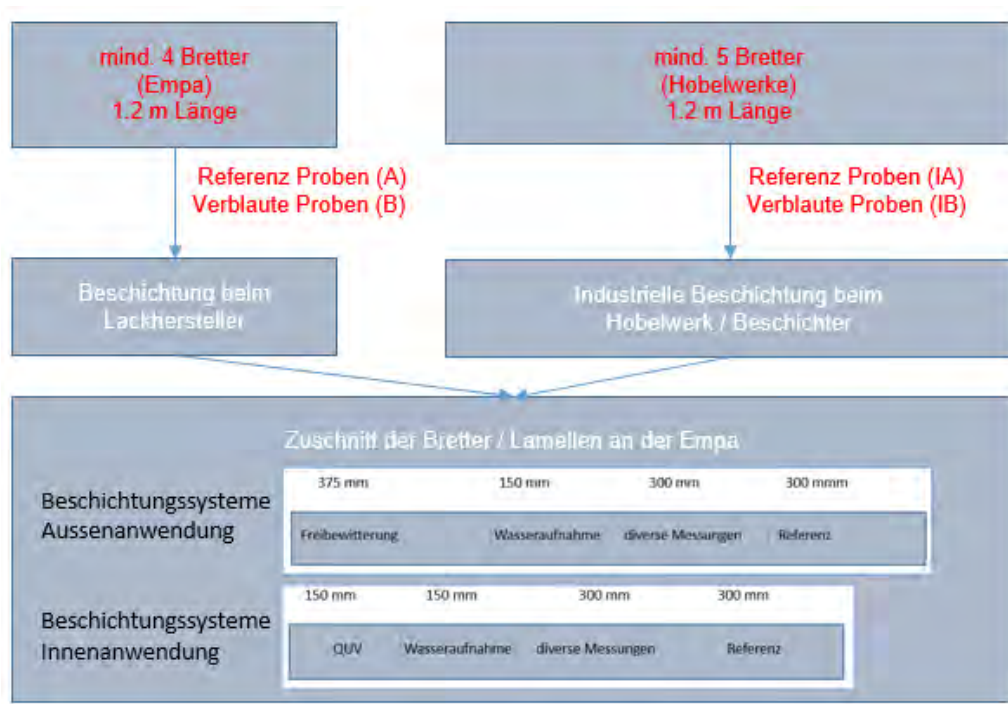


Abbildung 132 Probenmaterial für Bewitterung und Charakterisierung

6.4.1 Beschichtungssysteme

Durch die Industriepartner wurde eine repräsentative Auswahl verschiedener Beschichtungssysteme für Holzfassaden im Aussenbereich getroffen. Zusätzlich wurden drei Systeme für den Innenbereich ausgewählt.

(Die Produktnamen werden aus Gründen der Vertraulichkeit im Bericht nicht genannt.)

Aussenanwendung: 11 Beschichtungssysteme

- 4 wasserbasierte, offenporige Beschichtungen mit Vorvergrauungseffekt

1	braun / grau	mit Filmschutz
2	grau	mit Filmschutz
3	grau	ohne Filmschutz
4	grau	mit Filmschutz
- 2 wasserverdünnbare, mineralische Beschichtungen

5	rot	ohne biozide Wirkstoffe; flammhemmend
6	weiss	ohne biozide Wirkstoffe
- 3 Holzschutzlasuren mit Biozid/Holzschutzmittel

7	Lärche lasierend	lösemittelhaltige Imprägnierlasur
8	farblos lasierend	wasserbasierte Öllasur
9	weiss / grau	wasserbasierte Öllasur deckend
- 2 wasserbasierte, deckende Lacksysteme

10	weiss / grau	mit Filmschutz
11	weiss / elfenbein	mit Filmschutz

Innenanwendung: 3 Beschichtungssysteme

- 1 wasserbasiertes Holzöl
12 rot ohne biozide Wirkstoffe
- 2 wasserbasierte Holzlacke
13 farblos ohne biozide Wirkstoffe
14 farblos ohne biozide Wirkstoffe

(Die Lackhersteller und Hobelwerke/Beschichter verwendeten teilweise beim gleichen Beschichtungssystem unterschiedliche Farbtöne.)

Die Applikation der Beschichtungen erfolgte industriell bei den Lackherstellern bzw. bei den Beschichtern. Die Applikationsparameter konnten durch die Industriepartner frei gewählt werden, um die gängige Praxis bestmöglich abzubilden.

➔ Ein Vergleich der verschiedenen Beschichtungssysteme untereinander ist NICHT vorgesehen.

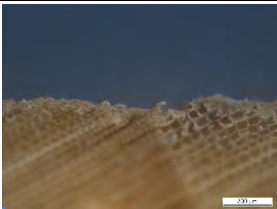
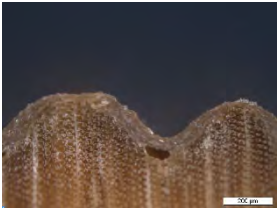
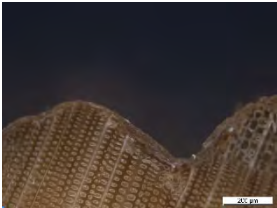
Ziel ist der Vergleich jeweils einer Beschichtung auf verblautem Käferholz und den entsprechenden Referenz-Proben ohne Verblauung.

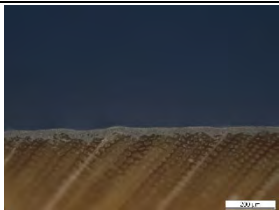
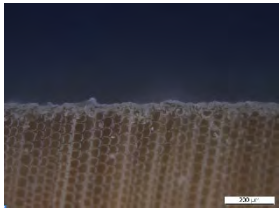
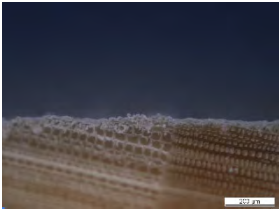
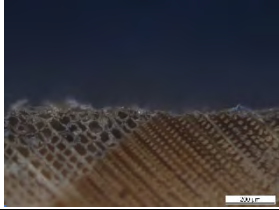
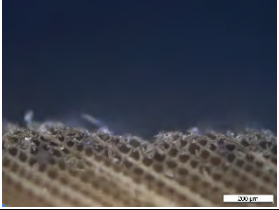
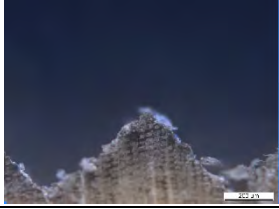
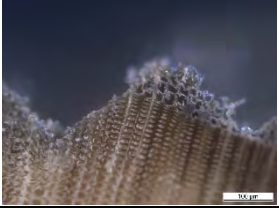
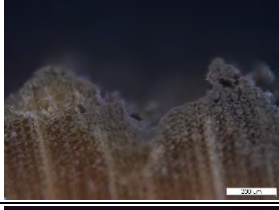
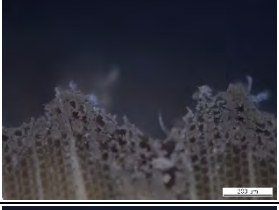
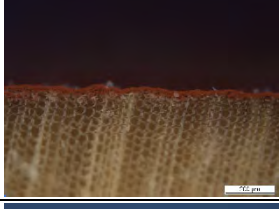
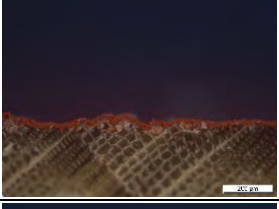
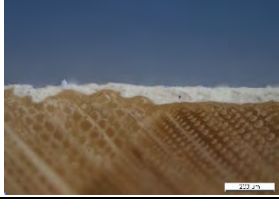
Alle Hobelwerke und Lackhersteller konnten **keine Unterschiede auf den unterverblauten Bereichen während der Applikation und der Trocknung der Beschichtungen** feststellen. Auch bei der visuellen Beurteilung der getrockneten Oberflächen konnten keine Unterschiede zwischen den Referenz-Proben und dem Käferholz beobachtet werden.

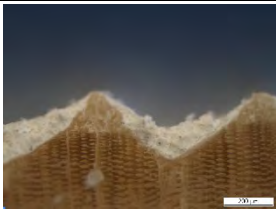
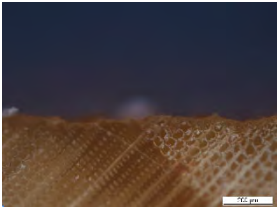
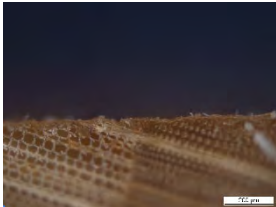
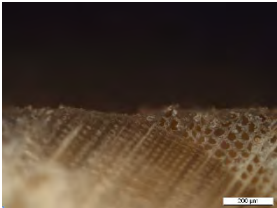
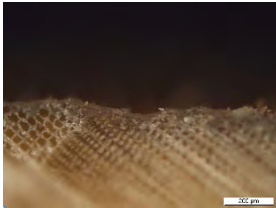
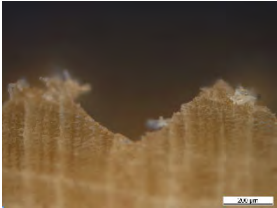
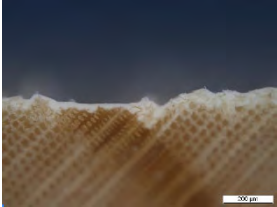
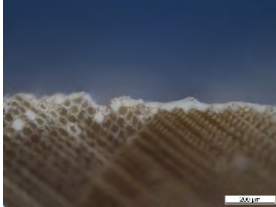
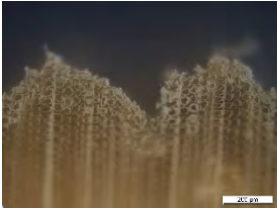
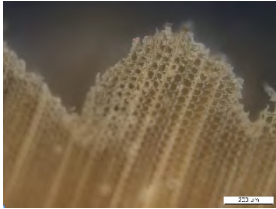
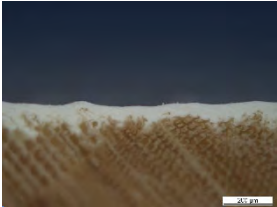
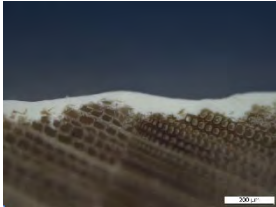
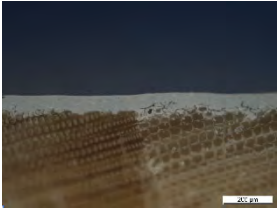
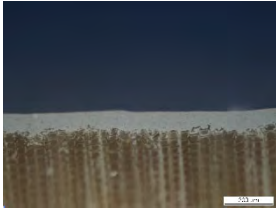
6.4.2 Trockenschichtdicke

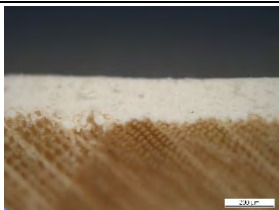
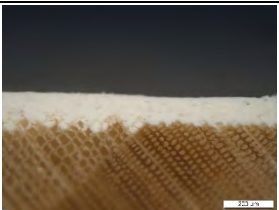
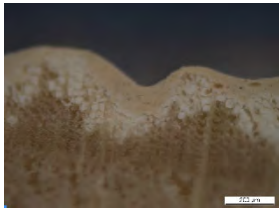
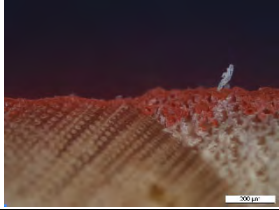
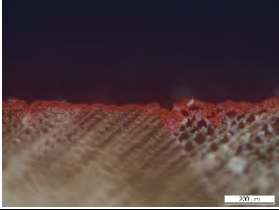
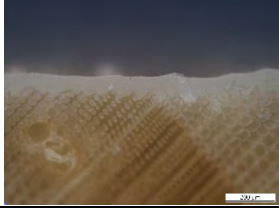
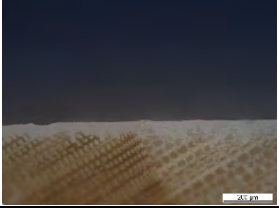
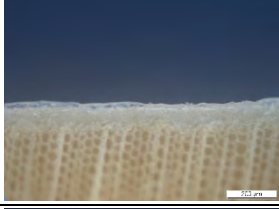
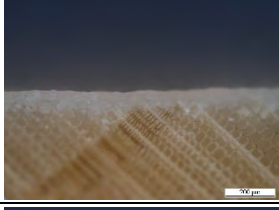
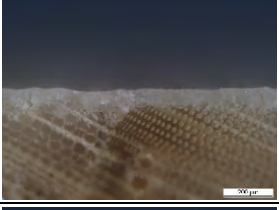
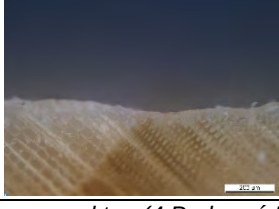
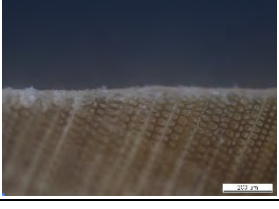
An jeweils 4 Proben wurde die Trockenschichtdicke der Beschichtung unter dem Lichtmikroskop ermittelt (5 Messpunkte pro Probe). Die Mittelwerte von jeweils 20 Einzelmesspunkten pro Variante sind in Tabelle 25 aufgeführt.

Tabelle 25 Mittlere Trockenschichtdicke inklusive mikroskopischer Aufnahmen (Beispiele)

Beschichtung	Probe	Beispiel	Schichtdicke in μm *	Probe	Beispiel	Schichtdicke in μm *
1	A		12	B		13
	IA		25	IB		29

2	A		22	B		26
	IA		15	IB		14
3	A		< 2 µm; keine durchgehende Schicht	B		< 2 µm; keine durchgehende Schicht
	IA			IB		
4	A		8	B		5
	IA		18	IB		18
5	IA		12	IB		13
6	A		76	B		75

	IA		76	IB		67
7	A		14	B		12
8	A		< 10 µm; keine durchgehende Schicht	B		< 10 µm; keine durchgehende Schicht
	IA		Nicht messbar	IB		Nicht messbar
9	A		12	B		12
	IA		Nicht messbar	IB		Nicht messbar
10	A		56	B		52
	IA		56	IB		61

11	A		148	B		124
	IA		72	IB		66
12	A		10	B		11
13	A		36	B		34
	IA		45	IB		46
14	A		57	B		52
	IA		46	IB		39

* Mittelwert aus 20 Einzelmesspunkten (4 Proben á 5 Messpunkte)

Die gemessenen Trockenschichtdicken der verblauten Proben (B und IB) sowie der unverblauten Referenzproben (A und IA) sind vergleichbar. Auch bei den Eindringtiefen konnten keine signifikanten Unterschiede erkannt werden.

6.4.3 Feuchteaufnahme

Zur Beurteilung der Feuchteaufnahme wurden an allen beschichteten Proben die Wasserdampfdiffusion in feuchtem Klima und an allen Proben mit Aussenbeschichtung abschliessend die Wasserdurchlässigkeit bei Wasserlagerung gemessen. Die Tests erfolgten in Anlehnung an EN 927-4 resp. EN 927-5.

Probenanzahl: 4 Referenz (A Charge II) und 4 Referenz Industrie (IA) pro Aussenanstrich
 4 Gruppe 3 (B Charge II) und 4 verblaute Proben Industrie (IB) Aussenanstrich
 3 Referenz (A Charge II) und 3 Referenz Industrie (IA) pro Innenanstrich
 3 Gruppe 3 (B Charge II) und 3 verblaute Proben Industrie (IB) pro Innenanstrich
 (Anstrich-Varianten siehe Kap. 6.4.1)

Abmessung: L 150 mm x b 78 mm x h 20 mm
 Klima: 20°C / 65% RH



Abbildung 133 Vorbereitung der Proben; Versiegelung der Rückseite und der Schmalflächen

Die Rückseite und die Schmalflächen der Proben wurden 3-fach, die Hirnholzflächen 4-fach mit einem 2K-PU Lack versiegelt. Die Proben wurden anschließend mindestens 14 Tage im Klima 20°C/ 65%RH gelagert.

Entsprechend den Vorgaben in der Norm wurde eine Vorbehandlung der Proben durchgeführt. Das Auslaugverfahren besteht aus dem folgenden Zyklus, welcher zweimal hintereinander durchgeführt wurde:

- 24 h Tauchen der Prüffläche
- 3 h Trocknen bei 20° / 65% RH
- 3 h Trocknen bei 50°C
- 18 h Trocknen bei 20° / 65% RH

Die Bestimmung des Wasserdampfaufnahme-Koeffizienten erfolgte nach einer 14-tägigen Lagerung der Proben im Klima 20°C / >98% RH. Anschließend erfolgte eine 14-tägigen Rücktrocknung der Proben im Klima 20°C / 65% RH.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 134 und in Tabelle 26 dargestellt. Dabei sollten immer die nebeneinander aufgeführten **A- und B-Proben** sowie die **IA- und IB-Proben** miteinander verglichen werden

(Anmerkung: **Ein Vergleich der verschiedenen Anstrichsysteme untereinander ist nicht Ziel dieser Studie! Ein solcher Vergleich ist nicht sinnvoll, da sich die Systeme zum Teil massiv in Aufbau und Schichtdicke unterscheiden.**)

Ein Vergleich der Mittelwerte inklusive Standardabweichungen (aus den jeweils 4 Einzelproben) der Referenz-Proben mit denen der verblauten Proben zeigt, dass die **Wasserdampfaufnahme vergleichbar** ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 6.2.8 und 0.

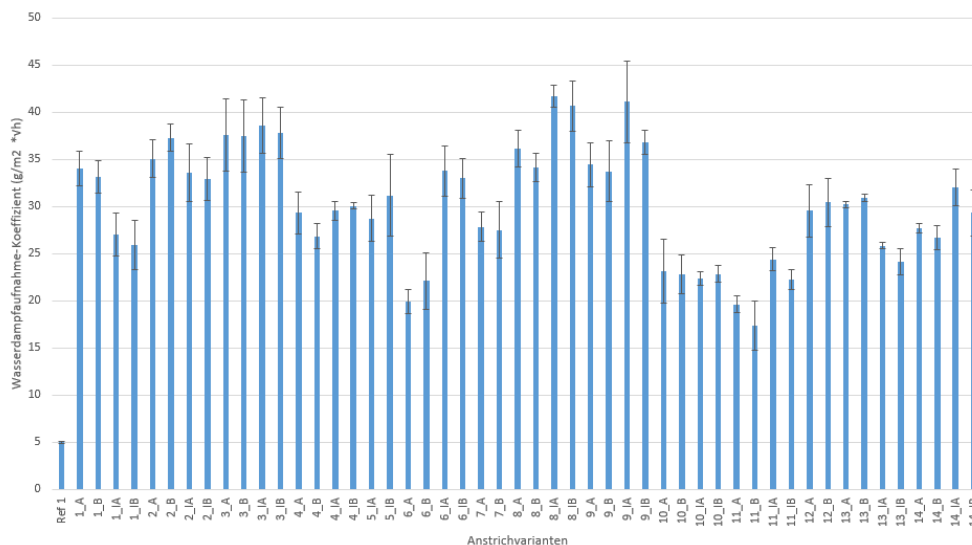


Abbildung 134 Wasserdampfaufnahme-Koeffizienten für alle Anstrichsysteme (1 bis 14)
 (Bezeichnung: Anstrichvariante_Holzprobe; A Referenz Empa, IA Referenz Industrie, B verblaut Empa, IB verblaut Industrie)
 (Ref 1 komplett versiegelt)

Nach Rückkonditionierung wurde an allen Proben mit einem Anstrich für den Außenbereich (Anstrichsystem 1 bis 11) die Wasserdurchlässigkeit nach 72 Stunden Kaltwasserlagerung bestimmt. Hierfür wurden die Proben 72 Stunden schwimmend in kaltem Wasser (Raumtemperatur) gelagert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 135 und in Tabelle 26 dargestellt.

