

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung (WHFF)
c/o Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald
Herrn M. Gautschi
3003 Bern

Projektnummer 2008.06

Schlussbericht an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzfor- schung (WHFF-2008.06)

Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz (TMT) ge- genüber pyroxyphilen Pilzen

Durability of thermally modified timber (TMT) against pyroxyphilic fungi

Verfasser: Prof. Dr. Francis W.M.R. Schwarze und Martin Arnold
Projektleitung: Francis Schwarze

Datum: September 2011

Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz (TMT) gegenüber pyroxyphilen Pilzen

Durability of thermally modified timber (TMT) against pyroxyphilic fungi

Zusammenfassung

Thermisch modifiziertes Holz (englisch: Thermally Modified Timber, kurz TMT) ist das Endprodukt einer thermischen Behandlung (Erhitzen) von Holz auf mindestens 160 C bei Sauerstoffmangel. Ziel der thermischen Holzmodifikation ist es, technische Eigenschaften des Baustoffs Holz über den gesamten Holzquerschnitt für bestimmte Einsatzzwecke zu verbessern.

Bislang liegen keinerlei Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen TMT und pyroxyphilen Pilzen vor. Da TMT während der Behandlung einer Teilpyrolyse ausgesetzt wird, ist es naheliegend, die Dauerhaftigkeit des modifizierten Holzes gegen holzerstörende Pilze zu untersuchen, die sich auf natürliche Weise an pyrolisiertes Holz angepasst haben. Das vorliegende Projekt soll einen Beitrag leisten, um eine mögliche Anfälligkeit von TMT gegen pyroxyphile Pilzarten zu klären und Kenntnisse über die Resistenz/Anfälligkeit und mögliche Mechanismen der Holzbesiedlung und Holzersetzungstrategien dieser Schadorganismen zu gewinnen. Für diesen Zweck wurde die Resistenz von thermisch modifiziertem Holz (*Abies alba*, *Picea abies*, *Fagus sylvatica* und *Fraxinus excelsior*) gegen drei Braunfäuleerreger (*Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum*, *Oligoporus placenta*), einen Weissfäuleerreger (*Trametes versicolor*) und vier pyroxyphile Pilze (*Daldinia concentrica*, *D. fissa*, *D. grandis* und *D. loculata*) untersucht.

Die Studien zeigten, dass im Vergleich zu den Braun- und Weissfäuleerregern, Kontrollproben von Fichte und Tanne von den pyroxyphilen Pilzarten (*Daldinia concentrica*, *D. fissa*, *D. grandis* und *D. loculata*) nur sehr schwach besiedelt und nach 16-wöchiger Inkubation nur sehr geringe Masseverluste verzeichnet wurden. Holzarten, z.B. Fichte und Tanne, mit einem höheren Anteil von Guaiacyl-Einheiten sind dauerhafter als solche, die einen höheren Anteil von Syringyl-Einheiten am Ligninpolymer besitzen. Die Dauerhaftigkeit von TMT aus Buche und Esche, war im Vergleich zum unbehandeltem Holz gegenüber pyroxyphilen Pilzen erhöht. An TMT Proben von Fichte und Tanne hingegen, wurden im Vergleich zu den Kontrollproben, signifikant höhere Masseverluste durch pyroxyphile Pilze verursacht. Nach einer QUV-Behandlung und anschließender Pilzinkubation wird die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) teilweise stark vermindert. Die Studien zu den mechanischen Eigenschaften des Holzes zeigten, dass eine Thermobehandlung die Oberflächenhärte je nach Holzart zwischen 10% und 30% reduziert. Ein Befall durch holzerstörende Pilze führt zu einer weiteren Verminderung der Oberflächenhärte, wobei dies bei den Braun- und Weissfäuleerregern deutlicher ausgeprägt war als bei den pyroxyphilen Pilzen. Die auf den Pilzbefall zurückzuführende Reduktion der Oberflächenhärte war bei den nicht-wärmebehandelten Proben stärker als bei den TMT Proben und kann bis zu 60% betragen (Fichte, Tanne und Buche).

Die Studien verdeutlichen, dass eine QUV-Behandlung vor der Pilzinkubation unbedingt erforderlich ist für ein realitätsnahes Testverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von TMT.

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurden immer mehr Verfahren zur Holzmodifikation entwickelt. Dabei entstehen Hölzer, die kaum noch "arbeiten", weitgehend resistent gegen Pilzbefall sind und sich in ihren technologischen Eigenschaften oft sehr von unbehandeltem Holz unterscheiden. Unter Holzmodifikation versteht man, Hölzer durch (biozidfreie) chemische, thermische oder mechanische Behandlung so zu modifizieren, dass Eigenschaften wie die Dauerhaftigkeit und die Masshaltigkeit verbessert werden (Vernois 2001; Arnold 2007). Folgende Vorteile werden für die Holzvergütung angeführt:

- Von den Kunden in zunehmendem Masse wegen der optischen Eigenschaften (dunkle Farben) verlangte tropische Edelholzarten können durch einheimische Holzarten ersetzt werden. Als positiver Nebeneffekt kann der Raubbau an Tropenholz eingeschränkt werden.
- Zunehmende Verbote und Anwendungsbeschränkungen bei Holzschutzmitteln erfordern alternative Schutzverfahren für Holz.
- Steigende Anforderungen der Verbraucher an die Pflegeleichtigkeit und "Fehlerfreiheit" machen es dem Naturstoff Holz immer schwerer, gegen Konkurrenzmaterialien wie Metall oder Kunststoff anzukommen.

TMT ist das Endprodukt einer thermischen Behandlung (starkes Erhitzen) von Holz. Ziel der Behandlung ist es, die technischen Eigenschaften des Baustoffs Holz über den gesamten Holzquerschnitt für bestimmte Einsatzzwecke zu verbessern. Nach mehreren Jahrzehnten Forschung begannen die ersten industriellen Anlagen vor ca. 10 Jahren in Finnland mit der Produktion von TMT (Kangas und Oy 2000). TMT wird bereits seit einigen Jahren von etlichen Herstellern angeboten und im englischsprachigen Raum als TMT = Thermally Modified Timber bezeichnet (Rapp und Sailer 2000; Militz 2002a,b). Chemisch handelt es sich bei TMT um das Ergebnis einer Teilpyrolyse in sauerstoffarmer Atmosphäre. Das Holz wird für etwa 24 - 48 Stunden Temperaturen von 170°C bis 250°C ausgesetzt, je nach Verfahren in einer Heissluft-/Wasserdampfatmosphäre, in einer sauerstofffreien Stickstoffumgebung oder in einem Ölbad (Rapp und Sailer 2000; Militz 2002a, b). Dieses Verfahren verändert die OH-Gruppen, die zwischen Hemizellulose und Lignin verbunden sind. Hemizellulose wird partiell ab etwa 140°C abgebaut und kristallisiert in anderer Form wieder aus (Syriänen et al. 1988, Tjeerdsma und Militz 2005). Ab etwa 150°C wird auch alpha-Zellulose abgebaut. Der relative Ligninanteil im Holz steigt. Das Holz wird "karamellisiert". Flüchtige Stoffe wie Harze werden ausgetrieben (Rapp und Sailer 2000; Militz 2002a,b). Aus der Umwandlung bzw. Besetzung freier OH-Gruppen resultiert eine Reduzierung des Schwind- und Quellmasses in tangentialer, axialer und radialer Richtung um bis zu 70%. Die Holzfarbe wird dunkler (durch den ganzen Querschnitt), ist jedoch nicht UV-beständig (Aufhellung). Die Temperaturbehandlung führt zu einer deutlichen Reduzierung des pH-Wertes (1,5). So wird den Mikroorganismen der Nährboden entzogen und Wasser wird nur eingeschränkt aufgenommen. Insgesamt wird durch die thermische Modifikation die Dauerhaftigkeit des Holzes erhöht.

