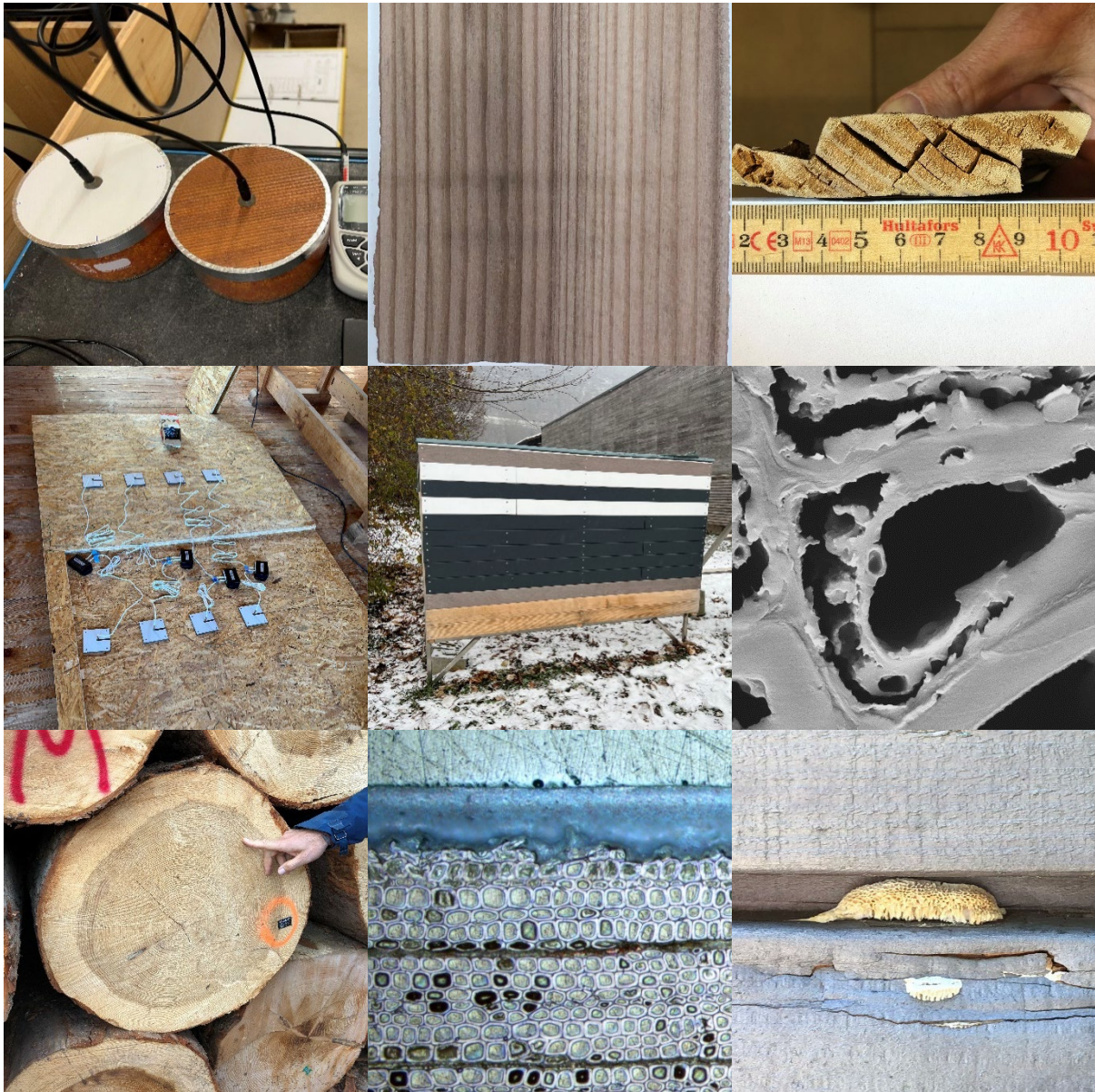


FÄULNISANFÄLLIGKEIT VON TANNENHOLZFASSADEN

Ermittlung der bauphysikalischen Einflüsse auf die Fäulnisanfälligkeit von Fassaden aus Tannenholz

Marcel Schnyder und Thomas Volkmer



Dieses Projekt wurde unterstützt durch die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH».

Projektnummer 2020.01

Berner Fachhochschule
Institut für biobasierte Materialien

Forschungsbericht

Bericht Nr.	63FE-010510-R-01-PB-01
Auftrag Nr.	R.010510-10-63FE-01
Klassifizierung	öffentlich
Datum	23.04.2024
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für biobasierte Materialien www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Marcel Schnyder, Thomas Volkmer
Projektverantwortlicher	Thomas Volkmer
Institutsleitung	Reto Frei

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1 Zielsetzungen	5
2. Projektbeteiligte	6
3. Ausgangslage	7
4. Material und Methoden	14
4.1 Material	14
4.2 Aufnahme von flüssigem Wasser	14
4.3 Wasserdampfdiffusion	15
4.4 Feuchtemonitoring an Fassadenelementen	15
4.1 Freibewitterung	19
5. Ergebnisse und Diskussion	21
5.1 Schichtdicken	21
5.2 Wasserdampfdiffusion	22
5.3 Wasserlagerung	24
5.4 Monitoring	26
5.5 Freibewitterung	34
6. Weiterführende Untersuchungen	37
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	38
8. Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	42
8.1 Umfang des Berichts	42
9. Verzeichnisse	43
9.1 Literaturverzeichnis	43
9.2 Tabellenverzeichnis	44
9.3 Abbildungsverzeichnis	45
A.1 Anang - Mikroskopische Aufnahmen der Beschichtungen	48
A.2 Anang - Bewitterungsaufnahmen	52

1. Einleitung

Der Anteil des Holzbaus am Gesamtbauaufkommen hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Das ist und war möglich, weil sich die Qualität der Ausführung fortlaufend erhöht hat und somit zu einer ernsthaften Konkurrenz des Massivbaus geworden ist. Damit der Einsatz von Holz auf diesem hohen Niveau gehalten und allenfalls ausgebaut werden kann, ist es wichtig, dass Bauschäden oder Qualitätsmängel so gering wie möglich gehalten werden. Beim Einsatz von Tannenholz sind vor allem im Fassadenbereich in den letzten Jahren vermehrt Schäden durch holzerstörende Pilze aufgetreten, welche hinsichtlich ihrer Ursache nicht aufgeklärt werden konnten. Bei der Frage nach holzartspezifischen Faktoren ist wiederholt ein potenzieller Einfluss von Nasskern, welcher bei Tannenholz relativ häufig vorkommt oder Rotstreifigkeit zur Sprache gekommen. Das abgeschlossene Projekt 01.0101.PZ/2018/16 (gefördert durch den WHFF), sowie der hier vorliegende Folgeantrag analysieren die gesamte Verarbeitungskette von Tannenholz (mit und ohne Nasskern oder Rotstreifigkeit) für den Fassadenbereich, um mögliche Ursachen für die durch Blättlingsbefall verursachten Schadensfälle zu ermitteln. Im vorliegenden Teilprojekt wird verstärkt der Einfluss der Oberflächenbehandlung und der bauphysikalischen - konstruktiven Aspekte auf das Fäulnisrisiko von Tannenfassaden untersucht. In den entsprechenden Arbeitspaketen werden Eigenschaften und Parameter der einzelnen Fassadenelemente und Komponenten bestimmt, sowie die Entwicklung von Praxisobjekten dokumentiert und ausgewertet. Mit Abschluss dieses Projekts soll geklärt sein, welche konstruktiven Ausführungen und welche Beschichtungsvarianten einen sicheren Einsatz von Tanne im Fassadenbereich gewährleisten.

Die Weisstanne (*Abies alba*) eignet sich hervorragend für den Holzbau und ist prädestiniert für ästhetisch anspruchsvolle Bauteile, wie z.B. Fassaden. Sie weist im Vergleich zur Fichte eine deutlich geringere Anzahl an Ästen auf und beinhaltet kein Harz. Der wesentliche Nachteil des Tannenholzes ist die relativ hohe biologische Anfälligkeit speziell gegenüber dem Tannenblättlings (und anderen Blättlings) und verschiedenen Schichtpilzen. Wobei hier zu erwähnen ist, dass es keine wissenschaftlichen Belege dafür gibt, die ihr eine geringere Dauerhaftigkeit als der Fichte bescheinigen. Vor diesem Hintergrund sollen Tannenvarianten untersucht und mit Fichte verglichen werden, um allfällige Unterschiede identifizieren und im Kontext einordnen zu können. Basierend auf den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Ergebnisse, sollte es möglich sein, Verarbeitungsrichtlinien zu definieren,

durch deren Anwendung eine maximale Lebensdauer der Bauteile gewährleistet und somit Schäden an Holzbauten vorgebeugt werden können.

1.1 Zielsetzungen

Dieses Teilprojekt hat die gleichen übergeordneten Ziele wie Teilprojekt 1, wobei es ebenso in erster Linie um den Ausbau und den Erhalt der hohen Akzeptanz des Werkstoffs Holz im Bauwesen geht. Es soll ein nachhaltiger Einsatz von Tannenholz im Baubereich sichergestellt und Bauschäden durch einen Befall holzerstörender Pilze an Holzbauteilen vermieden werden. Der Fokus der Untersuchungen liegt weiterhin beim Einsatz von Tanne im Fassadenbereich. Die zentrale Fragestellung zielt auf die Ermittlung von zusätzlichen bauphysikalischen Daten, welche mit als Grundlage dienen für die bessere Abschätzung eines Befallsrisikos und wirksamen präventiven Massnahmen.

Folgende konkrete Ziele können für das Teilprojekt 2 entsprechend dem vorliegenden Antrag abgeleitet werden:

1. technisch

- Analyse der Beschichtungssysteme in Bezug auf die absperrende Wirkung gegenüber Wasser bei der Austrocknung der Bauteile (durch die Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl und der Wasseraufnahmemenge - flüssig)
- Bewertung der Beschichtungssysteme bei natürlicher Bewitterung in Bezug auf die allgemeine Dauerhaftigkeit (Farbe und weitere optische Merkmale, Risse, Abblättern und Pilzbefall)
- Spezielle Berücksichtigung von (künstlichen) Rissen und Durchdringungen (Schrauben) in der Beschichtung in Bezug auf das Bewitterungsverhalten und den Pilzbefall
- Ermittlung und Bewertung von bauphysikalischen (kritischen) Konstruktionen in Hinblick auf die Wassereindringung, Ableitung oder Zurückhaltung von Wasser (Monitoring an Fassadenelementen, Messung Luftfeuchte, Holzfeuchte und Temperatur)

2. ökonomisch

- Langlebige Fassadenelemente für unterschiedliche konstruktive Anwendungen bei einer breiten Variantenvielfalt
- Dauerhafte Beschichtungssysteme, welche eine maximale Lebensdauer der Fassadenteile gewährleisten

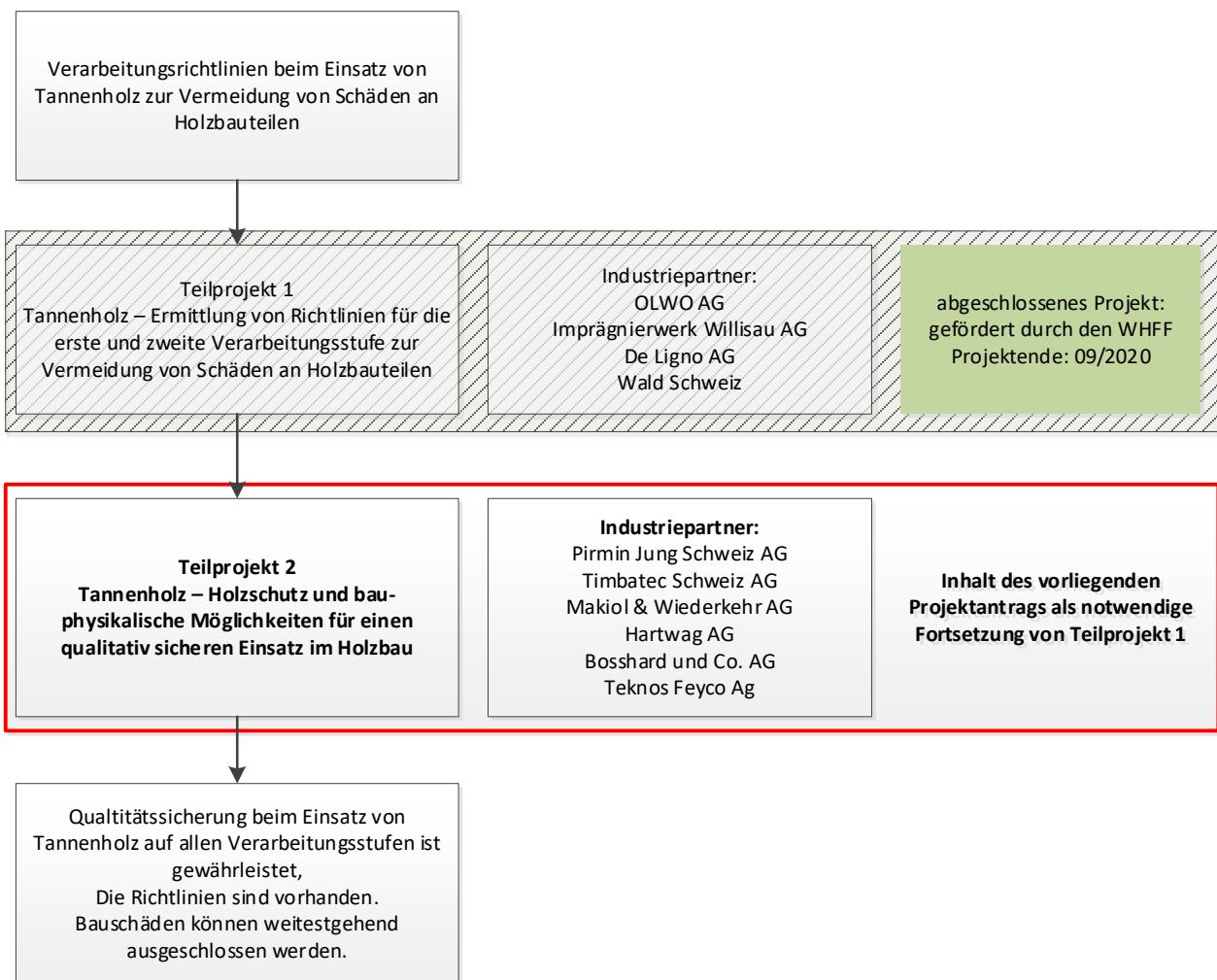


Abbildung 1: Gesamtübersicht der bearbeiteten Themenfelder beider Teilprojekte

2. Projektbeteiligte

Timbatec Schweiz AG	Makiol Wiederkehr AG	Pirmin Jung Schweiz AG	Hartweg Holz AG
Andreas Burgherr	Peter Makiol	Pirmin Jung	Andreas Seiz
Ausstellungsstrasse 36 8005 Zürich	Industriestrasse 9 5712 Beinwil am See	Centralstrasse 34 6210 Sursee	Furtbachstrasse 7 8107 Buchs ZH
Bosshard & Co. AG	Teknos Feyco AG		
Wolfram Selter	Martin Grabher		
Ifangstrasse 97 8153 Rümlang	Industriestrasse 7 9487 Gamprin- Bendern		

3. Ausgangslage

Rahmenbedingungen des Projekts

Wie im ersten Teilprojekt ausgeführt, konnte mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen keine erhöhte Anfälligkeit der Weisstanne (*Abies alba*) gegenüber holzerstörenden Pilzen im Vergleich zu Fichte (*Picea abies*) festgestellt werden. Das bezieht sich insbesondere auch auf die charakteristischen Ausprägungen der Tanne, wie Nasskern, pathologischer Nasskern oder Rotstreifigkeit, welche ebenfalls nicht mehr oder in einem grösseren Umfang befallen oder abgebaut wurden.

Diesbezüglich gibt es auch in der aktuellen Fachliteratur keine Quellen, die Fichte und Weisstanne bezüglich der Dauerhaftigkeit (ohne Erdkontakt) in unterschiedliche Klassen einordnen. Auch bei einer Umfrage in Zusammenarbeit mit dem VGQ (Verein geprüfter Qualitätshäuser), bei der von Schadensfällen betroffene Betriebe die Möglichkeit hatten, einen spezifischen Fragebogen zu einzelnen Fällen auszufüllen, ergaben sich keine Unterschiede zwischen Tannen- und Fichtenholz.

Nichtsdestotrotz betreffen die durch holzerstörende Pilze verursachten Schäden im Fassadenbereich in den uns bekannten Fällen überwiegend Tanne. Hierbei ist allerdings zu erwähnen, dass vereinzelt auch andere Holzarten, beispielsweise Douglasie, betroffen waren.

Wir gehen davon aus, dass eine eindeutige Ursachenfindung in Bezug auf eine erhöhte Anfälligkeit von Tannenholz nur mit einem enorm hohen Aufwand realisierbar ist. Es hat sich im Verlauf der Untersuchungen und insbesondere durch das Literaturstudium gezeigt, dass der Befallsverlauf so komplex und mit einer Reihe an Einflussgrössen verknüpft ist, dass eine klare Zuschreibung von auslösenden Faktoren in Bezug auf den Befall von Tannenfassaden schlicht nicht möglich ist.

Ausgewählte Aspekte zum Stand des Wissens

Für eine Besiedelung des Holzes sind die holzerstörenden Pilze auf günstige Rahmenbedingungen angewiesen (Goodell u. a. 2020). Die zentralen physikalischen Einflussparameter sind Feuchtigkeit und Temperatur (im Substrat Holz). Die Holzfeuchte als relevante Kenngrösse ist definiert als die Masse des im Holz enthaltenen Wassers im Verhältnis zur Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand.

Eine offene Frage bleibt in diesem Zusammenhang die minimale Holzfeuchte, ab welcher die Wahrscheinlichkeit einer Besiedlung und eines Abbaus stark zunehmen (Abbildung 2 und 3, Brischke u. a. 2017). In diesem Kontext spricht Brischke auch die Thematik des relevanten Holzvolumens an, welches oberhalb dieses Grenzwerts liegen müsste, was vor allem auch in Bezug auf die Konstruktionsdetails wie Stossausbildung oder Art der Befestigung von grossem Interesse ist. Für die Keimung der Sporen und das Wachstum der ersten Hyphe ist der Pilz auf günstige Bedingungen (Holzfeuchte 20-25%, Splintholz) angewiesen, da die Spore selbst nur einen äusserst geringen Nährstoffvorrat hat (Huckfeldt & Schmidt 2015). Das befallene Holzvolumen ist zu Beginn äusserst gering ($< 1 \text{ mm}^3$) und weitet sich bei Vorhandensein von feuchtem Holz aus. Generell ist es problematisch, Splintholz in Bereichen zu verbauen, an denen die Dauerhaftigkeit von Belang ist, weil durch die geringere Dauerhaftigkeit des Splints die Befallswahrscheinlichkeit für das gesamte Bauteil reduziert wird. Der vom Splint ausgehende Befall breitet sich auf das weniger gefährdete Kernholz aus.

Tabelle 1: Bereiche der Temperatur für Blättlinge nach (Huckfeldt & Schmidt 2015)

	Temperaturbereich [°C]	
	optimal	Wachstum
Tannenblättling	25-30	0-42
Balkenblättling	30-38	5-45
Zaunblättling	28-38	5-45

Weiter ist zu beachten, dass die klimatischen Anforderungen der entsprechenden Holzzerstörer bereits sehr unterschiedlich sind (Tabelle 1). Das Feuchtespektrum für die in dieser Arbeit besonders im Fokus stehenden Blättlinge, variieren abhängig von der Pilzart. So liegt das Spektrum für die Holzfeuchte für den Tannenblättling gemäss Huckfeldt zwischen 21.6 % und 210 % und das Optimum für die Temperatur im Bereich von 25 bis 30 °C, wobei das Wachstum auch in einem grösseren Temperaturbereich (0 – 42.5 °C) stattfinden kann. In Bezug auf die Feuchteansprüche muss dabei noch beachtet werden, dass sich diese zwischen Befall/Bewuchs und Holzabbau unterscheiden.