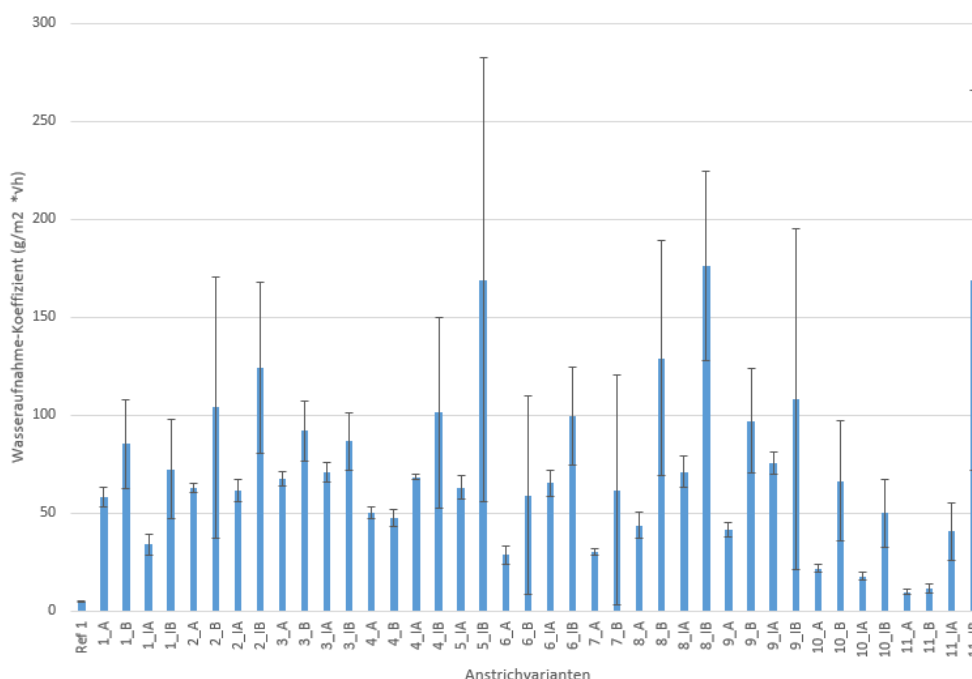


Abbildung 135 Wasseraufnahme-Koeffizient für alle Anstrichvarianten Aussenbereich (1 bis 11)
 (Bezeichnung: Anstrichvariante_Holzprobe; A Referenz Empa, IA Referenz Industrie, B verblaut Empa, IB verblaut Industrie)

Im Gegensatz zur Wasserdampfdurchlässigkeit haben sich die Proben ohne und mit Bläue in der Wasserlagerung sehr unterschiedlich verhalten. Nach 72 Stunden Wasserlagerung zeigten, bis auf 2 Varianten (4A/4B

und 11A/11B), **alle verblauten Proben eine wesentlich höhere Wasseraufnahme und somit auch einen höheren Wasseraufnahmekoeffizienten als die entsprechenden Referenz-Proben ohne Bläue.**

Neben den wesentlich höheren Wasseraufnahme-Koeffizienten für die verblauten Proben (B und IB) zeigte sich auch, dass die Streuung der Messdaten (Standardabweichung) im Vergleich zu den unverblauten Referenz-Proben (A und IA) wesentlich höher ist. Dies, weil einige verblaute Proben massiv Flüssigwasser aufnahmen.

Wesentlich erhöhte Werte bei der Wasseraufnahme innerhalb 72 Stunden können sich auf die Zuordnung der Beschichtungssysteme bezüglich der Masshaltigkeit auswirken. Einige Systeme wie z.B. Beschichtung 10, welche beispielsweise auf den nicht verblauten Lamellen die Zuordnung 'masshaltig' (10_IA) bzw. 'begrenzt masshaltig' (10_A) erreichten, konnten die geforderten Grenzwerte mit den verblauten Lamellen nicht mehr einhalten und müssten dort entsprechend 'nicht masshaltig' klassifiziert werden (Abbildung 136).

Lediglich die gehobelt/geschliffenen Empa-Proben mit Beschichtung 11 (A und B) erreichten, vor allem aufgrund der gleichmässig hohen Schichtdicke, einen sehr guten Schutz gegenüber Flüssigwasser und erfüllen die Grenzwerte für 'masshaltige' Bauteile. Solange die Beschichtung intakt ist, kommt das erhöhte Saugverhalten der verblauten Proben somit nicht zum Tragen.

Generell wurde deutlich, dass vor allem die verblauten Industrieproben mit rauer Oberflächenstruktur (feinstrukturiert) und den dadurch ungleichmässigeren Schichtdicken sehr viel mehr Wasser aufnehmen als beispielsweise die entsprechenden verblauten Empa-Proben mit den glatten Oberflächen. In der Praxis könnte sich eine entsprechend hohe Neigung zur Flüssigwasseraufnahme negativ auf die Dauerhaftigkeit der beschichteten Lamellen auswirken.

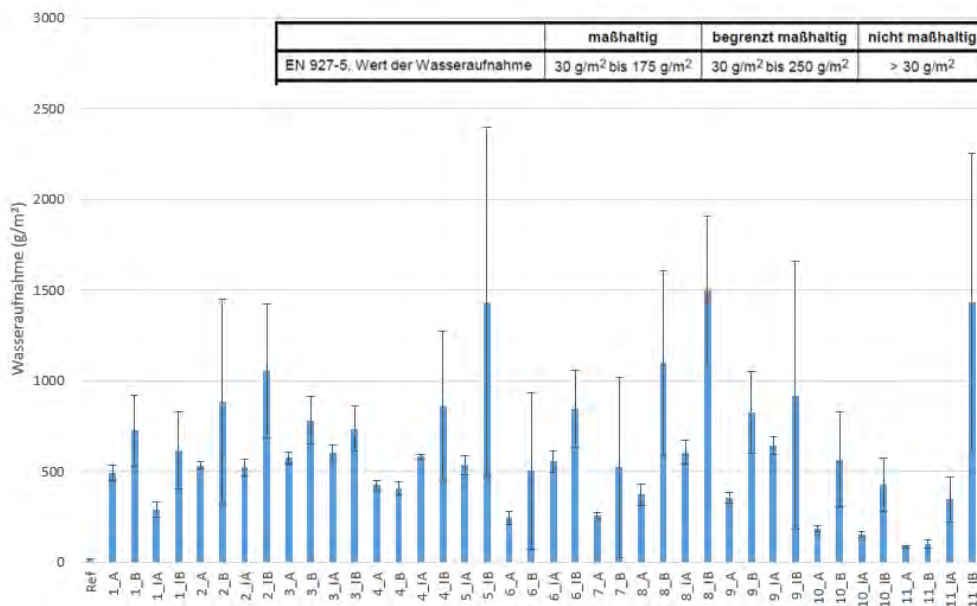


Abbildung 136 Wasseraufnahme nach 72 Stunden für alle Anstrichvarianten Aussenbereich (Referenz komplett versiegelt < 30 g/m²)

Bei den unbehandelten Proben konnte bereits eine massiv höhere Wasseraufnahme der verblauten Proben, sowohl im kapillaren Saugversuch als auch im Tauchversuch festgestellt werden. Dieser Trend bestätigte sich nun auch bei den beschichteten Proben.

Tabelle 26 Koeffizienten für Wasserdampfaufnahme nach 14 Tagen im 20°C / > 98 %RH und Koeffizienten für Wasseraufnahme nach 72 h Kaltwasserlagerung der beschichteten Proben im Neuzustand

	Wasserdampfaufnahme Koeffizient (g/m ² *√h) Stabw		Wasseraufnahme Koeffizient (g/m ² *√h) Stabw			Wasserdampfaufnahme Koeffizient (g/m ² *√h) Stabw	
Ref	5.0	±0.1	4.6	±0.3	12_A	29.6	±2.8
1_A	34.0	±1.8	58.1	±5.1	12_B	30.4	±2.5
1_B	33.1	±1.8	85.3	±22.8	13_A	30.2	±0.3
1_IA	27.1	±2.3	34.1	±5.3	13_B	30.9	±0.4
1_IB	26.0	±2.6	72.5	±25.3	13_IA	25.9	±0.4
2_A	35.1	±2.0	62.8	±2.4	13_IB	24.2	±1.3
2_B	37.3	±1.4	103.9	±66.6	14_A	27.7	±0.5
2_IA	33.6	±3.1	61.5	±5.7	14_B	26.7	±1.3
2_IB	32.9	±2.3	124.3	±43.5	14_IA	32.0	±1.9
3_A	37.6	±3.8	67.5	±3.8	14_IB	29.4	±2.5
3_B	37.5	±3.8	92.1	±15.3			
3_IA	38.6	±2.9	71.2	±5.1			
3_IB	37.8	±2.7	86.6	±14.8			
4_A	29.3	±2.2	50.1	±3.0			
4_B	26.9	±1.4	47.7	±4.3			
4_IA	29.6	±1.0	68.4	±1.3			
4_IB	30.1	±0.3	101.3	±48.6			
5_IA	28.7	±2.5	63.0	±6.0			
5_IB	31.2	±4.3	169.1	±113.2			
6_A	20.0	±1.3	28.7	±4.5			
6_B	22.1	±3.0	59.1	±50.6			
6_IA	33.8	±2.7	65.2	±6.6			
6_IB	33.0	±2.1	99.7	±24.9			
7_A	27.9	±1.5	30.2	±1.9			
7_B	27.5	±3.0	61.6	±58.7			
8_A	36.2	±1.9	43.8	±6.7			
8_B	34.1	±1.5	129.2	±60.1			
8_IA	41.8	±1.2	71.2	±7.8			
8_IB	40.7	±2.6	176.3	±48.5			
9_A	34.5	±2.4	41.7	±3.5			
9_B	33.7	±3.2	97.2	±26.5			
9_IA	41.1	±4.3	75.6	±5.6			
9_IB	36.8	±1.3	108.2	±86.9			
10_A	23.1	±3.4	21.8	±2.0			
10_B	22.9	±2.0	66.5	±30.8			
10_IA	22.3	±0.7	17.7	±1.9			
10_IB	22.8	±0.9	50.0	±17.2			
11_A	19.7	±0.9	9.9	±1.0			
11_B	17.4	±2.6	11.6	±2.4			
11_IA	24.4	±1.2	40.6	±14.7			
11_IB	22.2	±1.0	168.8	±97.0			

6.4.4 Trockenhaftung

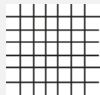
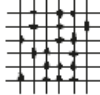
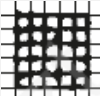
Die Trockenhaftung wurde an allen beschichteten Proben mittels Gitterschnitt bestimmt. Der Test erfolgte in Anlehnung an ISO 2409 (Prozedur 6.2). Die Entfernung der losen Partikel erfolgte mit einem Klebeband.

Probenanzahl: jeweils 3 Messungen pro Variante (Varianten siehe Kap. 6.4.1) auf A-, B, IA- und IB-Proben
 Klima: 20°C / 65% RH

Der Gitterschnitt erfolgte manuell mit jeweils 6 parallelen Schnitten zu einem Gitter (bewertete Fläche ca. 1,8 cm²). Die visuelle Bewertung der Haftungsqualität erfolgte entsprechend der Norm ().

Zur besseren Quantifizierung der Flächen wurde zusätzlich die Software 'Scientific Color' der Firma DatInf GmbH (Tübingen, D) genutzt.

Tabelle 27 Beurteilung der Trockenhaftung nach ISO 2409

Klassifizierung	Beschreibung	Beispiel
0	Keine Beschädigungen	
1	Kleine Beschädigungen an den Kreuzungspunkten der Schnitte; Fläche ≤ 5%	
2	Beschädigungen entlang der Schnittkanten und an den Kreuzungspunkten; Fläche ≤ 15%	
3	Beschädigungen auch innerhalb der Quadrate; Fläche ≤ 35%	
4	Starke Beschädigungen; Fläche ≤ 65%	
5	Starke Beschädigungen; Fläche > 65%	

Die Bewertung der Trockenhaftung erfolgte an unbewitterten, konditionierten Proben (20°C /65% RH). Bei Abweichungen der Mittelwerte von weniger als 0.5 Punkten in der Klassifizierung wurden die Varianten als gleichwertig beurteilt.

Die Beurteilung der Trockenhaftung auf den Industrieproben war aufgrund deren Oberflächenrauigkeit teilweise schwierig und in einigen Fällen nicht möglich (Beschichtung 3, 4, 6, 8, 9 und 12 auf den Industrieproben).

Tabelle 28 Klassifizierung der Trockenhaftung der Beschichtungssysteme nach ISO 2409

Anstrichsysteme	Empa		Industrie	
	Referenz (A)	Verblaut (B)	Referenz (IA)	Verblaut (IB)
1	1.3	1.7	0.3	1.0
2	1.3	1.7	1.3	1.0
3	1.0	0.7	n.m.	n.m.
4	0.7	1.0	n.m.	n.m.
5	1.0	2.0	-	-
6	0.0	0.0	n.m.	n.m.
7	-	-	1.3	2.0
8	1.0	1.7	n.m.	n.m.
9	0.7	1.0	n.m.	n.m.
10	0.7	1.0	1.0	0.7
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1.0	1.0	n.m.	n.m.
13	1.0	1.0	0.0	0.0
14	0.3	0.7	0.3	0.7

Mittelwerte aus jeweils drei Einzelmessungen

Die Trockenhaftung der meisten Beschichtungssysteme auf unverblautem Referenzmaterial und auf verblauten Bereichen des Käferholzes kann als gleichwertig beurteilt werden (siehe Tabelle 28). Kleine Abweichungen sind dabei massgeblich der Holzstruktur der Einzelproben geschuldet.

Nur drei der gesamthaft untersuchten Beschichtungssysteme zeigten auf den verblauten Bereichen eine leicht reduzierte Trockenhaftung (Unterschied > 0.5; in Tabelle 28 grau markiert). Inwieweit diese Unterschiede in der Praxis relevant sein könnten, muss in der Freibewitterung beurteilt werden.

6.4.5 Künstliche Bewitterung im QUV

Die ca. 4-monatige UV-Bestrahlung der Proben, welche mit den Produkten für die Innenanwendung beschichtet wurden, erfolgte im QUV-Gerät 'Solar Eye'.

Alle Proben wurden mit UVA-351 Lampen bestrahlt, um die Farbstabilität der Verblauung zu untersuchen. Farbmessungen wurden vor Beginn, nach 1000 Stunde, 2000 Stunde und 3000 Stunde durchgeführt (Methodik siehe Kap. 6.2.2). Die Messung erfolgte an jeweils 3 Punkten pro Probe.

Die abschliessende visuelle Beurteilung der Proben erfolgte nach 3000 Stunden in Anlehnung an die EN 927-6.

Probenanzahl: 3 Referenz (A Charge II) und 3 Referenz Industrie (IA) pro Innenanstrich
 3 Gruppe 3 (B Charge II) und 3 verblaute Proben Industrie (IB) pro Innenanstrich
 (Anstrich-Varianten 12, 13, 14 siehe Kap. 6.4.1)
 3 Gruppe 3 (B Charge II) unbehandelt, 3 Gruppe 3 (B Charge II) Thermobehandelt

Abmessung: L 150 mm x b 78 mm x h 20 mm

Klima: 20°C / 65% RH

QUV: 3000 h Bestrahlung mit UVA-351 Lampen

Tabelle 29 Helligkeits- und Farbparameter vor und nach der UV-Bestrahlung sowie Farbabstand ΔE bezogen auf die Ausgangswerte

			SCE			
			L*	a*	b*	ΔE
Keine Beschichtung	Probe A	0 h	79.7	4.7	22.7	
		1000 h	62.1	14.3	36.0	24.2
		2000 h	58.6	15.1	34.1	26.4
		3000 h	57.6	15.7	32.4	26.7
	Probe B	0 h	64.1	2.2	14.4	
		1000 h	60.1	11.6	32.0	26.9
		2000 h	58.1	12.3	30.0	26.3
		3000 h	58.0	12.8	29.3	26.9
Thermobehandelt	Probe A	0 h	60.1	11.1	27.6	
		1000 h	56.1	12.6	31.6	6.5
		2000 h	55.4	13.1	30.2	6.4
		3000 h	54.6	13.7	28.8	6.6
	Probe B	0 h	54.7	10.5	24.0	
		1000 h	54.2	10.7	27.1	4.1
		2000 h	52.9	11.2	25.9	3.6
		3000 h	53.0	12.0	26.0	4.0
Beschichtung 12	Probe A	0 h	36.2	36.8	16.9	
		1000 h	36.3	34.1	15.5	3.1
		2000 h	36.1	34.2	15.7	2.9
		3000 h	36.3	34.4	15.7	2.8
	Probe B	0 h	35.8	36.0	16.6	
		1000 h	35.7	33.9	15.7	2.3
		2000 h	36.0	33.7	15.5	2.5
		3000 h	36.3	33.8	15.4	2.7
Beschichtung 13	Probe A	0 h	84.8	3.5	20.2	
		1000 h	72.5	10.4	27.9	16.1
		2000 h	71.5	10.4	24.9	15.8
		3000 h	70.9	10.5	23.5	16.0
	Probe B	0 h	78.5	1.3	13.9	
		1000 h	70.7	7.2	23.3	13.6
		2000 h	70.2	7.7	21.6	13.0
		3000 h	70.3	7.7	20.5	12.4
	Probe IA	0 h	83.0	4.1	21.1	
		1000 h	67.8	12.9	30.8	20.2
		2000 h	64.8	14.1	28.9	22.3
		3000 h	63.3	14.6	27.5	23.2
	Probe IB	0 h	75.9	1.6	15.2	
		1000 h	62.9	9.4	25.2	18.4
		2000 h	60.6	11.1	24.1	20.3
		3000 h	59.3	11.6	22.9	21.0

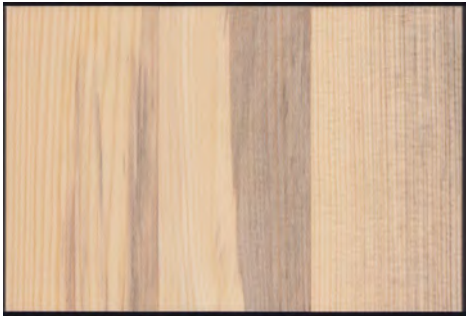
Beschichtung 14	Probe A	0 h	82.6	4.2	24.4	
		1000 h	80.0	5.2	22.9	3.7
		2000 h	79.6	5.9	24.8	3.7
		3000 h	78.9	6.6	27.1	5.3
	Probe B	0 h	76.9	2.6	19.4	
		1000 h	76.1	3.7	19.3	2.1
		2000 h	76.1	4.1	21.1	3.1
		3000 h	76.0	5.0	24.2	5.8
	Probe IA	0 h	83.3	3.6	24.6	
		1000 h	79.2	5.9	28.0	5.8
		2000 h	77.3	7.4	30.7	9.4
		3000 h	76.3	8.7	32.6	11.7
	Probe IB	0 h	75.3	2.3	19.0	
		1000 h	73.0	4.8	25.8	8.0
		2000 h	71.3	6.4	28.6	11.2
		3000 h	71.5	8.1	31.2	14.3

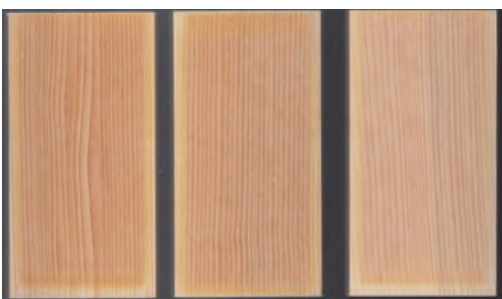
Mittelwerte aus jeweils 9 Einzelmessungen

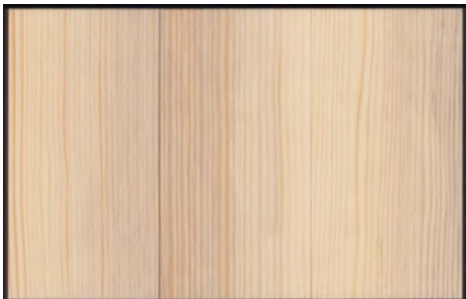
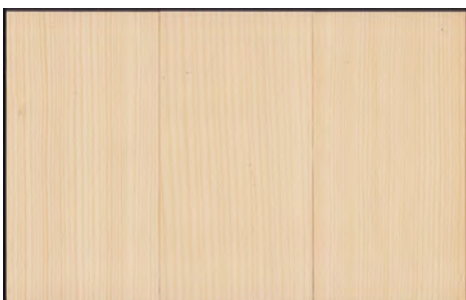
Erwartungsgemäss wurden die unbehandelten Proben durch die UV-Bestrahlung dunkler (L^* ↓) und tendieren mehr zum rot (a^* ↑) / gelben (b^* ↑) Farbspektrum. Die Proben mit den transparenten Beschichtungen 13 und 14 folgen ebenfalls diesem Trend.