Auch eine Erhöhung der natürlichen Dauerhaftigkeit gegen tierische und pilzliche Holzschädlinge wurde vereinzelt festgestellt. Bei Rotbuche je nach Intensität des Thermo-Prozesses bis Dauerhaftigkeitsklasse 1, Fichte bis Klasse 2. Verschiedene Studien nach EN 113 zeigen, dass die Dauerhaftigkeit speziell der Buche gegen Braun- und Weissfäulepilze durch die thermische Be-

handlung angehoben werden kann. Dagegen zeigen jüngste Studien von Skyba et al. (2008), dass die Dauerhaftigkeit von thermisch behandeltem Fichten- und Buchenholz gegen Moderfäuleerreger sogar herabgesetzt wird. Der Einsatz von TMT in der Gebrauchsklasse 4 (d.h. im Erdkontakt) scheint daher nicht geeignet (Skyba et al. 2008). In diesem Zusammenhang muss aber auch kritisch hinterfragt werden, ob die obligaten Prüfpilze (*Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum*, *Poria placenta* und *Trametes versicolor*), die traditionell gemäss EN 113 einzusetzen sind, wirklich geeignet sind, um die Resistenz von TMT zu prüfen. Die EN 113 wurde ursprünglich als Prüfverfahren zur Grenzwertbestimmung der Wirksamkeit von vorbeugenden Holzschutzmitteln z.B. CKA (Chrom-Kupfer-Arsen), CK (Chrom-Kupfer); CKB (Chrom-Kupfer-Bor) gegen holzerstörende Basidiomyceten entwickelt, nicht aber um die Dauerhaftigkeit von thermisch behandeltem Holz zu bestimmen.

Um eine realitätsnahe Prüfung von Holzschutzmitteln zu gewährleisten, werden im Rahmen der EN 113 obligate Prüfpilze wie etwa *Oligoporus placenta* (= *Poria placenta*) selektiert die eine hohe Resistenz gegenüber fungistatischen Wirkstoffen wie etwa Kupfer besitzen. So tritt z.B. *Oligoporus placenta* an Holz im Erdluftbereich auf, wie an Palisaden oder Lärmschutzwänden, die trotz sachgemässer Behandlung mit Chrom-Kupfer-Salzen infolge der Oxalsäureausscheidung und Kupfertoleranz des Pilzes zerstört werden.

Da TMT während der Behandlung einer Teilpyrolyse ausgesetzt ist, wäre es naheliegend, die Dauerhaftigkeit des modifizierten Holzes gegen holzerstörende Pilze zu untersuchen, die sich auf natürliche Weise an pyrolysiertes Holz angepasst haben. Bislang liegen keinerlei Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen TMT und pyroxyphilen Pilzen vor. In Vorversuchen zeigte Skyba (2008), dass im Vergleich zu unbehandeltem Fichtenholz, thermisch behandeltes Holz besser durch den pyroxyphilen Pilz *Daldinia loculata* besiedelt wurde und nach achtwöchiger Inkubationszeit signifikant höhere Masseverlust resultierten.

2. Zielsetzungen

Im Rahmen des Projektes wurden

- die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*), gegen pyroxyphile Pilze überprüft
- die Abbauraten von pyroxyphilen Pilzen mit denen obligater Prüfpilze, die durch die EN 113 vorgeschrieben werden, verglichen
- die Auswirkungen eines Befalls durch pyroxyphile Pilze auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes untersucht
- histologische Untersuchungen zu den Abbauprozessen von pyroxyphilen Pilzen an thermisch modifiziertem Holz durchgeführt
- Vorschläge für ein neues realitätsnahes Testverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von TMT entwickelt
- internationale Normen- und Fachgremien auf die neue Testmethode aufmerksam gemacht
- Initiativen zur Aufnahme der neuen Testmethode in die EN 113 eingeleitet

3. Material und Methoden

3.1 Probekörper aus Thermoholz

Um wirtspezifische Unterschiede in der Resistenz von Thermoholz gegen pyroxyphile Pilzarten zu bestimmen, stellte die Firma Balz, Langnau i.E., Bretter von Fichte und Tanne, die Fa. H. Steiner, Walkringen; Bretter von Buche und die Fa. Wüthrich, Langnau i.E., Bretter von Esche mit einer Länge von 2.4 m bzw. 1.8 m und einem Brettquerschnitt von von mind. 120 x 30 mm (R x T) zur Verfügung. Die thermische Behandlung erfolgte durch Fa. Balz, Langnau i.E., bei normaler und starker Behandlung (geringe und hohe Zeitdauer und Temperatur).

3.2 Inkubation mit Pilzen

Für die Resistenzprüfung des thermisch behandelten Holzes wurden Reinkulturen von pyroxyphilen Pilzen (*Daldinia concentrica*, *D. loculata*, *D. fissa*, *D. grandis*) in Kolleschalen auf 4,0 % MEA angezüchtet. Zum Vergleich wurden Reinkulturen der Prüfpilze (*Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum*, *Oligoporus placenta* und *Trametes versicolor*), die traditionell für Prüfungen gemäss EN 113 verwendet werden, ebenfalls angezüchtet. Die Pilze wurden gemäss Empa-SOP 000588 vorkultiviert. Die Pilzexposition erfolgte in Kolleschalen (in Anlehnung an EN 113) sobald das Pilzmyzel den Nährboden komplett überwachsen hatte, über Glasbänkchen (für Prüfung mit holzzersetzenden Basidiomyceten) bzw. durch direktes Auflegen auf den Malzagar-Nährboden ohne Glasbänkchen (für Prüfung mit *Daldinia*-Arten). Die (für Basidiomyceten) 16-wöchige bzw. (für *Daldinia*-Arten) 24-wöchige Inkubationszeit der Holzproben erfolgte bei $22 \pm 1^\circ\text{C}$ und 70 ± 5 % rel. Luftfeuchtigkeit. Nach Entfernen des anhaftenden Oberflächenmyzels wurden die einzelnen Holzproben gewogen, um später den Feuchtigkeitsgehalt der Holzproben bei Versuchende anhand des Enddarrgewichtes zu berechnen. Ein möglicher Gewichtsverlust durch Pilzangriff wurde anhand von einem theoretischen durch Aklimatisationsgewichte (der Zusatzkontrollen) errechneten Anfangsdarr- und dem ermittelten Enddarrgewicht (Masseverlust) erfasst. Eine Varianzanalyse zum Nachweis von signifikanten Unterschieden ($p \leq 0.05$) in den Masseverlusten zwischen den Kontrollproben und den thermisch behandelten Proben, wurde in Origin 7.5 (Microcal Software Inc.) durchgeführt.