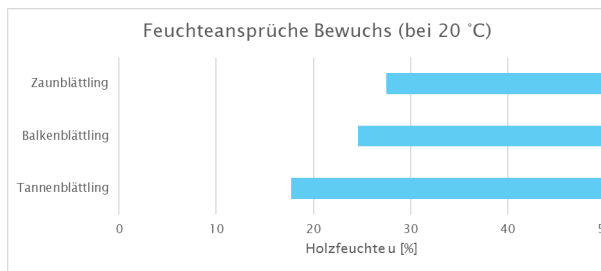


Abbildung 2: Feuchteansprüche für den **Bewuchs** von Kiefernspiltholz mit naher Feuchtequelle (Huckfeldt & Schmidt 2015)

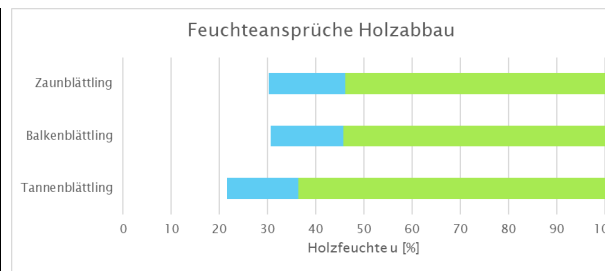


Abbildung 3: Feuchteansprüche für den **Abbau** von Kiefernspiltholz mit naher Feuchtequelle (Huckfeldt & Schmidt 2015)

Die beiden Grössen, Feuchte und Temperatur in Bezug auf das Bauteil, sind unter anderem abhängig vom Überbauungsanteil, der Topografie und der Vegetation in der unmittelbaren Umgebung. An einer Fassade beispielsweise sind Parameter wie die Ausrichtung des Bauteils, die damit verbundene Sonnenexposition, die Exponierung bezüglich des Niederschlags, die Dimensionen und dessen Oberflächenbeschichtung, die konstruktive Einbausituation u.v.m. von Bedeutung. Das Zusammenspiel von äusseren Faktoren und der Eigenschaften des Substrats resultieren in einem Mikroklima im Holz, welches entscheidend für die Besiedelung und das Wachstum eines holzzeretzenden Organismus ist.

Neben dem Aspekt der Holzfeuchte kann auch die Saugfähigkeit des Holzes und die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme eine Rolle spielen, was in der vorliegenden Arbeit insbesondere für den Vergleich von Fichte und Tanne von Interesse ist. Nach Sell (1988) ist bei Tanne die kapillare Saugfähigkeit grösser als bei Fichte, streut aber relativ stark. Ein Zusammenhang zum Nasskern und zum Gesundheitszustand der untersuchten Bäume konnte nicht festgestellt werden.

Ein Faktor, der die Holzfeuchte und das Mikroklima im Bauteil, z.B. einer Fassadenlamelle, beeinflusst, ist die Dimensionierung. In den Untersuchungen von (Augusta 2007) konnte nach vierjähriger Exposition kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Prüfkörperdimension und Holzabbau festgestellt werden. Allerdings waren bei den untersuchten Kiefernproben die Proben, die bei gleicher Querschnittsfläche eine flachere Dimensionierung aufwiesen, im Verhältnis weniger stark befallen.

«Die Ergebnisse zeigten jedoch auch, dass von der erfolgreichen Sporenkeimung nicht auf den Abbau geschlossen werden kann. Somit lassen Pilzidentifikationen von

Holzoberflächen allein keine Rückschlüsse auf die Arten zu, die später den Abbau verursachen.»

Die oben dargestellte Aussage von Augusta (2007) wird durch die Arbeiten von Pechmann et al. bestätigt. Das Sporenangebot und die tatsächlich im Holz aktiven Pilze korrelierten bei diesen Untersuchungen praktisch nicht. So scheint der entscheidende Faktor für die Besiedelung, nicht die Zusammensetzung der Sporen in der Umgebungsluft, sondern der Zustand des Holzes zu sein.

Nach (Brischke & Rapp 2008)) kann kein direkter Zusammenhang zwischen klimatischen Faktoren wie Niederschlag und Temperatur zum Holzabbau gefunden werden. Hingegen ergibt sich eine gute Korrelation zu Holzfeuchte und Holztemperatur. Demzufolge muss der Schluss gezogen werden, dass die regionalen klimatischen Unterschiede in der Schweiz allein nicht ausreichen, um einen Befall und Abbau des Holzes im Aussenbereich zu beschreiben (Abbildung 4), wobei sich hier die Angaben aus der Literatur auch widersprechen.

Entsprechend (Blanchette u. a. 1994)) konnte in Bezug auf den Holzabbau kein Unterschied zwischen Druckholz und normalem Holz festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass der erhöhte Ligningehalt im Druckholz die Beständigkeit nicht erhöht.

Wie in Tabelle 2 dargestellt, sind für die Abschätzung einer Befallswahrscheinlichkeit diverse Einflussfaktoren zu berücksichtigen (Brischke u. a. 2006). Dabei bleibt zu beachten, dass nur ein Teil der Faktoren eindeutig und widerspruchsfrei in Bezug auf einen Befall und Abbau beschrieben sind.

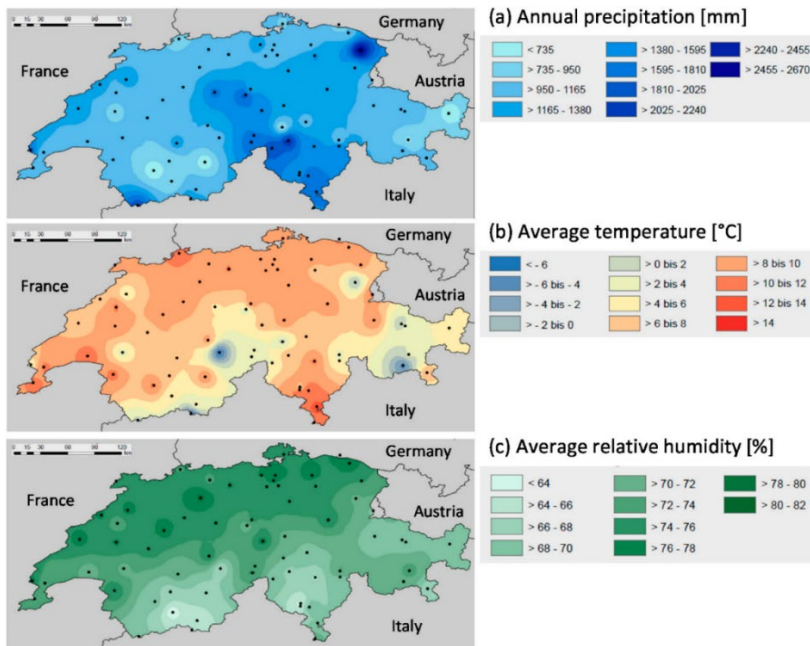


Abbildung 4: Übersichtskarten der Schweiz mit klimatischen Faktoren: (a) jährlichen Niederschlag, (b) Jahresdurchschnitt Temperatur und (c) Jahresdurchschnitt der relativen Luftfeuchte (Brischke & Selter 2020)

Tabelle 2: Klassifikation von abbaurelevanten Faktoren nach Brischke u.a. 2006

Indirekte Faktoren	Direkte Faktoren	
	Exogene Faktoren (Umwelteinflüsse)	Endogene Faktoren (dem Material innenwohnende Dauerhaftigkeit)
Klima - Lufttemperatur - Niederschlag - Wind - Relative Luftfeuchte Konstruktion Bauteildimensionen Beschattung Abstand vom Boden Ausrichtung Dach	Vorhandensein der Spezies Typen Abbau - Abbaumechanismen Besiedlungspotenzial Holztemperatur - Temperaturdynamik Holzfeuchte - Holzfeuchtedynamik Nährstoffe Zusammenspiel der Organismen	Natürliche Dauerhaftigkeit - Holzart - Extraktstoffe - Position im Stamm - Reaktionsholz - Herkunft - Fällzeitpunkt - Lagerung, Trocknung - Dichte (- Tylosis) Verbesserte Dauerhaftigkeit - Typ des Holzschutzmittels - Retention des Holzschutzmittels - Eindringung/Verteilung des Holzschutzmittels - Hydrophobierung - Beschichtung - Biologischer Holzschutz

Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf die Besiedlung durch holzerstörende Pilze ist die Zugänglichkeit der inneren Holzstruktur. Dazu untersuchten Fogarty & Ward 1973 wassergelagerte Stämme von Sitkafichte, bei welchen sie eine erhöhte

Bakterienaktivität im Splint nachweisen konnten,. Durch den Abbau der Tüpfelmembranen in Zusammenhang mit einem Bakterienbefall wird die Zugänglichkeit der Holzstruktur deutlich erhöht, was sich ebenfalls auf eine erhöhte Befallsanfälligkeit auswirken könnte.

Rapp & Peek 1999 kommen in diesem Zusammenhang bei der Analyse von Haarrissen in einer Beschichtung zu ähnlichen Ergebnissen. Im Bereich der Risse kommt es zu einem erhöhten Feuchteeintrag bei reduziertem Sauerstoffangebot, was ein ideales Klima für bakteriellen Abbau von Tüpfelmembranen darstellt. Das wiederum trägt zu einer besseren Wasseraufnahme bei und begünstigt einen späteren Abbau durch holzerstörende Pilze.

Die von Rapp untersuchten Holz- und Beschichtungsvarianten zeigten in Bezug auf die Anzahl Tage, an denen die Holzfeuchte über 25 % lag, grosse Differenzen. So waren beispielsweise die mit einer biozidfreien Lasur ausgestatteten Proben im 2. Jahr der Aussenwitterung mit 236 Tagen deutlich länger einer Feuchte von >25% ausgesetzt als unbeschichtete Proben, welche nur bei 166 Tagen den Grenzwert von 25% überschritten hatten.

Aufgrund der zitierten Forschungsarbeiten ist anzunehmen, dass eine steigende Expositionsdauer von beschichtetem Holz zu einer erhöhten Wasseraufnahme führt. Dem zu Grunde liegt ein fortschreitender Abbau der Beschichtung und die Bildung von Rissen im Substrat und der Beschichtung. Über diese Risse haben Feuchtigkeit (in Dampfform), flüssiges Wasser und Pilzsporen einen «einfacheren» Zugang zu tiefer im Holz liegenden Bereichen. Das Vorhandensein von Rissen führt insgesamt zu einer vergrößerten Oberfläche, über die Wasser aufgenommen werden kann. Durch den Abbau der Beschichtung und der mechanischen Erosion wird die Hydrophilie der Oberfläche erhöht und somit eine einfachere Aufnahme von Wasser begünstigt. Eine Vergrößerung der Rauheit der Oberfläche begünstigt zudem eine bessere Haftung von flüssigem Wasser.

Weiter bleibt zu beachten, dass die Oberflächenerosion bei unbeschichteten Holzoberflächen zur einer starken Delignifizierung führt und somit die Cellulose und Hemicellulosen freigelegt werden. Auf Grund der chemischen Struktur der genannten Polysaccharide nimmt der hydrophile Charakter der Oberfläche stark zu, was generell zu längeren Feuchteperioden auf und im Holz führt. Es kann dementsprechend davon ausgegangen werden, dass verlängerte Feuchteperioden auch zu einem höheren Befallsrisiko führen. Diese Aussagen werden durch die Untersuchungen von Stirling u. a. (2016) bestätigt, welcher in einem Freilandversuch nachweisen konnte, dass jene

Proben, die Wasser am schnellsten aufgenommen und am langsamsten wieder abgegeben haben, auch am schnellsten abgebaut werden.

Neben den beschriebenen Aspekten der Oberflächenerosion gibt es noch eine Reihe weiterer Phänomene, wie Tauwasserbildung oder Bodennebel, die eine Rolle beim Auffeuchten von Holzoberflächen und ganzen Bauteilen spielen, was einerseits von der lokalen Bauteilexposition und andererseits vom regionalen Klima abhängig ist.

Ein weiterer Punkt, welcher den Vergleich der vorliegenden Literatur und vor allem die Schlussfolgerungen der vorliegenden Arbeit stark beeinflussen, sind die geforderten Rahmenbedingungen bei Laboruntersuchungen mit holzerstörenden Pilzen. Diese bilden die in der Umwelt stattfindenden Prozesse nur teilweise ab und erlauben nur sehr begrenzte Prognosen in Bezug auf Faktoren, die einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer oder einer Schädigung durch holzabbauende Mikroorganismen haben. Freilandversuche über Zeiträume von mehreren Jahren bilden eine sehr gute, aber zeitaufwendige Basis für die Bewertung und Risikoabschätzung von Oberflächenmaterialien in Bezug auf Dauerhaftigkeit und Pilzbefall. Im grösseren Kontext von Nachhaltigkeit und LCA besteht eine grosse Nachfrage nach zuverlässigen Modellen für eine Prognose der Lebensdauer bzw. den Wartungsintervallen von verschiedenen Fassadenvarianten. Trotz der intensiven Bemühungen diverser Forschungsinstitute (Suttie u. a. 2020; Brischke & Selter 2020; Brischke u. a. 2021) und Kooperationen sind genaue Prognosen jedoch schwierig. Während gewisse relevante Faktoren mit relativ hoher Genauigkeit (Abbildung 4) interpoliert werden können, sind andere entscheidende Einflussparameter (bspw. Rel. Luftfeuchte) mit einer hohen Fehlerquote behaftet (Brischke & Selter 2020).

Eine vielversprechende Methode im Hinblick auf eine einfache und reproduzierbare, sowie schnellere Durchführung der Materialmodellierung in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Holz mit und ohne Erdkontakt beschreiben (Brischke u. a. 2023) in einer sehr umfangreichen und breit abgedeckten Studie, welche als grundlegende Referenz zu dieser Fragestellung angenommen werden kann.

4. Material und Methoden

4.1 Material

Sämtliches für die nachfolgenden Versuche verwendete Holz wurde uns zur Verfügung gestellt von den beiden Lieferanten (Deligno AG und Olwo AG), welche uns bereits im ersten Teilprojekt mit den benötigten Sortimenten beliefert hatten. Bei der Holz Auswahl wurde auf eine möglichst repräsentative Qualität geachtet, d.h. vor allem Rift und Halbrift (idealerweise 40-70° Jahrringneigung) geachtet.

In Absprache mit den Projektpartnern wurden die nachfolgend in Tabelle 3 aufgeführten Beschichtungssysteme eingesetzt.

Tabelle 3: Verwendete Beschichtungsaufbauten mit Ausführung der Produktbezeichnungen

Beschichtungssystem N°	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4
1 - Bosshard dünn	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	x
2 - Bosshard dick	Arbezol Hydro-Grundierung BP Plus	Arbezol Hydro-Isoprimer (weiss)	Arbezol Industrie-Finish	Arbezol Industrie-Finish
3 - Teknos dick	Eterno Täfergrund 3624-00	Eterno 3600	Eterno 3600	x
4 - Teknos dünn	Teknol	x	x	x
5 - Olwo	Dynalan-Fassadenoel Glimmer			

4.2 Aufnahme von flüssigem Wasser

In Anlehnung an EN 927-5 Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 5: Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit, erfolgte die Bestimmung der Wasseraufnahme. Die Norm dient zur Beurteilung der Durchlässigkeit von Beschichtungen gegenüber flüssigem Wasser. Es ergibt sich ein Wert zur Charakterisierung der Wasserdurchlässigkeit bei einer Messung nach 72 h.

Die Proben wurden nach einer Lagerung im Normklima (20°C/65% rel. LF) bis zur Massekonstanz gelagert. Danach erfolgte die Herstellung der Prüfkörper, so dass diese die Masse 150 x 70 x 20 mm aufwiesen. Die dem Wasser zugewandte Seite wurde mit Korn 120 geschliffen und anschliessend mit den Systemen (siehe Tabelle 3) gemäss Herstellerangaben beschichtet. Die Schmalflächen sowie die Rückseite der Probenkörper wurden mit einer Beschichtung von geringer Permeabilität versiegelt.

Um zusätzliche Informationen zur Wasseraufnahme bei kürzeren Expositionsintervallen zu gewinnen, fanden nebst der letzten Messung nach 72 h noch Messungen nach 1, 4, 8, 24, 48 Stunden statt. Die Proben wurden hierfür aus dem Wasserbad entnommen, das anhaftende Wasser mit einem saugfähigen Schwamm entfernt und die Proben dann nach erfolgter Wägung wieder ins Wasserbad gelegt. Die Dauer, in der die Proben sich für die Wägungen ausserhalb des Wasserbades befanden, betrug jeweils 7 min und wurde zeitlich bei der Versuchsdauer berücksichtigt. Der Versuch fand in einem klimatisierten Raum statt (20°C/65% rel. LF).

4.3 Wasserdampfdiffusion

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit wurde angelehnt an die Norm EN ISO 12572 (2016) durchgeführt. Die Holzproben wurden nach einer Klimatisierung (23 °C/50 % rel. LF) mit den in Tabelle 3 aufgeführten Systemen beschichtet und nachfolgend wieder bis zur Massekonstanz im geregelten Klima (23 °C/50 % rel. LF) gelagert. Die Probekörper der Variante 5 wurden direkt aus Lamellen, die industriell von der Olwo AG beschichtet wurden, hergestellt. Die beschichtete Oberfläche dieser Lamellen sind im Gegensatz zu den anderen Varianten strukturgehobelt. Anschliessend wurden Proben mit einem Durchmesser von 140 mm gefräst. Die Holzrondellen wurden auf den Glasgefässen mit diffusionsdichtem Aluminiumklebeband befestigt und abgedichtet.

Bei den Diffusionsmessungen wurden für alle 4 Beschichtungsvarianten jeweils 5 Proben in Tanne und Fichte «Dry-cup» gemessen. Auch für die strukturgehobelte Variante 5 (nur Tanne) wurden 5 Proben gemessen.

4.4 Feuchtemonitoring an Fassadenelementen

Das Feuchtemonitoring wurde an 2 Fassaden-Elementen mit den zwei Holzvarianten Fichte und Tanne durchgeführt. Die Elemente sollen dabei einen realistischen Ausschnitt einer Fassade abbilden und die wesentlichen Einflussfaktoren berücksichtigen (Abbildung 9).

Für die Beschichtung der Fassadenelemente wurden ein Teil der Systeme (Varianten 2 und 5) der vorangegangenen Untersuchungen verwendet (siehe Tabelle 3). Darüber hinaus wurden für das Monitoring zwei Farbvarianten, weiss und dunkelgrau, eingesetzt, um den Einfluss der Farbe auf die Holztemperatur und indirekt auf die Holzfeuchte zu untersuchen.

Des Weiteren wurden für die Fassadenelemente die Stossausbildung und die Art der Hinterlüftung variiert. Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren hat sich die Variantenanzahl ergeben, welche in Tabelle 4 zusammengefasst ist.

Tabelle 4: Übersicht über die Varianten, welche in den Elementen verbaut sind mit den in den Feuchtediagrammen verwendeten Variantenbezeichnungen im Teil Resultate.

Beschichtungssystem N'	Farbe	Holzart	Stossausbildung	Hinterlüftung	Bezeichnung in den Diagrammen
2 - Bosshard dick	Weiss	Fichte	Stumpf	Gross	Fi weiss stumpf gross
	Weiss	Fichte	Offen	Gross	Fi weiss offen gross
2 - Bosshard dick	Weiss	Fichte	Stumpf	Klein	Fi weiss stumpf klein
	Weiss	Fichte	Offen	Klein	Fi weiss offen klein
	Weiss	Tanne	Stumpf	Gross	Ta weiss stumpf gross
	Weiss	Tanne	Offen	Gross	Ta weiss offen gross
2 - Bosshard dick	Dunkelgrau	Fichte	Stumpf	Gross	Fi dunkelgrau stumpf gross
	Dunkelgrau	Fichte	Offen	Gross	Fi dunkelgrau offen gross
	Dunkelgrau	Tanne	Stumpf	Gross	Ta dunkelgrau stumpf gross
	Dunkelgrau	Tanne	Offen	Gross	Ta dunkelgrau offen gross
5 - Olwo	Hellgrau	Tanne	Stumpf	Gross	Ta hellgrau stumpf gross
	Hellgrau	Tanne	Offen	Gross	Ta hellgrau offen gross
	Hellgrau	Tanne	Stumpf	Klein	Ta hellgrau stumpf klein
	Hellgrau	Tanne	Offen	Klein	Ta hellgrau offen klein

Im Rahmen des Feuchtemonitoring wurde in einer ersten Phase ein Element installiert und 6 Monate später ein zweites. Abbildung 6 bietet eine detaillierte Übersicht über die Varianten, die mit Feuchte- und Temperatursensoren ausgestattet sind und deren Aufteilung auf die beiden Fassadenelemente. Diese Sensoren führen sorptive Messungen durch, was bedeutet, dass kontinuierlich die relative Luftfeuchte und die Umgebungstemperatur gemessen werden. Die Sensoren sind auf der Rückseite der Lamellen eingebaut und via Kabel mit einem Datenlogger verbunden, wobei die Messdaten etwa 7 mm unterhalb der beschichteten Vorderseite erfasst werden (siehe Abbildung 5, Abbildung 7 und Abbildung 8). Der Sensor befindet sich in einem Röhrchen, welches an der Messstelle platziert wird. Die Messung erfolgt in einem Hohlraum (im Holz) mit einem kleinen Volumen, wobei beim Einbau der Sensoren darauf geachtet werden muss, dass dieser gegen die äussere Umwelt gut abgedichtet werden muss, damit die Messungen nicht verfälscht werden.

Parallel wird ein Sensor im Datenlogger zur Messung des Umgebungsklimas genutzt, was zur Beurteilung des Wettergeschehens dient. Die Messungen erfolgen in einem

Rhythmus von 5 min, wobei auch eine stündliche und tagesbezogenen Auswertung möglich ist. Alle Datenlogger sind via Wireless Lan mit einem Gateway verbunden, welcher die Daten in den Cloudspeicher überträgt, von wo aus sie dann abgerufen und ausgewertet werden. Auf diese Weise kann ein kontinuierliches Monitoring des Fassadenelementes über einen entsprechend langen Zeitraum durchgeführt werden.