Beschichtung 12 kann für den Innenbereich als sehr farbstabil bezeichnet werden. Der Farbabstand ΔE betrug nach 3000 Stunden lediglich 2.8 bzw. 2.7. Die Verblauung war durch die Beschichtung zu keinem Zeitpunkt sichtbar.

Tabelle 30 Optischer Zustand der Proben vor und nach 3000 Stunden im QUV
(A/IA unverblaute Referenz, B/IB verblautes Käferholz)

		Ausgangszustand	3000 h QUV
Keine Beschichtung	Probe B		
	Probe B		
Beschichtung 12	Probe A		
	Probe B		

Beschichtung 13	Probe A		
	Probe B		
	Probe IA		
	Probe IB		

Beschichtung 14	Probe A		
	Probe B		
	Probe IA		
	Probe IB		

Die nicht oberflächlich behandelten, verblauten Holzproben verblassten mit der Zeit unter UV-Strahlung etwas. Dadurch waren leicht verblaute Bereiche nach der UV-Bestrahlung weniger auffällig, wogegen sehr intensiv verblaute Bereiche auch nach 3000 Stunden noch deutlich sichtbar waren.

Die verblauten Bereiche unter Beschichtung 13 und 14 scheinen ebenfalls nach der 3000 stündigen UV Bestrahlung und der damit einhergehenden Nachdunkelung des Holzes etwas weniger auffällig.

Möchte man die Verblauung als gestalterisches Element zum Beispiel bei Möbeloberflächen einsetzen, muss damit gerechnet werden, dass es, je nach Beschichtungssystem und Intensität der Sonneneinstrahlung, zu unerwünschten farblichen Veränderungen kommen kann.

6.4.6 Freibewitterung

Proben, welche mit den Produkten für die Aussenanwendung beschichtet wurden, wurden einer einjährigen Freibewitterung in Anlehnung an die Norm EN 927-3 unterzogen.

Vor der Freibewitterung wurden alle Proben an den Hirnholzflächen versiegelt (2-fach mit 2K-PU Lack). Auf Gestellen, wie in Abbildung 138 dargestellt, wurden die Proben in einem Winkel von 45° der Witterung ausgesetzt. Die Hälfte der Proben wurde in SW-Richtung, die andere Hälfte in NO-Richtung bewittert. Ein Teil der Proben wurde durch einen einfachen Gitterschnitt vorgeschädigt.

Pro Beschichtungssystem wurden insgesamt 16 Proben bewittert:



Abbildung 137 Beispiel Freibewitterungsproben pro Beschichtungssystem
 A- und B-Pröben aus Charge II (siehe Kap.6.1.1)
 IA- und IB-Pröben aus industrieller Fertigung (siehe Kap. 0)
 Vorschädigung (blaue Markierung)

Die Freibewitterung startete Anfang Februar 2022.



Abbildung 138 Freibewitterungsstand Empa Dübendorf

Farbmessungen wurden vor Beginn und nach dem 1. / 6. und 12. Monat der Bewitterung durchgeführt. Zusätzlich wurden alle Proben monatlich gewogen, um eventuelle Unterschiede in der Feuchtedynamik zu erkennen.

Die abschliessende visuelle Beurteilung der Proben erfolgte nach 12 Monaten ebenfalls in Anlehnung an die EN 927-3.

In Abbildung 139 sind die Wetterbedingungen während des ersten Jahres der Freibewitterung von Februar 2022 bis Februar 2023 dargestellt.

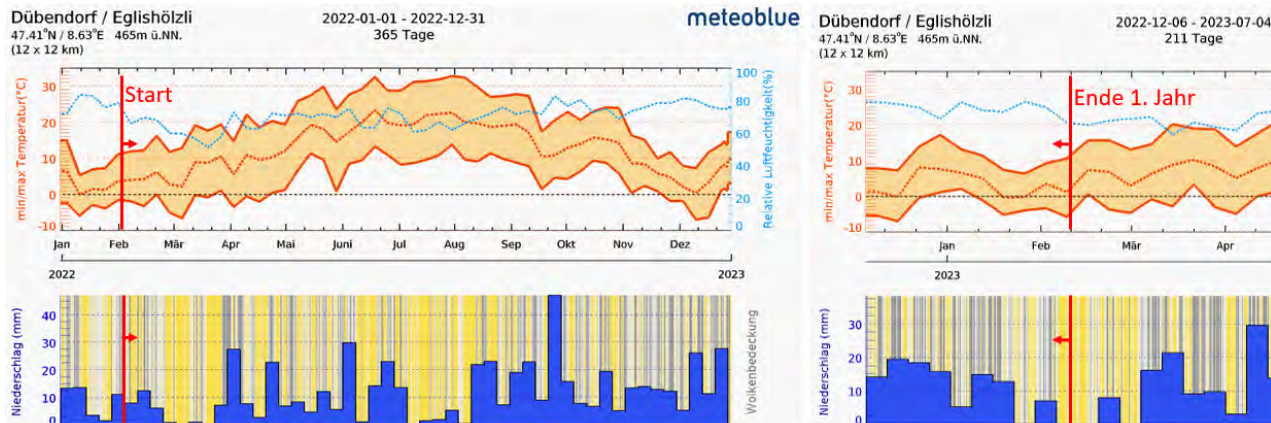


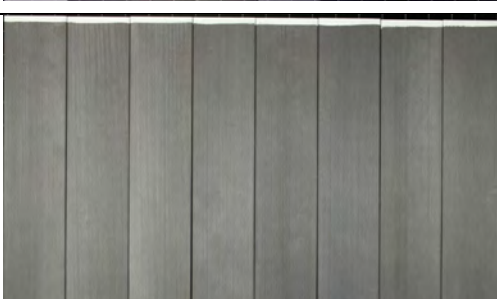
Abbildung 139 Temperaturverlauf, rel. Luftfeuchtigkeit, Niederschläge und Wolkenbedeckung für den Freibewitterungszeitraum Feb. 2022 bis Feb. 2023 (Quelle: <https://my.meteoblue.com>)

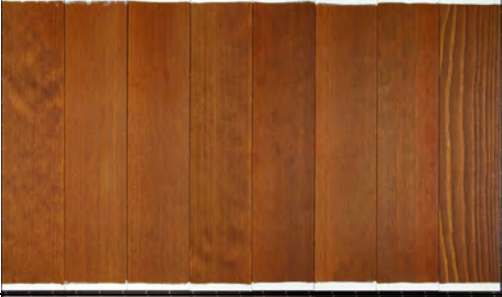
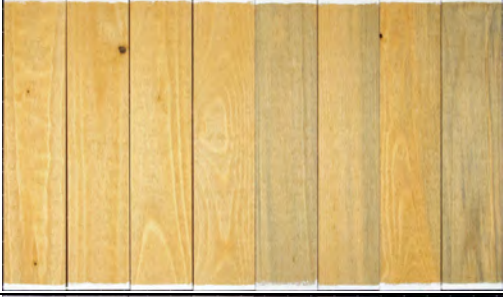
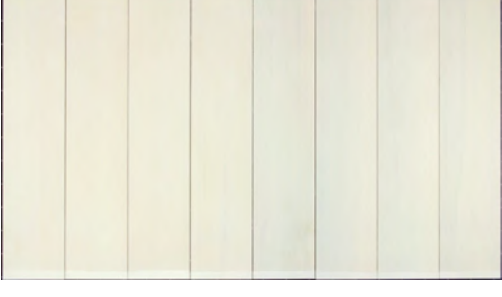
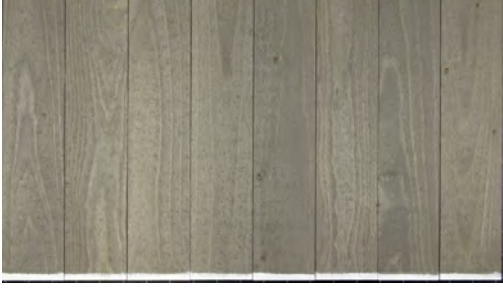
Der Bewitterungszeitraum kann als überdurchschnittlich warm bezeichnet werden. Besonders die Temperaturen der Monate Februar, Oktober, November als auch die der Periode von Mai bis August lagen über der Referenztemperatur (1991 bis 2020). Passend zu den rekordhohen Temperaturen zeichnete sich der Testzeitraum auch durch relativ viele Sonnenstunden aus.

Während Frühjahr und Sommer eher trocken waren, konnten im Herbst und Winter wieder 'normale' Niederschlagsmengen verzeichnet werden.

Feuchte Perioden mit ausreichend hohen Temperaturen begünstigen dabei das Pilzwachstum.

Tabelle 31 Beschichtete Proben im Neuzustand
 (A/IA unverblaut, B/IB verblaut; SW Süd-West, NO Nord-Ost; x vorgeschädigt)

Beschichtung	Holz Bereitstellung: Empa Beschichtung: Lackhersteller								Holz Bereitstellung: Hobelwerke Beschichtung: Hobelwerke / Beschichter							
	A SW x	A SW	A NO x	A NO	B SW x	B SW	B NO x	B NO	IA SW x	IA SW	IA NO x	IA NO	IB SW x	IB SW	IB NO x	IB NO
1																
2																
3																
4																

Beschichtung	Holz Bereitstellung: Empa Beschichtung: Lackhersteller								Holz Bereitstellung: Hobelwerke Beschichtung: Hobelwerke / Beschichter							
	A	A	A	A	B	B	B	B	IA	IA	IA	IA	IB	IB	IB	IB
	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO
	X		X		X		X		X		X		X		X	
7 links 5 rechts																
6																
8																
9																

Beschichtung	Holz Bereitstellung: Empa Beschichtung: Lackhersteller								Holz Bereitstellung: Hobelwerke Beschichtung: Hobelwerke / Beschichter							
	A	A	A	A	B	B	B	B	IA	IA	IA	IA	IB	IB	IB	IB
	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO	SW	SW	NO	NO
	x		x		x		x		x		x		x		x	
10																
11																

Basierend auf den Farbmessungen der beschichteten Proben im Ausgangszustand (siehe Tabelle 33) konnten die Farbabstände zwischen den unverblauten und den verblauten Bereichen berechnet werden (Tabelle 32).

Tabelle 32 Farbabstand ΔE der Beschichtung auf den unverblauten und den verblauten Bereichen

Beschichtung	ΔE zwischen A und B	ΔE zwischen IA und IB
1	0.5	0.4
2	0.2	0.2
3	2.2	1.2
4	1.3	0.4
5	-	0.6
6	0.1	0.2
7	7.9	-
8	3.8	10.7
9	2.1	1.2
10	0.1	0.1
11	0.1	0.6

Ein Farbabstand von $\Delta E < 2$ ist in der Regel durch das menschliche Auge kaum wahrnehmbar. **Bei den meisten Beschichtungssystemen war die Bläue unter der Beschichtung nicht sichtbar** und es gab somit zu Beginn der Freibewitterung bei diesen keine visuellen Unterschiede zwischen den verblauten Proben und den unverblauten Referenz-Proben.

Die Beschichtungen 3 und 9 zeigten bei den Empa Proben (A und B) Werte leicht über diesem ΔE Grenzwert. Durch die weisse Beschichtung 9 war die Bläue schwach erkennbar. Erwartungsgemäss zeigten die gering pigmentierten Beschichtungen 7 und 8 relativ hohe Werte beim Farbabstand. Bei diesen Varianten war im Neuzustand die Bläue durch die Beschichtung deutlich erkennbar und auch nach der Bewitterung konnte man die verblauten Bereiche identifizieren.

Tabelle 33 Helligkeits- und Farbparameter vor und nach 6 und 12 Monaten Freibewitterung sowie der Farbabstand ΔE nach 12 Monaten, bezogen auf die Ausgangswerte

SCE Beschichtung		Ausgangsmessung			Nach 6 Monaten Freibewitterung			Nach 12 Monaten Freibewitterung			Farbabstand Nach 12 Mo
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE
1	A	57.2	1.9	8.5	56.6	1.8	8.0	54.7	1.1	6.3	3.5
	B	56.9	1.5	8.2	56.6	1.7	8.1	55.4	1.2	6.7	2.4
	IA	49.1	3.6	12.1	48.5	3.7	11.9	49.0	3.7	12.0	0.8
	IB	48.7	3.6	12.1	48.3	3.7	11.9	48.3	3.6	11.9	0.7
2	A	48.1	0.1	2.0	46.9	0.3	2.3	45.8	0.3	2.3	2.3
	B	48.3	0.2	2.1	47.0	0.3	2.3	46.4	0.3	2.4	1.9
	IA	57.8	0.0	2.6	56.6	0.1	2.8	53.8	0.1	2.9	4.1
	IB	58.0	0.1	2.8	56.2	0.3	3.3	53.0	0.3	3.2	5.1
3	A	51.9	0.2	2.2	54.9	0.2	1.4	54.1	0.1	1.1	2.5
	B	49.7	0.2	2.0	53.4	0.2	1.3	51.9	0.0	1.0	2.6
	IA	49.2	-0.1	2.3	52.3	0.0	1.3	52.8	-0.1	1.2	4.4
	IB	49.5	0.1	3.5	51.2	0.4	2.1	50.5	0.1	1.8	3.5
4	A	45.0	0.8	4.7	44.6	1.3	4.5	41.7	0.9	3.3	3.6
	B	44.6	0.6	3.5	44.7	1.0	3.9	42.1	0.8	3.0	2.6
	IA	40.7	0.5	3.8	39.9	1.0	4.2	38.5	0.9	3.8	2.5
	IB	40.3	0.4	3.9	40.0	1.0	4.1	38.2	0.8	3.7	2.3
5	IA	34.2	25.5	15.4	33.8	25.7	15.6	33.1	25.3	15.8	1.5
	IB	34.2	25.0	15.1	33.7	24.9	15.0	33.1	24.8	15.6	1.7
6	A	94.6	-0.8	3.1	93.2	-0.4	3.6	91.9	-0.3	4.1	2.9
	B	94.6	-0.9	3.2	93.0	-0.5	4.0	89.9	-0.4	7.9	6.8
	IA	93.0	-0.7	3.0	89.2	-0.4	7.7	83.1	0.2	16.0	16.6
	IB	92.8	-0.8	2.9	88.3	-0.4	9.2	81.9	0.4	17.6	18.4
7	A	51.4	20.7	38.4	47.2	20.1	31.1	43.6	16.7	26.2	15.1
	B	47.6	17.0	32.5	47.3	18.7	31.0	43.2	14.9	25.0	9.2
8	A	40.9	18.3	26.3	40.2	15.5	18.5	37.8	13.4	16.2	11.7
	B	39.2	16.3	23.5	39.8	14.6	17.7	37.6	12.3	15.6	9.2
	IA	71.0	11.5	38.4	59.0	12.2	27.6	56.4	7.4	20.9	23.4
	IB	65.6	7.2	30.1	59.8	10.4	24.8	57.6	6.3	19.1	13.9
9	A	92.2	-0.3	7.5	87.6	1.3	6.5	86.3	0.6	4.6	6.7
	B	91.1	-1.3	6.1	87.7	0.9	6.2	86.1	0.3	4.3	5.6
	IA	56.3	1.2	12.3	52.7	2.2	8.7	52.4	1.6	7.6	6.3
	IB	55.7	1.0	11.3	52.8	2.3	9.0	51.2	1.5	7.3	6.1
10	A	91.7	-0.9	4.7	89.2	-0.3	6.3	89.5	-0.4	6.1	2.7
	B	91.7	-1.0	4.6	89.2	-0.4	6.4	89.3	-0.3	6.3	3.0
	IA	71.6	-0.3	1.8	70.4	-0.1	3.2	70.4	-0.1	3.1	1.8
	IB	71.5	-0.4	1.8	70.6	-0.1	3.2	70.3	-0.1	3.1	1.8
11	A	95.8	-0.2	2.6	94.4	-0.5	4.6	94.5	-0.4	4.3	2.2
	B	95.8	-0.2	2.7	94.3	-0.5	4.5	94.4	-0.4	4.4	2.2
	IA	85.5	2.2	15.5	84.0	2.5	16.0	83.7	2.5	16.1	2.0
	IB	85.0	2.2	15.7	83.3	2.5	16.2	82.9	2.5	16.3	2.2
14*	A	83.1	3.9	25.1	76.1	5.7	18.4	62.6	0.8	5.9	28.5
	B	75.9	2.3	19.6	73.3	3.4	12.6	63.3	0.6	4.7	19.7

Die Farbmessungen erfolgten nach 6 und 12 Monaten Freibewitterung. Die Messwerte sind in Tabelle 33 dargestellt (* Beschichtung 14 ist nicht für den Ausseneinsatz vorgesehen. Als transparentes System wurde sie zusätzlich getestet, um mögliche Veränderungen der Bläue unter der Beschichtung beobachten zu können.).

Infos zur Methode der Farbmessung können in Kapitel 6.2.2 nachgelesen werden.

7 der insgesamt 11 Beschichtungssysteme (Beschichtungen 1, 2, 3, 4, 5, 10 und 11) zeigten sich während 12 Monaten Freibewitterung **sehr farbstabil**. Teilweise dunkelten die Beschichtungen geringfügig nach.

Farbliche Unterschiede zwischen den Proben mit gleicher Beschichtung waren nach einem Jahr Freibewitterung teilweise auf die Bewitterungsrichtung (SW oder NO; z.B. Beschichtung 7 in Tabelle 34) und / oder auf eine vorhandene Vorschädigung und damit verbundener Unterfeuchtung zurückzuführen (z.B. Beschichtung 6 Tabelle 34).

Die Bläue spielte bei den Farbunterschieden keine wesentliche Rolle. Bei den schwach pigmentierten Beschichtungen 7 und 8 war nach einer einjährigen Beschichtung die Verblauung unter der Beschichtung kaum mehr wahrnehmbar.