Die Pilzexposition der Holzstäbe für mechanische Versuche (mit den Dimensionen von 540 mm (Faserrichtung) x 20 mm x 20 mm) erfolgte in geeigneten, rechteckigen, autoklavierbaren Kunststoffgefässen über einem mit Pufferlösung versetzten Feuchtigkeitssubstrat (Vermiculit) während 32 Wochen ebenfalls bei $22 \pm 1^\circ\text{C}$ und 70 ± 5 % rel. Luftfeuchtigkeit im Dunkeln.

Die auf speziellen Futterbrettchen angezüchteten holzerstörenden Basidiomycetenstämme waren *Oligoporus placenta* (für die Nadelholzarten Fichte und Tanne) bzw. *Trametes versicolor* (für die Laubholzarten Buche und Esche). Die pilzbewachsenen Futterbrettchen welche über dem Feuchtigkeitssubstrat in den Versuchsgefässen eingebaut wurden, dienten als Unterlage bzw. Infektionsquelle für die darüber eingebauten zuvor sterilisierten Holzstäbe (Serie P) einer Holzart (15 Holzstäbe pro Versuchsgefäss).

Die Infektion und Beimpfung der Holzstäbe für die Prüfung mit den *Daldinia*-Arten erfolgte durch homogene Beigabe einer Mischsporensuspension von *Daldinia concentrica*, *D. loculata*, *D. fissa* und *D. grandis* mit einer Sporenkonzentration von 10^6 Sporen pro ml (zu gleichen Anteilen) zu den ebenfalls direkt über dem sterilen Feuchtigkeitssubstrat eingebauten Holzstäben (Serie D) einer Holzart (15 Holzstäbe pro Versuchsgefäss).

3.3 Mikroskopische Untersuchungen

Um Kenntnisse über die Besiedlungs- und Holzersetzungstrategien von pyroxyphilen Pilzen zu gewinnen, wurden aus inkubierten Holzproben mehrere ca. 3 x 3 x 8 mm grosse Stücke mit radialer, tangentialer und axialer Ausrichtung der Jahrringe entnommen und in 0,2 M Phosphatpuffer (pH 7,2 - 7,4) mit Glutaraldehyd eingelegt, mit einer Vakuumpumpe entgast und im Kühlschrank bei 4 - 8° C aufbewahrt. Die fixierten Proben wurden dreimal für jeweils zwei Stunden in aqua dest. im Rotator geschwenkt. Hierauf erfolgte die Entwässerung mit einer aufsteigenden Isopropanolreihe (50%, 70 %, 90 %, 96 % V/V) und schliesslich die Einbettung in mit 0,5 Katalysator versetzter Methacrylatharz-Lösung. Dazu wurden die Proben in Gelatine kapseln gemäss der gewünschten Schnittebene orientiert und die Kapseln mit Einbettlösung gefüllt. Nach dem Aushärten im Wärmeschrank (55°C) wurden die Gelatine kapseln entfernt, das Einbettungsmedium herausgelöst und Schnitte angefertigt. Zur Anfärbung und Analyse der gewonnenen Proben wurden mit Rotationsmikrotomen (Leica Ultracut UCT) Dünnschnitte angefertigt. Für die Durchlicht-Hellfeldmikroskopie wurden die Proben mit Diamantmessern auf eine Dicke von 2 - 3 µm geschnitten. Die angefertigten Schnitte wurden 12 Stunden in einer Lösung mit 3 % Safranin und 1 % Acriflavin belassen, mit *aqua dest.* abgewaschen, anschliessend 30 Minuten in 1%-iger Auraminlösung gebadet und mikroskopisch analysiert. Die lichtmikroskopischen Studien erfolgten auf Mikroskopen des Bautyps Zeiss Axiophot und Leitz Orthoplan.

3.4 Mechanische Versuche

Die Versuchsvarianten setzen sich zusammen aus der Kombination von 4 Holzarten, 3 Stufen Thermobehandlung und 3 Inkubationsvarianten (Serien) mit Pilzen (Tab. 1). Angesichts der zu erwartenden grossen Eigenschaftsstreuungen sollten für jede Kombination von Holzart, Thermobehandlung und Pilz-Inkubation 30 Wiederholungsproben geprüft werden. Dies ergibt gesamthaft einen Versuchsumfang von 1080 Prüfkörpern. Ausgangsmaterial für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften waren aus den Brettern geschnittene Stäbe mit den Dimensionen 540 (axial) x 20 x 20 mm. Die Prüfungen erfolgten gemäss den entsprechenden Normvorschriften an kleinen (strukturstörungsfreien) Proben nach einer vorherigen Klimatisierung im Normklima (20°C/65% r.F.). Bei den Fichtenstäben waren vereinzelt feine Winddruckstauchungen vorhanden. Die Qualität des Buchenholzes war generell eher unbefriedigend und es war schwierig, Proben ohne Strukturstörungen zu erhalten. Bei den Buchenproben mit Thermobehandlung T1 waren zudem auffällig viele Risse vorhanden. Da dies bei den aus den gleichen Brettern stammenden Proben ohne Thermobehandlung respektive mit Thermobehandlung T2 nicht der Fall war, ist zu vermuten, dass die Risse durch eine nicht optimale Thermobehandlung verursacht wurden.

Sowohl für die Härte- als auch für die Schlagbiegeprüfung wäre eine möglichst genaue radiale/tangentiale Ausrichtung der Jahrringstellung bezogen auf den Probenquerschnitt ideal. Aufgrund der limitierten Materialmenge war dies allerdings nur teilweise möglich. Der vorhandene Jahrringwinkel wurde daher bei jeder Einzelprobe erfasst. Bei der K-Serie erfolgte die Härte- und die Schlagbiegeprüfung an zwei separaten Stab-Abschnitten von 100 respektive 300 mm Länge. Bei den inkubierten Stäben, besonders bei der P-Serie, war stirnseitig ein deutlich stärkerer Abbau vorhanden. Um möglichst homogene Proben zu erhalten, wurde daher lediglich ein 300 mm Abschnitt aus der Längsmittle der Stäbe geschnitten. Daran wurde zuerst im äusseren Längsdrit-

tel die Härte gemessen und anschliessend (zerstörend) an derselben Probe die Bruchschlagarbeit bestimmt.

Tabelle 1. Versuchsvarianten mit Identifikations-Kürzeln (fett)

Holzart	Thermo- behandlung	Inkubation mit Pilzen				
		ohne	<i>Daldinia</i> spp.	<i>Oligoporus</i> <i>placenta</i>	<i>Trametes</i> <i>versicolor</i>	
		Serie K	Serie D	Serie P		
Fichte (<i>Picea abies</i>)	F	ohne T0	X	X	X	
Weisstanne (<i>Abies alba</i>)	T	Stufe 1 T1	X	X	X	
		Stufe 2 T2	X	X	X	
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)	B	ohne T0	X	X		X
Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)	E	Stufe 1 T1	X	X		X
		Stufe 2 T2	X	X		X

Die Oberflächenhärte wurde als Brinell-Härte in Anlehnung an EN 1534 mit einem speziellen Härtemesskopf auf einer Zwick Universal-Prüfmaschine gemessen.