Die Auswertung der Sensordaten erfolgte über das periodische Auslesen der Rohdaten, welche mittels MathLab auf Basis der Kalibrierwerte umgerechnet und aufbereitet wurden.

Die Bestimmung der Holzfeuchte ausgehend aus der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte erfolgte nach der Simpson-Formel (1973):

$$u = \frac{1800}{M_p} \cdot \left(\frac{K_1 h}{1 - K_1 h} + \frac{K_2 K_1 h + 2K_3 K_2 K_1^2 h^2}{1 + K_2 K_1 h + K_3 K_2 K_1^2 h^2} \right)$$

$$M_p = 349 + 1.29T + 1.35 \cdot 10^{-2}T^2$$

$$K_1 = 0.805 + 7.36 \cdot 10^{-4}T - 2.73 \cdot 10^{-6}T^2$$

$$K_2 = 6.27 - 9.38 \cdot 10^{-3}T - 3.03 \cdot 10^{-4}T^2$$

$$K_3 = 1.91 + 4.07 \cdot 10^{-2}T - 2.93 \cdot 10^{-6}T^2$$

mit u: Holzfeuchte [M%], h: rel. Luftfeuchte [-] T: Temperatur [°C]

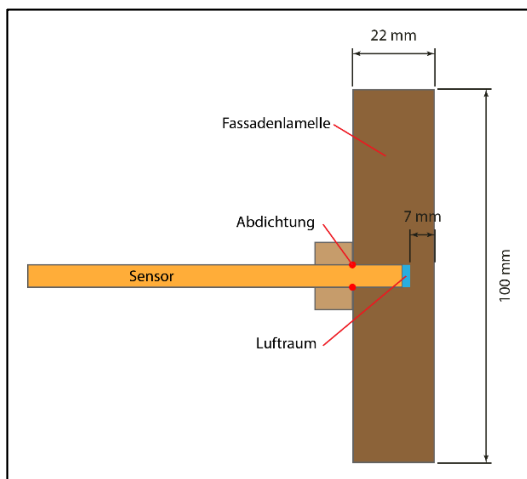


Abbildung 5: Schema Feuchte-/Temperatursensor, Bohrung in einer Lamelle

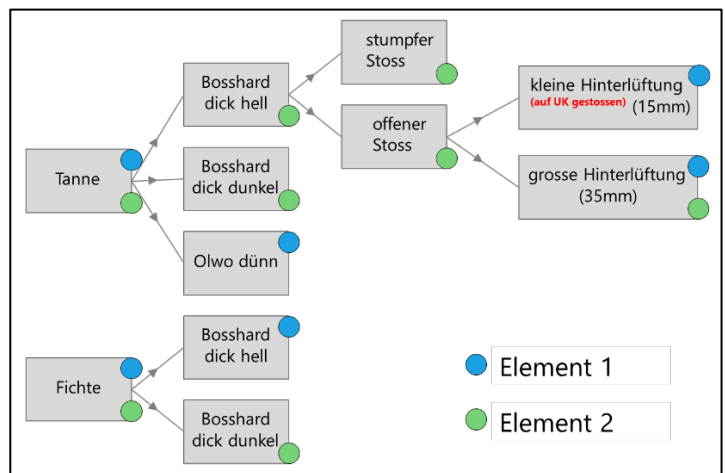


Abbildung 6: Varianten der mit Sensoren ausgestatteten Holz-, Beschichtungs-, Stoss- und Hinterlüftungskombinationen



Abbildung 7 Feuchtesensor im Messingrohr in der Fassade, Fassadelement mit einem Holz fixiert

Abbildung 8 Fassadelemente mit 6 Sensoren, Ansicht der OSB Platte von hinten

Bei Element 1 wurde die Dimension der Hinterlüftungsebene als Variable mitberücksichtigt. Die Lamellen auf der linken Seite haben jeweils einen Abstand von 35 mm bis zur dahinterliegenden Schicht (OSB), jene auf der rechten Seite lediglich einen Abstand von 15 mm. Da die Feuchtedaten der ersten Monate auf keine Unterschiede hindeuteten, wurde das zweite Element lediglich mit dem Abstand 35 mm ausgeführt.

Die Fassadelemente haben eine Breite von 2050 mm und eine Höhe von 1200 mm. Neben den verschiedenen Beschichtungen, mit welchen die Lamellen versehen wurden, galt insbesondere dem möglichen Einfluss der Ausführung der Längsstöße auf den Feuchtehaushalt besonderes Interesse. Die Sensoren lagen, wie in Abbildung 9 zu sehen, jeweils in den längeren Lamellen, wobei die rückseitige Bohrung einen Abstand von 50 mm vom Lamellenende hatte. Beim ersten Element wurde nach einer Zwischenauswertung und nach Rücksprache mit der Projektgruppe auf der Seite mit der kleinen Hinterlüftung (15 mm) zusätzlich eine Montageleiste direkt unter die Längsstöße geschoben und verschraubt, um den Einfluss dieser Stossausbildung mit zu berücksichtigen. Die Lamellen haben einen rechteckigen Querschnitt mit einer Dicke von 22 mm und einer Breite von 100 mm. Sie sind so auf die Unterkonstruktion geschraubt, dass sie längsseitig keine Fuge aufweisen. Die Elemente wurden an der Berner Fachhochschule in Biel an einem halbschattigen Standort mit Ausrichtung Süd-

Südwest aufgestellt (Abbildung 10). Sie sind an Ständern aus Edelstahl senkrecht aufgehängt und weisen Unterkant einen Abstand von 0.4 m zum Boden auf.



Abbildung 9: Fassadenelemente 1 (links) und 2 (rechts) ausgestattet mit Feuchtesensoren, deren Lage jeweils mit einem roten Punkt markiert ist. Die Leiste direkt unter den Stößen ist durch die rot gestrichelte Linie im linken Element gekennzeichnet.



Abbildung 10 Platzierung der Fassadenelemente mit Ausrichtung Süd- Südwest an der Berner Fachhochschule, Vorderansicht links, Hinteransicht rechts (Sensoren sind abgedeckt)

4.1 Freibewitterung

Die hier durchgeführten Bewitterungsprüfungen sind angelehnt an die Norm EN 927-3, Beschichtungssysteme - Beschichtungssysteme und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich -Teil 3: Freibewitterung (Abbildung 12). Die eingesetzten Beschichtungssysteme sind aus Tabelle 3 ersichtlich, wobei das System 5 nicht Teil dieser Untersuchungen war.

Um den möglichen Einfluss von Durchdringungen durch Verbindungsmitteln oder von Fehlstellen wie Rissen in der beschichteten Oberfläche mit zu berücksichtigen, wurden die Prüfkörper zusätzlich modifiziert. An den fertig beschichteten Proben wurde jeweils mit einem Cutter ein 30 mm langer und 5 mm tiefer Schnitt ausgeführt. Ebenfalls wurde an allen Proben eine Schraube so eingedreht, dass sich der

Schraubenkopf bündig versenkt in einer Ebene mit der fertig beschichteten Oberfläche befand. Die Länge der 4.5 mm dicken Edelstahlschraube mit Senkkopf wurde für die zwei Probendicken so gewählt, dass sie nicht die Rückseite der Probe durchdrungen hat, sprich dass sie kürzer war als die Probendicke.

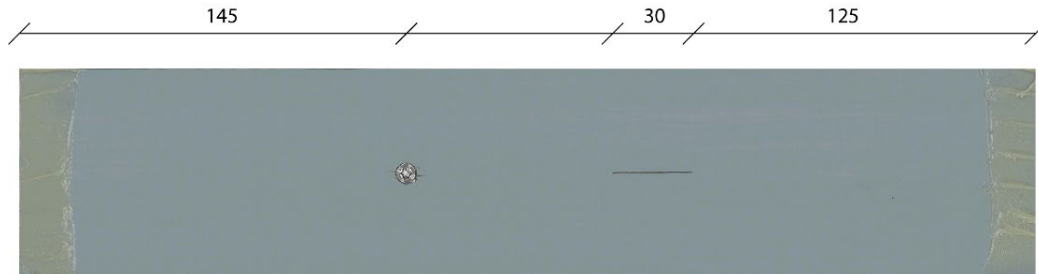


Abbildung 11: Prüfkörper Freibewitterung mit Verschraubung und einem Schnitt, jeweils in der Breite mittig platziert. Die Enden der Lamelle links und rechts sind mit einer wasserundurchlässigen Beschichtung versiegelt.



Abbildung 12 Bewitterungsstand der BFH nach EN 927-3 mit den Beschichtungsproben

Die Prüfkörper sind für alle 4 Beschichtungssysteme in den drei Holzvarianten Tanne normal, Tanne Nasskern und Fichte ausgeführt. Zusätzlich zu den Proben in 20 mm Dicke wurden auch solche mit einer Dicke von 40 mm hergestellt.

Die vier bereits aufgeführten durch die BFH hergestellten Varianten wurden ergänzt mit weiteren vom Imprägnierwerk Willisau gelieferten Proben (siehe Anhang), welche ebenfalls Teil der hier durchgeführten Untersuchungen sind und in erster Linie als Vergleichsproben dienten.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Schichtdicken

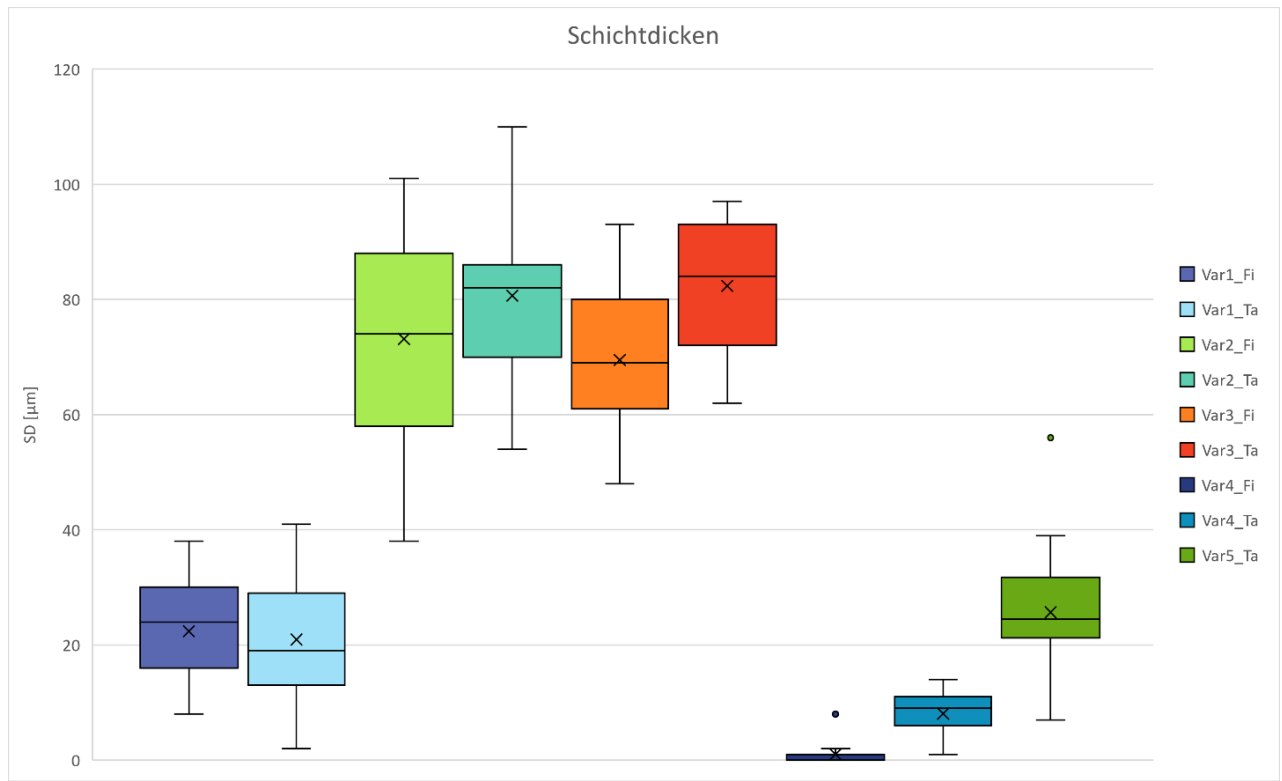


Abbildung 13: Schichtdicken aller Varianten

In Abbildung 11 sind die Messwerte der jeweiligen Schichtdicken der untersuchten Varianten dargestellt. Die mit der Öl-Lasur beschichteten Varianten 1 weisen Schichtdicken im Bereich von 20 µm auf, wobei die Beschichtung keinen durchgängigen, geschlossenen Film ausbildet. Die Deckschicht wird vielerorts von Zellwänden durchbrochen. Bei Variante 2 ist eine Schichtdicke mit Mittelwerten von 73 µm (Fichte) bzw. 81 µm (Tanne) sichtbar, welche eine homogene Schicht auf dem Substrat aufweist und nicht durch Holzbestandteile durchbrochen wird. Variante 3 zeigt Werte von 70 µm (Fichte) bzw. 82 µm (Tanne), ebenso wie bei Variante 2 ist hier eine homogene und intakte Schicht auf dem Substrat zu sehen. Für die Variante 4 ist keine auf dem Holzsubstrat messbare Schicht vorhanden. Das als Imprägnierung deklarierte Produkt ist vollständig in die Struktur eingedrungen. Sowohl bei Tanne wie bei Fichte ist eine Eindringtiefe von bis zu 3 Zellreihen zu beobachten, wobei die Eindringung insgesamt stark schwankt.

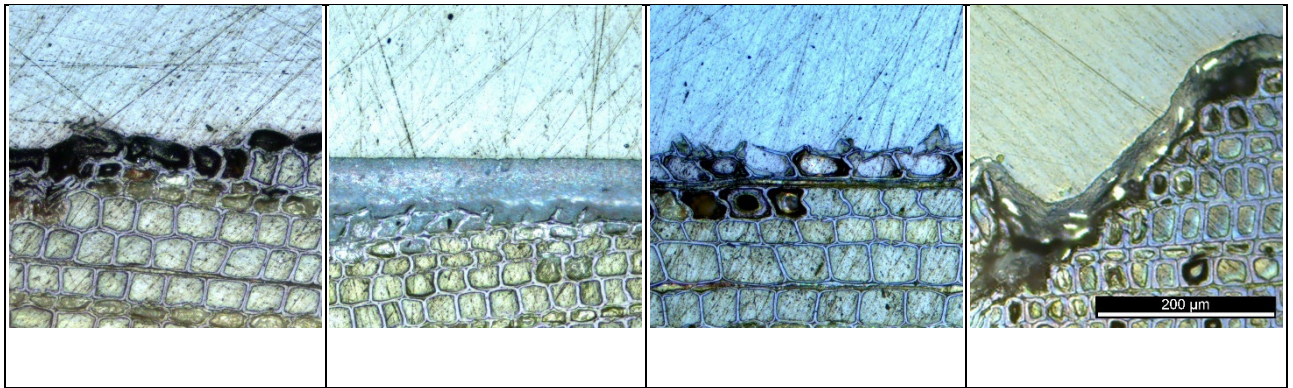


Abbildung 14: Bildausschnitte von mikroskopischen Aufnahmen des Übergangsbereichs Holzsubstrat-Beschichtung zur besseren Veranschaulichung der Messwerte für die Schichtdicken (v.l.n.r. Variante 1 Tanne, Variante 2 Fichte, Variante 4 Tanne, Variante 5 Tanne)

Variante 5 weist auf der strukturgehobelten Oberfläche eine durchschnittliche Schichtdicke von 26 µm auf. Auch hier durchdringen immer wieder geschnittene Zellwände die Beschichtungsebene.

In Abbildung 12 sind exemplarisch Aufnahmen mit Proben der Beschichtungssysteme der Varianten 1, 2, 4 und 5 ersichtlich. Die hier nicht abgebildete Variante 3 entspricht der Erscheinung nach der hier abgebildeten Variante 2.

5.2 Wasserdampfdiffusion

In Abbildung 13 sind die Diffusionswiderstandszahlen der beschichteten Proben für das Dry-Cup Verfahren zusammengefasst, wobei die gleichen Systeme jeweils appliziert auf Fichte bzw. Tanne in der Graphik nebeneinander dargestellt sind. Generell kann man sagen, dass die Ergebnisse der Dampfdurchlässigkeit den ermittelten Schichtdicken der Systeme entsprechen. Systeme mit niedriger Schichtdicke (1, 4 und 5) zeigen auch die höchste Dampfdurchlässigkeit. Dieser Effekt ist abgesehen von Variante 1 unabhängig von der verwendeten Holzart.

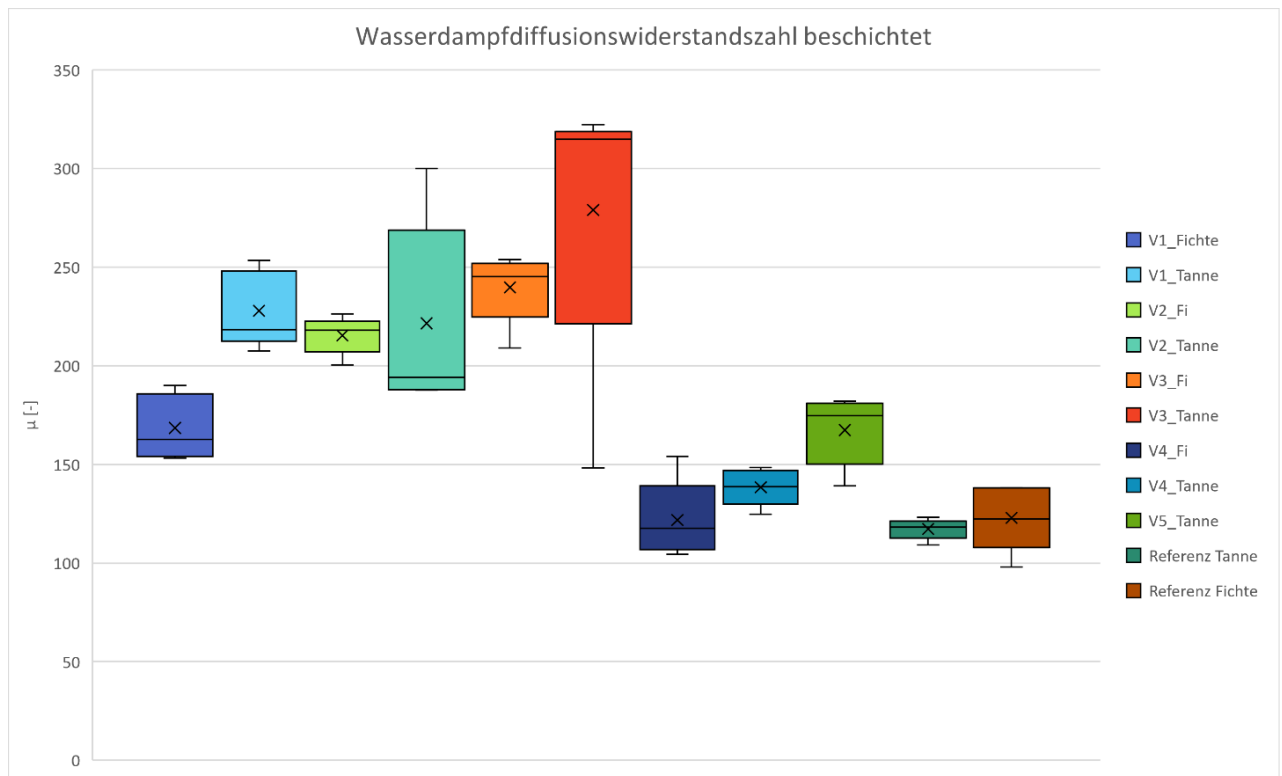


Abbildung 15: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen der verschiedenen Varianten ermittelt nach DIN EN ISO 12572 nach dem dry-cup Verfahren

Im Vergleich dazu ist bei Variante 1 der Unterschied zwischen Fichte (168) und Tanne (228) am stärksten ausgeprägt, wobei hier beide Varianten gleich viel streuen. Es ist anzunehmen, dass die Durchbrechung der Holzfasern zu dieser Variabilität und den Unterschieden zwischen den Holzarten geführt haben. Bei Beschichtung 2 liegen beide Mittelwerte um 220, wobei hier die Tanne stark streut. Bei Variante 3 zeigt die Fichte wiederum tiefere Werte, die auch hier weniger streuen als bei der Tanne. Bei der Variante 4 liegen die Werte für Fichte im Bereich vergleichbar mit den unbeschichteten Referenzproben. Die Tanne liegt etwas höher und streut bei dieser Variante leicht weniger als die Fichte. Offensichtlich handelt es sich hierbei um ein sehr offenes System, welches den Dampfstrom praktisch nicht behindert. Die industriell beschichtete Variante 5 liegt leicht über den Referenzwerten für Fichte und Tanne und obwohl dieses Ölsystem auf eine strukturierte Oberfläche aufgetragen wurde, zeigt sich ein geringfügig dampfbremsender Effekt, was wiederum auf eine geschlossene Schichtausbildung schließen lässt. Die gemessenen Referenzwerte für Fichte und Tanne entsprechen den Vergleichswerten aus der Literatur (Vanek & Teischinger 1989).