Lediglich Beschichtung 6 zeigte schon frühzeitig gelbe Verfärbungen, die in den Bereichen sehr ausgeprägt waren, in denen es zu einer erhöhten Unterfeuchtung kam. Dies waren bei den Empa-Proben (6 A und 6 B) vor allem die verblauten Proben (IB) in NO Ausrichtung. Bei den Industrieproben (6 IA und 6 IB) waren es vor allem die Proben mit einem Gitterschnitt als Vorschädigung, und hier insbesondere die verblauten Proben (6 IB) ebenfalls in NO Ausrichtung. Bereits auf dem Datenblatt wird darauf hingewiesen, dass es auf Holz zum Durchschlagen von Inhaltsstoffen kommen kann, was hier sicherlich der Fall war.

Zudem hatte dieses Beschichtungssystem bereits vor der Bewitterung ein Problem mit Rissbildung in Form von feinen Rissen (Abbildung 140). Auf den gehobelten Oberflächen (6 A und 6 B) zeigten sich diese Frühschwundrisse als Gitterrisse auf der gesamten Oberfläche. Bei den Feinstrukturierten Industrieproben (6 IA und 6 IB) verliefen die Risse hauptsächlich in den Tälern der Strukturierung.

Die Risse als auch die erhöhte Durchfeuchtung trugen wesentlich zur schlechten Performance der Beschichtung 6 bei. **Bläue verstärkte diese nachteiligen Eigenschaften.**

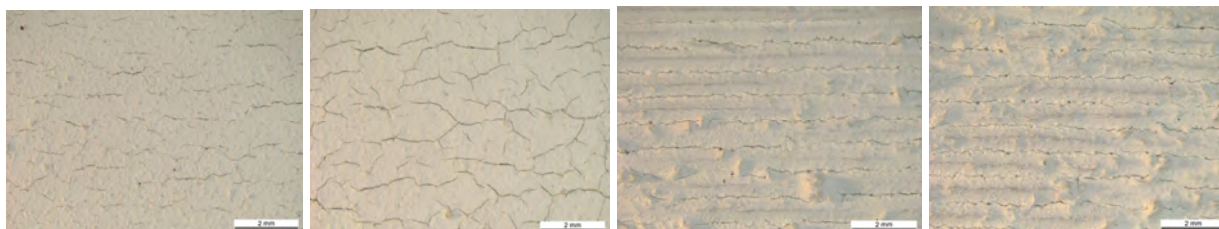


Abbildung 140 Frühschwundrisse auf unbewitterten Proben mit Beschichtung 6;
(von links: Probe 6 A, Probe 6 B, Probe 6 IA, Probe 6 IB)

Die abschliessende visuelle Beurteilung der Proben erfolgte nach 12 Monaten in Anlehnung an die EN 927-3. Die Beurteilung umfasste dabei das allgemeine Aussehen, Rissbildung, Abblättern, Schimmelbildung und Kreidung. Zusätzlich wurde der Einfluss der Vorschädigung bezüglich Unterfeuchtung, Abblättern und Rissbildung bewertet.

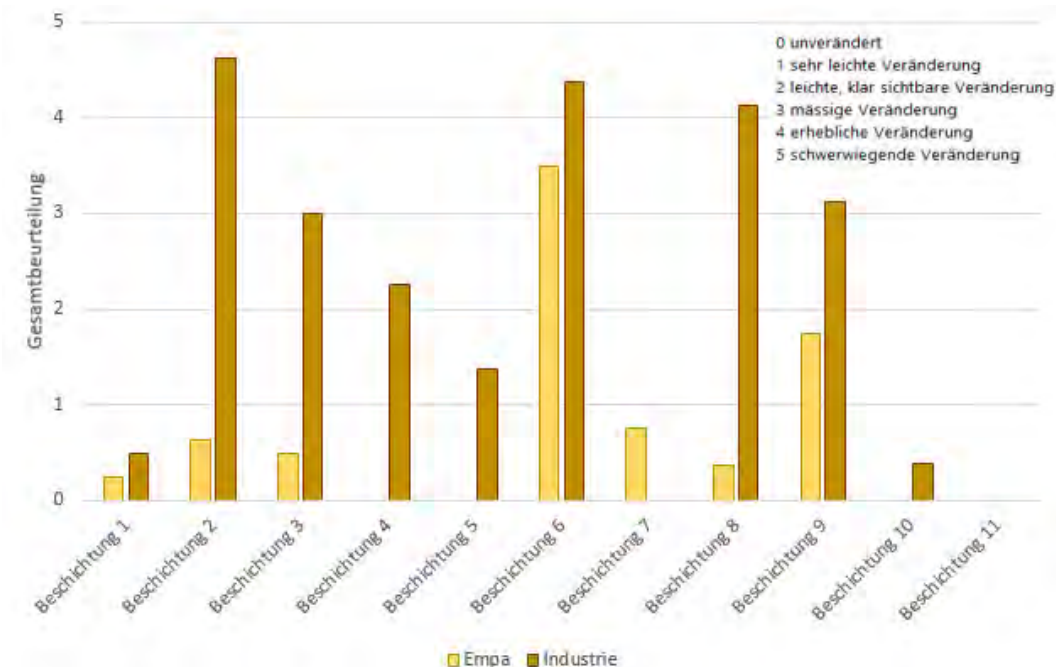


Abbildung 141 Vergleich der Gesamtperformance der Empa-Proben und der Industrieproben
 (Hinweis: Beschichtung 5 keine Empa-Proben; Beschichtung 7 keine Industrieproben)

Die Industrieproben schnitten in der Beurteilung nach 12 Monaten Freibewitterung wesentlich schlechter ab als die Empa Proben (siehe Abbildung 141).

Dabei spielten die Holzrisse eine wesentliche Rolle. Diese waren meist bedingt durch die Jahrringstellung, wobei hier vor allem liegende Jahrringe, mit der linken Seite nach aussen auffällig waren. Die Empa-Proben mit ihrer definierten Jahrringstellung (halbrift) neigten wesentlich weniger zur Rissbildung. Die Industrieproben mit Beschichtung 2 (2 IA, 2 IB) sind ein gutes Beispiel dafür, welchen (negativen) Einfluss die Jahrringstellung auf die Gesamtperformance einer Beschichtung nehmen kann (siehe Beschichtung 2 in Tabelle 34). Hier kam es neben Rissen auch zu Abblättern. Die Beschichtung 6 auf den Industrieproben (6 IA und IB) neigte ebenfalls zum Abblättern.

Schimmelbildung war lediglich auf den Beschichtungen 7 (Lärche lasierend) und 9 (weiss) deutlich sichtbar. Dabei waren die Proben in NO-Ausrichtung etwas stärker betroffen als die Proben in SW-Ausrichtung. Ein Unterschied zwischen verblauten und unverblauten Proben konnte diesbezüglich nach 1 Jahr Freibewitterung nicht festgestellt werden.

(Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es auch auf anderen Beschichtungen zu leichter Schimmelbildung gekommen ist. Von Auge was dies jedoch nicht sichtbar, vor allem bedingt durch die mehrheitlich grauen Farbtöne der Beschichtungssysteme.)

Zur Kreidung neigte lediglich die Beschichtung 6 auf den Empa-Proben. Auch hier konnten keine unterschiedlichen Intensitäten zwischen verblauten und unverblauten Proben ermittelt werden.

Nach einem Jahr Freibewitterung waren die Unterschiede zwischen den verblauten und den unverblauten Proben als gering einzustufen (Abbildung 142). Differenzen von maximal 0.75 Punkten in der Gesamtbeurteilung waren nach einem Jahr nicht praxisrelevant. Die Jahrringstellung der Proben als auch die Himmelsrichtung der Bewitterung (NO oder SW) waren die entscheidenden Einflussgrössen auf den bisherigen Gesamtzustand der Beschichtungssysteme.

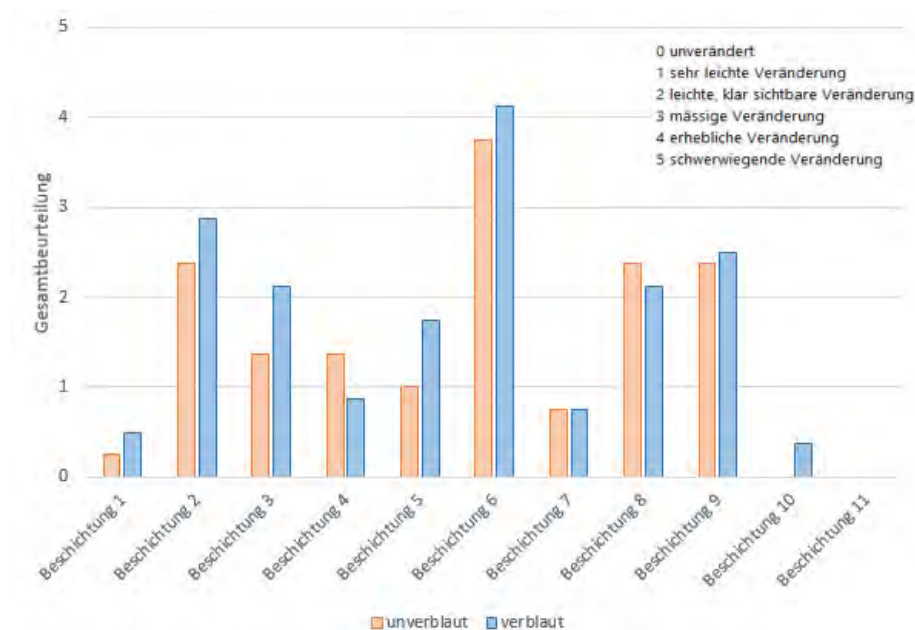


Abbildung 142 Vergleich der Gesamtperformance der Referenz-Proben ohne Bläue und der Käferholzproben mit Bläue

Bei zehn der elf untersuchten Beschichtungen konnten nach einem Jahr Freibewitterung keine relevanten Unterschiede im allgemeinen Erscheinungsbild, welche ausschliesslich auf die Bläue zurückzuführen wären, festgestellt werden (vgl. Abbildungen in Tabelle 34).

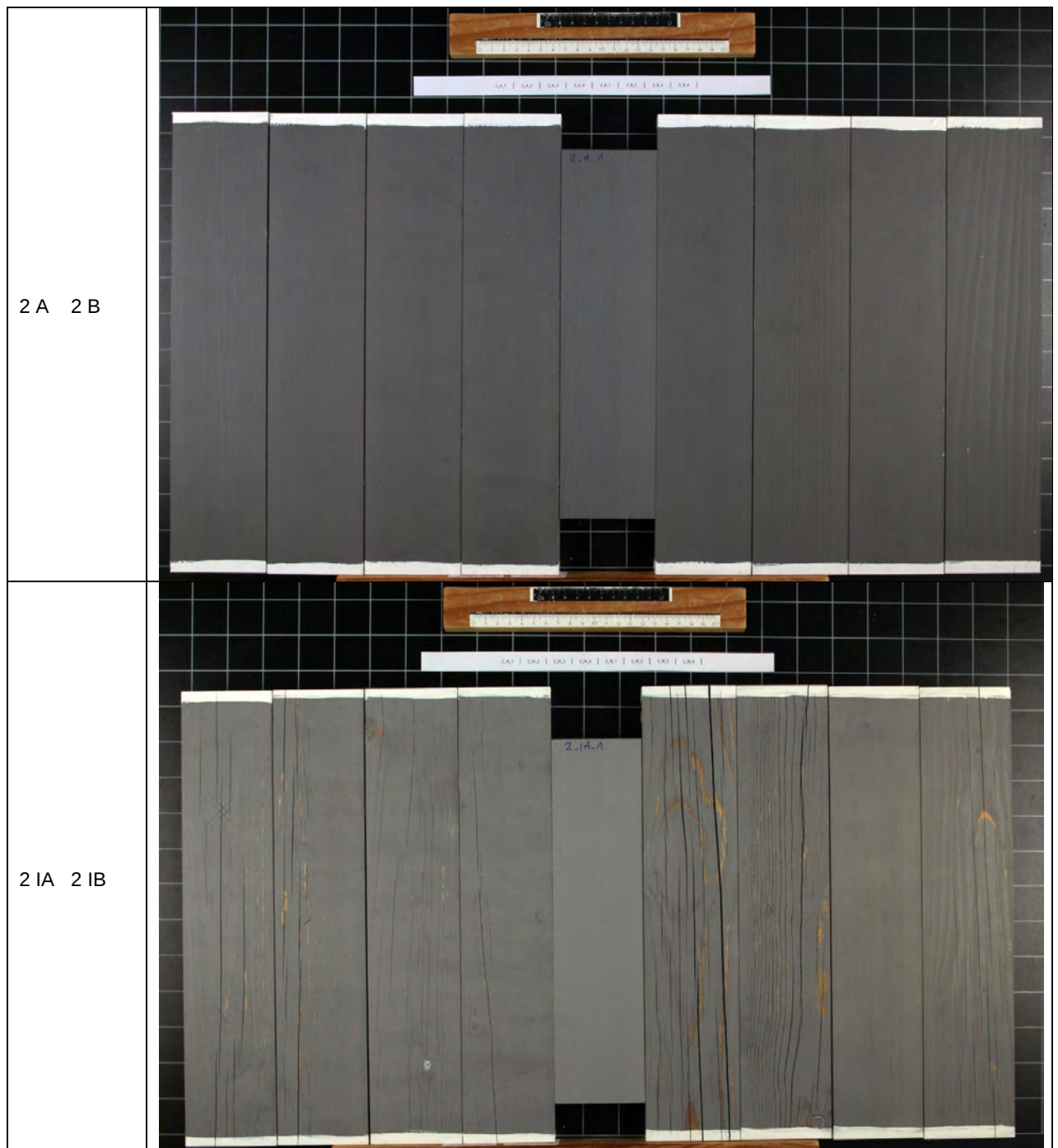
Lediglich bei Beschichtung 6 verstärkte die Bläue im Untergrund die ohnehin schlechte Performance der Beschichtung (Verfärbungen, Risse und Abblätterungen). Nach 1 ½ Jahren zeigte sich hier eine stärkere Abwitterung und Verfärbung auf den verblauten Bereichen (Abbildung 143).

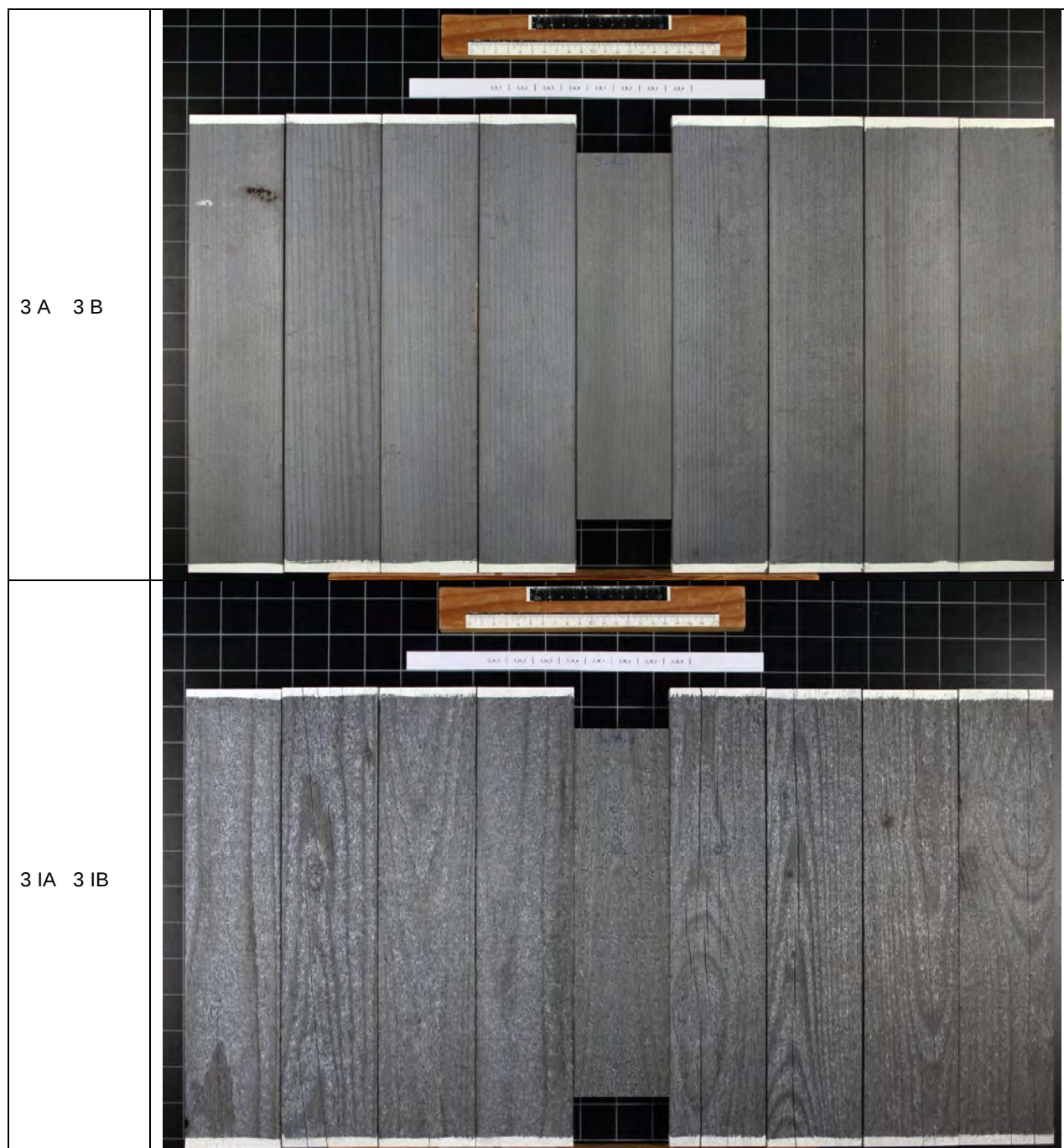


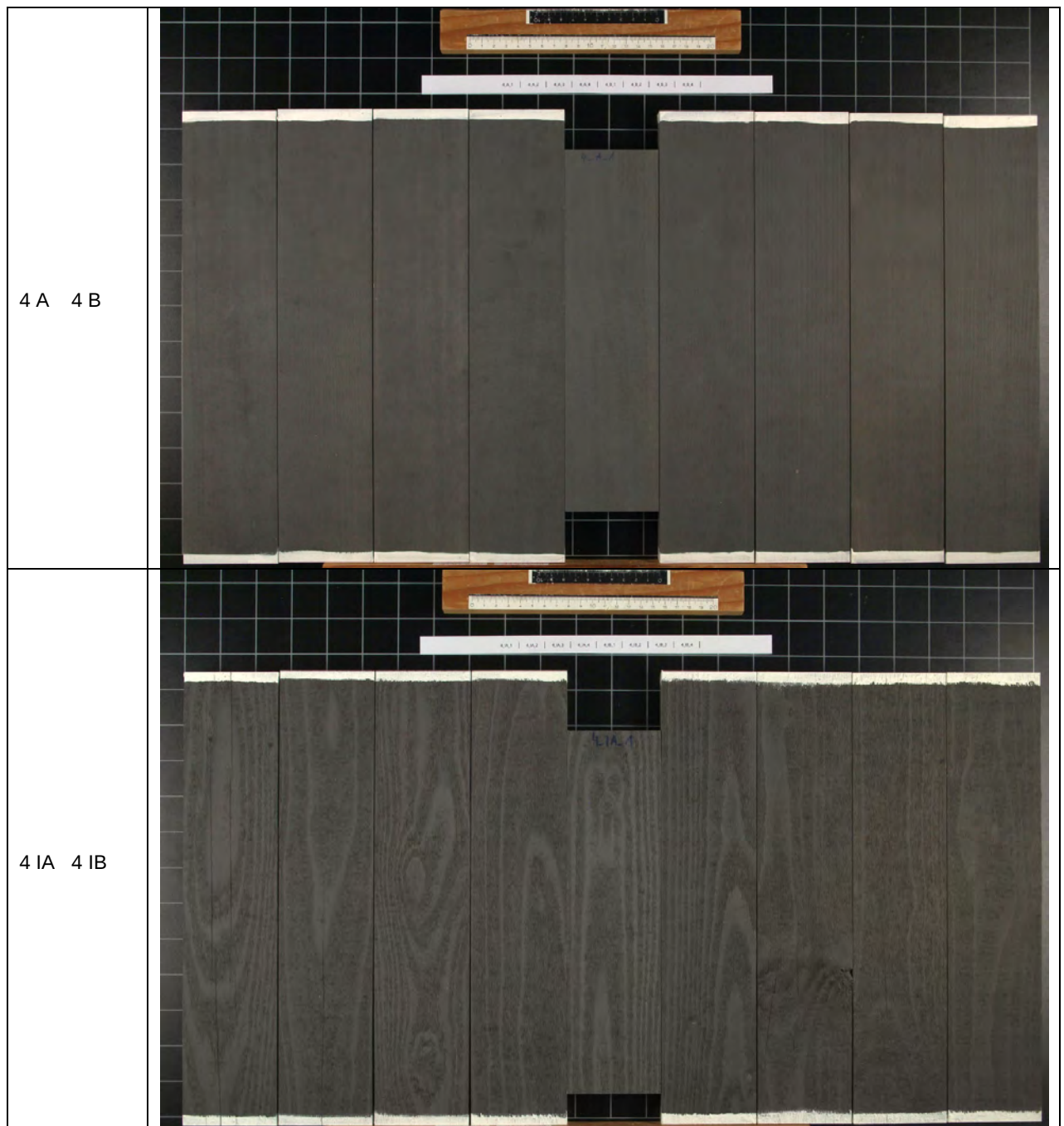
Abbildung 143 Beschichtung 6 nach 1 ½ Jahren Freibewitterung mit deutlich stärkerer Abwitterung und Verfärbung auf den verblauten Bereichen