Prüfdetails:

- Proben: 100 resp. 300 x 20 x 20 mm (axial x Querschnitt), siehe oben
- 10mm Kugel

Bei der K-Serie erfolgte der Kugeleindruck mit einer maximalen Kraft von 500 N. Angesichts des vielfach deutlichen Holzabbaus wurde bei den inkubierten Proben der Serien D und P die maximale Kraft auf 300 N reduziert..

- Auf jeder der 4 (Längs-)Seitenflächen wurde jeweils 1 Eindruck gemacht. Für die weitere Auswertung wurde der Mittelwert aus den 4 Einzelmessungen verwendet, welcher dem Durchschnittswert aus von Radial- und Tangentialfläche entspricht.

- Aufgrund von fortgeschrittenem Pilzabbau lag die Oberflächenhärte (trotz reduzierter Maximalkraft) bei vielen Fichten- und Tannen-Proben der P-Serie unterhalb des mit dem Härtemesskopf messbaren Bereiches. Dadurch standen bei diesen Probenkollektiven (F + T, P) nur bei je 10 Wiederholungsproben (von insgesamt 30 Proben) gültige Werte zur Verfügung. Die Bruchschlagarbeit wurde mit einem Schlagbiegeversuch gemäss DIN 52189 ermittelt. Prüfdetails:

- Probenstäbe 300 x 20 x 20 mm (axial x Querschnitt)
- 50J Hammer
- Der Probenquerschnitt wurde mit einer Schieblehre in Längsmittle gemessen. Bei den inkubierten Stäben, besonders bei der P-Serie, ist die Erfassung des Probenquerschnittes infolge von Querschnittsverformungen und -abbau mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

- Bei den nicht-inkubierten Proben der K-Serie wurden die Proben so gedreht, dass die Schlagbiegeprüfung möglichst in tangentialer Richtung erfolgte. Bei den inkubierten Proben der

Serien D und P wurde (unabhängig von der Jahrringstellung) die bei der Inkubation untenliegende, oft stärke abgebaute Probenfläche auf die Zugseite gelegt.

- Aufgrund von fortgeschrittenem Pilzabbau (Querbrüche) konnten 4 Fichten- und 1 Tannen-Probe der P-Serie (T0) nicht geprüft werden.

Die Prüfungen erfolgten in 2 Phasen:

- 1) Die nicht-pilzinkubierten Kontroll-Proben (K-Serie) wurden nach der Bereitstellung des Probenmaterials am 20.11.2009 zugeschnitten und anschliessend bei 20°C/65% r.F. klimatisiert. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften wurde im Zeitraum vom März bis Mai 2010 durchgeführt.
- 2) Nach der Inkubation des Probenmaterials von April bis Dezember 2010 erfolgte die Verarbeitung der pilz-befallenen Proben (D- und P-Serie) nach folgendem Zeitplan:

- Ende Pilzinkubation / Bereitstellung Proben Dezember 2010
- Trocknung/Zwischenklimatisierung 23°C/50% r.F. bis Mitte Jan. 2011
- Probenzuschnitt durch Schreiner bis Mitte Feb. 2011
- Klimatisierung 20°C /65% r.F. bis Mitte März 2011
- Prüfungen März bis Juli 2011 - Auswertung / Bericht August bis September 2011

Stichprobengrößen

Von jeder Holzart und thermischen Behandlung wurden 10 Prüfkörper mit den verschiedenen Pilzarten inkubiert. Je Holzart wurde die Resistenz von 96 Prüfkörper und 96 Kontrollen verglichen. Insgesamt wurden 768 Prüfkörper (384 thermisch behandelte Proben und 384 unbehandelte Proben) untersucht und ausgewertet. Die Härtemessungen und Schlagbiegeversuche wurden an je 30 Prüfkörpern pro Holzart und thermische Behandlungsart durchgeführt. Vergleichsmessungen (mit ähnlicher resp. gleicher Probenzahl) wurden an Referenzmaterial, welches nicht inkubiert wurde, durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Masseverluste am inkubierten Holz

Je nach Holzart und Pilzarten wurden die Holzproben in unterschiedlicher Intensität vom Pilzmyzel besiedelt. Die Braunfäuleerreger (*Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* und *Oligoporus placenta*) und der Weissfäuleerreger (*Trametes versicolor*) besiedelten die Kontrollproben schnell und intensiv. Nach 16-wöchiger Inkubation waren die Holzoberflächen aller Proben von Pilzmyzel komplett besiedelt. Bei den TMT Proben konnte in Abhängigkeit der Dauer und Intensität (T1-T2) der Hitzebehandlung merkbare Unterschiede in der Pilzbesiedelung beobachtet werden. Mit zunehmender Dauer der Hitzebehandlung wurde ein schwächerer Pilzbewuchs und geringere Masseverluste verzeichnet (Tabelle 2). Die verzeichneten Masseverluste waren jedoch nicht nur von der Dauer der Hitzebehandlung, sondern auch von der Holzart abhängig. Die höchsten Masseverluste verursachte *C. puteana* an unbehandeltem Fichtenholz (47,1%). Nach einer thermischen Behandlung (T2) wurde eine signifikante Minderung ($P < 0.001$) des Masseverlustes (2,9 %) durch *C. puteana* festgestellt (Tabelle 2). Auch für die beiden anderen Braunfäuleerreger konnte, mit der Ausnahme von *G. trabeum* an Tannenholzproben und nach einer stärkeren thermischen Behandlung (T2), an allen Holzarten signifikant geringere Masseverluste verzeichnet werden. An TMT Proben (T2) die zusätzlich einer QUV-Bewitterung ausgesetzt wurden, (Fichte / *O. placenta*, Tanne / *O. placenta* und Buche bzw. Esche / *O. placenta*) konnten signifikant höhere Masseverluste verzeichnet werden (Tabelle 2).

Im Vergleich zu den Braun- und Weissfäuleerregern wurden die Kontrollproben von Fichte und Tanne von den pyroxyphilen Pilzarten (*Daldinia concentrica*, *D. fissa*, *D. grandis* und *D. loculata*) nur sehr schwach besiedelt. Nach 16-wöchiger Inkubation konnten an den Kontrollproben von Fichte und Tanne nur sehr geringe Masseverluste von 0,2 - 1,8 % bzw. 0,2 - 0,5 % verzeichnet werden (Tabelle 2). An den Kontrollproben von Buchen- und Eschenholz hingegen wurden je nach Pilzart Masseverluste von 1,5 - 18,7 % bzw. 1,6 - 17,4 % verzeichnet (Tabelle 2). An TMT Proben von Buche und Esche konnte im Vergleich zur Kontrolle eine signifikante Minderung ($P < 0.001$) der Masseverluste durch pyroxyphile Pilze verzeichnet werden.

Im Vergleich zu den Kontrollproben verursachten die pyroxyphile Pilze an TMT Proben von Fichte und Tanne (mit wenigen Ausnahmen und unabhängig von der Intensität der Behandlung) signifikant höhere Masseverluste (Tabelle 2). Im Vergleich zu den Kontrollproben konnte an allen TMT Proben die zusätzlich einer QUV-Bewitterung ausgesetzt wurden, ebenfalls signifikant höhere Masseverluste verzeichnet werden (Tabelle 2).