5.3 Wasserlagerung

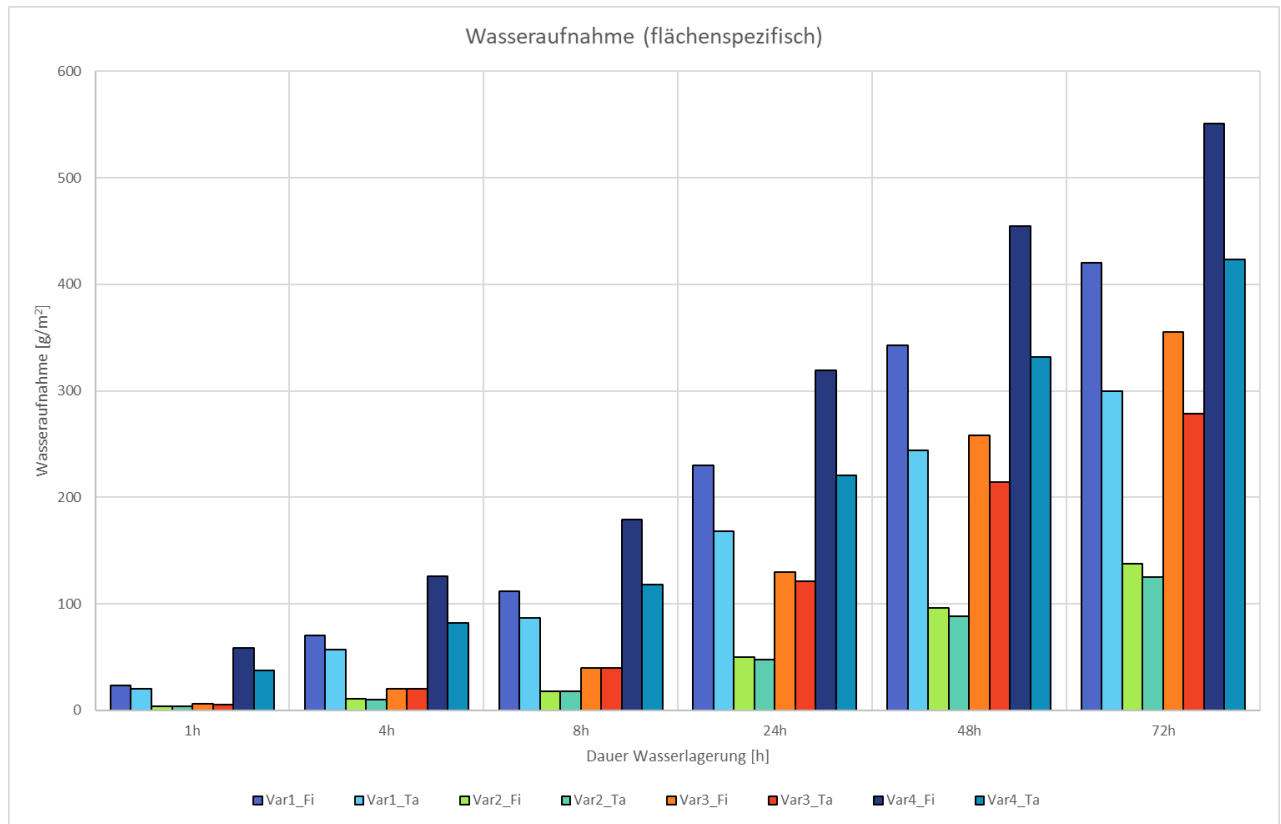


Abbildung 16: Aufnahme von flüssigem Wasser der Beschichtungsvarianten 1 bis 4 auf Fichte (Fi) und Tanne (Ta)

Die Abbildung 14 fasst die Werte der Wasseraufnahme der 4 Beschichtungssysteme auf den beiden Holzarten Tanne und Fichte zusammen (insgesamt 8 Varianten), wobei die Messwerte für 6 Zeitstufen aufgenommen wurden. Grundsätzlich kann auch bei dieser Auswertung der Einfluss der Beschichtung und insbesondere der Schichtdicke abgeleitet werden. Die Varianten mit einer (sehr) niedrigen Schichtdicke zeigen auch die höchste Wasseraufnahme, im Gegensatz dazu nehmen Varianten mit höherer Schichtdicke weniger Wasser auf. Diese Ergebnisse entsprechen somit auch den Resultaten aus der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, bei welcher ähnliche Zusammenhänge aufgezeigt wurden (Abbildung 13), wobei in beiden Fällen der Effekt von durchbrechenden Fasern nicht abschliessend bewertet werden kann.

Variante 4 mit der niedrigsten Schichtdicke, bei welcher praktisch nur die oberen Holzzellen imprägniert sind, zeigt über die gesamte Versuchsdauer die höchsten Werte, wobei die Fichte bei allen Messpunkten über der Tanne liegt. Die Werte von Variante 1, welche ebenfalls nur eine Schichtdicke von ca. 20 µm aufweist, liegen nach einer Stunde bei ca. 50 % der Variante 4, was auf zumindest auf eine zeitlich begrenzte

Absperrung von flüssigem Wasser spricht. Auch hier ist eine Zunahme mit ansteigender Dauer zu beobachten; mit wiederum höheren Werten bei Fichte als bei Tanne. Die Variante 2 zeigt über die gesamte Messdauer die tiefsten Werte aller getesteten Systeme. Fichte und Tanne zeigen in Kombination mit diesem Beschichtungssystem die geringsten Unterschiede, wobei die Fichte ab einer Messdauer von 24 h leicht höhere Werte zeigt. Variante 3 liegt bereits ab 1 h Versuchsdauer 100 % höher als Variante 2, wobei der Faktor bis Ende des Versuchs nach 72 h bis zum Faktor von ca. 2.5 ansteigt. Auch bei dieser Variante zeigt die Fichte höhere Werte als die Tanne.

Entsprechend den vorliegenden Messerwerten, wäre Variante 2 für dein Einsatz im masshaltigen Bereich vorzusehen. Der Grenzwert für diese Anwendung liegt nach EN 927-2 bei 30-175g/m². Alle anderen Varianten könnten entsprechend den Grenzwerten der Norm nur im nichtmasshaltigen Bereich eingesetzt werden.

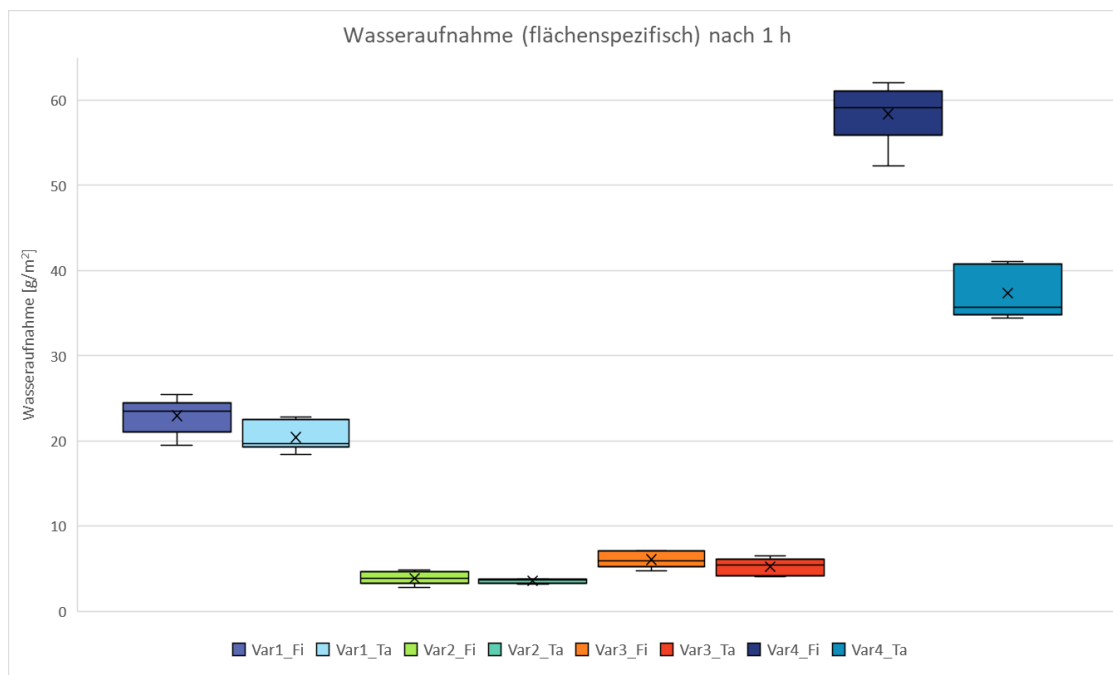


Abbildung 17: Aufnahme von flüssigem Wasser nach einer Stunde Wasserlagerung der Beschichtungsvarianten 1 bis 4 auf Fichte (Fi) und Tanne (Ta)

Für eine deutlichere Veranschaulichung der Varianten bei kurzzeitiger Einwirkung von flüssigem Wasser wurde in Abbildung 15 die Wasseraufnahme für alle Varianten nach einer Stunde dargestellt. Die dickeren Systeme (Varianten 2 und 3) liegen beide in einem tieferen Bereich mit Werten von 3.6 (Var2) bis 6.1 g/m²h (Var3), wobei hier auch schon die etwas tieferen Werte für Tanne sichtbar werden. Bei System 1 zeigt sich auch die leicht höhere Aufnahme von Fichte (23.0 g/m²h), wobei hier die Werte bei

beiden Holzarten relativ stark streuen. Die höchsten Werte zeigen sich bei der Variante 4, mit Fichte bei 58.4 g/m²h und Tanne hier deutlich tiefer bei 37.3 g/m²h. Praktisch bedeutet das, dass die Varianten mit dickerer Beschichtung (2 und 3) eine kurzzeitige Wässerung (Regen) gut absperrern und die Varianten mit dünnen Schichtdicken im Verlauf einer 1h bereits relativ viel Wasser aufnehmen.

5.4 Monitoring

Das Monitoring der Feuchteverläufe wurde einerseits über einen relativ langen Zeitraum von 18 Monaten durchgeführt und andererseits war der Variantenumfang sehr gross, weshalb im folgenden Abschnitt nur ein ausgewählter Teil der Ergebnisse vorgestellt wird. Dabei wurden immer jeweils zwei Varianten hinsichtlich ihrer Feuchteverläufe einander gegenübergestellt, welche sich nur in einem Einflussparameter unterscheiden. Dadurch kann in gewissen Grenzen abgeschätzt werden, ob und wie gross der Einfluss des jeweiligen Parameters ist. In Bezug auf die darzustellenden Varianten wurde insbesondere solche ausgewählt, welche Rückschlüsse auf den Einfluss der Stossausführung (stumpf oder offen) zulassen.

Allgemein ist zu berücksichtigen, dass die Temperaturen (in diesem Fall Tagesmittelwerte) in den nachfolgend aufgeführten Zeitintervallen unter dem Gefrierpunkt liegen:

- 06.-07.12.2022
- 10.-14.12.2022
- 18.-23.01.2023
- 26.-29.01.2023
- 07.-10.02.2023.

Da unterhalb der Null Grad Grenze keine relativen Luftfeuchten mehr mit den hier verwendeten Sensoren erfasst werden können, sind folglich die in den Diagrammen aufgeführten Werte für die oben genannten Zeiträume zu vernachlässigen.

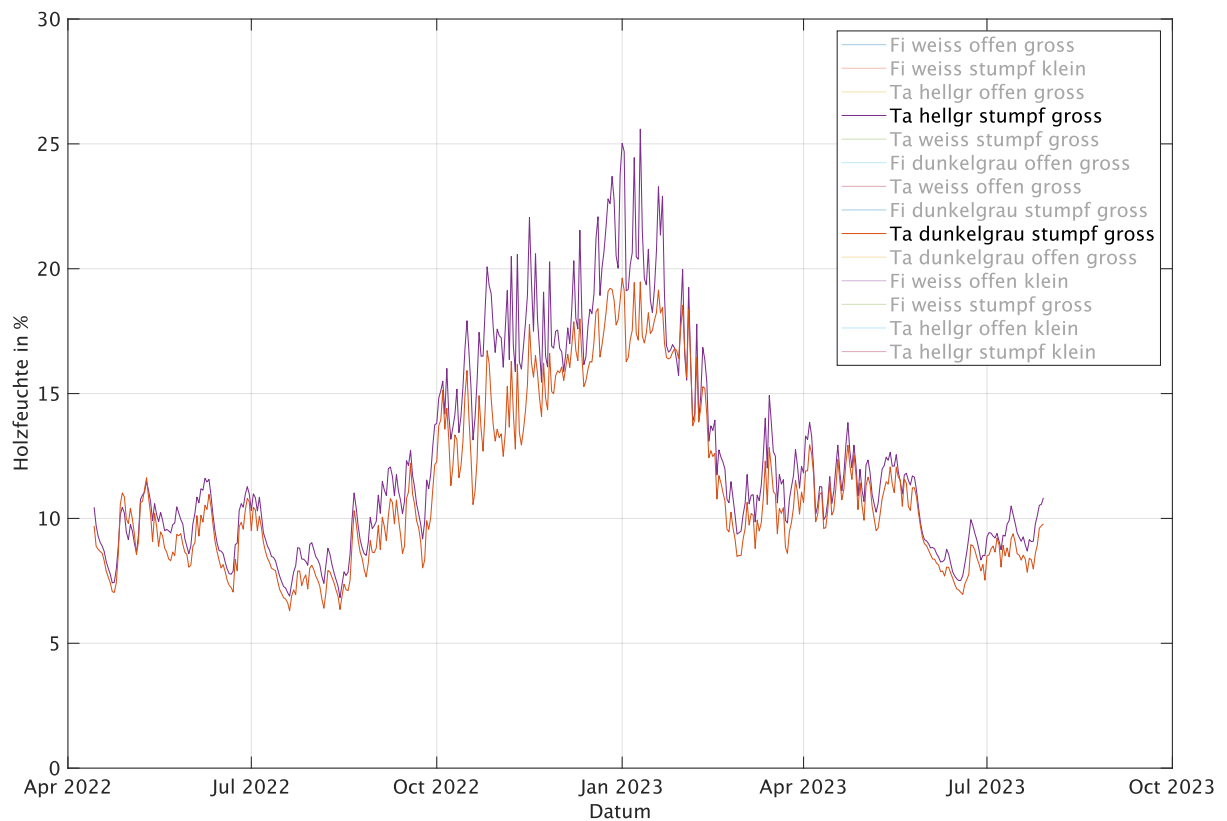


Abbildung 18: Zwei Tannevarianten, einmal mit diffusionsoffener hellgrauer Beschichtung und einer dichteren Variante in dunkelgrau

In Abbildung 16 sind zwei Tannenvarianten dargestellt, welche sich in erster Linie durch die Diffusionsoffenheit der Beschichtungssysteme unterscheiden. Bis auf einen geringfügigen Unterschied im Farbton bleiben alle weiteren Einflussfaktoren gleich. Die Feuchten für die diffusionsoffenerere Tannevariante (hellgrau stumpf) liegen über den gesamten Jahresverlauf etwas höher als für die dunkelgraue Tannevariante mit einer «dichteren» Beschichtung. Auffällig ist auch der ausgeprägtere Unterschied im Zeitraum von November bis Februar, während dem die Werte für die hellgraue Variante deutlich über 20 % liegen. In der Periode von April bis September 2022 schwanken beide Varianten zwischen minimal ca. 6 und maximal 12.5 %. Während dem kälteren Zeitraum steigen die Holzfeuchten bei der hellgrauen Variante bis auf knapp 25 % und bei der dunkelgrauen bis ca. 19 %.

Offensichtlich bewirkt die Dampfdiffusionsoffenheit eine stärkere Feuchteaufnahme, was aber nicht gleichzeitig ein besseres Austrocknungsverhalten bedeuten muss.

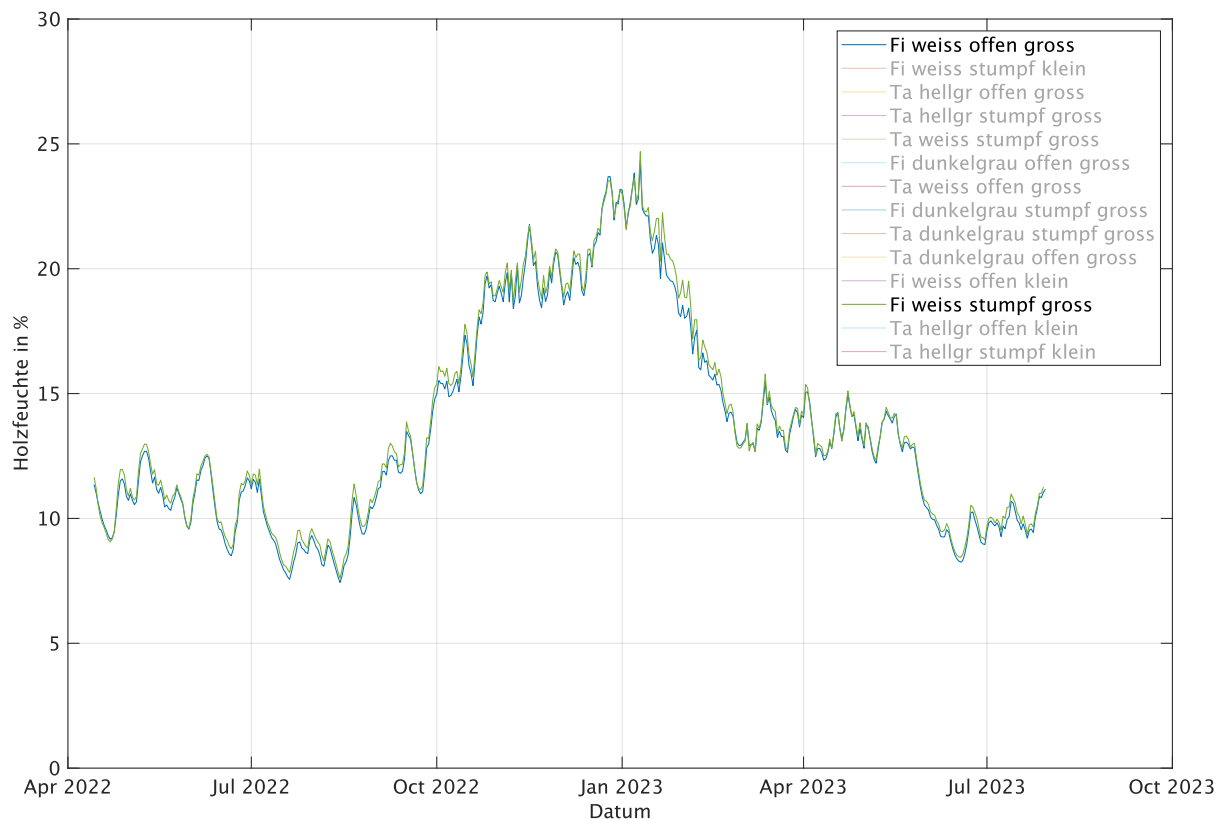


Abbildung 19: Zwei weisse Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung

Abbildung 17 bezieht sich auf die Analyse der Stossausführung, wobei eine offene und eine geschlossene Variante (Fichte) gegenübergestellt werden. Alle anderen Parameter bleiben unverändert. Beide Varianten zeigen bis Mitte September Feuchten, die zwischen minimal 7.5 und 12.5 % schwanken und danach bis Jahresende auf Werte von maximal 22.5 % ansteigen. Ab Jahresbeginn fallen beide Varianten wieder kontinuierlich bis Anfang März, wo sie dann bis Ende Mai zwischen 12.5 und 15 % schwanken, bevor sie zu Beginn Juni nochmals auf ein tieferes Niveau von 8 bis 11 % zurückgehen.

Es ist kein oder nur ein geringer Einfluss der Stossausbildung auf den Feuchtegehalt der beiden Lamellen festzustellen. Die beiden Stossvarianten zeigen einen praktisch identischen Verlauf über den gesamten Messzeitraum, mit Ausnahme des Zeitraums von Januar bis Februar, wo die Holzfeuchtwerte der offenen Variante leicht tiefer als die der geschlossenen liegen. Die Luftumspülung im Stossbereich hat offensichtlich nur einen geringen Einfluss auf die Holzfeuchte und ein geschlossener Stoss führt in diesem Zusammenhang nicht zu einer deutlich erhöhten kapillaren Wasseraufnahme und somit zu einer höheren Holzfeuchte.