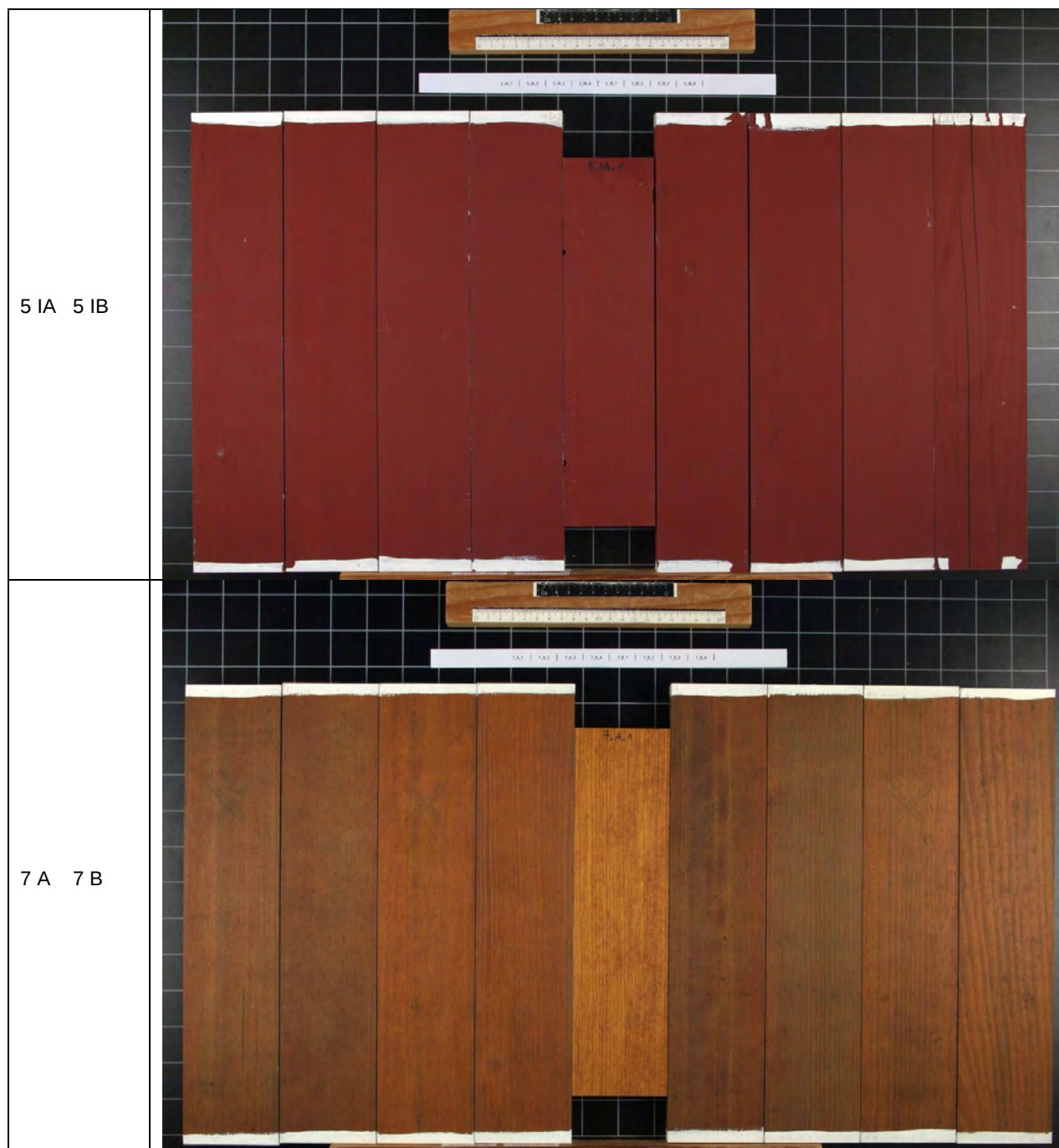
Tabelle 34
 Proben ohne und mit Bläue nach 12 Monaten Freibewitterung;
 inklusive einer unbewitterten Referenz-Probe in der Mitte

Beschichtung Probenbe- zeichnung	4 Proben ohne Bläue 2 Proben SW 2 Proben NO	Original unbewittert	2 Proben SW 4 Proben mit Bläue 2 Proben NO
1 A 1 B			
1 IA 1 IB			

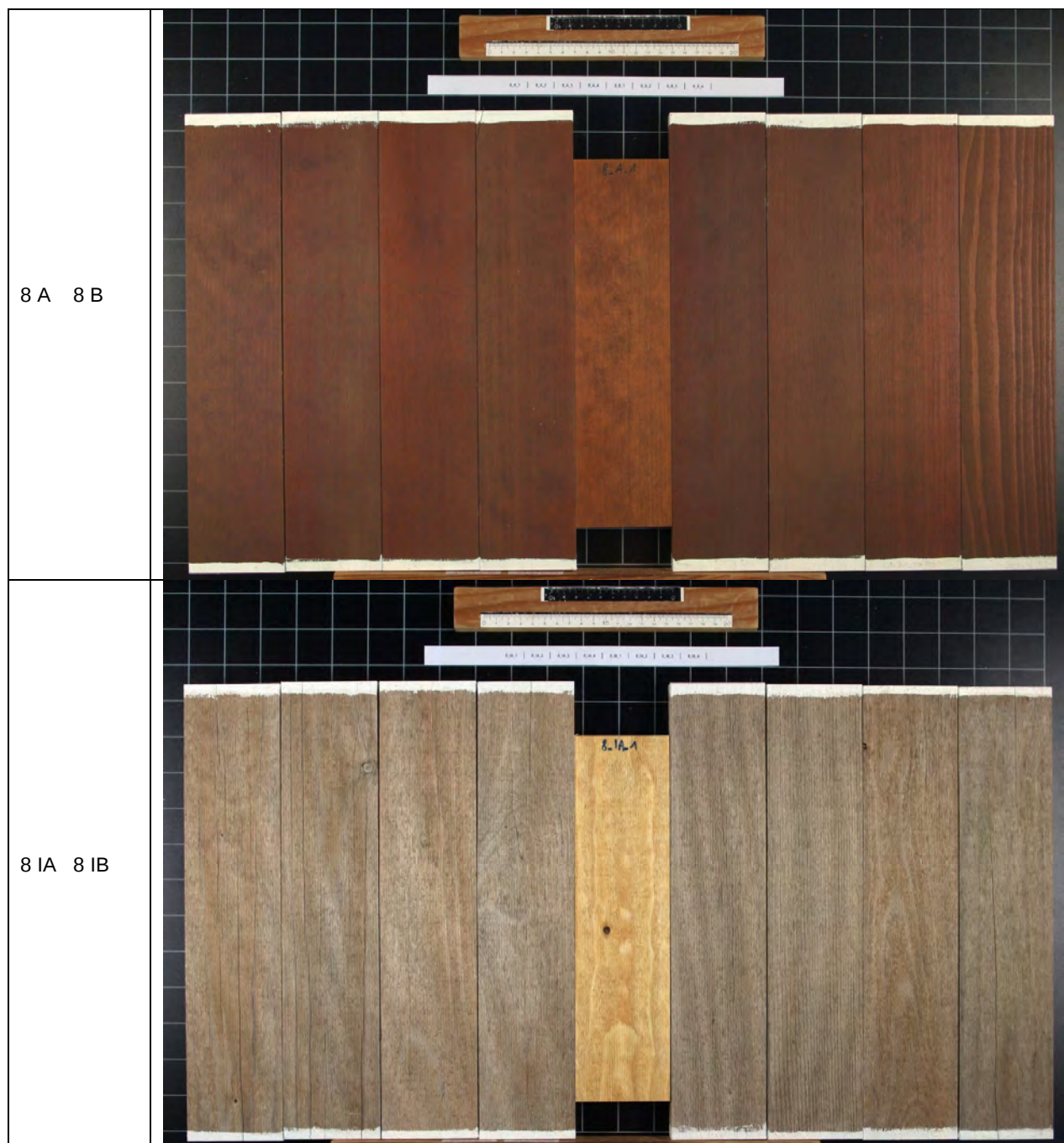


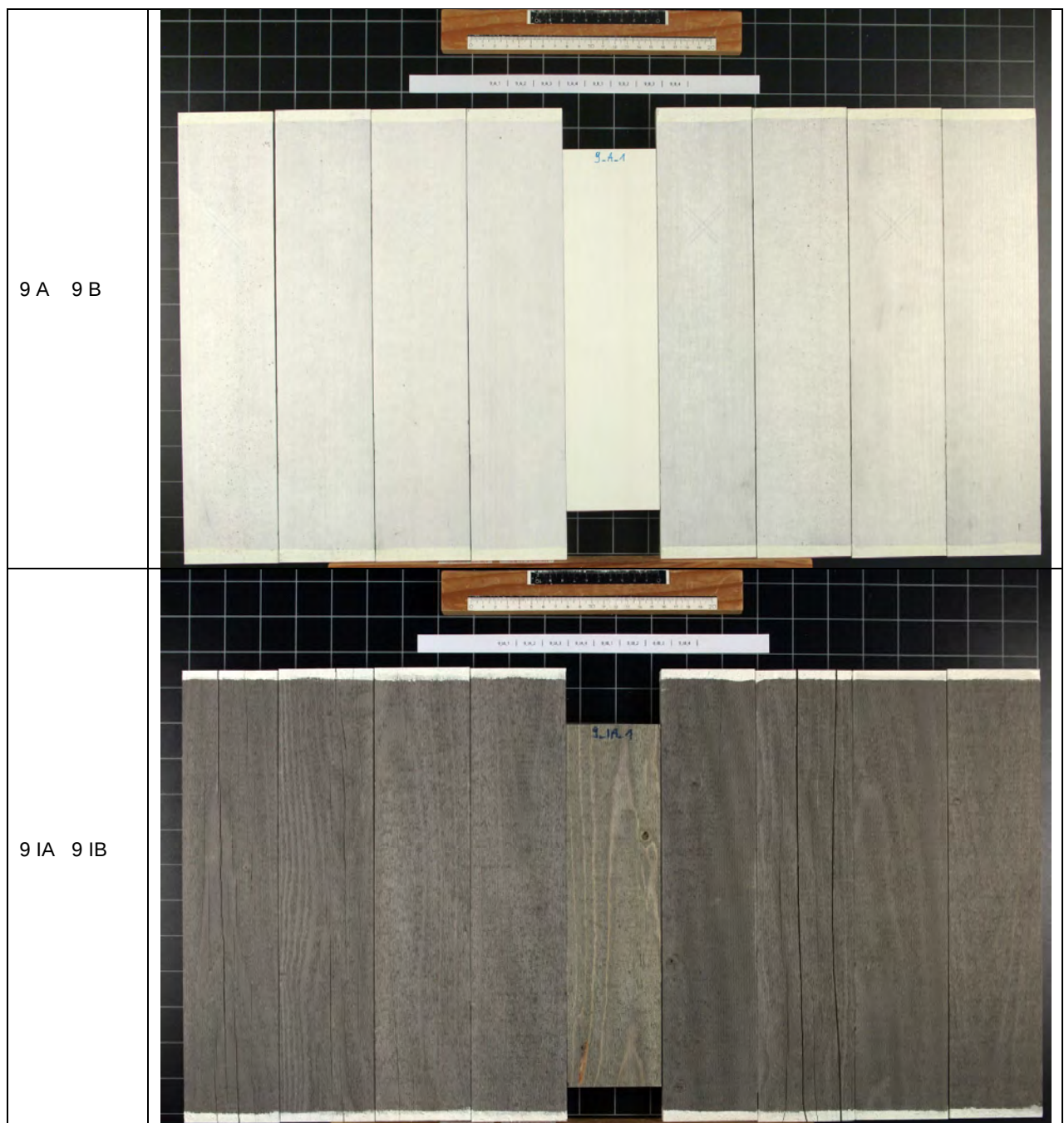


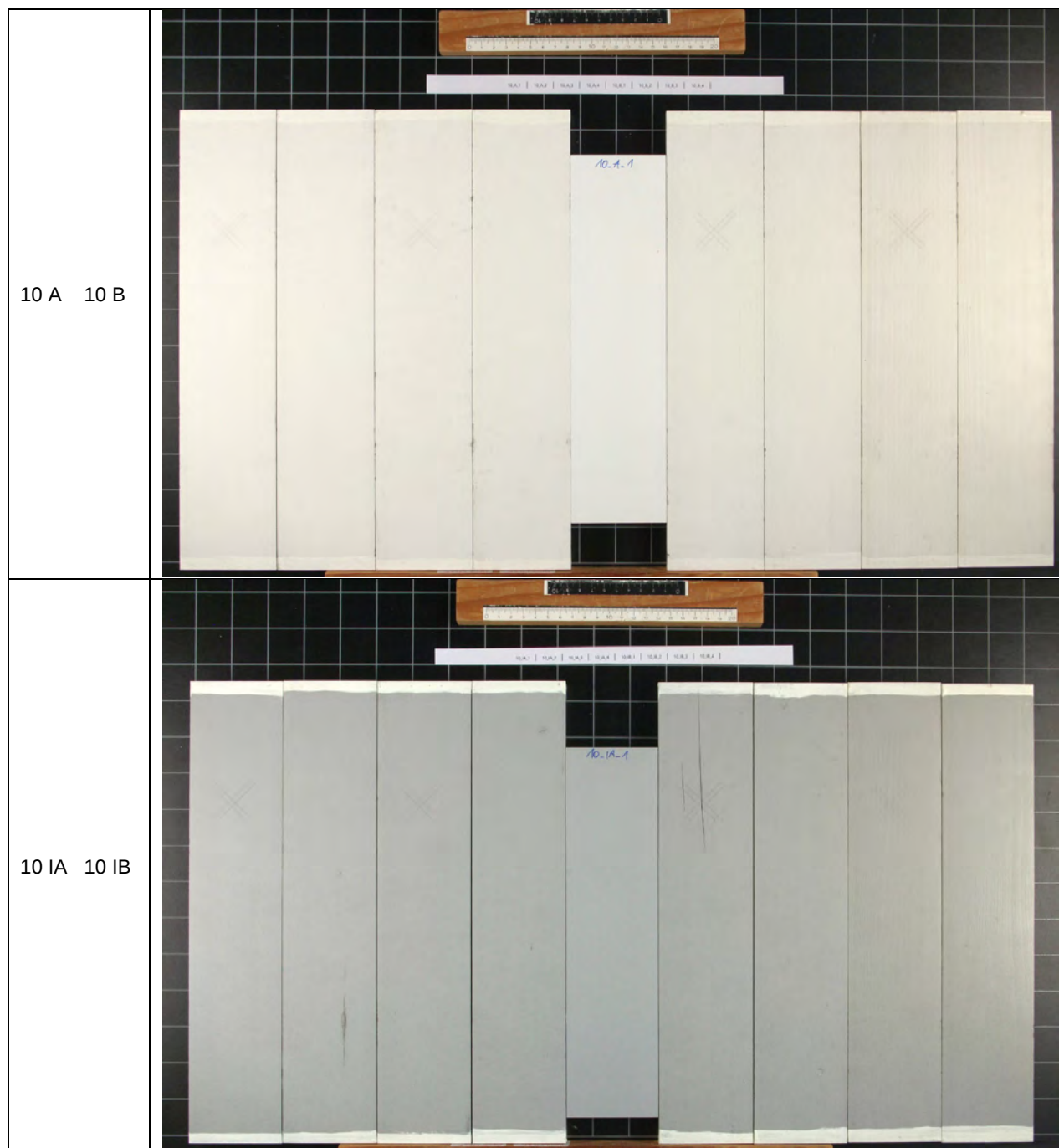


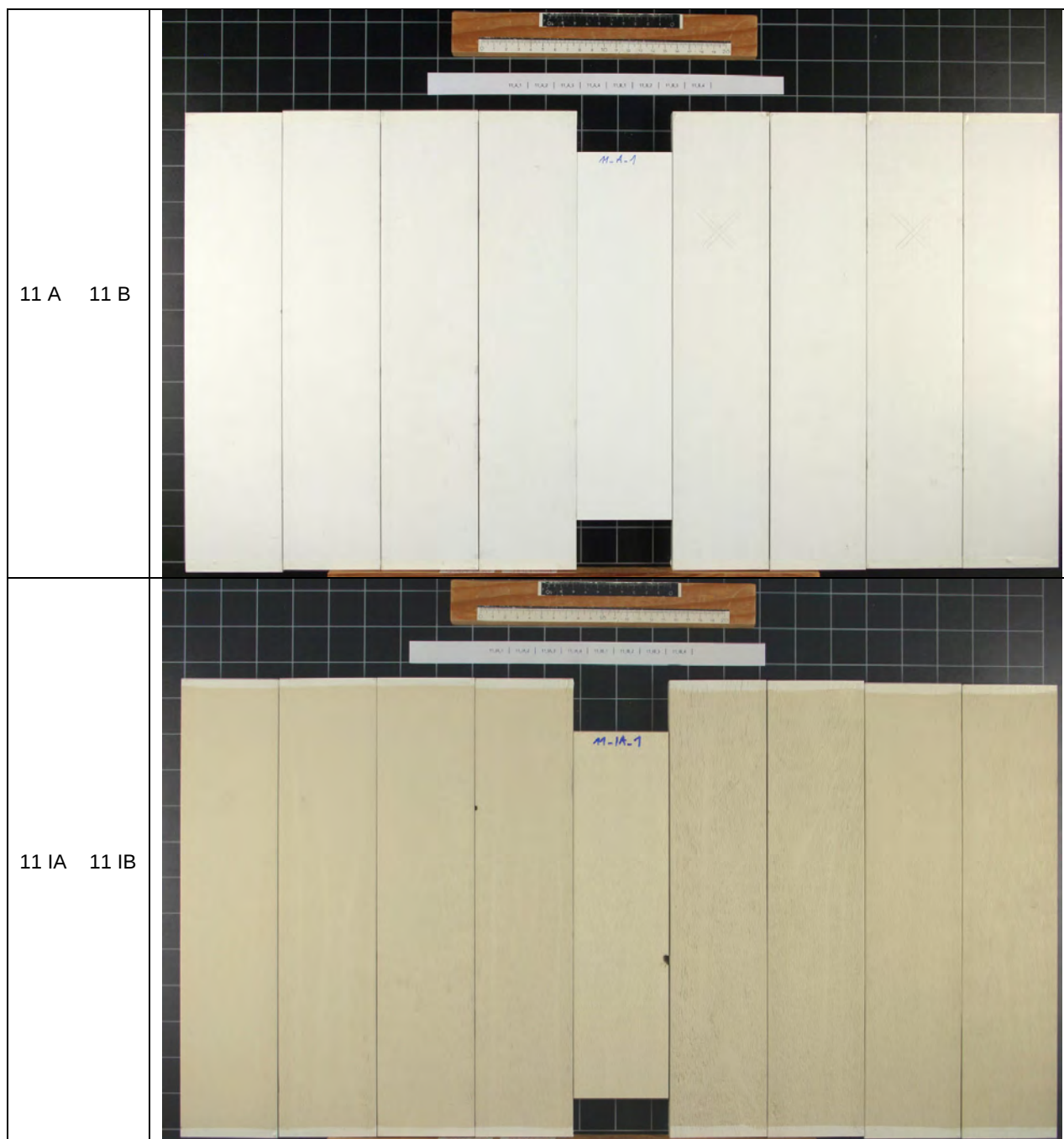












Bei der Holzfeuchte konnten zwischen den verblauten und den nicht verblauten Proben leichte Unterschiede festgestellt werden. Alle verblauten Proben nahmen während des gesamten Jahres prozentual (bezogen auf das Ausgangsgewicht der konditionierten Proben) mehr Feuchte auf als die vergleichbaren Referenz-Proben ohne Bläue. Die Proben in NO Ausrichtung waren dabei feuchter als die Proben in SW Ausrichtung.