Die Holzersetzungsmuster der verschiedenen Pilzarten an unbehandelten- und TMT-Proben waren im Laubholz weitgehend identisch und unterschieden sich nur in der Intensität des Abbaus. Aus diesen Gründen werden sie nachfolgend zusammenfassend behandelt.

4.1.1 Braunfäuleerreger

In Fichten und Tannenholz, welches mit den Braunfäuleerregern (*Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* und *Oligoporus placenta*) inkubiert wurde, konnten einzelne, sehr feine 1–2,5 µm breite Hyphen im Lumen der Tracheiden auf der S3-Schicht verzeichnet werden. Im Vergleich zu den Weissfäuleerregern war das Wachstum der Hyphen im Zelllumen der Tracheiden sehr spärlich (Abb. 1A und C, 2C-E).

Tabelle 2. Masseverluste verursacht durch holzerstörende Pilze im unbehandelten Kontroll und TMT-Proben nach 16-wöchiger Inkubationszeit

Picea abies								
	C. puteana	G. trabeum	O. placenta	T. versicolor	D. concentrica	D. fissa	D. grandis	D. loculata
Kontrolle	47.1±4.95	38.9±6.22	34.7±7.34	16.1±3.36	1.8±0.47	1.6±0.57	0.2±0.23	1.6±0.35
T1	25.6±10.69**	5.7±8.72**	31.1±4.19 ^{n.s.}	12.3±3.42*	2.4±0.63*	2.4±0.37**	1.5±0.75* *	2.5±0.77*
T2	2.9±2.66**	0.9±0.31**	20.0± 9.00**	7.8±2.08**	1.5±0.26 ^{n.s.}	1.6± 0.23 ^{n.s.}	1.2±0.35* *	1.8±0.30 ^{n.s.}
T2 & QUV	7.2±2.98**	2.4±0.38**	31.8±5.30 ^{n.s.}	3.2±1.04**	3.2±0.27**	3.5±0.29**	2.3±0.37* *	3.3±0.56**
Abies alba								
Kontrolle	27.3±24.71	4.8±13.62	23.3±13.63	13.2±2.81	0.5±0.45	0.2±0.23	0.4±0.28	0.3±0.38
T1	0.8±0.97**	1.1±0.37 ^{n.s.}	15.8±10.38 ^{n.s.}	6.3±3.03**	1.4±0.50**	1.2±0.55**	1.2±0.63**	1.5±0.51**
T2	-0.5±0.41**	0.5±0.26 ^{n.s.}	0.7±1.90**	3.9±1.71**	1.0±0.39*	1.1±0.30**	1.0±0.37*	1.1±0.52**
T2 & QUV	2.0±0.84**	2.0±0.43 ^{n.s.}	24.8±9.27 ^{n.s.}	2.9±0.64**	2.8±0.57**	2.8±0.34**	2.4±0.38**	2.9±0.46**
Fagus sylvatica								
Kontrolle	44.8±6.90	19.7±16.02	24.5±9.91	40.2±3.10	12.4±2.35	15.7±3.10	1.5±0.54	18.7±2.05
T1	19.9±12.40**	10.2±5.19 ^{n.s.}	22.3±5.46 ^{n.s.}	15.1±2.99**	3.8±0.82**	4.5±0.93**	3.4±0.98**	5.6±2.71**
T2	0.7±0.50**	1.2±0.21**	3.4±4.18**	6.5±2.44**	1.8±0.26**	1.8±0.29**	1.9±0.46 ^{n.s.}	2.1±0.31**
T2 & QUV	5.4±2.79**	3.8±0.39**	18.7±8.72 ^{n.s.}	9.1±2.74**	4.2±0.31**	5.0±0.72**	3.9±0.33**	4.2±0.21**
Fraxinus excelsior								
Kontrolle	36.2±9.39	16.6±12.68	26.4±2.27	34.2±1.92	15.5±2.10	17.4±2.10	1.6±0.30	17.1±2.46
T1	21.4±6.62**	11.0±2.63 ^{n.s.}	21.8±5.22*	17.5±2.08**	4.6±0.56**	4.9±0.38**	3.3±0.62**	6.7±0.67**
T2	1.0±0.30**	1.5±0.29**	4.1±2.04**	11.7±3.24**	2.0±0.22**	2.5±0.29**	1.8±0.33 ^{n.s.}	2.1±0.27**
T2 & QUV	5.2±1.23**	4.2±0.28**	20.7±4.14*	7.6±2.82**	4.2±0.30**	3.7±9.37**	3.1±0.34**	3.9±0.47**

* = signifikant $P < 0.05$
** = hoch signifikant $P < 0.001$
^{n.s.} = nicht signifikant $P \geq 0.05$

Nur sehr wenige Bohrlöcher wurden in schwach zersetzten Zellregionen beobachtet, da die meisten Hyphen durch die Hoftüpfel zu benachbarten Zellen vordrangen. Die Frühholztracheiden und insbesondere die S2-Schicht, wurden im Anfangsstadium der Holzzerersetzung zuerst abge-

baut (Abb. 1C). Dabei entstanden zahlreiche feine, senkrecht zur Mittellamelle verlaufende Risse in der Sekundärwand, die sich von der inneren bis zur äusseren Sekundärwand erstreckten (Abb. 1D). Aufgrund der höheren Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Holzzersetzung konnte nur eine geringe Zerstörung der S3-Schicht und der Mittellamelle beobachtet werden. Im fortgeschrittenen Stadium der Holzzersetzung konnten in den Zellwänden der dickwandigen Tracheiden des Spätholzes, zahlreiche Spalten beobachtet werden, die vermutlich durch Volumenverluste des Holzes zustande kamen.

In vielen Bereichen entstanden Risse an Stellen, wo eine Hyphe die Zellwand durchbohrte. Unter polarisiertem Licht war erkennbar, dass die Doppelbrechung im Spätholz noch teilweise erhalten, im Frühholz hingegen bereits deutlich vermindert und teilweise weitgehend aufgehoben war. Im Spätstadium der Holzzersetzung wurde in Querschnitten insbesondere im Frühholz erkennbar, dass nach und nach der optische Unterschied zwischen der Mittellamelle und der Sekundärwand verschwindet. In manchen Bereichen des Frühholzes war der optische Unterschied vollkommen aufgehoben mit dem Resultat, dass die stark lignifizierte Mittellamelle bzw. die S3-Schicht deutlich in Erscheinung trat. Durch den bevorzugten Zelluloseabbau schrumpfte die Zellwand faltenartig zusammen, und die Lichtabsorption in der Sekundärwand wurde durch die entstehenden humusartigen Substanzen erhöht.