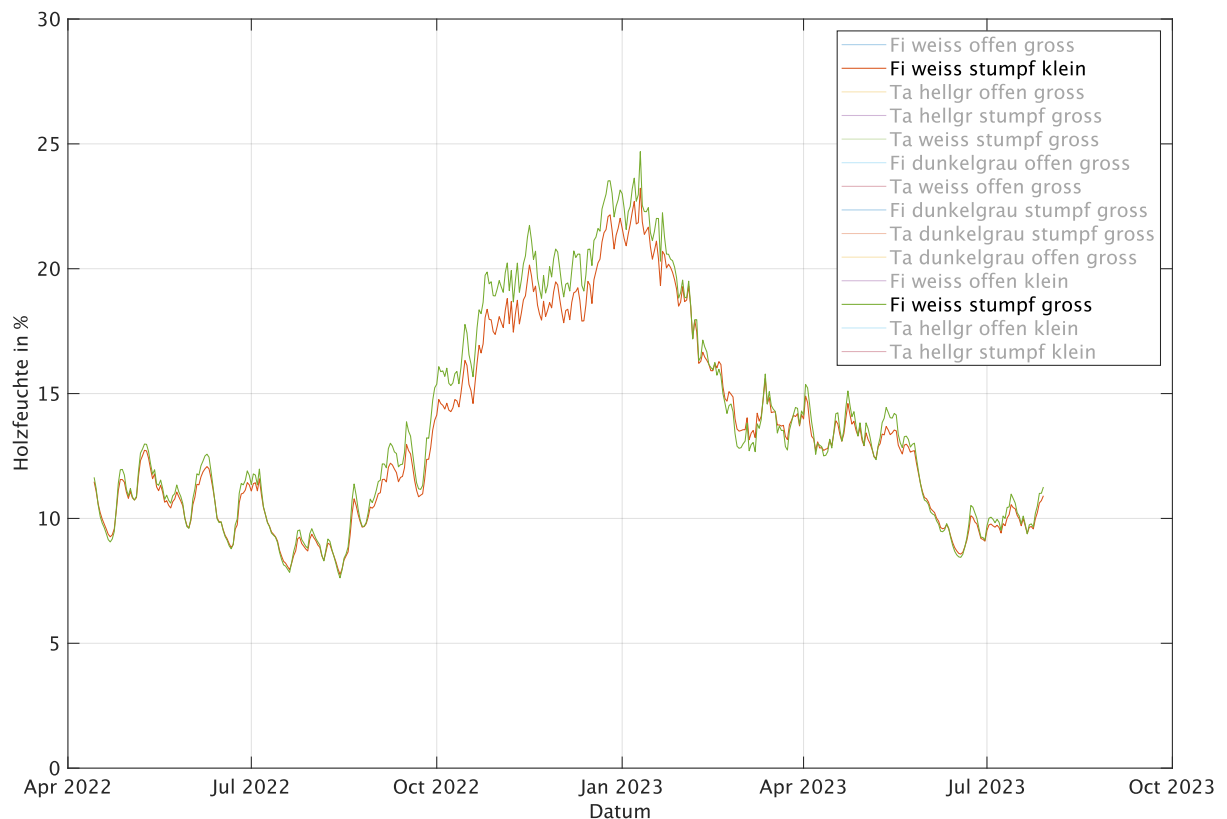


Abbildung 20: Zwei weisse Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung und unterschiedlicher Hinterlüftungssituation

In Abbildung 18 werden zwei Fichtenvarianten miteinander verglichen, welche sich durch den Hinterlüftungsraum unterscheiden.

Beide Kurven der obigen Grafik schwanken von April bis Mitte August relativ synchron zwischen Holzfeuchten von 7.5 bis 12.5 %. Die stumpf auf der Lattung gestossene Variante mit dem kleineren Hinterlüftungsraum zeigt ab September leicht tiefere Werte. Diese Tendenz setzt sich noch ausgeprägter fort bis Februar. Die ermittelten Ergebnisse entsprechen so nicht den Erwartungen, da ein kleinerer Hinterlüftungsraum eher zu einem Feuchtestau und somit zu höheren Holzfeuchtwerten führen müsste. Es ist davon auszugehen, dass die Konstruktion der Hinterlüftungsräume nicht den realen Verhältnissen einer mehrstöckigen Fassade entspricht und somit eine Differenzierung der Feuchteverhältnisse nur schwer möglich ist.

Generell zeigen die beiden Varianten wiederum die höchsten Feuchtwerte (bei ca. 23 %) um den Jahreswechsel, mit einem anschliessenden Abfall der Feuchten bis Anfang März (12.5 %) Ab Anfang Juni kommt es zu einem weiteren Abfall bis auf ein Niveau von 10 % Holzfeuchte.

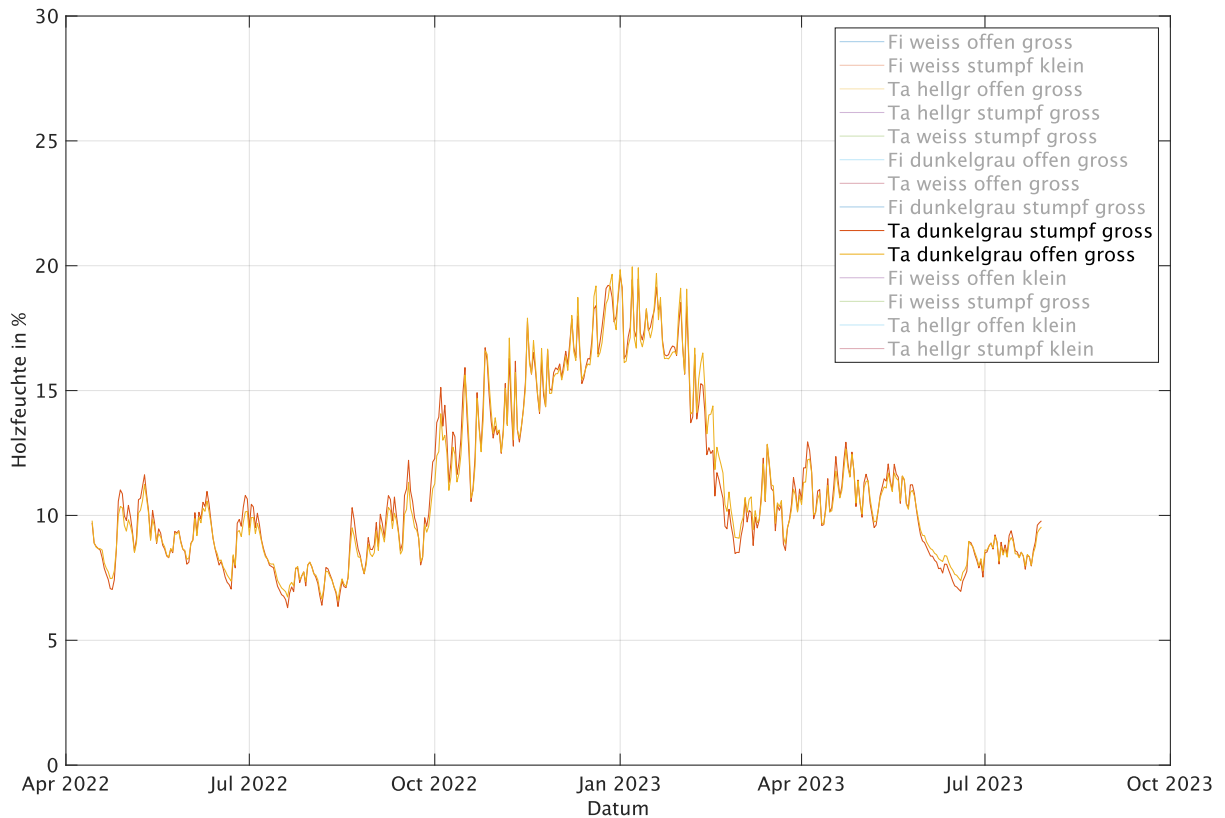


Abbildung 21: Zwei dunkelgraue Tannevarianten mit unterschiedlicher Stossausführung

In Abbildung 19 werden wiederum zwei Varianten mit unterschiedlicher Stossausbildung verglichen. Im Unterschied zu Abbildung 17 handelt es sich hierbei um zwei Tannenvarianten mit einer dunklen Beschichtung.

Bei den hier dargestellten Tannevarianten (dunkelgrau) zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei den weissen Fichtenvarianten. Die Stossausführungen hat keinen Einfluss auf den Feuchteverlauf, beide Varianten weisen auch hier einen nahezu identischen Verlauf über die gesamte Versuchsdauer auf.

Das Feuchteniveau der beiden hier abgebildeten Tannevarianten liegt insgesamt etwas tiefer, verglichen mit hellen Beschichtungsvarianten auf Fichte. So stellen sich hier wiederum bei Jahreswechsel die höchsten Feuchtwerte bei maximal 20 % ein (Die weissen Fichtevarianten zeigen eine maximale Feuchte von ca. 25%). Das niedrigere Feuchteniveau ist wahrscheinlich auf die dunklere Farbe zurückzuführen, welche zu einer höheren Temperatur auf der Oberfläche und somit zu einem besseren Austrocknen der Varianten führt.

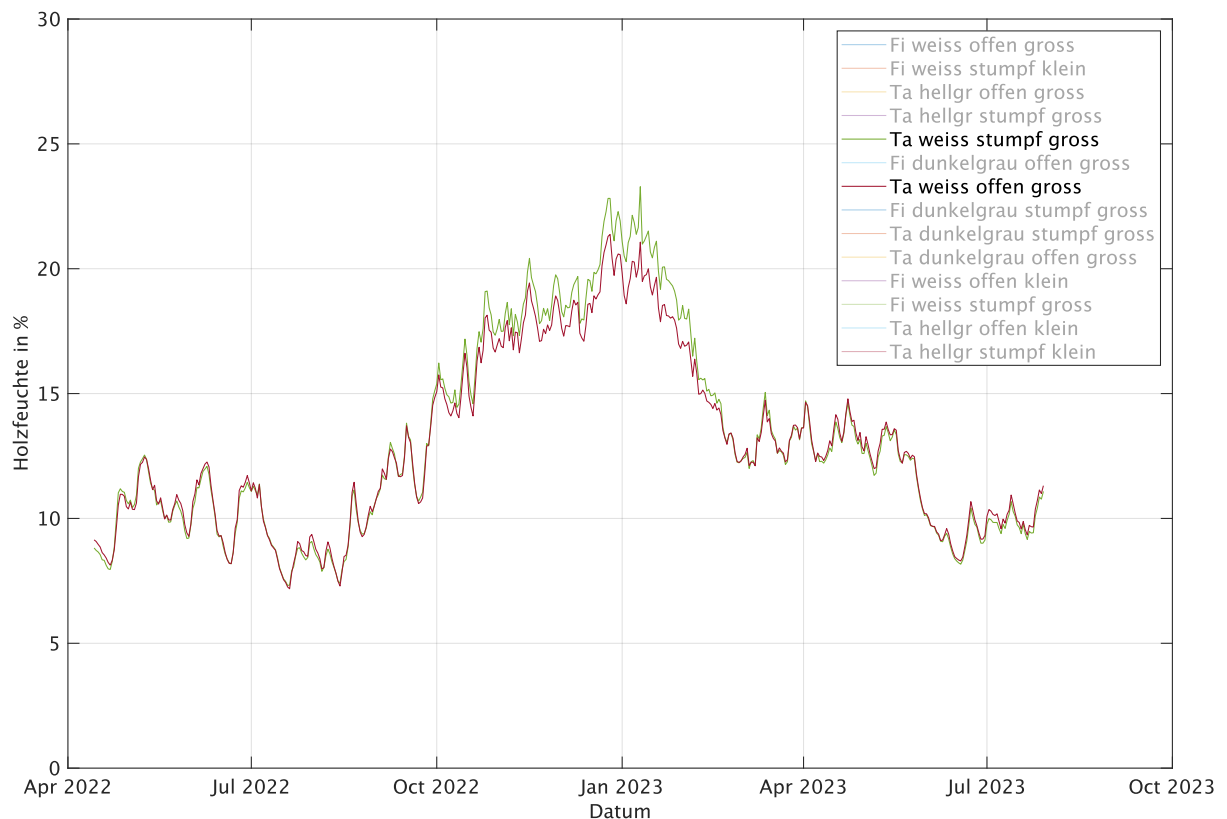


Abbildung 22: Zwei weisse Tannevarianten mit stumpfer und offener Stossausführung

In Abbildung 20 werden neben den Abbildungen 15 und 17 wieder zwei Varianten mit unterschiedlicher Stossausbildung dargestellt. Wobei es sich hierbei um zwei Tannevarianten mit weisser Beschichtung handelt.

Es zeigt sich dabei erstmals die Situation, dass die stumpfe Ausführung höhere Holzfeuchten aufweist, was insbesondere im Zeitraum von November bis Februar zu beobachten ist. Ausserhalb dieser Periode zeigen beide Varianten wiederum Werte, die sehr nahe beieinander liegen. Auch hier treten die höchsten Feuchten in der Zeit um den Jahreswechsel auf, zwischen 20 und 23 %. Die Werte von April 2022 bis Mitte September bewegen sich in einem Bereich von ca. 7 bis 14 %. Die Periode ab Anfang März bis Ende Mai 2023 liegt auf einem etwas höheren Niveau als im Vorjahr, wobei ab Juni die Werte nochmals deutlich sinken und in etwa das Vorjahresniveau um 10 % erreichen.

Es liegt die Vermutung nahe, dass die weisse Beschichtung einerseits zu niedrigeren Temperaturen im Bauteil führt, was wiederum zu einem differenzierten

Austrocknungsverhalten führt. Dabei gibt die Variante mit offener Stossausführung offensichtlich mehr Wasser ab, was sich in der niedrigeren Holzfeuchte widerspiegelt.

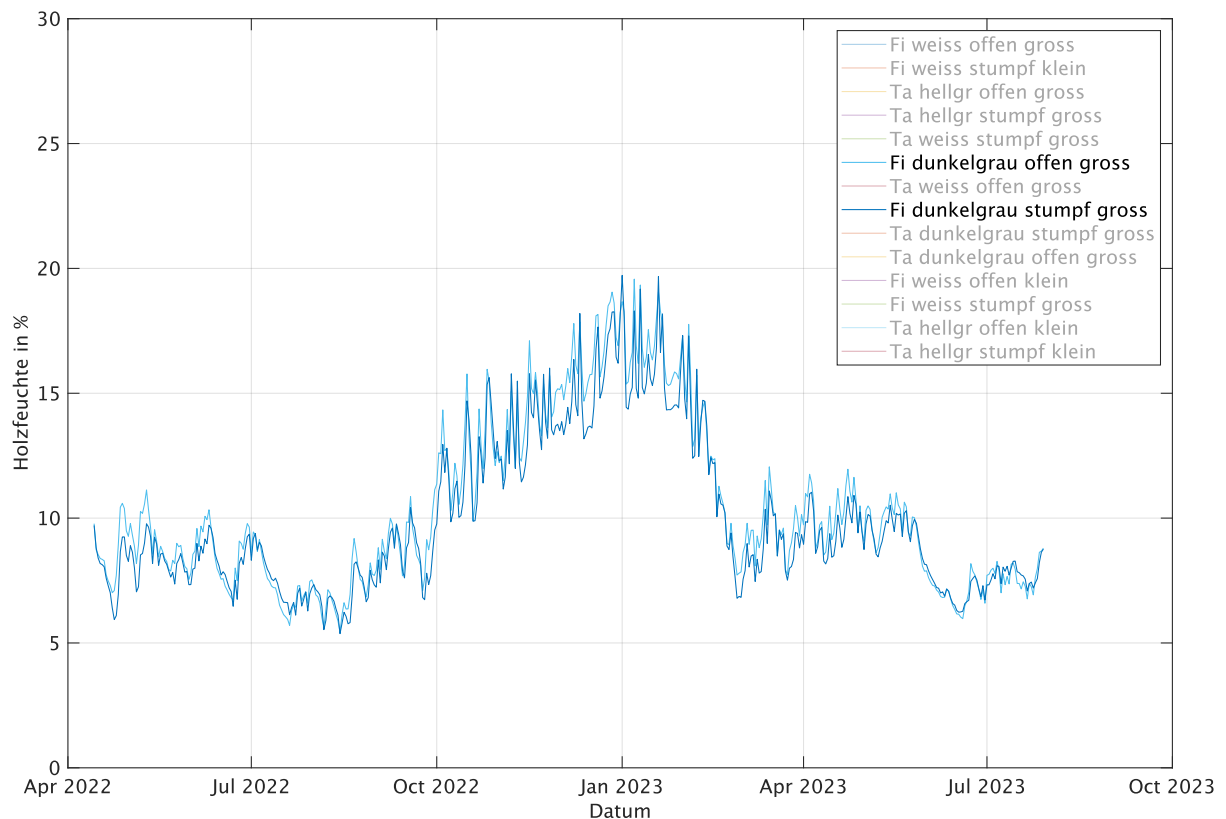


Abbildung 23: Zwei dunkelgraue Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung

Auch bei der Gegenüberstellung in Abbildung 21 steht nochmals die Analyse der Stossausbildung im Zentrum der Untersuchung, wobei hier die dunkelgrau beschichteten Fichtevarianten untersucht wurden. Bei beiden Varianten zeigt sich dieselbe Tendenz wie bei den vorangegangenen Varianten, die sich lediglich durch die Stossausführung unterscheiden, nämlich dass die Unterschiede im Holzfeuchteverlauf gering sind und es leichte Unterschiede im Zeitraum von Januar bis Februar gibt. Im vorliegenden Fall ist die stumpf gestossene Fuge (im genannten Zeitraum) wiederum etwas trockener und zeigt somit niedrigere Feuchten.

Der über die gesamte Messdauer betrachtete Feuchteverlauf zeigt wie bei allen anderen Varianten um den Jahreswechsel ein Maximum. Bei den hier dargestellten Varianten stellt sich dieses bei unter 20% ein, anschliessend erfolgt eine Austrocknung der Proben bis Anfang März, wobei sich dieser Trocknungseffekt nochmals im Juni verstärkt und auf ein Niveau von ca. 7% absinkt.

Der generell niedrigere Feuchteverlauf der dunkleren Varianten ist, wo oben beschrieben, mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die höheren Oberflächentemperaturen und somit auf ein stärkeres Trocknungsverhalten zurückzuführen.

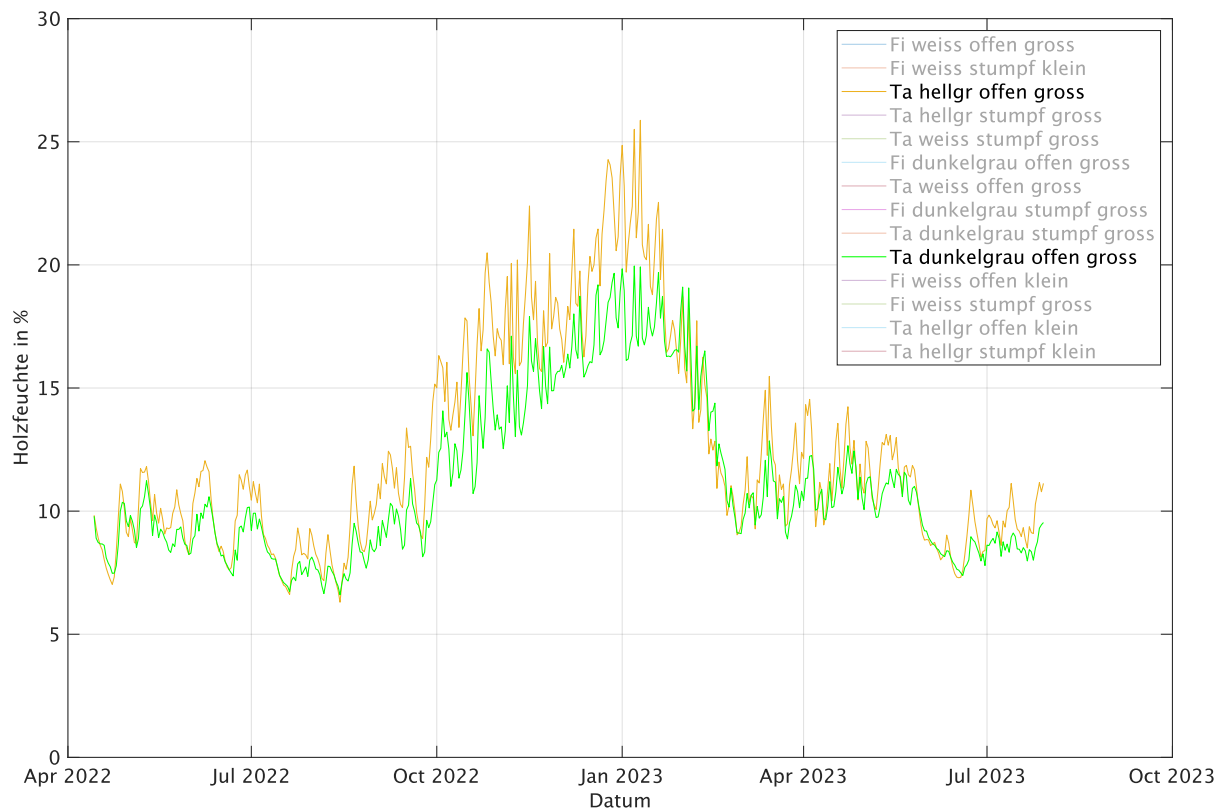


Abbildung 24: Zwei Tannevarianten offen gestossen mit unterschiedlicher Beschichtung

In Abbildung 22 ist jeweils eine diffusionsoffene und eine diffusionsdichte Tannenvariante in unterschiedlichen Grautönen dargestellt. In den Perioden von April bis September 2022 und von Februar bis August 2023 zeigt die offenere Variante höhere Spitzenwerte, wobei die Feuchte immer wieder auch auf das tiefere Niveau der dichteren Variante abfällt. Lediglich in der Zeit von September 2022 bis Februar 2023 liegen die Werte der beiden Varianten auf unterschiedlichen Feuchteniveaus. Bei der diffusionsoffeneren hellgrauen Variante ist der Anstieg bis auf ein Maximum von ca. 25 % zum Jahreswechsel hin deutlich stärker ausgeprägt, wobei der anschliessende starke Abfall bereits Mitte Januar dazu führt, dass beide Varianten wieder ähnliche Werte aufweisen.