In den folgenden Diagrammen wurde die mittlere jährliche Holzfeuchte der Proben dargestellt (Abbildung 144). Die jährlichen Mittelwerte setzen sich aus den Holzfeuchten zusammen, die jeweils am Anfang jeden Monats ermittelt wurden. Die geringsten Holzfeuchten wurden erwartungsgemäss in den Monaten Juli / August, die höchsten in den Monaten Dezember bis Februar gemessen.

Abbildung 144 Mittlere, jährliche Holzfeuchte der Proben in SW ■ und NO ■ Ausrichtung
 (A Referenz Empa, B verblaut Empa, IA Referenz Industrie, IB verblaut Industrie)



Die verblauten Proben wiesen, gemittelt über den gesamten Jahresverlauf, eine höhere Holzfeuchte auf als die entsprechenden Referenz-Proben ohne Bläue (Abbildung 144). Je nach Beschichtung war dieser Unterschied grösser oder kleiner.

Vom Start der Bewitterung bis September 2022 waren die Holzfeuchten der Proben, aufgrund der trockenen, sonnigen Witterung, im Mittel $u < 20\%$. Lediglich einzelne verblaute Proben wiesen bei der Messung Anfang April und Anfang Mai Holzfeuchten $u > 20\%$ auf. Dies betraf vor allem Industrieproben (IB-Proben) mit der Beschichtung 6 und Beschichtung 11.

Im Oktober 2022 wiesen bereits diverse Proben Holzfeuchten über 20% auf. Bei den Beschichtungen 1, 2, 3, 5, 6, 8 und 9 waren dies vor allem verblaute Proben in NO-Ausrichtung. Bei den Beschichtungen 10 und 11 zeigten zusätzlich auch verblaute Proben in SW-Ausrichtung sowie einzelne unverblaute Proben in NO-Ausrichtung Holzfeuchten $u > 20\%$.

Lediglich an den Proben mit Beschichtung 4 und 7 wurden bis Oktober 2022 ausschliesslich Holzfeuchten $u < 20\%$ gemessen.

Ab November 2022 stiegen die Holzfeuchten merklich an. Bis auf wenige unverblaute Proben zeigten praktisch alle Proben in NO-Ausrichtung Holzfeuchten $u > 20\%$. Während an allen Proben der Beschichtungen 6 und 11 auch in SW-Ausrichtung Holzfeuchten $u > 20\%$ gemessen wurden, waren die Holzfeuchten aller Proben der Beschichtungen 1, 3, 4, 7 und 8 in SW-Ausrichtung immer noch $u < 20\%$.

Vor allem in den Wintermonaten (Dez. 2022 – Feb. 2023) war die Holzfeuchte der einzelnen Proben (bis auf wenige Ausnahmen) zwischen 20% - 25% , teilweise darüber. Proben mit Holzfeuchten $u > 25\%$ waren zu 85% verblaute Proben.

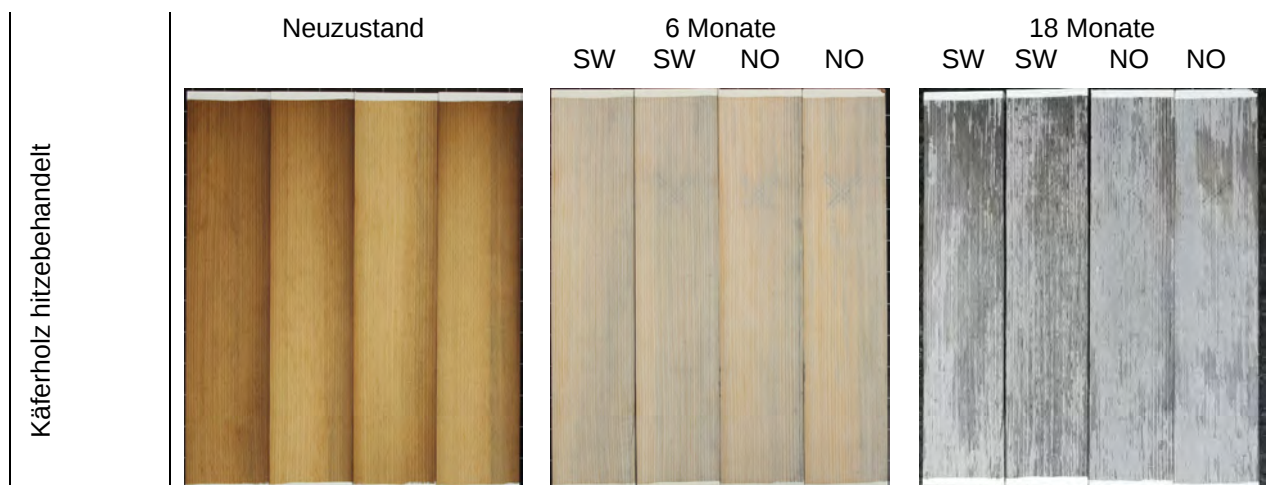
Die Messdaten haben gezeigt, dass die verblauten Untergründe aufgrund der höheren Holzfeuchte bezüglich Pilzbefall durchaus ein gewisses Risiko darstellen könnten. Dies insbesondere in Jahren mit genügend Feuchtigkeit in den warmen Monaten, und wenn die Proben aufgrund fehlender direkter Sonnenbestrahlung (nördliche Ausrichtung) weniger gut abtrocknen können.

Nach einem Jahr Freibewitterung kann festgestellt werden, dass die beschichteten verblauten Proben tendenziell höhere Holzfeuchten aufweisen (bis 4% höhere Holzfeuchte), sie jedoch bis anhin in ihrer Gesamtperformance mit den unverblauten Referenz-Proben vergleichbar sind.

Um eventuelle Veränderungen der verblauten Bereiche unter einer Beschichtung besser beurteilen zu können, wurden zusätzliche Proben mit einem transparenten Holzlack mit geringem Feuchte- und UV-Schutz beschichtet und der Freibewitterung ausgesetzt.

Tabelle 35 Proben nach 6 und 18 Monaten Freibewitterung

	Neuzustand	6 Monate			18 Monate		
		SW	SW	NO	SW	SW	NO
Referenz							
Käferholz verblaut							
Käferholz gedämpft							



Bereits nach 6 Monaten Freibewitterung sieht man beim verblauten Käferholz deutlich, dass die verblauten Bereiche unter dem transparenten Lack intensiver vergraut sind als die nicht verblauten Bereiche (Tabelle 35, 2. Zeile). Nach 18 Monaten ist der Lack teilweise abgeblättert, vor allem auf den verblauten Untergründen.

Sowohl die gedämpften als auch die mit Hitze behandelten Proben zeigen bereits nach 6 Monaten eine starke Verblassung der ursprünglichen braunen Färbung. Die Bläue tritt wieder prominenter hervor.

Nach 18 Monaten ist der Lack auf den gedämpften Proben fast vollständig abgewittert (Tabelle 35, 3. Zeile). Auch die nach SW ausgerichteten, mit Hitze behandelten Proben sind bereits stark abgewittert (Tabelle 35, 4. Zeile).

Die kleinen braunen Stellen auf den 18 Monate bewitterten Proben, vor allem bei den gedämpften Proben, sind Spuren von Insektenfrass (Wespen).

Nach 18 Monaten Freibewitterung war der transparente Lack tendenziell auf den verblauten Bereichen stärker abgewittert. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass auch bei den deckenden Anstrichen die Dauerhaftigkeit und somit die Renovationsintervalle etwas verkürzt sind, sofern verblautes Käferholz verwendet wird.

Um dies besser abschätzen zu können befinden sich ALLE Proben weiterhin in der Freibewitterung. Eine erneute Beurteilung wird nach ca. 3 Jahren erfolgen (ca. Ende 2024).

7 Zusammenfassung

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Studie sind unter den folgenden Punkten zusammengefasst:

AP 2 – Material

- ♦ Frisch vom Borkenkäfer *Ips typographus* befallenes Fichtenholz - Käferholz – zeigte bereits beim Fällen eine **Verblauung des Splintes** in den oberen Stammabschnitten, während ein grosser Teil der mittleren und unteren Stammabschnitte noch unverfärbt war.
- ♦ An bereits länger befallenen Stämmen war fast der gesamte Splint relativ gleichmässig verblaut.
- ♦ Ohne technische Trocknung zeigten auch die unverblauten Stammabschnitte innert weniger Tage Lagerung erste Anzeichen von Bläue.
- ♦ Der Splint des Käferholzes wies neben den zu erwartenden **Hyphen und Sporen der Ascomyceten**, zu denen auch die bläueverursachenden Pilze zählen, auch **Hyphen und Sporen von holzabbauenden Basidiomyceten** auf. Dies bestätigt die Annahme, dass ein Käferbefall nicht nur zu einer Verblauung des Holzes führt, sondern dass nach einigen Wochen Lagerung auch immer mit einem beginnenden Strukturabbau durch holzabbauende Pilze gerechnet werden muss.
- ♦ Eine künstliche Verblauung von Fichte mittels Sporensuspensionen aus Käferholz war nur bedingt erfolgreich. Die künstliche Infektion führte zu einem anderen Verblauungsmuster als bei echtem Käferbefall. Zudem dominierten Basidiomyceten, welche zu Rotstreifigkeit führten, den künstlichen Befall.

AP 3 – Charakterisierung

- ♦ Die Rohdichte von verblautem Käferholz, welches kurz nach dem Befall geschlagen wurde und noch wenig Verblauung aufwies (Proben Gruppe 2; B Charge III), war vergleichbar mit der Rohdichte von unbefallener Fichte.
- ♦ Verblautes Käferholz, welches erst mehrere Monate nach dem Befall geschlagen oder eingeschnitten wurde (Proben Gruppe 3 und 4; B Charge II & C Charge I), zeigte bei gleicher Jahrringbreite eine im Durchschnitt um mindestens **5% geringere Rohdichte** als unbefallenes Fichtenholz. Dies könnte mit der natürlichen Variation der Rohdichte zusammenhängen, aber auch ein Hinweis auf einen beginnenden Abbau der Holzstruktur durch holzerstörende Pilze sein.
- ♦ Die **Druckfestigkeit** aller untersuchten Proben war vergleichbar.
- ♦ Die **Scherfestigkeit** aller untersuchten Proben war vergleichbar.
- ♦ 18% der verblauten Proben aus Gruppe 3 und 40% der Proben aus Gruppe 4 zeigten in der **3-P-Biegung** ein eher **sprödes Bruchverhalten mit stumpfen Bruchflächen**, mit niedrigeren Standardkräften und geringerer Dehnung, wogegen alle Referenz-Proben sowie sämtliche Proben aus Charge III (Proben Gruppe 1 und 2) einen faserigen Bruch aufwiesen.
- ♦ In den Mittelwerten von **E-Modul MOE und Bruchmodul MOR** 3-P-Biegung spiegelt sich dieses ungünstige Bruchverhalten des Käferholzes nur bedingt wieder. Lediglich der MOR der **Proben mit Bläue und Rotstreifigkeit** (Gruppe 4) war im Mittel **um 5% reduziert** (bei vergleichbarer Jahrringstruktur).
- ♦ Verblautes Käferholz, welches erst mehrere Monate nach dem Befall geschlagen oder eingeschnitten wurde (Proben Gruppe 3 und 4), zeigte eine deutliche **Reduktion der Bruchschlagarbeit** um durchschnittlich 35%. Die Referenz-Proben ohne Bläue sowie die Käferholz-Proben ohne oder mit beginnender Bläue (Gruppe 1 und 2; B Charge III) zeigten dagegen keine signifikanten Unterschiede in der Bruchschlagarbeit.
- ♦ Die **Brinell Härte** der verblauten Bereiche war mehrheitlich vergleichbar mit der der Referenz-Proben.
- ♦ Verblautes Käferholz, welches länger im Bestand verblieb und/oder länger im Wald oder im Sägewerk gelagert wurde, zeigte eine **eingeschränkte Oberflächenelastizität**. Dies bedeutet, dass sich Druckstellen, welche durch mechanische Belastung (z.B. Hagel) entstanden sind, schlechter zurückbildeten.

- ◆ Das **Quellverhalten** der verblauten Proben war mit dem der Referenz-Proben vergleichbar.
- ◆ Die Dynamik der Wasseraufnahme und –abgabe (**Adsorption / Desorption**) innerhalb des hygroskopischen Feuchtebereiches war beim Käferholz nicht signifikant verändert.
- ◆ Im Saugversuch war die **kapillare Wasseraufnahme (über Hirnholzflächen)** der verblauten Käferholzproben um das **ca. 4-fache höher** als die der Referenz-Proben. Während luftgetrocknetes, unverblautes Käferholz mit einer fast 2-fach höheren kapillaren Wasseraufnahme ebenfalls signifikant höhere Werte als das Referenzmaterial erreichte, zeigte das technisch getrocknete, unverblaute Käferholz keine erhöhte kapillare Wasseraufnahme.
- ◆ Der **Wasseraufnahmekoeffizient (Tauchversuch; Wasseraufnahme über Tangentialflächen)** der verblauten Proben war **3-mal so hoch** wie der Wert der Referenz-Proben ohne Bläue.
- ◆ Die **Rücktrocknung** der verblauten Proben war nicht eingeschränkt.
- ◆ Während die **Wasseraufnahme** von verblautem Käferholz durch eine **Hitzebehandlung** signifikant sank, wurde sie durch das **Dämpfen** noch zusätzlich erhöht.

- ◆ Brettware aus unverblautem **Käferholz verfärbte sich während der Lufttrocknung** im Freien unter Dach innert weniger Tage.
- ◆ **Unverblautes Käferholz** kann auch nach der technischen Trocknung **nachverblauen**, sofern die Bedingungen wie Feuchte und Temperatur für den Pilz günstig sind.
- ◆ Eine **Belastung der Raumluft durch keimfähige Sporen** während der Verarbeitung von technisch getrocknetem, verblautem Käferholz ist als **gering bis sehr gering** einzustufen.
- ◆ Die technisch getrockneten und gehobelten Oberflächen von verblautem Käferholz enthielten etwa die **10-fache Menge an keimfähigen Sporen an der Oberfläche**, im Vergleich zu den unverblauten Käferholzproben. Luftgetrocknete Hobelware ist dabei stärker belastet als technisch getrocknete Hobelware. Dämpfen reduziert die Anzahl keimfähiger Sporen signifikant.
- ◆ **Verblaute Bereiche** wurden bei ausreichender Umgebungsfeuchte **schneller und intensiver durch Schimmel befallen**.
- ◆ Verblautes Käferholz wurde durch den **Balken-Blättling früher und in stärkerer Intensität abgebaut** als die Referenz-Proben ohne Bläue. Bei den anderen getesteten Braunfäuleerregern konnte kein signifikanter Unterschied in der Befallsintensität festgestellt werden.

AP 4 – Oberflächliche Entfärbung

- ◆ Der **Farbunterschied ΔE** zwischen den verblauten und den unverblauten Bereichen ist mit Werten zwischen 9 bis 12 relativ deutlich und wird vom menschlichen Auge klar als andere Farbe wahrgenommen.
- ◆ Die getesteten **chemischen Bleichverfahren** waren als Methoden zur oberflächlichen Entfärbung des verblauten Fichtenholzes **ungeeignet**, da das für das bläuliche Erscheinungsbild verantwortliche Melanin in den Pilzhypen im Vollholz zu schlecht zugänglich ist.
- ◆ Auch die getesteten **elektromagnetischen Wellen sowie Ultraschall** führten nicht zu befriedigenden Ergebnissen bezüglich Entfärbung bzw. Farbangleichung. Ein angestrebtes Platzen der Hyphen bzw. die Zerstörung des Melanins waren unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich. Eine genügende Intensität der Behandlung in tieferen Holzschichten war nicht möglich.
- ◆ Eine **Hitzebehandlung** mit einhergehender Farbänderung des Holzes führte zu einer Farbangleichung zwischen den verblauten und den unverblauten Bereichen. Bei einem gemessenen Farbabstand von $\Delta E = 2$ ist dieser kaum noch durch das menschliche Auge wahrnehmbar. Eine generell wesentlich dunklere Optik des Holzes muss dabei in Kauf genommen werden. Zudem wird das Holz durch die Behandlung wasserabweisender.
- ◆ Eine Behandlung durch **Dämpfen**, wie in diesem Projekt beschrieben, verringert die Farbdifferenz zwischen den verblauten und unverblauten Bereichen, hebt diese jedoch nicht auf. Da das gedämpfte Holz wesentlich stärker zur Wasseraufnahme neigt und zudem die Attraktivität für holzabbauende Pilze wie den Balken-Blättling zunimmt, ist die Methode für Holz zum Einsatz im Aussenbereich mit direkter Bewitterung nur bedingt geeignet.