Beim mit den Braunfäuleerregern inkubierten Buchen- und Eschenholz wurde das Frühholz im Anfangsstadium der Holzzersetzung bevorzugt angegriffen. Unter polarisiertem Licht war erkennbar, dass die Doppelbrechung im Frühholz unmittelbar abnahm. Einzelne Hyphen wuchsen im Lumen auf der S3-Schicht der Fasertracheiden, von der ausgehend die zelluloseangereicherte S2-Schicht der Sekundärwand abgebaut wurde (Abb. 1B, 2A-B). Zu diesem Zeitpunkt der Holzzersetzung kam es bevorzugt in den Zellwänden der Fasertracheiden des Frühholzes zu einer Auflockerung der einzelnen Lamellen in der S2-Schicht. Im weiteren Verlauf der Holzzersetzung löste sich ein Teil der Lamellen oder die komplette S2-Schicht nach innen zum Lumen hin ab (Abb. 2A). Nachfolgend bildeten sich Spalten in den abgelösten Zellwandschichten. Teilweise konnten Hyphen in den Sekundärwänden beobachtet werden (Abb. 2B). Die Primärwand, Mittellamelle und die Holzstrahlen hingegen wurden zu diesem Zeitpunkt nicht befallen. Im Gegensatz zum Holzzersetzungsmuster der Braunfäuleerreger am Nadelholz wies die S3-Schicht der Fasertracheiden bereits im Frühstadium eine recht starke Schädigung auf.

Das Loslösen oder Abschälen einzelner Lamellen konnte im Spätholz nicht beobachtet werden, allerdings war hier, wie zuvor am Nadelholz, die Zahl der entstandenen Risse in den Fasertracheiden wesentlich grösser. In der tangentialen Betrachtungsebene war erkennbar, dass die Hyphen dichtgedrängt in den vielreihigen Holzstrahlen auftraten. Trotz der starken Besiedlung konnten in den Holzstrahlen zunächst keine nennenswerten Strukturveränderungen verzeichnet werden. Im weiteren Verlauf der Holzzersetzung wurden die Sekundärwände der Fasertracheiden im Frühholz komplett zerstört, und unter polarisiertem Licht war im Vergleich zu den Fasertracheiden des Spätholzes nur noch eine sehr schwache Doppelbrechung ersichtlich. Aufgrund des höheren Lignifizierungsgrades war die Widerstandsfähigkeit des Spätholzes gegenüber einer Holzzersetzung höher. Deshalb nahm die Doppelbrechung in diesem Bereich verzögert ab. Die Zellwände der Fasertracheiden des Spätholzes waren zu diesem Zeitpunkt der Holzzersetzung, wie ihre intensive Doppelbrechung auch unter polarisiertem Licht bestätigte, noch weitgehend intakt.

4.1.2 Weissfäuleerreger

In Buchen- und Eschenholz wuchsen die Hyphen von *Trametes versicolor* vorrangig in den Gefässen und entlang der Holzstrahlen. Die Holzersetzung begann zunächst im Frühholz, das eine gleichmässige Abnahme der Doppelbrechung über alle Zellen hinweg aufwies. Die Hyphen wuchsen vornehmlich im Lumen der S3-Schicht der Fasertracheiden (Abb. 1E) und bauten von dort aus die Sekundärwand progressiv von innen (Lumen) nach aussen ab. Dabei wurde jedoch zunächst nicht die Mittelschicht von der Zersetzung erfasst. In einzelnen Zellwandregionen entstanden kanalartige Bohrlöcher mit Durchmessern von 2-3 μm , die benachbarte Zellen miteinander verbanden. Diese Kanäle erweiterten sich mit zunehmender Holzersetzung zu grossen Bohrlöchern (5-7 μm) (Abb. 1E-F) und vereinigten sich im Spätstadium zu Hohlräumen, die ganze Zellwandpartien zerstörten. Ähnliche Abbauerscheinungen zeigten auch die vielreihigen Holzstrahlen. Während das Frühholz schon weitreichende Strukturveränderungen aufwies, erfolgte der Zellwandabbau im Spätholz mit zeitlicher Verzögerung, lief jedoch nach dem gleichen Muster wie im Frühholz ab. Ähnlich wie bei der Holzersetzung im lebenden Baum, bildeten sich auch im künstlich infizierten Buchenholz Demarkationslinien.

In Fichten- und Tannenholz wurden bevorzugt die einreihigen Holzstrahlen des Frühholzes sowie die Tracheiden abgebaut. Der Ablauf entsprach dem einer selektiven Delignifizierung. Diese schreitet vom Lumen in Richtung der Mittellamelle vor. Es kam anfänglich nur zu einer Zellwandverfärbung, die im weiteren Verlauf zu einer selektiven Delignifizierung der Tracheiden führte. Mit zunehmendem Grad der Holzersetzung fand auch ein selektiver Ligninabbau in der Mittellamelle statt, so dass einzelne Tracheiden aus ihrem Verbund gelöst wurden. Neben dieser Form der Holzersetzung konnte lokal auch eine simultane Fäule in den Tracheiden beobachtet werden, bei der die Zellwände von innen nach aussen abgebaut wurden. Vereinzelt durchdrangen die Hyphen auf direktem Weg die Sekundärwand oder verzweigten sich innerhalb dieser und zersetzen dabei weitreichende Zellwandbereiche. Die Holzsetzungsmuster der pyroxyphilen Pilze an unbehandelten und TMT Proben unterschieden sich im Laubholz nicht wesentlich. Aus diesen Gründen werden sie nachfolgend zusammenfassend behandelt.