Es ist davon auszugehen, dass sich beim Vergleich der beiden dargestellten Varianten die Aspekte der Diffusion und des Farbtons überlagern und ggf. sogar verstärken. Die hellere diffusionsoffene Variante nimmt mehr Feuchtigkeit auf. Im Vergleich dazu

zeigt die dunkle diffusionsgeschlossene Variante eine geringer Feuchtaufnahme und ein stärkeres Austrocknungsverhalten infolge der höheren Temperatur.

5.5 Freibewitterung

Im folgenden Abschnitt sind wesentliche Aspekte zum Witterungsverhalten der beschichteten Proben dargestellt, wobei die Auswertung der zeitabhängigen Farbänderung im Vordergrund steht.


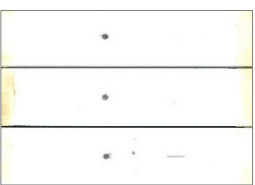






Für ein besseres Verständnis der Grafiken sind hier nochmals die Beschichtungssysteme und die Bezeichnungen der Proben dargestellt:

Tabelle 5: Beschichtungssysteme der Freibewitterungsproben

Beschichtungssystem N° (Variante)	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4
1 - Bosshard dünn	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	Arbezol Aqualin pro (Eiche)	x
2 - Bosshard dick	Arbezol Hydro-Grundierung BP Plus	Arbezol Hydro-Isoprimer (weiss)	Arbezol Industrie-Finish	Arbezol Industrie-Finish
3 - Teknos dick	Eterno Täfergrund 3624-00	Eterno 3600	Eterno 3600	x
4 - Teknos dünn	Teknol	x	x	x

Wie aus Tabelle 6 ersichtlich, sind die beiden deckenden Systeme (Variante 2 und 3) in Bezug auf die Farbveränderung stabiler. Bereits eine optisch qualitative Bewertung zeigt, dass diese Systeme sich farblich nur geringfügig geändert haben. Bei den dünn-schichtigen Systemen der Varianten 1 und 4 ist es im Gegensatz dazu bereits nach einem Jahr zu einem deutlichen Nachdunkeln der Oberflächen gekommen.

Tabelle 6 : Aufnahmen der 4 Beschichtungsvarianten appliziert auf einer 40 mm Probe in Fichte in Abhängigkeit der Bewitterungsdauer von einem Jahr

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Vor Bewitterung				
Nach 12 Monaten Bewitterung				

In den folgenden Abbildung 23 bis Abbildung 26 sind für die Beschichtungsvarianten 1-4 für die entsprechenden Substratvarianten die Farbveränderungen nach einem Jahr Bewitterung dargestellt. Somit ist eine qualitative Bewertung der Bewitterung in Abhängigkeit des Substrats möglich.

Die Benennung der Varianten in den 4 Abbildungen entspricht dabei folgendem Schema:

- Var1_Fi_20 Beschichtungssystem 1, Holzart Fichte, Dicke 20mm
- Var1_no_20 Beschichtungssystem 1, Holzart Tanne ohne Nasskern, Dicke 20mm
- Var1_nass_20 Beschichtungssystem 1, Holzart Tanne mit Nasskern, Dicke 20mm
- Var1_Fi_40 Beschichtungssystem 1, Holzart Fichte, Dicke 40mm
- Var1_no_40 Beschichtungssystem 1, Holzart Tanne ohne Nasskern, Dicke 40mm
- Var1_nass_40 Beschichtungssystem 1, Holzart Tanne mit Nasskern, Dicke 40mm

Bei Variante 1 (Abbildung 23) variieren die Mittelwerte für die Farbänderung ΔE , zwischen 10.6 (Nass_20) und 15.7 (Fi_20). Die dickeren Proben weisen bei dieser Beschichtung eine deutlich grössere Streuung auf.

Für Variante 2 (Abbildung 24) liegen die Mittelwerte aller Varianten für die Farbänderung ΔE unter 2, wobei die Streuung für alle Substrate sehr gering ist. Diese quantitativen Werte bestätigen die hohe Farbstabilität und Witterungsbeständigkeit der deckenden Systeme mit höhere Schichtdicke im Vergleich mit den qualitativen optischen Auswertungen aus Tabelle 6.

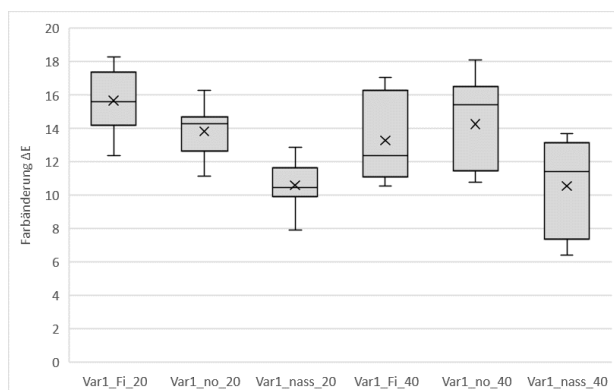


Abbildung 25: Farbänderung der Proben von Beschichtungsvariante 1 nach 12 Monaten

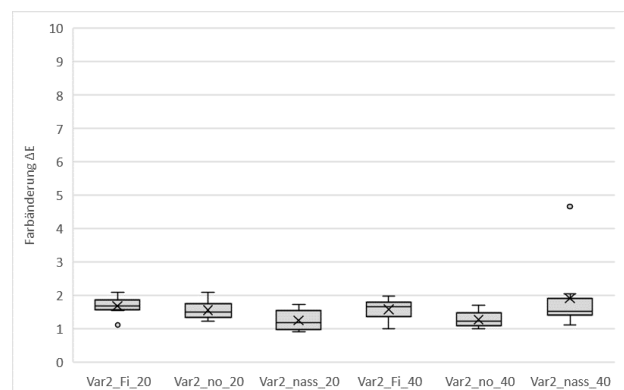


Abbildung 26: Farbänderung der Proben von Beschichtungsvariante 2 nach 12 Monaten

Bei Variante 3 (Abbildung 25) variieren die Mittelwerte der Farbänderung ΔE der verschiedenen Probenausführungen zwischen 2 (no_40) und 2.7 (nass_20), was wiederum für eine hohe Witterungsbeständigkeit spricht und die qualitativen Ergebnisse aus Tabelle 6 bestätigt.

Bei Variante 4 (Abbildung 26) bewegen sich die Mittelwerte der Farbänderung zwischen 27.3 (Fi_20) und 17.5 (nass_40) und entsprechen somit der grössten Farbveränderung der hier untersuchten Varianten. Die Streuung innerhalb der verschiedenen Substratvarianten ist relativ gering, wobei sich die einzelnen Varianten teilweise signifikant voneinander unterscheiden. Insbesondere zeigt die Varianten Var1_nass_40 die geringste Farbänderung

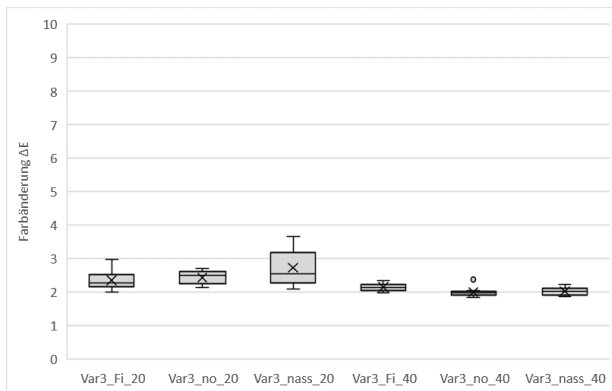


Abbildung 27: Farbänderung der Proben von Beschichtungsvariante 3 nach 12 Monaten

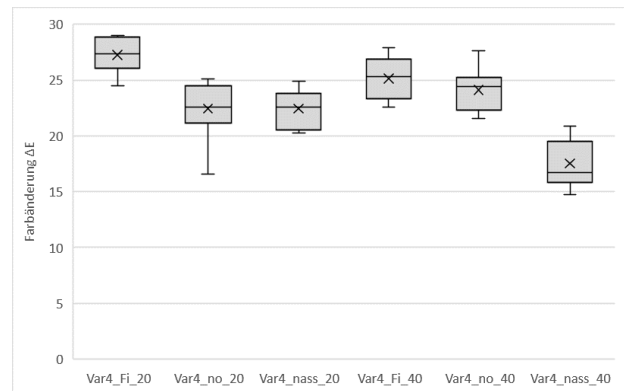


Abbildung 28: Farbänderung der Proben von Beschichtungsvariante 4 nach 12 Monaten

Die Proben für die Freibewitterung wurden zusätzlich mit einer Schraube und einem Schnitt versehen, um die beschichtete Fläche mit standardisierten Fehlern auszustatten. Über den beobachteten Zeitraum konnten noch keine durch die Fehlstellen begünstigten Makel ausgemacht werden. Wie beim Monitoring der Fassadenelemente ist davon auszugehen, dass der Beobachtungszeitraum zu kurz war, als dass die durch die Fehlstellen begünstigte Wasseraufnahme sich bereits negativ bemerkbar machen konnte.

6. Weiterführende Untersuchungen

Die Thematik der Bewitterung und des Pilzbefalls muss in einem grösseren zeitlichen Rahmen (> 5 Jahre) betrachtet werden. Die zahlreichen Faktoren und deren Zusammenspiel, welches sich in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs dynamisch verändert, erschweren genaue Prognosen. Trotz diverser Bestrebungen mit Hilfe von Modellen (Brischke u. a. 2021) Kenngrössen wie Lebenserwartung und Wartungsintervalle zu berechnen, fehlt es diesen an einer genügend hohen geografischen Auflösung und sich ändernden Gewichtung der indirekten und direkten Einflussfaktoren (siehe Tabelle 2). Vor dem Hintergrund, dass die meisten Schadensfälle ausserhalb der Gewährleistungsfrist, meistens nach mehr als 5 Jahren auftreten, sehen wir es als äusserst wertvoll an, insbesondere das Monitoring an den Fassadenelementen weiterzuführen.

In der Literatur wird meist von einer kritischen Schwelle der Holzfeuchte von 25 % ausgegangen. Betrachtet man die Werte die Huckfeldt (Huckfeldt & Schmidt 2015) für die Blättlinge aufführt, könnte es allenfalls Sinn machen zusätzlich zur Holzfeuchte die Holztemperatur bei der Einteilung der Risikoklassen zu berücksichtigen, was ebenfalls in einem weiterführenden Monitoring berücksichtigt werden muss.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand der bisher bekannten Fakten können keine spezifischen Ursachen für eine erhöhte Anfälligkeit der Tanne gegenüber der Fichte identifiziert werden. Alle im Rahmen dieser 2 Teilprojekte durchgeführten Untersuchungen, deuten nicht auf eine erhöhte Befalls- und Abbauwahrscheinlichkeit für in Tanne ausgeführte Fassaden hin. (Eine in der Planungsphase durchzuführende allgemeine Risikobewertung für kritische Objekte ist dringend zu empfehlen, egal ob in Fichte oder Tanne ausgeführt.) Die hierbei zu berücksichtigenden Faktoren sind angelehnt an die in Tabelle 2 aufgeführten Faktoren. Hierbei ist der Einfluss durch Klima und insbesondere auch durch Umweltfaktoren, die einen Einfluss auf die Holzfeuchte haben, speziell zu berücksichtigen.

Vor dem grösseren Hintergrund der Nachhaltigkeit und spezifisch der Stellung von Holz im Fassadenbereich gegenüber alternativen Materialien, scheint es immer wichtiger, verlässliche Prognosen in Bezug auf die Lebenserwartung stellen zu können. Wie oben bereits erwähnt, sind hier sehr viele Faktoren zu berücksichtigen, die von Fall zu Fall sehr stark variieren können und deren Abschätzung nicht trivial ist. Als Beispiel seien hier genannt, die Niederschlagswerte in Kombination mit Wind und Windrichtung, die lokal stark begrenzt eine grosse Variation aufweisen können und entsprechend zu unterschiedlichem «Wassereintrag» in ein Fassadensystem führen.

Trotz der oben gemachten Ausführungen zur schwierigen Differenzierung der Anfälligkeit von Fichten- und Tannenholz gegenüber dem Tannenblättling sollen an dieser Stelle die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst werden, welche sich in erster Linie auf die physikalischen Eigenschaften und die spezifischen Faktoren einer installierten Fassade beziehen.

Bei der Bewertung der Laborversuche müssen, wie in Teilprojekt 1, prinzipiell zwei verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Einerseits muss geklärt, insofern das möglich ist, ob Tannenholz per se anfälliger gegenüber dem Tannenblättling ist als z.B. Fichte. Andererseits gilt es abzuschätzen, inwieweit Tannenholz durch seine physikalischen Eigenschaften ggf. bessere Bedingungen bietet, damit es überhaupt zu einem Pilzbewuchs kommt. Diese Fragestellung würde sich dann in erster Linie auf das sorptive und kapillare Verhalten von Tannenholz in der konkreten Fassade beziehen (Schwerpunkt von Teilprojekt 2).

In Bezug auf die generelle Anfälligkeit und einen möglichen Befall von Tannenholz (ohne Nasskern und Rotstreifigkeit) im Vergleich mit Fichtenholz kann auf die

Auswertung in Teilprojekt 1 verwiesen werden, in welchem festgestellt wurde, dass es dies bzgl. kaum Unterschiede gibt. Beide Varianten werden in gleichem Umfang abgebaut, wobei Fichte sogar die grösseren Abbauraten aufweist. Hinsichtlich der unterschiedlichen Tannensortimente gilt prinzipiell das gleich, dass die Rotstreifigkeit oder das Vorhandensein des Nasskerns zu einem stärkeren Befall geführt hat, kann ebenfalls nicht bestätigt werden. Es ist sogar so, dass die Proben mit normalem Nasskern nur ausgesprochen wenig durch den Tannenblättling befallen werden. Es bleibt aber zu betonen, dass sich diese Ergebnisse nur auf Laborversuche beziehen und dementsprechend nicht ohne weiteres auf Holzelemente im Aussenbereich übertragen werden können. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass Tannenholz eine ähnliche Resistenz gegenüber dem Tannenblättling aufweist, wie Fichtenholz. Was bei dieser Bewertung aber nicht beachtet wird, ist die initiale Start eines Befalls bzw. wie schnell erfolgt die Besiedlung auf den verschiedenen Holzsortimenten. Diese Frage kann labortechnisch nicht nachgestellt werden, da die Einflussfaktoren zu vielfältig sind.

Jedoch kommt an dieser Stelle genau der Aspekt des sorptiven Verhaltens bzw. der physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Hölzer in Zusammenhang mit entsprechenden Beschichtungen zum Tragen, welche den Schwerpunkt in dem vorliegenden Teilprojekt 2 gebildet haben.

Dabei hat sich gezeigt, dass erwartungsgemäss die Beschichtung der Holzproben zu einer Erhöhung des Dampf Widerstandes geführt hat. Dabei war aber auffällig, dass die gleichen Beschichtungssysteme bei Tanne zu einem höheren Dampf Widerstand führen als bei Fichtenholz. Das legt die Annahme nahe, dass beschichtete Tannenproben ein schlechteres Austrocknungsverhalten zeigen, was einen Befall durch den Tannenblättling begünstigen würde.

Entsprechend den Ergebnissen der Dampfdiffusion führt die Applikation einer Beschichtung auch zu einer reduzierten Aufnahme von flüssigem Wasser. Jedoch konnte beim Vergleich der beschichteten Proben festgestellt werden, dass die Fichte proben für jedes Beschichtungssystem mehr flüssiges Wasser aufnehmen, was den Angaben nach Sell (1988) widerspricht, wonach Tanne eine höhere Saugfähigkeit hat. Aber wie bereits oben erwähnt, könnte es auch sein, dass die Beschichtung von Tanne zu einem dichteren Verbund führt und somit weniger flüssiges Wasser durchdringen kann. Allgemein muss in diesem Zusammenhang noch ergänzt werden, dass eine dichte wasserabweisende Beschichtung so lange gut ist und funktioniert, so lange das gesamte System keine Aufnahme von flüssigem Wasser zu lässt (z.B. über Risse oder offene Verbindungen). Ein dichtes System kann zwar Wasser von aussen gut abschirmen, erschwert aber auch eine Trocknung des Bauteils von innen.

Das Monitoring von Musterfassaden war ein wesentlicher Schwerpunkt von Teilprojekt 2 und hat in diesem Zusammenhang einige wichtige Ergebnisse geliefert, welche teilweise im Widerspruch zu Teilprojekt 1 und zur gängigen Meinung in der Praxis stehen. Generell muss dazu noch erwähnt werden, dass die Ergebnisse des Monitorings sich auf einen Zeitraum von 18 Monaten beziehen, was im Vergleich zur Lebensdauer einer Fassade sehr kurz ist. Weiter bleibt festzuhalten, dass insbesondere die Beschichtungen erst bei längeren Bewitterungszeiten von mehr als 5 Jahren deutlich degradiert sein können und dementsprechend ihre Schutzfunktion verlieren, was dann wieder zu ändernden Feuchteverhältnissen in der Fassade und im Substrat führen kann. Von daher sind die hier vorgelegten Ergebnisse auch mit Vorsicht zu geniessen und müssen noch über einen längeren Zeitraum verifiziert werden.

Trotz der oben gemachten Einschränkungen konnten folgende Zusammenhänge gefunden werden, welche aus Sicht der Autoren wesentlich für einen Befall durch den Tannenblättling sind.

- Diffusionsoffene Beschichtungssysteme führen zu höheren Holzfeuchten, was auf die bessere Dampfdurchlässigkeit zurückgeführt wird. Inwieweit das Austrocknungsverhalten beeinflusst wird, konnte nicht nachgewiesen werden. (Widerspruch zu Teilprojekt 1)
- Der Einfluss der Grösse des Belüftungsraumes hinter der Schalung ist eher gering auf die Holzfeuchte der Lamellen, wobei dieser Parameter sehr schwierig an einer Musterfassade nachgestellt werden kann. (Widerspruch zu Teilprojekt 1)
- Die Stossausführung, stumpf oder offen, hat nur einen geringen Einfluss auf Holzfeuchte der Lamellen, mit einer deutlichen Ausnahme bei der Variante Tanne-weisse Beschichtung. (Widerspruch zur Teilprojekt 1)
- Dunkle Farben führen zu geringeren Holzfeuchten, was wahrscheinlich auf die höheren Oberflächentemperaturen und das entsprechende Austrocknen des Holzes zurückzuführen ist.

Allgemein konnte aus dem Kurvenverlauf der Holzfeuchte abgelesen werden, dass das Maximum immer in den Wintermonaten erreicht wurde. In Anbetracht der entsprechend niedrigen Temperaturen sind diese hohen Werte wahrscheinlich nicht ausschlaggebend für einen Befall durch den Tannenblättling, welcher unter diesen Umständen nicht aktiv ist.

Die Untersuchungen haben wieder eine Reihe an Ergebnisse geliefert, wobei eine Prognose des Befalls durch den echten Tannenblättling sehr schwierig bleibt. Auf

Grund der vorliegenden Ergebnisse und insbesondere der Erfahrungen der analysierten Schadensfälle sind die folgenden Aspekte weitere wesentliche Parameter, welche einen Befall begünstigen. Wichtig bleibt dabei anzumerken, dass speziell die Einflussgrößen, welche den Pilz betreffen nicht im vornherein abgeschätzt werden können und somit einen grossen Unsicherheitsfaktor bilden.

Weitere mögliche Ursachen für einen Befall von Fichte und Tanne durch den Tannenblättling:

- Fassadenkonstruktion allgemein – offen oder geschlossene Varianten führen zu einem deutlich unterschiedlichen Abwitterungsverhalten
- Zugänglichkeit der Unterkonstruktion - stehendes Wasser im Bereich der Unterkonstruktion kann äusserst kritisch sein (Ein Befall wird erst sehr spät bemerkt.)
- Einsatz von Splintholz, was bei Tanne oder Fichte nach der technischen Trocknung nicht mehr differenziert werden kann, Die Anfälligkeit des Splintholzes ist als deutlich höher einzuschätzen und kann der Start für einen grösseren Befall sein.
- Längerfristiger Einfluss von Konstruktionsdetails – Risse, Verbindungsmittel, Stösse, welche zu einer erhöhten Wasseraufnahme führen
- Schwankende Holzqualität insbesondere in Bezug auf die Dichte und Wimmerwuchs
- Herkunft, Geschichte und Vitalität der Pilzstämme – extrem entscheidend für die Befallsdynamik und den Befallsumfang

Was bei den genannten Einflussgrößen unbedingt beachtet werden muss, ist deren Kombination miteinander. Oftmals treten verschiedene Einflüsse parallel auf und verstärken sich somit, was eine Vorhersage des Befalls aber nochmals erschwert.