AP 5 – Beschichtung und Bewitterung

- ◆ Bei der **Applikation und Trocknung der Beschichtungssysteme** auf den verblauten Bereichen konnten laut Aussagen der industriellen Beschichter keine Auffälligkeiten beobachtet werden. Auch das visuelle Erscheinungsbild nach der Trocknung war vergleichbar mit dem Referenzmaterial.
- ◆ Die **Trockenschichtdicken** als auch die **Eindringtiefen** der Beschichtungen auf verblautem Käferholz und unverblautem Referenzmaterial waren vergleichbar.
- ◆ Bei den **nicht oder wenig pigmentierten Anstrichsystemen** waren erwartungsgemäss die verblauten Bereiche durch die Beschichtung sichtbar.
- ◆ Die **Trockenhaftung** der Beschichtungen auf verblautem Käferholz und unverblautem Referenzmaterial war bei der Mehrzahl der Beschichtungssysteme vergleichbar. Geringfügige Unterschiede bei einzelnen Beschichtungssystemen waren während der 1-jährigen Freibewitterung nicht relevant, könnten allerdings bei längeren Standdauern zu einem früheren Abwittern der Beschichtung führen.
- ◆ Bei der **Wasserdampfaufnahme der beschichteten Proben** konnten keine Unterschiede zwischen verblauter und unverblauter Fichte festgestellt werden.
- ◆ Die **Wasseraufnahme der beschichteten Proben** aus verblautem Käferholz (Kaltwasserlagerung) war **deutlich höher** als die der Referenz-Proben. Der **Wasseraufnahmekoeffizient der verblauten Proben war bis zu 4-mal höher**.
- ◆ Verblaute Bereiche ohne als auch mit transparenter Beschichtung (Innenbereich) waren nach 3000 Stunden UV-Bestrahlung aufgrund der generell nachgedunkelten Holzoberflächen weniger auffällig. Beim Einsatz von Bläue als gestalterisches Element muss somit mit leichten Farbveränderungen gerechnet werden.
- ◆ Während der **Freibewitterung** wiesen die Proben aus verblautem Käferholz eine **bis zu 4% höhere Holzfeuchte** auf, verglichen mit den Referenz-Proben.
- ◆ Nach **einem Jahr Freibewitterung** waren **keine relevanten Unterschiede in der gesamten Performance** der deckenden Beschichtungen auf verblautem oder unverblautem Material feststellbar. Die Jahrringstellung der Proben als auch die Himmelsrichtung der Bewitterung (NO oder SW) waren die entscheidenden Einflussgrössen auf den bisherigen Gesamtzustand der beschichteten Lamellen.
- ◆ Lediglich bei einem Beschichtungssystem **verstärkte der verblaute Untergrund** und die damit verbundene höhere Holzfeuchte **die ohnehin schlechte Performance der Beschichtung**.
- ◆ Ein transparenter Holzlack auf verschiedenen Käferholzproben war **nach 18 Monaten Freibewitterung** über den **Bereichen mit Bläue stärker abgewittert** als auf den nicht verblauten Bereichen. Auch eine weisse mineralische Beschichtung zeigte nach 18 Monaten Freibewitterung diese Tendenz.

8 Schlussfolgerungen

Fichte, welche durch den Borkenkäfer (*Ips typographus*) befallen wird, zeigt nach kürzester Zeit nicht nur die typische Bläue im Splintbereich des Holzes, sondern dieses ist in der Regel bereits auch durch holzerstörende Pilze befallen. Abhängig von den Stand- und Lagerzeiten nach dem Borkenkäferbefall sowie den klimatischen Bedingungen kann dieser Befall mit Holzzerstörern relevant werden und mit dem Verlust an mechanischer Festigkeit einhergehen. Zudem nimmt das verblaute Käferholz bei Wasserkontakt signifikant mehr Feuchtigkeit auf und es ist anfälliger gegenüber dem Befall mit einigen Braunfäuleerregern, beispielsweise dem Balken-Blättling.

Die durchschnittlich höhere Holzfeuchtigkeit des verblauten Käferholzes in Kombination mit bereits im Splint vorhandenen Holzzerstörern könnte bei der Anwendung als Fassadenschalung längerfristig zu Problemen wie Fäulnis inklusive Festigkeitsverlust führen. Wie hoch dieses Risiko jedoch in der Praxis ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt (nach nur 1 Jahr Freibewitterung) nicht abschliessend gesagt werden.

Basierend auf ihren eigenen Messdaten und mit Hilfe des Meyer-Veltrup Modells (Brischke, Alfredsen et al. 2021) prognostizierten (Kržišnik, Lesar et al. 2018) für Bauteile aus verblautem Käferholz im Aussenbereich eine um ca. 30% geringere Lebensdauer als für Bauteile aus gesundem Fichtenholz.

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen, ist der Einsatz von verblautem Käferholz als beschichtete Fassadenschalung möglich. Ob langfristig die gleichen Standdauern wie auf gesundem Fichtenholz erreicht werden können, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht sicher prognostiziert werden.

Um befriedigende Standdauern zu gewährleisten, sollten die Lamellen vor langfristiger Durchfeuchtung geschützt werden (Konstruktive Massnahmen, diffusionsoffene Beschichtungen).

Der Einsatz von verblautem Käferholz als Unterkonstruktion der Fassaden ist kritischer zu bewerten. Hier sollte durch den zusätzlichen Einsatz von biozid eingestellten Grundierungen oder Imprägnierungen das erhöhte Risiko von Pilzschäden reduziert werden.

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Projektes und der Tatsache, dass aufgrund der ebenfalls eingeschleppten holzerstörenden Pilze relativ schnell auch mit Festigkeitseinbussen im Holz gerechnet werden muss, scheint es angebracht, diesen Aspekt für den tragenden Holzbau inklusive Verklebung separat zu diskutieren und gegebenenfalls zusätzliche Daten zu erheben.

Trotz der vielen gewonnenen Erkenntnisse hat dieses Projekt auch gezeigt, dass noch viele Fragen rund um das Thema Käferholz unbeantwortet sind. Die grösste Relevanz besteht aus unserer Sicht bezüglich der Fragen:

- Wie kann man die Holzqualität am stehenden Baum nach Befallsbeginn kontrollieren? Ab wann spricht man von 'Käferholz' (Definition fehlt)?
- Wie schnell muss die durch den Borkenkäfer befallene Fichte gefällt werden, um Qualitätsverluste des Holzes zu vermeiden? Welche Faktoren spielen dabei eine Rolle?
- Welche Lagerung ist am besten geeignet, um Nachverblauung und Rotstreifigkeit zu verhindern?
- In welchem Umfang kann auch das Kernholz durch den Befall mit holzabbauenden Pilzen (Rotstreifigkeit) betroffen sein?
- Wie gut eignet sich verblautes Käferholz für Druckimprägnierungen für GK 3 und GK4? Ist die Auswaschung von Wirkstoffen (Menge und Geschwindigkeit) vergleichbar mit der aus gesunder Fichte?
- Für welche Produkte mit Wertschöpfung kann verblautes Käferholz problemlos eingesetzt werden (Verpackung und Lagerung von Lebensmitteln, verklebte Produkte wie z.B. Furnier- oder Mehrschichtplatten, druckimprägnierte Produkte usw.)? Welche Risiken bestehen?

Kontaktperson:

Dipl. Ing. Tina Künniger
Empa
Abteilung Cellulose & Wood Materials
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf

Tel.: +41 58 765 44 37
Email: tina.kuenniger@empa.ch

Dübendorf, 30. September 2023

Tina Künniger
Projektleiterin

Prof. Dr. Ingo Burgert
Leiter Forschungsgruppe WoodTec
Abt. Cellulose & Wood Materials

9 Literatur

- Banholzer, H., C. Fuhrmann, et al. (Ausgabe 2010). Holzhandelsgebräuche für die Schweiz, Lignum, Holzbau Schweiz, Waldwirtschaft Schweiz, Holzindustrie Schweiz.
- Barnett, H. L. (1960). Illustrated Genera of Imperfect Fungi, Burgess Publ.
- Brischke, C., G. Alfredsen, et al. (2021). "Modeling the Material Resistance of Wood—Part 2: Validation and Optimization of the Meyer-Veltrup Model." *Forests* 12: 576.
- Burmester, A. (1970). "Einfluß von Holzfeuchtigkeit und Rohdichte auf die Schlagbiegefestigkeit von Kiefern-, Fichten- und Buchenholz/ Influence of moisture content and density on impact bending strength of spruce, pine and beech wood/ L'influence de l'humidité et de la densité sur la résistance à la flexion au choc du bois de pin, d' épicéa et de hêtre." *Materials Testing* 12(9): 313-316.
- Caduff, M. E., N. Brožová, et al. (2022). "How large-scale bark beetle infestations influence the protective effects of forest stands against avalanches: A case study in the Swiss Alps." *Forest Ecology and Management* 514: 120201.
- CHAPMAN, A. D. (1933). "EFFECT OF STEAM STERILIZATION ON SUSCEPTIBILITY OF WOOD TO BLUE-STAINING AND WOOD-DESTROYING FUNGI." *Journal of Agricultural Research* 47(6).
- Christiansen, E. and H. Solheim (1990). "The bark beetle-associated blue-stain fungus *Ophiostoma polonicum* can kill various spruces and Douglas fir." *European Journal of Forest Pathology* 20(6-7): 436-446.
- Denzler, J. K. (2007). Modellierung des Grösseneffektes bei biegebeanspruchtem Fichtenschnittholz. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München.
- Encinas, O. and G. Daniel (1997). "Degradation of the Gelatinous Layer in Aspen and Rubberwood by the Blue Stain Fungus *Lasiodiplodia Theobromae*." *IAWA Journal* 18(2): 107-115.
- Engler, H. (2019). "Holzmarktbericht." *Holzmarkt Ostschweiz* 2019-5.
- Evans, P. D., G. Palmer, et al. (2007). "Bleaching treatments for blue-stained lodgepole pine affected by the mountain pine beetle *Dendroctonus ponderosae*." *Holz als Roh- und Werkstoff* 65(6): 485-486.
- Furniss, M. M., H. Solheim, et al. (1990). "Transmission of Blue-Stain Fungi by *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae) in Norway Spruce." *Annals of the Entomological Society of America* 83(4): 712-716.
- Ghelmeziu, N. (1938). "Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Bauhölzern." *Holz als Roh- und Werkstoff* 1(15): 585-601.
- Glass, S. V., C. R. Boardman, et al. (2018). "Quantifying and reducing errors in equilibrium moisture content measurements with dynamic vapor sorption (DVS) experiments." *Wood Science and Technology* 52(4): 909-927.
- Glos, P. and A. Gamm (1987). Untersuchung der Festigkeit von Fichten-Bauholz nach Schädlingsbefall infolge von Waldschäden, DGfH Abschlussbericht 85502, Fraunhofer IRB Verlag.
- Grammel, R. (1990). "Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften der Fichte." *European Journal of Forest Research* 109(1): 119-129.
- Hu, T. Q., S. Johal, et al. (2006). "Thermomechanical pulping and bleaching of blue-stained chips." *PULP & PAPER CANADA* 107:9: 8.
- Humar, M., V. Vek, et al. (2008). "PROPERTIES OF BLUE-STAINED WOOD." *Svojstva drva zaraženoga gljivama plavila*. 59(2): 75-79.
- Hýsek, Š., R. Löwe, et al. (2021). "What Happens to Wood after a Tree Is Attacked by a Bark Beetle?" *Forests* 12(9): 1163.
- Icel, B., G. Guler, et al. (2015). "Effects of Industrial Heat Treatment on the Properties of Spruce and Pine Woods." 2015 10(3): 15.
- J. Sell, G. S., M. Arnold (1988). Holzqualität gesunder und geschädigter Fichten und Tannen von 6 schweizerischen Standorten. Schweiz, Empa Dübendorf.
- Jakoby, O., H. Lischke, et al. (2019). "Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*)." *Global Change Biology* 25(12): 4048-4063.
- Jamali, A. and P. D. Evans (2013). "Plasma treatment and bleaching to remove blue-stain from lodgepole pine sapwood." *European Journal of Wood and Wood Products* 71(5): 675-677.
- Kiritsits, T. (2004). "Der Große Lärchenborkenkäfer (*Ips cembrae*) als Überträger von Bläuepilzen." *Forstschutz Aktuell* 32.
- Kirschner, R. (2001). Diversity of Filamentous Fungi in Bark Beetle Galleries in Central Europe. Trichomycetes and Other Fungal Groups. J. K. Misra, CRC Press: 175-193.
- Kleist, G. (2001). "Rotstreifigkeit im Fichtenholz - ein Pilzschaden und seine Ursachen." *Zeitschrift für Mykologie* 67(2): 213-225.
- Kržišnik, D., B. Lesar, et al. (2018). "Performance of Bark Beetle Damaged Norway Spruce Wood Against Water and Fungal Decay." *bioresources.com* 13(2).

- Little, N. S., T. E. McConnell, et al. (2013). "SURFACE FREE ENERGY OF BLUE-STAINED SOUTHERN PINE SAPWOOD FROM BARK BEETLE-ATTACKED TREES." Wood and Fiber Science 45(2): 9.
- Mathiesen, A. (1950). "Über einige mit Borkenkäfern assoziierte Bläuepilze in Schweden." Oikos: 275-308.
- Netherer, S., D. Kandasamy, et al. (2021). "Interactions among Norway spruce, the bark beetle Ips typographus and its fungal symbionts in times of drought." Journal of Pest Science 94(3): 591-614.
- Niemz, P. (2005). Physik des Holzes, ETH Zürich.
- Schriber, N. (2021). Entfärbung verblauter Fichte. Bachelorarbeit, Departement Bau, Umwelt und Geomatik. ETH Zürich.
- Solheim, H. (1992). "Fungal succession in sapwood of Norway spruce infested by the bark beetle Ips typographus." European Journal of Forest Pathology 22(3): 136-148.
- Stirling, R. and P. I. Morris (2009). "Decolorization of blue stain in lodgepole pine sapwood by hypochlorite bleaching and light exposure." Forest Products Journal 59(7/8): 47-52.
- Stroheker, S., S. Blaser, et al. (2023). Leichte Zunahme von Buchdrucker-Befallsherden. Waldschutz Aktuell Birmensdorf, WSL / WSS. 1/2023.
- Stroheker, S., B. Forster, et al. (2020). Zweithöchster je registrierter Buchdruckerbefall (Ips typographus) in der Schweiz. Waldschutz Aktuell Birmensdorf, WSL / WSS. 1/2020.
- Thybring, E. E. and M. Fredriksson (2021). "Wood Modification as a Tool to Understand Moisture in Wood." Forests 12(3): 372.
- Wermelinger, B. (2004). "Ecology and management of the spruce bark beetle Ips typographus—a review of recent research." Forest Ecology and Management 202(1): 67-82.
- Yu, L. L., Z. Z. Tang, et al. (2011). "Properties of Blue-Stain Masson Pine after Compression and Thermal Modification." Advanced Materials Research 160-162: 1199-1204.
- Zink, P. and D. Fengel (1988). Studies on the Colouring Matter of Blue-stain Fungi. Part 1. General Characterization and the Associated Compounds. Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood. 42: 217.

10 Normen

- DIN EN 1534 (2011): Holzfußböden – Bestimmung des Eindruckwiderstands - Prüfmethode
- DIN CEN TS 16818 (2018): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Feuchte-Dynamik
- DIN 52180 (1977): Prüfung von Holz – Probenahme
- DIN 52182 (1976): Bestimmung der Rohdichte
- DIN 52184 (1979): Bestimmung der Quellung und Schwindung
- DIN 52185 (1976): Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser
- DIN 52186 (1978): Biegeversuch
- DIN 52187 (1979): Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung
- DIN 52189 (1981): Schlagbiegeversuch – Bestimmung der Bruchschlagarbeit
- EN 927-3 (2012): Beschichtungsstoff und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich – Teil 3: Freibewitterung
- EN 927-4 (2000): Beschichtungsstoff und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich – Teil 4: Beurteilung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- EN 927-5 (2006): Beschichtungsstoff und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich – Teil 5: Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit
- EN 927-6 (2006): Beschichtungsstoff und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich – Teil 6: Künstliche Bewitterung von Holzbeschichtungen mit fluoreszierenden UV-Lampen und Wasser
- EN 113 (1996): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten
- EN ISO 18593 (2018): Microbiology of the food chain – Horizontal methods for surface sampling
- EN ISO 2409 (2020): Gitterschnittprüfung
- RAL GZ 830 (2007): Holzschutz - Gütesicherung
- VDI 4300 Bl.10 (2008): Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategien zum Nachweis von Schimmelpilzen im Innenraum

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Buchdrucker: Menge des Käferholzes und Anzahl der Befallsherde (Käfernester) in der Schweiz von 1998 – 2022 (www.waldwissen.net)	8
Abbildung 2	Entwicklung der Durchschnittspreise von schweizerischer Fichte und Tanne zwischen 2015 und 2019 (Quelle: WaldSchweiz)	9
Abbildung 3	Frassbild des Borkenkäfers (<i>Ips typographus</i>)	11
Abbildung 4	Frisch gefällte Fichte mit Borkenkäferbefall und starker primärer Bläue	12
Abbildung 5	Arbeitsablauf im Projekt BlueWood	17
Abbildung 6	Standort Stammerberg (Forstrevier Stammheim)	20
Abbildung 7	Brettware verblautes Käferholz Fichte mit bereits einsetzender Rotstreifigkeit	21
Abbildung 8	Frisch gefällte Fichte mit verblautem Splint	22
Abbildung 9	Vorbereitung der verblauten Stämme zum Einschnitt	23
Abbildung 10	65 mm Fichtenbretter mit breit verblautem Splint	23
Abbildung 11	Beispiel Referenzstamm ohne Käferbefall und ohne Verblauung	24
Abbildung 12	Entrindungsstation mit frische entrindeten Fichtenstämmen	24
Abbildung 13	65 mm Bretter ohne Bläue als Referenz	25
Abbildung 14	Einschlag Ende Juli 2021	26
Abbildung 15	Stamm Nr.1 im oberen Teil verblaut (links) und im unteren Bereich noch unverfärbt	26
Abbildung 16	Einschnitt der Rugel zu Brettern direkt im Wald	27
Abbildung 17	Kontrolle der Stämme 3 Wochen nach dem Fällen	27
Abbildung 18	Lagerung an der Empa, welche kurzzeitig eine weitere Verblauung im Stamm begünstigt	28
Abbildung 19	Technisch getrocknete Brettware aus Stamm 1 (Brett 1.2 gedämpft)	29
Abbildung 20	Technisch getrocknete Brettware aus Stamm 3 (Brett 3.2 gedämpft)	29
Abbildung 21	Auswahl geeigneter Fichten im Wald	30
Abbildung 22	Eingeschnittene, saftfrische Fichtenholzstämmen für den Abtransport zur Empa	30
Abbildung 23	An der Empa zugeschnittene, gehobelte Lamellen für die industrielle Beschichtung	31
Abbildung 24	Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. Gebr.Eisenring AG	31
Abbildung 25	Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. OLWO AG	32
Abbildung 26	Bretter verblaut (links) und unverblaut (rechts) der Fa. Mivelaz Bois SA.	32
Abbildung 27	Lufttrocknung der Referenzabschnitte im Freien	33
Abbildung 28	Herstellung der Suspension mit Bläuepilz-Sporen	33
Abbildung 29	Tauchbecken mit Sporen-Suspension	34
Abbildung 30	Lagerung der inkubierten Hölzer	34
Abbildung 31	Fichtenbrett mit Bläue, Schimmel und Rotstreifigkeit nach künstlicher Verblauung	35
Abbildung 32	Durchgeführte Tests zur Charakterisierung des verblauten Käferholzes	36
Abbildung 33	Querschnitt zur Bestimmung der mittleren Jahrringbreite n Anzahl der Jahrringe, L Länge der Fläche	37
Abbildung 34	Mittlere Jahrringbreiten aller untersuchten Proben-Gruppen	37
Abbildung 35	Rohdichte ($u=12\%$) aller untersuchten Proben-Gruppen	37
Abbildung 36	Rohdichte der Proben aus Charge I und II mit Jahrringbreiten zwischen 2-3 mm	38
Abbildung 37	Braune Hyphen von Bläue erregenden Pilzen (oranger Pfeil) sowie Hyphen von holzerstörenden Pilzen (blaue Pfeile)	39
Abbildung 38	$L^*a^*b^*$ Farbraum (Quelle: www.torso.de)	39
Abbildung 39	Helligkeit L^* und Farbachsen a^* und b^* für unverblaute und verblaute Bereiche der Fichte	40
Abbildung 40	Versuchsaufbau Biegefestigkeit	41
Abbildung 41	Dichte der Biegeproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$	41
Abbildung 42	Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) 3-P-Biegung	42
Abbildung 43	Kraft-Weg-Diagramm; links Probe mit zähem Bruchverhalten (faserig); rechts Probe mit sprödem Bruchverhalten (stumpf)	43
Abbildung 44	2D-Konfidenzellipsen für MOR und MOE in Abhängigkeit der Dichte der Biegeproben (A: Referenz + Gruppe 1; B: Gruppe 2 und 3; C: Gruppe 4)	43
Abbildung 45	Versuchsaufbau Bruchschlagarbeit	44
Abbildung 46	Dichte der Schlagbiegeproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$	45
Abbildung 47	Bruchschlagarbeit w ; links: alle Proben; rechts: nur vollständig gebrochene Proben	45
Abbildung 48	Beispiele von faserigen (zähen) und stumpfen (spröden) Brüchen	46
Abbildung 49	2D-Konfidenzellipsen für die Bruchschlagarbeit in Abhängigkeit der Dichte (alle Proben) (A: Referenz + Gruppe 1; B: Gruppe 2 und 3; C: Gruppe 4)	47
Abbildung 50	Versuchsaufbau Druckfestigkeit	47