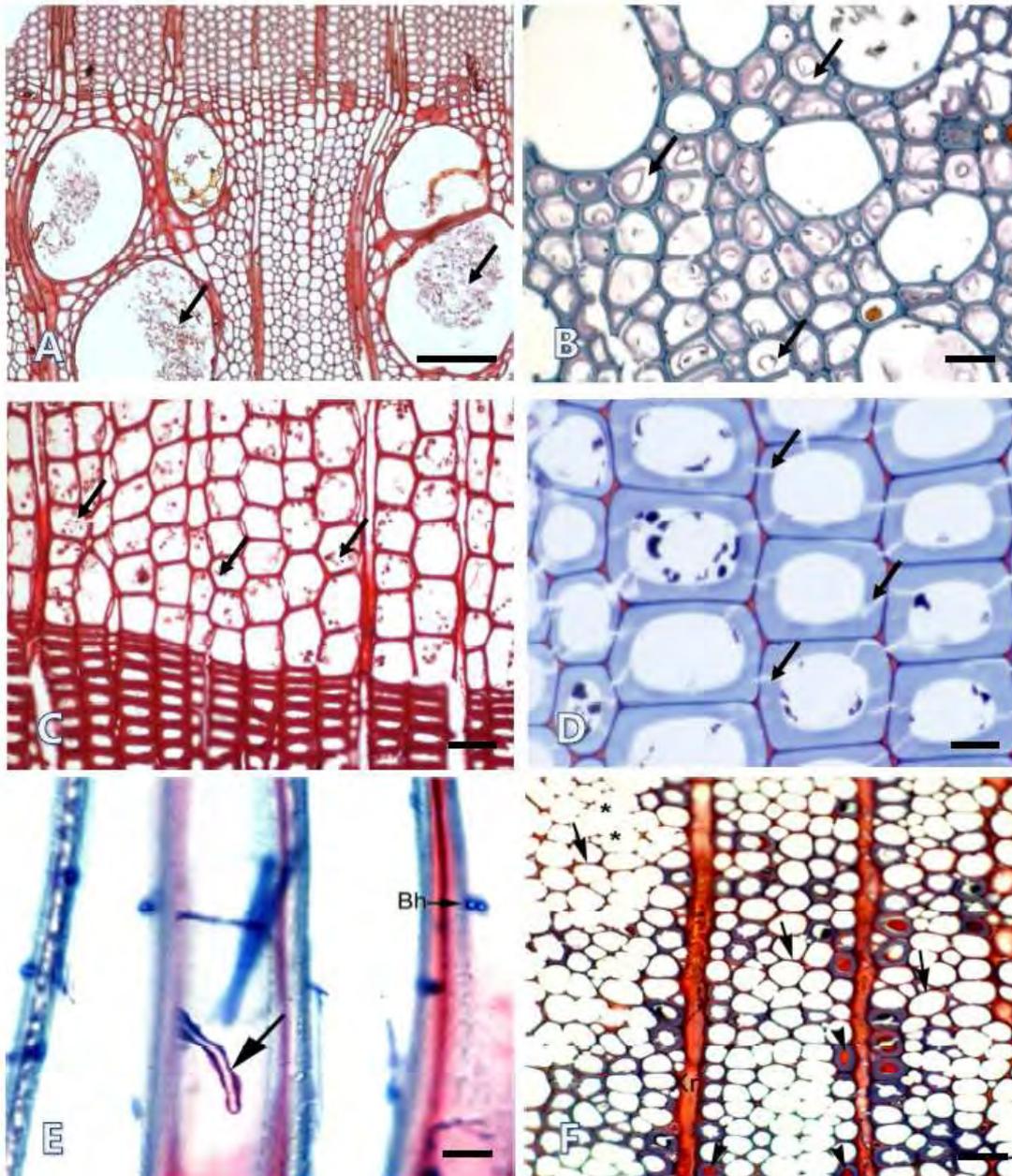


Abb. 1A. Querschnitt von unbehandeltem Eschenholz nach Inkubation mit *Coniophora puteana*. Das stärkste Hyphenwachstum findet in den weitlumigen Frühholzgefäßen (Pfeile) statt. Masstab = 50 µm. Abb. 1B. Querschnitt von unbehandeltem Buchenholz nach Inkubation mit *Coniophora puteana*. Die Sekundärwände der Libriformfasern sind weitgehend abgebaut. Masstab = 25 µm. Abb. 1C. Querschnitt von TMT-Tannenholz nach Inkubation mit *Coniophora puteana*. Zahlreiche Hyphen sind im Zelllumen der Frühholztracheiden sichtbar. Masstab=20µm. Abb. 1D. Querschnitt von TMT-Fichtenholz nach Inkubation mit *Coniophora puteana*. Hyphen sind im Zelllumen auf der S3-Schicht der Spätholztracheiden ersichtlich. Zahlreiche Risse (Pfeile) sind in den Sekundärwänden der Tracheiden erkennbar. Masstab = 10 µm. Abb. 1E-F. Radialschnitt von TMT-Buchenholz nach Inkubation mit *Trametes versicolor*. In unmittelbarer Umgebung der Hyphe (Pfeil) ist ein Erosionsgraben in der Zellwand erkennbar. Bh=Bohrlöcher. Masstab= 10 µm. Abb. 1F. Im fortgeschrittenen Stadium der simultanen Fäule ist die überwiegende Zahl der Sekundärwände (Pfeile) der Fasertracheiden bereits stark abgebaut. Masstab = 50 µm.

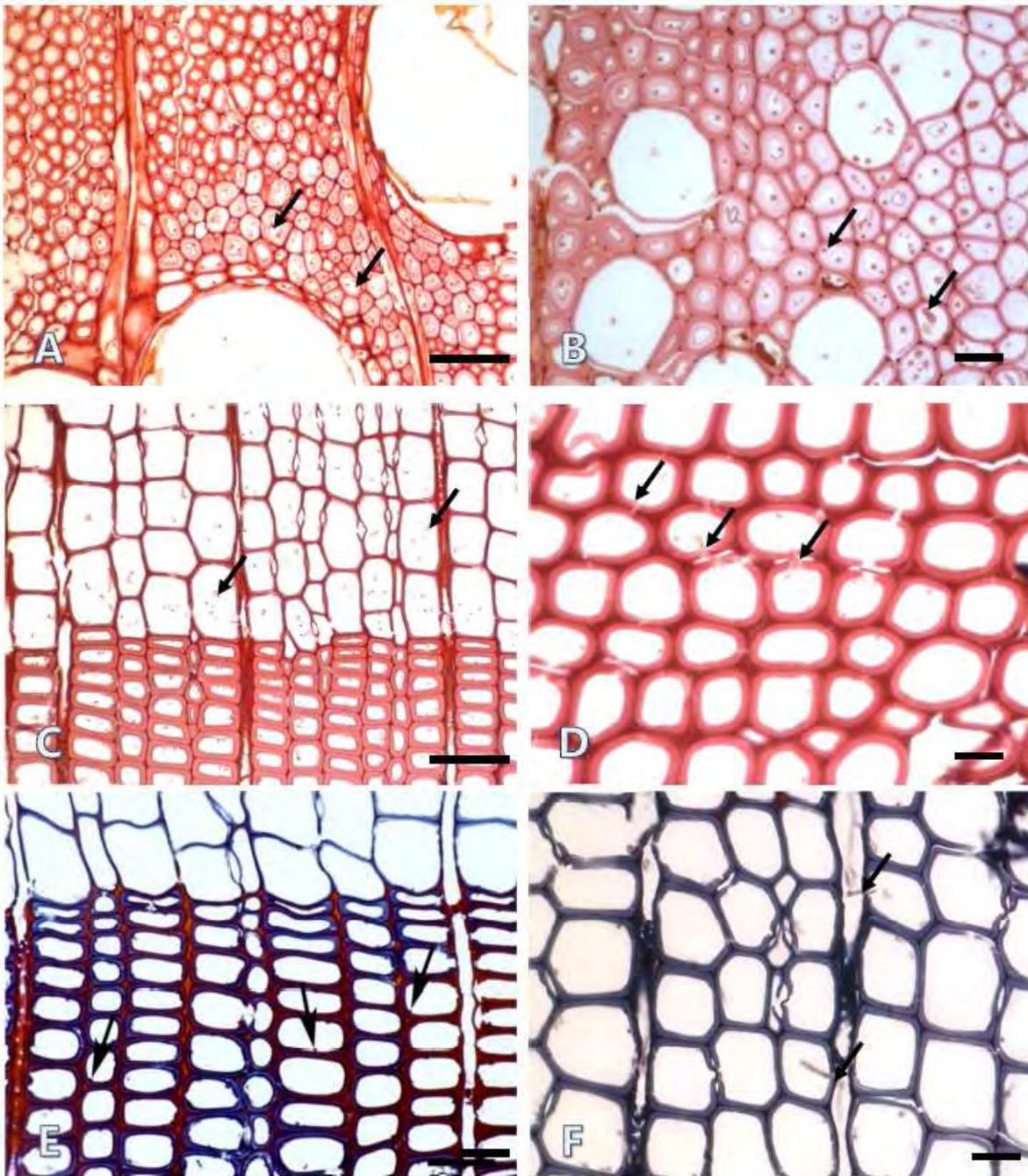


Abb. 2A-B. Querschnitt von unbehandeltem Eschenholz nach Inkubation mit *Gloeophyllum trabeum*. Das stärkste Hyphenwachstum (Pfeile) findet in den Zelllumina der Librifasern statt. Masstab = 50 μm . Abb. 2B. Vereinzelt wachsen Hyphen in den Zellwänden der Librifasern. Abb. 2C-2D. Querschnitt von behandeltem Tannenholz nach Inkubation mit *Gloeophyllum trabeum*. Zahlreiche Hyphen (Pfeilköpfe) sind im Zelllumina der Frühholztracheiden erkennbar. Masstab = 50 μm . Abb. 2D. Einzelne Bohrkanäle mit Hyphen sind in den Sekundärwänden der Tracheiden ersichtlich (Pfeile). Masstab = 20 μm . 2E. Querschnitt von unbehandeltem Fichtenholz nach Inkubation mit *Gloeophyllum trabeum*. Trotz Hyphenwachstum im Zelllumen ist in den Zellwänden kein Hyphenwachstum erkennbar. Masstab = 20 μm . Abb. 2F: Querschnitt von behandeltem Fichtenholz nach Inkubation mit *Gloeophyllum trabeum*. Zahlreiche Hyphen breiten sich in den Holzstrahlen aus und Durchdringen die Sekundärwände der Tracheiden (Pfeile). Masstab = 20 μm .