Auf der Grund der vorliegenden Erkenntnisse kann trotz aller Einschränkungen gesagt werden, dass Tannenholz gut für den Einsatz als Fassadenschalung geeignet ist und bei entsprechend fachgerechter Verwendung mit der gleichen Dauerhaftigkeit wie bei Fichtenholz gerechnet werden kann.

8. Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für und des Projektverantwortlichen gültig.

8.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 57 Seiten inkl. Anhang.

9. Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- Augusta, Ulrike 2007. Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Doctoral Thesis. Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky, Hamburg. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/1776> [Stand 2023-06-15].
- Blanchette, Robert A., Obst, John R. & Timell, Tore E. 1994. Biodegradation of Compression Wood and Tension Wood by White and Brown Rot Fungi. 48, s1, 34-42.
- Brischke, Christian u. a. 2023. Durability of Wood Exposed above Ground—Experience with the Bundle Test Method. *Forests* 14, 7, 1460.
- Brischke, Christian u. a. 2021. Modelling the Material Resistance of Wood—Part 3: Relative Resistance in above- and in-Ground Situations—Results of a Global Survey. *Forests* 12, 5, 590.
- Brischke, Christian, Bayerbach, Rolf & Otto Rapp, Andreas 2006. Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 1, 3-4, 91-107.
- Brischke, Christian & Rapp, Andreas Otto 2008. Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology* 42, 6, 507-518.
- Brischke, Christian & Selter, Vanessa 2020. Mapping the Decay Hazard of Wooden Structures in Topographically Divergent Regions. *Forests* 11, 5, 510.
- Brischke, Christian, Soetbeer, Arved & Meyer-Veltrup, Linda 2017. The minimum moisture threshold for wood decay by basidiomycetes revisited. A review and modified pile experiments with Norway spruce and European beech decayed by *Coniophora puteana* and *Trametes versicolor*. *Holzforschung* 71, 11, 893-903.
- Fogarty, William M. & Ward, Owen P. 1973. Growth and enzyme production by *Bacillus subtilis* and *Flavobacterium pectinovorum* in *Picea sitchensis*. *Wood Science and Technology* 7, 4, 261-270.
- Goodell, Barry, Winandy, Jerrold E. & Morrell, Jeffrey J. 2020. Fungal Degradation of Wood: Emerging Data, New Insights and Changing Perceptions. *Coatings* 10, 12, 1210.
- Huckfeldt, Tobias & Schmidt, Olaf 2015. Hausfäule- und Bauholzpilze : Diagnose und Sanierung. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Köln: Rudolf Müller.
- Rapp, A. O. & Peek, R.-D. 1999. Melaminharzimprägniertes sowie mit Wetterschutzlasur oberflächenbehandeltes und unbehandeltes Vollholz während zweijähriger Freilandbewitterung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57, 5, 331-339.

Simpson, W. 1973. «Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models» Wood and Fiber, Bd. 5(1), pp. 41-49,

Stirling, Rod u. a. 2016. Global survey on durability variation – on the effect of the reference species.

Suttie, E. u. a. 2020. Performance Based Specification of Wood – Project CLICKdesign. In XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. eBook of Proceedings. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. CIMNE. https://www.scipedia.com/public/Suttie_et_al_2020a [Stand 2023-10-31].

Vanek, M. & Teischinger, Alfred 1989. Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten. Holzforschung und Holzverwertung 41, 1, 3-6.

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bereiche der Temperatur für Blättlinge nach (Huckfeldt & Schmidt 2015)	8
Tabelle 2: Klassifikation von abbaurelevanten Faktoren nach Brischke u.a. 2006	11
Tabelle 3: Verwendete Beschichtungsaufbauten mit Ausführung der Produktbezeichnungen	14
Tabelle 4: Übersicht über die Varianten, welche in den Elementen verbaut sind mit den in den Feuchtediagrammen verwendeten Variantenbezeichnungen im Teil Resultate.	16
Tabelle 5: Beschichtungssysteme der Freibewitterungsproben	34
Tabelle 6 : Aufnahmen der 4 Beschichtungsvarianten appliziert auf einer 40 mm Probe in Fichte in Abhängigkeit der Bewitterungsdauer von einem Jahr	34
Tabelle 7: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 1 für die Versuche der Freibewitterung	52
Tabelle 8: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 2 für die Versuche der Freibewitterung	53
Tabelle 9: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 3 für die Versuche der Freibewitterung	54
Tabelle 10: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 4 für die Versuche der Freibewitterung	55
Tabelle 11: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvarianten IWW 5 bis 11 für die Versuche der Freibewitterung	56

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtübersicht der bearbeiteten Themenfelder beider Teilprojekte	6
Abbildung 2: Feuchteansprüche für den Bewuchs von Kiefernspiltholz mit naher Feuchtequelle (Huckfeldt & Schmidt 2015)	9
Abbildung 3: Feuchteansprüche für den Abbau von Kiefernspiltholz mit naher Feuchtequelle (Huckfeldt & Schmidt 2015)	9
Abbildung 4: Übersichtskarten der Schweiz mit klimatischen Faktoren: (a) jährlichen Niederschlag, (b) Jahresdurchschnitt Temperatur und (c) Jahresdurchschnitt der relativen Luftfeuchte (Brischke & Selter 2020)	11
Abbildung 5: Schema Feuchte-/Temperatursensor, Bohrung in einer Lamelle	17
Abbildung 6: Varianten der mit Sensoren ausgestatteten Holz-, Beschichtungs-, Stoss- und Hinterlüftungskombinationen	17
Abbildung 7 Feuchtesensor im Messingrohr in der Fassadenlamelle mit einem Holz fixiert	18
Abbildung 8 Fassadenelemente mit 6 Sensoren, Ansicht der OSB Platte von hinten	18
Abbildung 9: Fassadenelemente 1 (links) und 2 (rechts) ausgestattet mit Feuchtesensoren, deren Lage jeweils mit einem roten Punkt markiert ist. Die Leiste direkt unter den Stößen ist durch die rot gestrichelte Linie im linken Element gekennzeichnet.	19
Abbildung 10: Prüfkörper Freibewitterung mit Verschraubung und einem Schnitt, jeweils in der Breite mittig platziert. Die Enden der Lamelle links und rechts sind mit einer wasserundurchlässigen Beschichtung versiegelt.	20
Abbildung 11: Schichtdicken aller Varianten	21
Abbildung 12: Bildausschnitte von mikroskopischen Aufnahmen des Übergangsbereichs Holzsubstrat-Beschichtung zur besseren Veranschaulichung der Messwerte für die Schichtdicken (v.l.n.r. Variante 1 Tanne, Variante 2 Fichte, Variante 4 Tanne, Variante 5 Tanne)	22
Abbildung 13: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen der verschiedenen Varianten ermittelt nach DIN EN ISO 12572 nach dem dry-cup Verfahren	23

Abbildung 14: Aufnahme von flüssigem Wasser der Beschichtungsvarianten 1 bis 4 auf Fichte (Fi) und Tanne (Ta)	24
Abbildung 15: Aufnahme von flüssigem Wasser nach einer Stunde Wasserlagerung der Beschichtungsvarianten 1 bis 4 auf Fichte (Fi) und Tanne (Ta)	25
Abbildung 16: Zwei Tannevarianten, einmal mit diffusionsoffener hellgrauer Beschichtung und einer dichteren Variante in dunkelgrau	27
Abbildung 17: Zwei weisse Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung	28
Abbildung 18: Zwei weisse Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung und unterschiedlicher Hinterlüftungssituation	29
Abbildung 19: Zwei dunkelgraue Tannevarianten mit unterschiedlicher Stossausführung	30
Abbildung 20: Zwei weisse Tannevarianten mit stumpfer und offener Stossausführung	31
Abbildung 21: Zwei dunkelgraue Fichtenvarianten mit offener und geschlossener (stumpfer) Stossausführung	32
Abbildung 22: Zwei Tannevarianten offen gestossen mit unterschiedlicher Beschichtung	33
Abbildung 23: Farbänderung der Proben von Beschichtungs-variante 1 nach 12 Monaten	35
Abbildung 24: Farbänderung der Proben von Beschichtungs-variante 2 nach 12 Monaten	35
Abbildung 25: Farbänderung der Proben von Beschichtungs-variante 3 nach 12 Monaten	36
Abbildung 26: Farbänderung der Proben von Beschichtungs-variante 4 nach 12 Monaten	36
Abbildung 27: Variante 1 Fichte; Zellwände ragen relativ häufig «durch» die Beschichtung, es ist lediglich ein inhomogener Film von ca. einer Zellreihe festzustellen	48
Abbildung 28: Variante 1 Tanne normal; Die Beschichtung weist ähnlich wie bei der Tannevariante keinen durchgehenden Film auf	48
Abbildung 29: Variante 2 Fichte; es besteht ein durchgehender Film, ohne Durchdringungen von Holzkomponenten	49

Abbildung 30 : Variante 2 Tanne normal; wie bei der entsprechenden Fichtenvariante ein relativ homogener Film ohne Durchdringungen	49
Abbildung 31: Variante 3 Fichte; homogener Beschichtungsfilm ohne Durchdringungen	50
Abbildung 32 : Variante 3 Tanne normal; homogener Beschichtungsfilm ohne Durchdringungen	50
Abbildung 33: Variante 4 Tanne normal; es ist kein eigentlicher Film auf dem Holzsubstrat zu erkennen. Die durch die Beschichtung eingebrachten Substanzen sind mittels der Lichtmikroskopie nur gering zu identifizieren.	51
Abbildung 34: Variante 5 Tanne normal; es ist deutlich ein Film auf dem strukturgehobelten Holzsubstrat zu erkennen. Dieser wird teilweise durch Zellwandmaterial durchdrungen.	51
Abbildung 35: Farbänderung ΔE der Varianten IWW 5 bis 11 nach einer Bewitterungsdauer von 12 Monaten	57

A.1 Anhang - Mikroskopische Aufnahmen der Beschichtungen

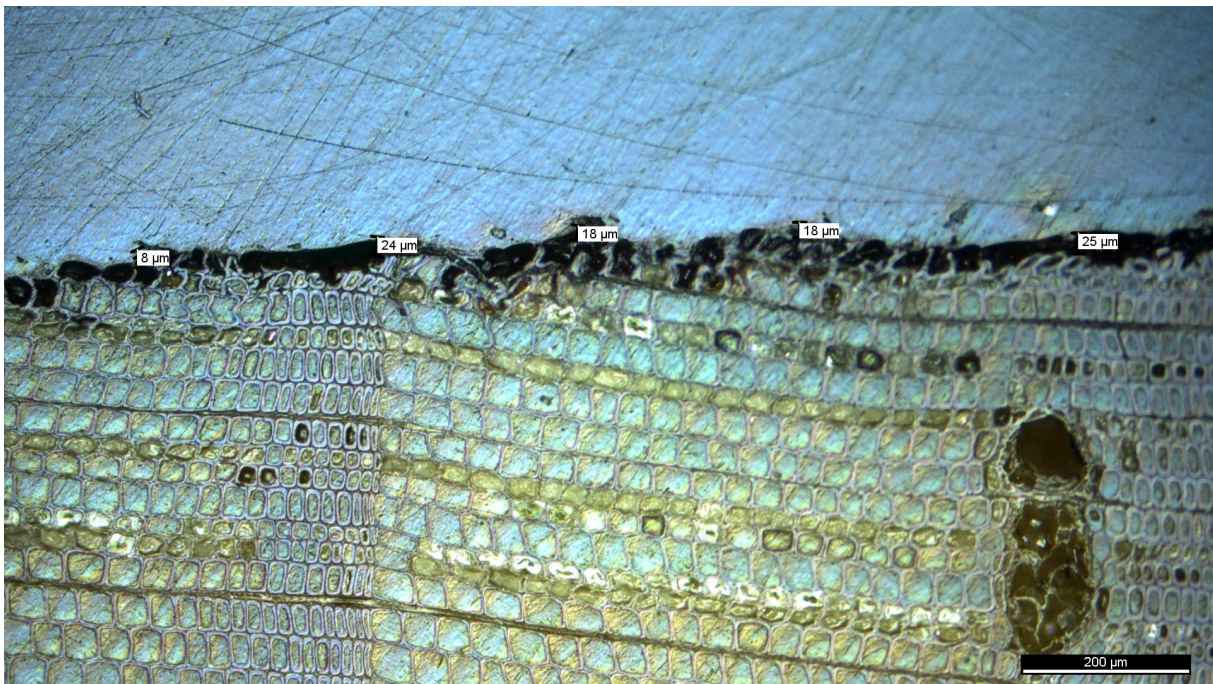


Abbildung 29: Variante 1 Fichte; Zellwände ragen relativ häufig «durch» die Beschichtung, es ist lediglich ein inhomogener Film von ca. einer Zellreihe festzustellen

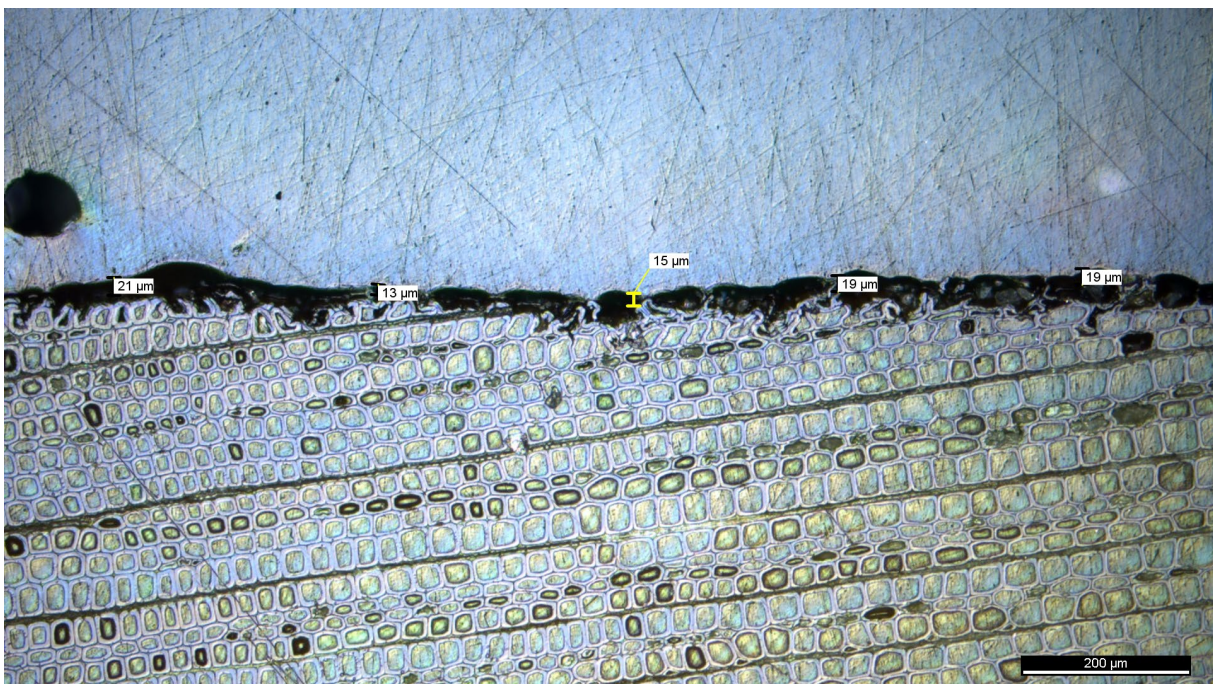


Abbildung 30: Variante 1 Tanne normal; Die Beschichtung weist ähnlich wie bei der Tannevariante keinen durchgehenden Film auf

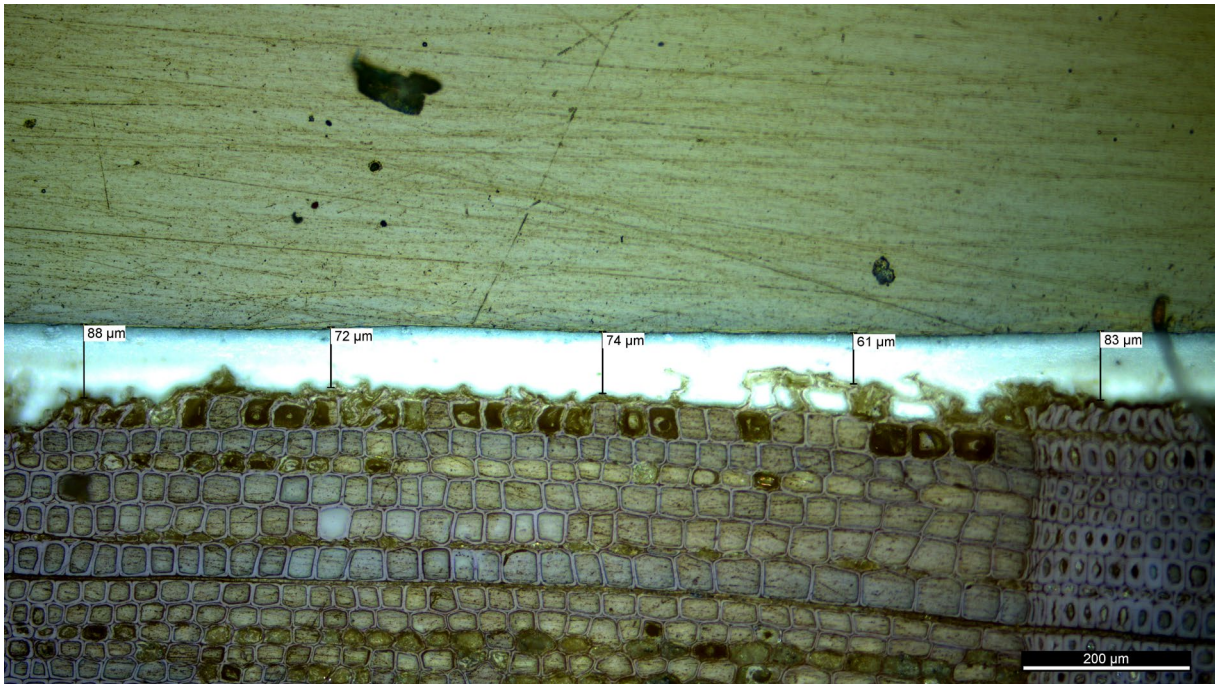


Abbildung 31: Variante 2 Fichte; es besteht ein durchgehender Film, ohne Durchdringungen von Holzkomponenten

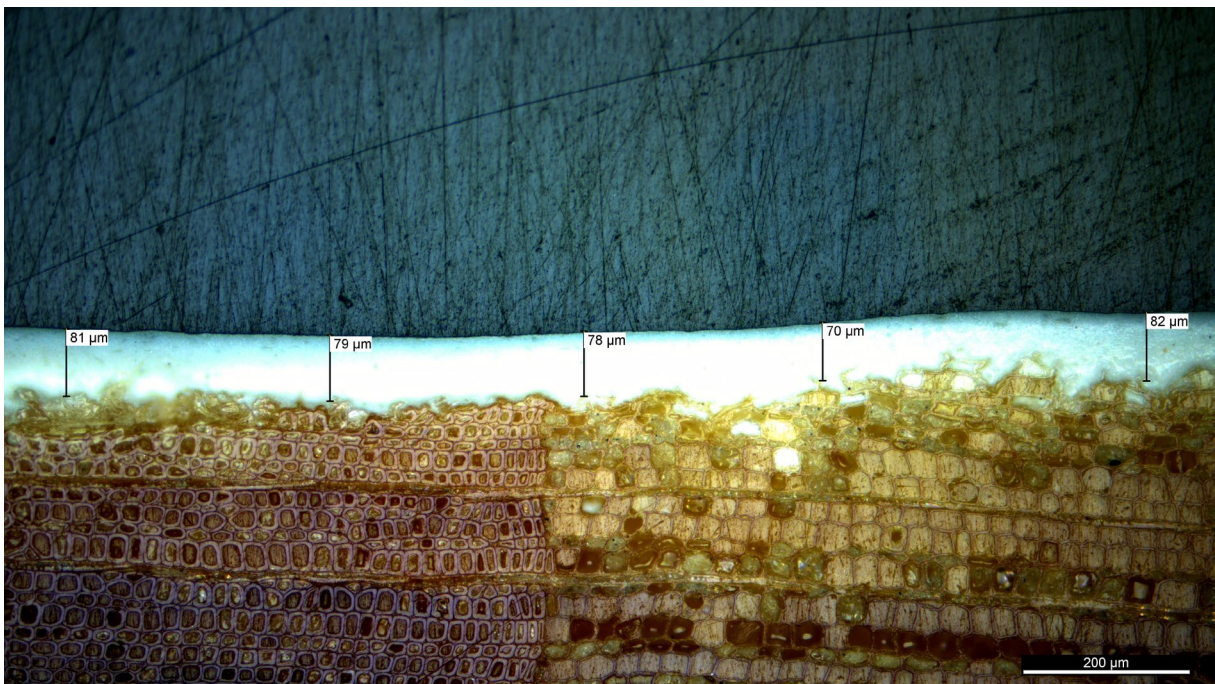


Abbildung 32 : Variante 2 Tanne normal; wie bei der entsprechenden Fichtenvariante ein relativ homogener Film ohne Durchdringungen