Abbildung 51	Dichte der Druckproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$	48
Abbildung 52	Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) Druckversuch	48
Abbildung 53	2D-Konfidenzellipsen für MOR und MOE in Abhängigkeit der Dichte der Druckproben (A: Referenz; B: Gruppe 3; C: Gruppe 4)	49
Abbildung 54	Versuchsaufbau Scherfestigkeit	49
Abbildung 55	Dichte der Scherproben bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$	50
Abbildung 56	Scherfestigkeit in longitudinal-radialer und longitudinal-tangentialer Richtung	50
Abbildung 57	2D-Konfidenzellipsen für radiale und tangentiale Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Dichte (A: Referenz; B: Gruppe 3; C: Gruppe 4)	51
Abbildung 58	Versuchsaufbau Härte nach Brinell	52
Abbildung 59	Dichte der Proben Härteprüfung bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$	52
Abbildung 60	Brinell Härte HB in radialer (links) und tangentialer (rechts) Richtung	52
Abbildung 61	Spezifische Brinell Härte SHB in radialer (links) und tangentialer (rechts) Richtung	53
Abbildung 62	Versuchsaufbau Wasserlagerung	54
Abbildung 63	Holzfeuchte nach Konditionierung im Normklima bei 20°C und verschiedenen Luftfeuchtigkeiten	54
Abbildung 64	Max. lineares Quellmass in radialer und tangentialer Richtung nach Wasserlagerung	55
Abbildung 65	Korrelation von Darrdichte und Max. linearem Quellmass (links radial, rechts tangential) (A: Referenz, B: Gruppe 3, C: Gruppe 4)	56
Abbildung 66	Maximale Wasseraufnahme der Proben nach Wasserlagerung	56
Abbildung 67	VTI-SA+ Dampfsorptionsmessgerät; Probenkammer mit Waagschale und Holzprobe	57
Abbildung 68	Desorption/Adsorption einer Referenz-Probe (A9)	58
Abbildung 69	Hysterese der Desorption-/Adsorptionsisothermen der A- und B-Proben im hygroskopischen Feuchtebereich	59
Abbildung 70	Mittlere Holzfeuchten bei 5%, 35%, 65% und 95% RH	59
Abbildung 71	Proben Saugversuch axial	60
Abbildung 72	Saugversuch zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme in axialer Richtung	61
Abbildung 73	Auswertung der gefärbten Fläche mittels der Software 'Scientific Color'; Beispiel	61
Abbildung 74	Wasseraufnahme im Saugversuch; axial über Hirnholz während 24 Stunden	63
Abbildung 75	Beispiele für die durch kapillar eingesaugtes Wasser verfärbten Proben	63
Abbildung 76	Tauchversuch zur Bestimmung der Wasseraufnahme über die Tangentialflächen	64
Abbildung 77	Wasseraufnahme im Tauchversuch; über Tangentialflächen während 144 Stunden	65
Abbildung 78	Wasseraufnahme pro m^2 Tangentialfläche in Abhängigkeit der Zeit	66
Abbildung 79	Holzfeuchteänderung der Proben bei Wasseraufnahme und -abgabe	67
Abbildung 80	Ausgangszustand der Proben und Zuteilung zu den Boxen 1 bis 5	68
Abbildung 81	Verblaute Proben der Gruppe 2 (B1 technisch getrocknet, B2 luftgetrocknet) nach 1 Woche Lagerung im Klima $23^{\circ}\text{C}/\approx 100\%$ RH (Box 4)	69
Abbildung 82	Proben der Gruppe 4 (C) nach 2 Wochen Lagerung im Klima $23^{\circ}\text{C}/\approx 100\%$ RH (Box 3)	69
Abbildung 83	Proben der Gruppe 3 (B) nach 3 Wochen Lagerung im Klima $23^{\circ}\text{C}/\approx 100\%$ RH (Box 2)	70
Abbildung 84	Unverblaute Käferholz-Proben (Gruppe 1, B3) und Referenz-Proben (A) nach 3 Wochen Lagerung im Klima $23^{\circ}\text{C}/\approx 100\%$ RH (Box 5)	70
Abbildung 85	B2-Proben und C-Proben im feuchten Zustand direkt nach dem Versuch	71
Abbildung 86	Referenz-Proben im feuchten Zustand direkt nach dem Versuch	71
Abbildung 87	Feuchteaufnahme während der 12-wöchigen Lagerung in der Box; inklusive der Holzfeuchte zu Beginn und am Ende des Versuches	72
Abbildung 88	Proben vor und nach der 12-wöchigen Lagerung in der Box	75
Abbildung 89	Ausbildung von Bläue an einigen der zuvor unverblauten Käferholz-Proben während der 12-wöchigen Lagerung in der feuchten Box	75
Abbildung 90	Luftkeimsammler MAS-100 NT mit Anschluss an die Testbox	76
Abbildung 91	Anzahl der keimfähigen Sporen pro m^3 Luft; Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen sowie der jeweilige maximale Einzelmesswert	78
Abbildung 92	Andrücken des Nährbodens auf einer Oberfläche (links); Verschlossener Testbehälter (rechts)	79
Abbildung 93	Positive Blindprobe; Abklatsch auf frisch gehobelten Oberflächen (links); Nährboden mit Bewuchs nach der Inkubation (rechts)	79
Abbildung 94	Anzahl der keimfähigen Sporen pro m^2 Fläche; Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen (sägerau) bzw. 9 Einzelmessungen (gehobelt) sowie der jeweilige maximale Einzelmesswert	80

Abbildung 95	Freibewitterung der Prüfkörper (Mai – Juni 2022)	82
Abbildung 96	Klimakontrollen vor dem Darren	82
Abbildung 97	Kolleschalen mit Nährmedium vor dem Beimpfen mit Pilzkulturen; rechts: Prüfprobe und Kontrollprobe auf Glasbänkchen	83
Abbildung 98	Proben nach Versuchsende	83
Abbildung 99	Mittlerer Gewichtsverlust aller Kontrollproben nach 16-wöchiger Pilzexposition	85
Abbildung 100	Wirksamkeit der biozidhaltigen Öllasur gegen ausgewählte Braunftäule Erreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung <i>braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte rote Linie: Grenzwert 5 Gew.% Gewichtsverlust (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)</i>	85
Abbildung 101	Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition; von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling; im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidhaltiger Öllasur und versiegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung) im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt	86
Abbildung 102	Kolleschale mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition mit Rosafarbenem Saftporling links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidhaltiger Öllasur und versiegelten Hirnflächen (nach 2-monatiger Bewitterung) rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt	86
Abbildung 103	Wirksamkeit des biozidfreien Holzlackes gegen ausgewählte Braunftäule Erreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung <i>braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte rote Linie: Grenzwert 5 Gew.% Gewichtsverlust (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)</i>	87
Abbildung 104	Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition; von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling; im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz mit biozidfreier Beschichtung und versiegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung) im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt	88
Abbildung 105	Kolleschalen mit Proben nach der 16-wöchigen Exposition; von links: Brauner Kellerschwamm, Balken-Blättling, Rosafarbener Saftporling; im Foto jeweils links: Prüfprobe aus verblautem Käferholz ohne Beschichtung aber mit versiegelten Hirnflächen (Original ohne Bewitterung) im Foto jeweils rechts: Kontrollprobe aus Fichte, komplett unbehandelt	88
Abbildung 106	Wirksamkeit der unbehandelten Proben gegen ausgewählte Braunftäule Erreger; links Proben im Originalzustand, rechts Proben nach 2-monatiger Freibewitterung <i>braune Linie: mittlerer Gewichtsverlust der Kontrollproben aus unbehandelter Fichte rote Linie: Grenzwert 5 Gew.% Gewichtsverlust (T = techn. Trocknung, L = Lufttrocknung, D = Dämpfen)</i>	89
Abbildung 107	Braun pigmentierte Hyphen eines Bläueerregers	90
Abbildung 108	Kreuzungsfelder mit diversen braunen Bläuehyphen in den Holzstrahlen sowie dünne, blau gefärbte Hyphen von Basidiomyceten	91
Abbildung 109	Hyphen und pigmentierte Konidio-Sporen eines Bläueerregers, vermutlich Ophiostoma	92
Abbildung 110	Unpigmentierte Hyphen und Sporen eines Schimmelpilzes, vermutlich Penicillium	92
Abbildung 111	Blau gefärbte Hyphen und Sporen eines Schimmelpilzes, vermutlich Trichoderma	93
Abbildung 112	Blau gefärbte Hyphen eines Basidiomyceten, vermutlich Stereum	93
Abbildung 113	Tracheiden mit braunen Bläuehyphen (oranger Pfeil) und blaue gefärbten Hyphen von Basidiomyceten (blaue Pfeile)	94
Abbildung 114	Hyphen wachsen durch die Kreuzfeldtüpfel (blau) als auch durch die Hoftüpfel (rot)	95
Abbildung 115	Tracheiden mit Kreuzfeldtüpfeln und Hyphen von Bläuepilzen sowie von Basidiomyceten; weiss markierter Bereich siehe Abbildung 116)	96
Abbildung 116	Dünne Hyphen mit für Basidiomyceten charakteristischen Schnallen (rot markiert)	96
Abbildung 117	Getestete Methoden zur oberflächlichen Entfärbung der verblauten Fichte	98
Abbildung 118	Proben nach dem Bleichen mit Oxalsäure (unbehandelte Original-Probe grün markiert)	99
Abbildung 119	Proben nach dem Bleichen mit Wasserstoffperoxid und IR-Bestrahlung (Probengrösse 150 mm x 74 mm)	99
Abbildung 120	Proben nach dem Bleichen mit Natriumhypochlorit und IR-Bestrahlung (Probengrösse 150 mm x 74 mm)	99

Abbildung 121	REM-Aufnahme; Ablagerungen nach Bleichen mit Natriumhypochlorit	100
Abbildung 122	Unbehandelt (links) und nach Behandlung mit Natriumpercarbonat-Lösung (rechts)	100
Abbildung 123	Behandlung mit Blitzlampe (links) und Ultraschall (rechts)	101
Abbildung 124	UV-LED-Lampe (links ohne; rechts nach 30 min)	101
Abbildung 125	IR-Strahlung (oberer Bereich Original; unten nach 3, 4, 5, 6 min IR-Strahlung)	101
Abbildung 126	Referenz-Proben ohne Bläue; Serie 1 (Probe 1,3 und 5 Original; Probe 2, 4 und 6 thermisch behandelt)	102
Abbildung 127	Proben der Serie 2 und 3 mit Bläue (Proben 1,3, 5 und 7 Original; Probe 2, 4, 6 und 8 thermisch behandelt)	102
Abbildung 128	Querschnitte aufgetrennter Proben von Serie 1, 2 und 3 (Die weiss gestrichelte Linie zeigt in etwa den Verlauf der Grenze zwischen unterblauten Bereichen links und verblauten Bereichen rechts)	103
Abbildung 129	Bretter vor dem Dämpfen (links) und nach dem Dämpfen (rechts); oberer Bereich: feingesägt; unterer Bereich: gehobelt	105
Abbildung 130	Bretterpaare gedämpft und ungedämpft (Bretterpaare 1.1/1.2, 1.2/1.3, 2.1/2.2, 2.2/2.3)	106
Abbildung 131	Arbeiten im AP5	108
Abbildung 132	Probenmaterial für Bewitterung und Charakterisierung	109
Abbildung 133	Vorbereitung der Proben; Versiegelung der Rückseite und der Schmalflächen	114
Abbildung 134	Wasserdampfaufnahme-Koeffizienten für alle Anstrichsysteme (1 bis 14) (Bezeichnung: Anstrichvariante_Holzprobe; A Referenz Empa, IA Referenz Industrie, B verblaut Empa, IB verblaut Industrie) (<i>Ref 1 komplett versiegelt</i>)	115
Abbildung 135	Wasseraufnahme-Koeffizient für alle Anstrichvarianten Aussenbereich (1 bis 11) (Bezeichnung: Anstrichvariante_Holzprobe; A Referenz Empa, IA Referenz Industrie, B verblaut Empa, IB verblaut Industrie)	115
Abbildung 136	Wasseraufnahme nach 72 Stunden für alle Anstrichvarianten Aussenbereich (Referenz komplett versiegelt < 30 g/m ²)	116
Abbildung 137	Beispiel Freibewitterungsproben pro Beschichtungssystem A- und B-Proben aus Charge II (siehe Kap.6.1.1) IA- und IB-Proben aus industrieller Fertigung (siehe Kap. 0) Vorschädigung (blaue Markierung)	125
Abbildung 138	Freibewitterungsstand Empa Dübendorf	125
Abbildung 139	Temperaturverlauf, rel. Luftfeuchtigkeit, Niederschläge und Wolkenbedeckung für den Freibewitterungszeitraum Feb. 2022 bis Feb. 2023 (<i>Quelle: https://my.meteoblue.com</i>)	126
Abbildung 140	Frühschwundrisse auf unbewitterten Proben mit Beschichtung 6; (von links: Probe 6 A, Probe 6 B, Probe 6 IA, Probe 6 IB)	131
Abbildung 141	Vergleich der Gesamtperformance der Empa-Proben und der Industrieproben (<i>Hinweis: Beschichtung 5 keine Empa-Proben; Beschichtung 7 keine Industrieproben</i>)	132
Abbildung 142	Vergleich der Gesamtperformance der Referenz-Proben ohne Bläue und der Käferholzproben mit Bläue	133
Abbildung 143	Beschichtung 6 nach 1 ½ Jahren Freibewitterung mit deutlich stärkerer Abwitterung und Verfärbung auf den verblauten Bereichen	133
Abbildung 144	Mittlere, jährliche Holzfeuchte der Proben in SW □ und NO □ Ausrichtung (A Referenz Empa, B verblaut Empa, IA Referenz Industrie, IB verblaut Industrie)	144

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwicklung der Fichten-Rohholz-Preise von Mai bis Oktober 2019	9
Tabelle 2	Arbeitspakete im Projekt	18
Tabelle 3	Übersicht und Bezeichnung des Holzes aus Charge I bis III	20
Tabelle 4	Mittelwerte der Rohdichten (20/65) der Proben aus Charge I und II	38
Tabelle 5	Durchschnittlicher Farbabstand ΔE zwischen unverblauten und verblauten Bereichen	40
Tabelle 6	Mittelwerte Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) 3P-Biegung	42
Tabelle 7	Mittelwerte der Bruchschlagarbeit w	45
Tabelle 8	Mittelwerte Bruchmodul (MOR) und E-Modul (MOE) Druckversuch	48
Tabelle 9	Mittelwerte Scherfestigkeit in radialer (τ_R) und tangentialer Richtung (τ_T)	50
Tabelle 10	Mittelwerte der Brinell Härte HB, der spezifischen Brinell Härte sHB sowie der Oberflächenelastizität SE jeweils radial und tangential	53
Tabelle 11	Quellverhalten der Proben in radialer und tangentialer Richtung	55
Tabelle 12	Mittelwerte der Messdaten für den 24 h Saugversuch	62
Tabelle 13	Mittelwerte der Messdaten für den 144 h Tauchversuch (und 168 h Rücktrocknung)	65
Tabelle 14	Wasseraufnahmekoeffizient bei Wasseraufnahme über Tangentialflächen	66
Tabelle 15	Auszählung der keimfähigen Sporen in der Luft	77
Tabelle 16	Auszählung der ausgewachsenen Kolonien	80
Tabelle 17	Beurteilung der Wirksamkeit gegen Basidiomyceten basierend auf dem Masseverlust	84
Tabelle 18	Ergebnis der Farbmessung an den technisch getrockneten Brettern vor und nach 45 min Hitzebehandlung bei 230°C (A unverblaut, B verblaut)	103
Tabelle 19	Farbabstand ΔE der technisch getrockneten Brettern vor und nach 45 min Hitzebehandlung bei 230°C (A unverblaut, B verblaut)	104
Tabelle 20	Dimensions- und Masseänderung durch Hitzebehandlung	104
Tabelle 21	Ergebnis der Farbmessung an den technisch getrockneten Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)	105
Tabelle 22	Farbabstand ΔE der technisch getrockneten Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)	106
Tabelle 23	Ergebnis der Farbmessung an waldfrischen Brettern vor und nach den Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)	107
Tabelle 24	Farbabstand ΔE der waldfrischen Bretter vor und nach dem Dämpfen (A unverblaut, B verblaut)	107
Tabelle 25	Mittlere Trockenschichtdicke inklusive mikroskopischer Aufnahmen (Beispiele)	110
Tabelle 26	Koeffizienten für Wasserdampfaufnahme nach 14 Tagen im 20°C / > 98 %RH und Koeffizienten für Wasseraufnahme nach 72 h Kaltwasserlagerung der beschichteten Proben im Neuzustand	117
Tabelle 27	Beurteilung der Trockenhaftung nach ISO 2409	118
Tabelle 28	Klassifizierung der Trockenhaftung der Beschichtungssysteme nach ISO 2409	119
Tabelle 29	Helligkeits- und Farbparameter vor und nach der UV-Bestrahlung sowie Farbabstand ΔE bezogen auf die Ausgangswerte	120
Tabelle 30	Optischer Zustand der Proben vor und nach 3000 Stunden im QUV (A/IA unverblaute Referenz, B/IB verblautes Käferholz)	122
Tabelle 31	Beschichtete Proben im Neuzustand (A/IA unverblaut, B/IB verblaut; SW Süd-West, NO Nord-Ost; x vorgeschädigt)	127
Tabelle 32	Farbabstand ΔE der Beschichtung auf den unverblauten und den verblauten Bereichen	129
Tabelle 33	Helligkeits- und Farbparameter vor und nach 6 und 12 Monaten Freibewitterung sowie der Farbabstand ΔE nach 12 Monaten, bezogen auf die Ausgangswerte	130
Tabelle 34	Proben ohne und mit Bläue nach 12 Monaten Freibewitterung; inklusive einer unbewitterten Referenz-Probe in der Mitte	134
Tabelle 35	Proben nach 6 und 18 Monaten Freibewitterung	146