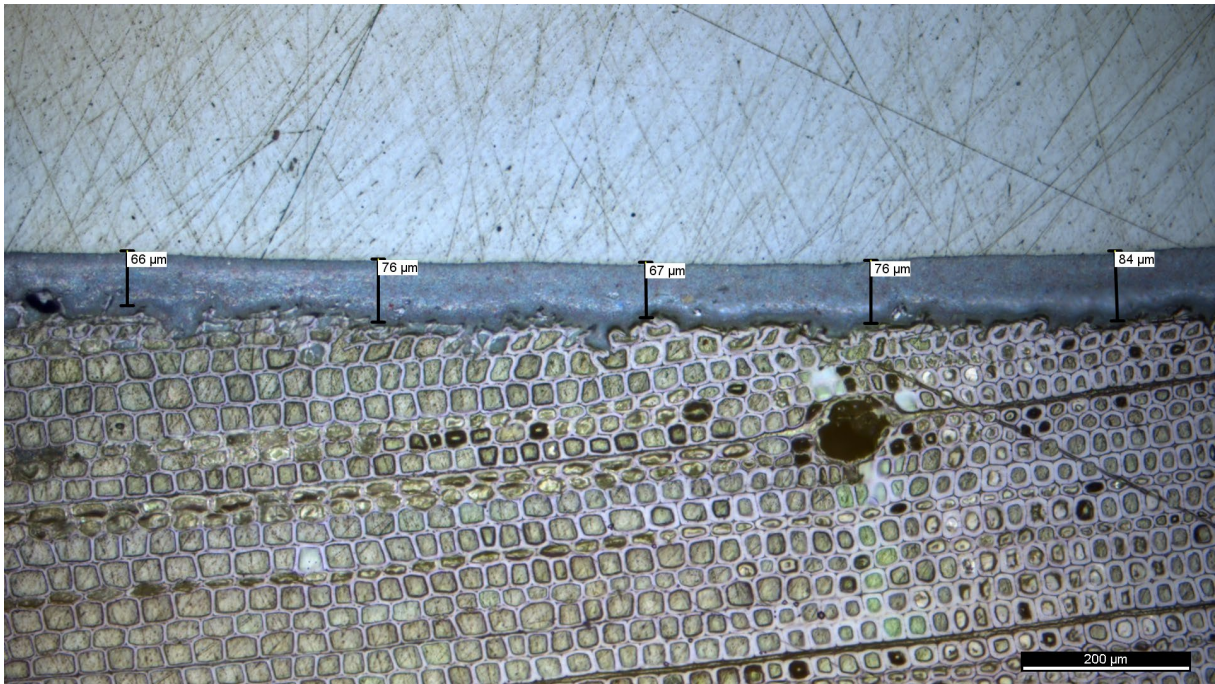


Abbildung 33: Variante 3 Fichte; homogener Beschichtungsfilm ohne Durchdringungen

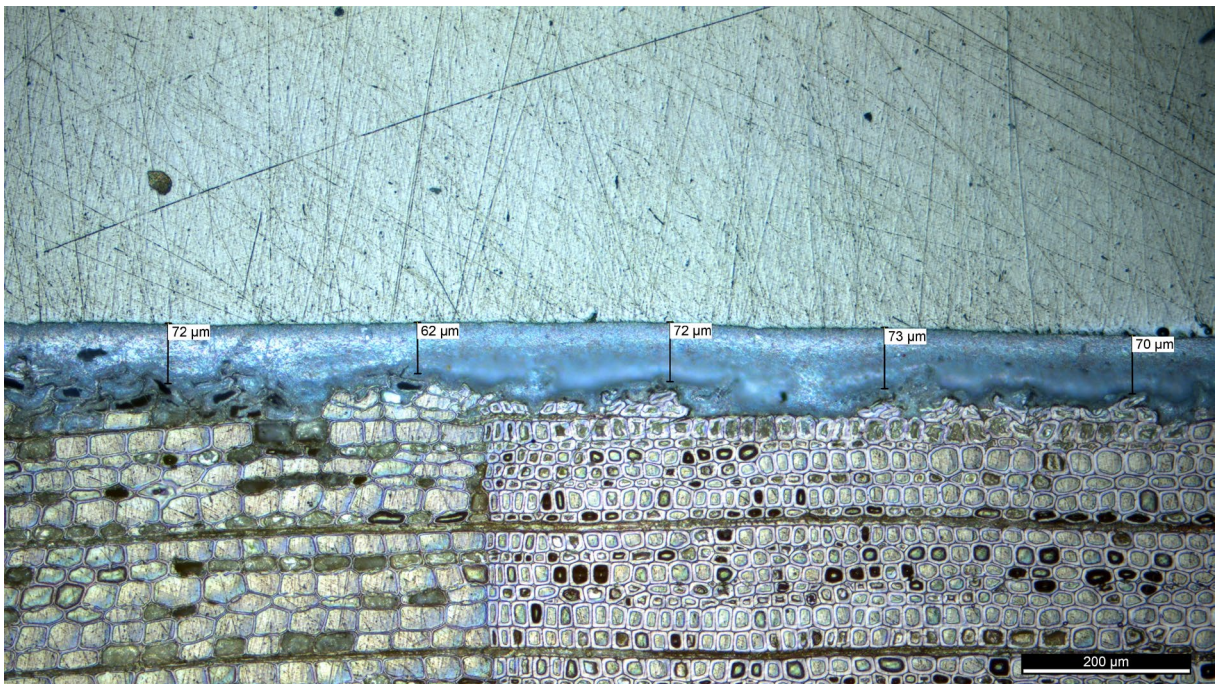


Abbildung 34 : Variante 3 Tanne normal; homogener Beschichtungsfilm ohne Durchdringungen

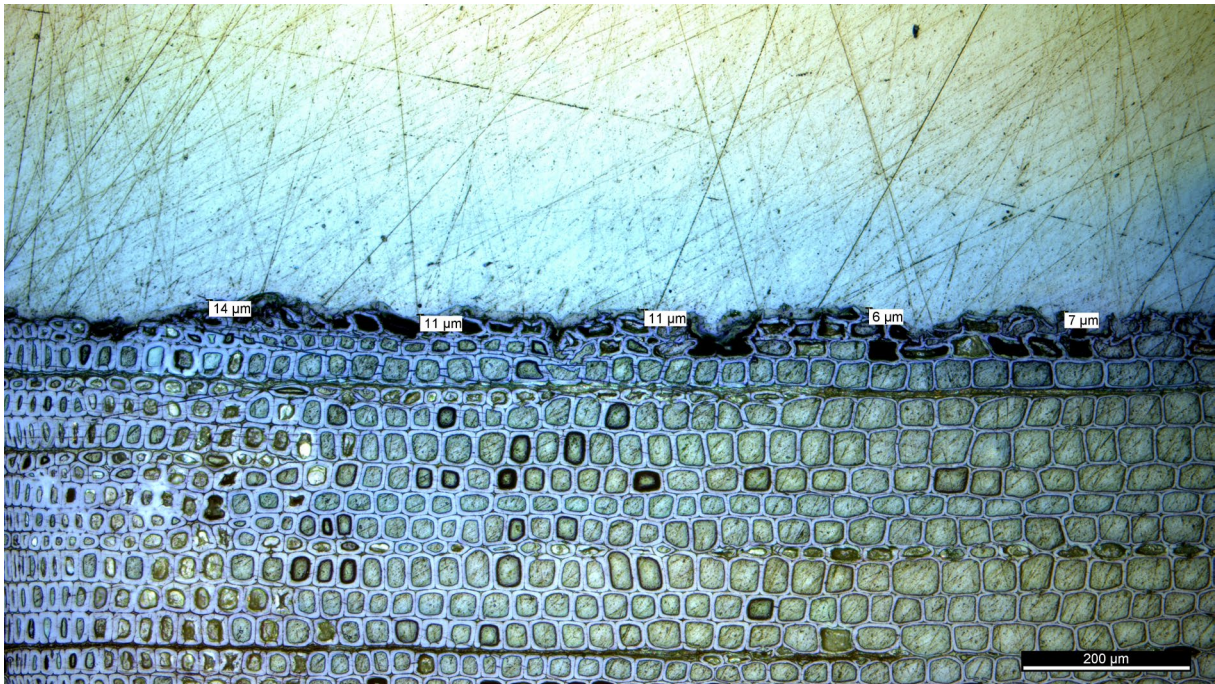


Abbildung 35: Variante 4 Tanne normal; es ist kein eigentlicher Film auf dem Holzsubstrat zu erkennen. Die durch die Beschichtung eingebrachten Substanzen sind mittels der Lichtmikroskopie nur gering zu identifizieren.

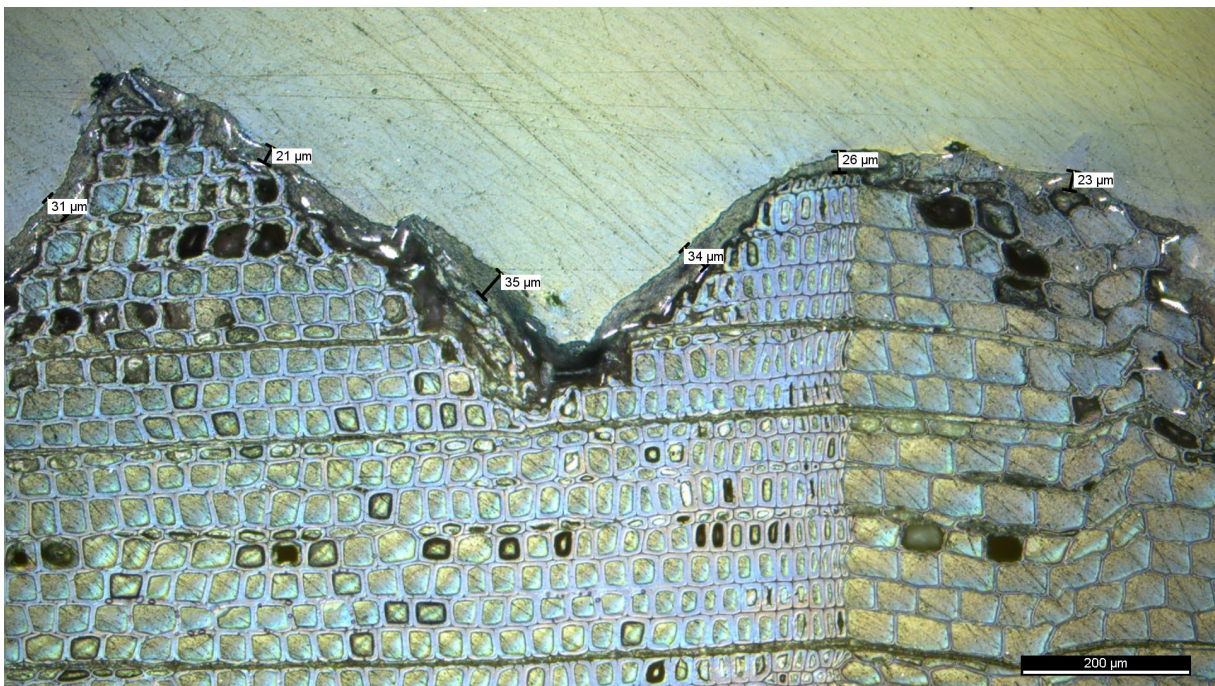


Abbildung 36: Variante 5 Tanne normal; es ist deutlich ein Film auf dem strukturgehobelten Holzsubstrat zu erkennen. Dieser wird teilweise durch Zellwandmaterial durchdrungen.

A.2 Anang - Bewitterungsaufnahmen

Tabelle 7: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 1 für die Versuche der Freibewitterung

	Referenz	6 Monate	12 Monate
Variante 1 Fichte 40 mm			
Variante 1 Tanne 40 mm			
Variante 1 Nasskern 40 mm			
Variante 1 Fichte 20 mm			
Variante 1 Tanne 20 mm			
Variante 1 Nasskern 20 mm			

Tabelle 8: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 2 für die Versuche der Freibewitterung

	Referenz	6 Monate	12 Monate
Variante 2 Fichte 40 mm			
Variante 2 Tanne 40 mm			
Variante 2 Nasskern 40 mm			
Variante 2 Fichte 20 mm			
Variante 2 Tanne 20 mm			
Variante 2 Nasskern 20 mm			

Tabelle 9: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 3 für die Versuche der Freibewitterung













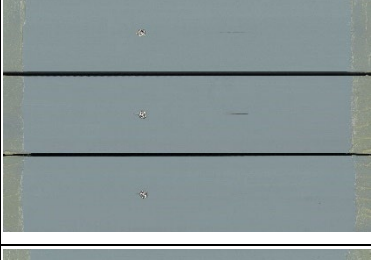





	Referenz	6 Monate	12 Monate
Variante 3 Fichte 40 mm			
Variante 3 Tanne 40 mm			
Variante 3 Nasskern 40 mm			
Variante 3 Fichte 20 mm			
Variante 3 Tanne 20 mm			
Variante 3 Nasskern 20 mm			

Tabelle 10: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvariante 4 für die Versuche der Freibewitterung













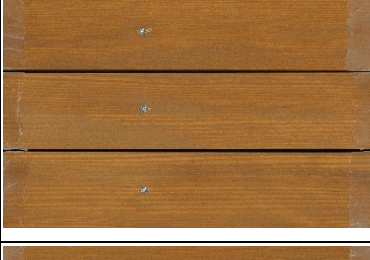


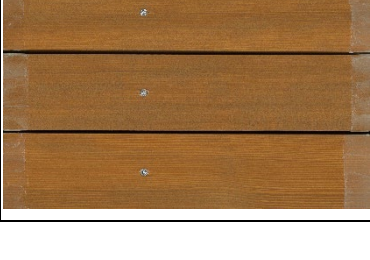

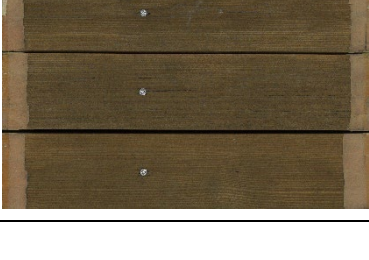
	Referenz	6 Monate	12 Monate
Variante 4 Fichte 40 mm			
Variante 4 Tanne 40 mm			
Variante 4 Nasskern 40 mm			
Variante 4 Fichte 20 mm			
Variante 4 Tanne 20 mm			
Variante 4 Nasskern 20 mm			

Tabelle 11: Aufnahmen aller Proben der Beschichtungsvarianten IWW 5 bis 11 für die Versuche der Freibewitterung




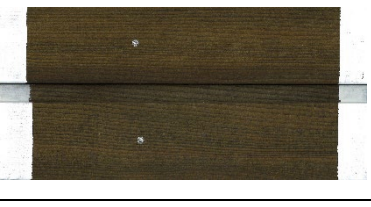
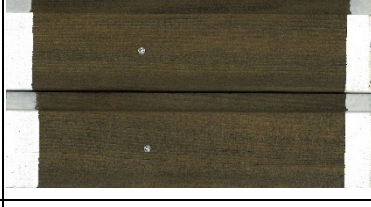
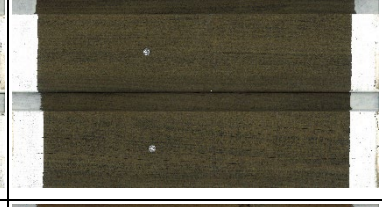



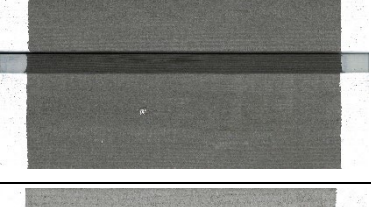
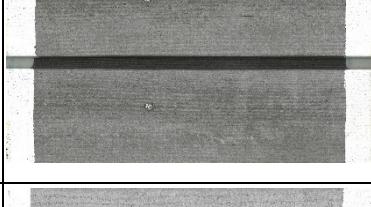
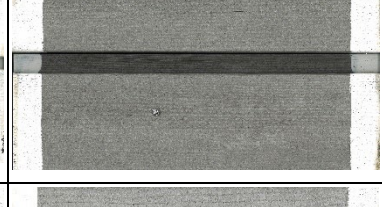
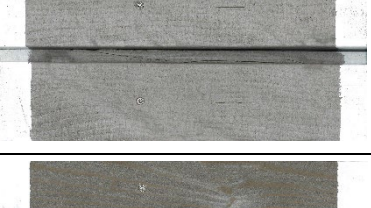



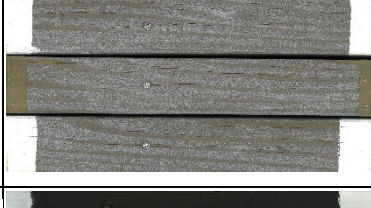
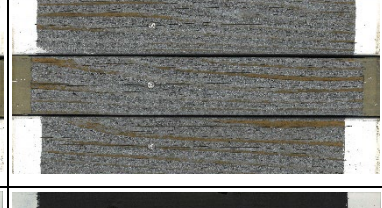

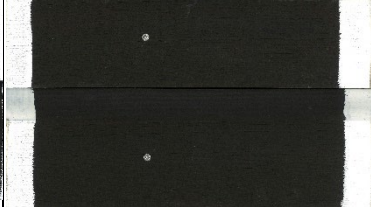
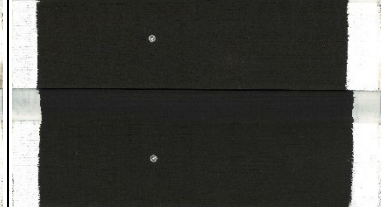
	Referenz	6 Monate	12 Monate
Variante 5 IWW			
Variante 6 IWW			
Variante 7 IWW			
Variante 8 IWW			
Variante 9 IWW			
Variante 10 IWW			
Variante 11 IWW			

Tabelle 12: Variantenübersicht Proben Freibewitterung Imprägnierwerk Willisau (IWW)

Variante	Holzart	Typ	Imprägnierung	Oberfläche
5 IWW	Tanne	153 / 21	KDS	Gebürstet
6 IWW	Tanne	158 / 21	KDS	Gebürstet
7 IWW	Tanne	147 / 21	BKD5	Gespritzt
8 IWW	Tanne	164 / 21	BKD5	Gespritzt
9 IWW	Tanne	171 / 21	BKD5	Gespritzt
10 IWW	Tanne	167 / 21	BKD5	Gespritzt
11 IWW	Tanne	154 / 21	KDS	Gespritzt

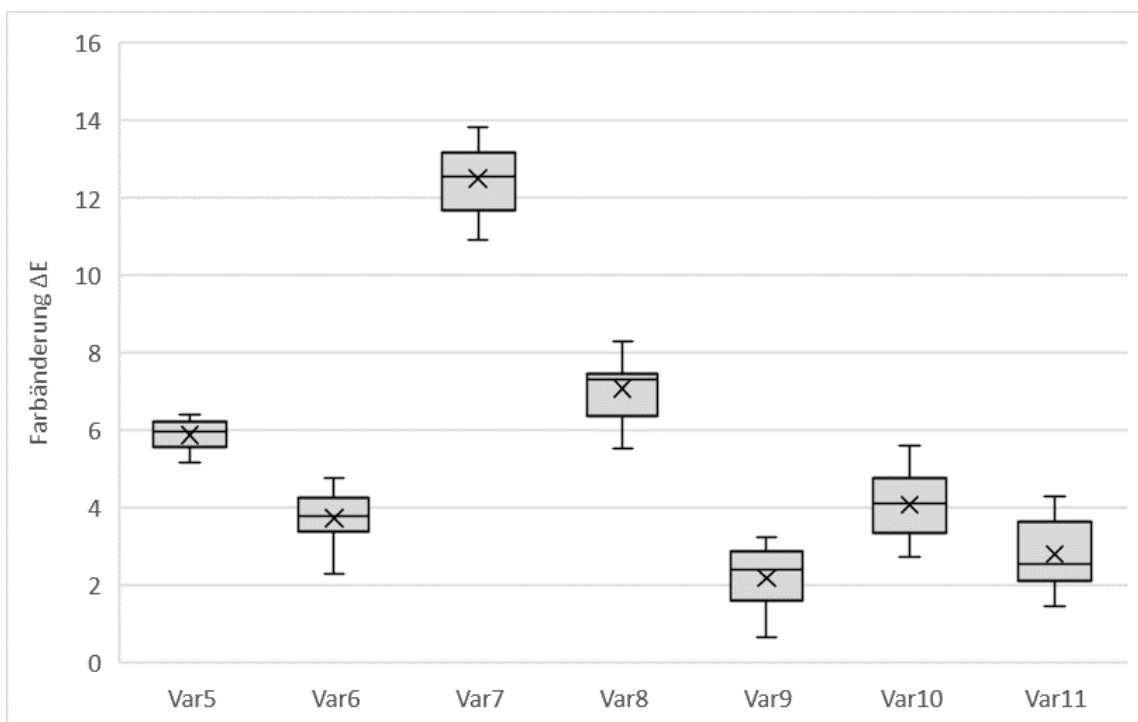


Abbildung 37: Farbänderung ΔE der Varianten IWW 5 bis 11 nach einer Bewitterungsdauer von 12 Monaten