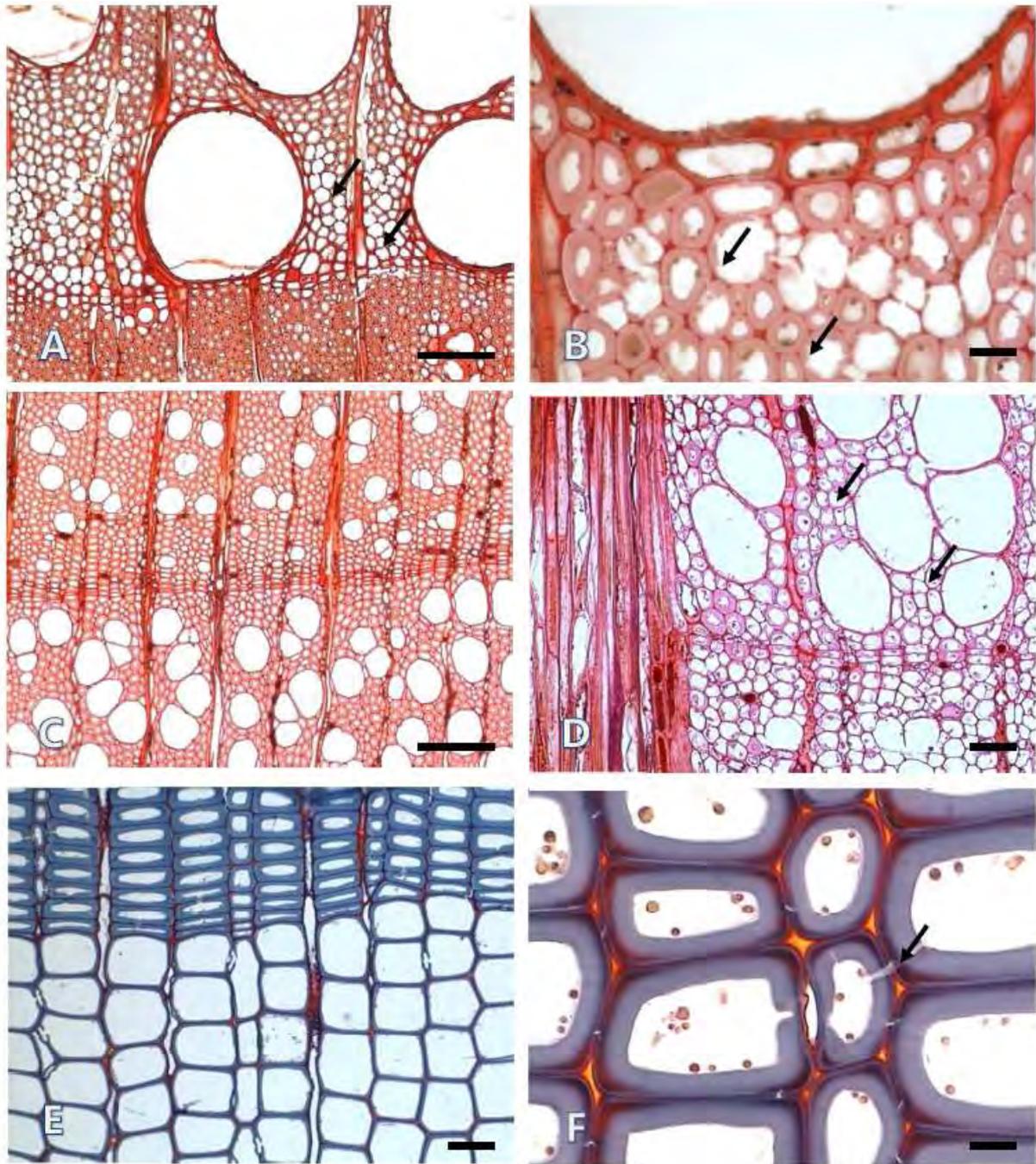


Abb. 3A-B. Querschnitt von TMT-Eschenholz nach Inkubation mit *Daldinia concentrica*. Die stärksten Strukturveränderungen sind in Zellwänden der Librifasern sichtbar (Pfeile). Massstab = 50 µm. Abb. 3B. Im Zelllumen sind zahlreiche Hyphen sichtbar und die Zellwände der Librifasern weisen deutliche Erosionsgräben auf (Pfeile). Massstab = 10 µm. Abb. 3C. Querschnitt von Buchenholz (Kontrolle). Massstab = 50 µm. Abb. 3D. Querschnitt von TMT-Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia concentrica*. Die Sekundärwände der Fasertracheiden sind bereits stark abgebaut (Pfeile). Massstab = 25 µm. Abb. 3E. Querschnitt von unbehandeltem Fichtenholz nach Inkubation mit *Daldinia concentrica*. Trotz Hyphenwachstums in den Zelllumina der Tracheiden sind keine Strukturveränderungen in den Zellwänden erkennbar. Abb. 3F. Querschnitt von TMT-Fichtenholz nach Inkubation mit *Daldinia concentrica*. Hyphen durchdringen die Sekundärwände der Tracheiden (Pfeil). Massstab = 25 µm.

4.2 Pyroxyphile Pilze

In Buchen- und Eschenholz breiteten sich die Hyphen vornehmlich durch die Gefässe in longitudinaler Richtung aus (Abb. 3A; 4A-B; 5C) in radialer Richtung durch die Holzstrahlen und in tangentialer Richtung durch das apotracheale Längsparenchym. Im Anfangsstadium war die Holzzersetzung im Spätholz stets stärker ausgeprägt als im Frühholz (Abb. 3B; 4B). Die sehr schmalen, bis zu 1 µm dünnen Hyphen erzeugten keine Bohrlöcher, sondern drangen ausschliesslich über die Tüpfel zu benachbarten Zellen vor.

Die Zellwände der Fasertracheiden in Buche zeigten in diesem Stadium der Holzzersetzung eine beginnende Veränderung der Zellwandstruktur, und die zellulosereiche S2-Schicht wurde bevorzugt abgebaut (Abb. 3D). Einzelne Hyphen drangen zwar quer zur Zellachse in die Zellwand ein, aber, im Gegensatz zur Entstehung eines Bohrloches, wurde die benachbarte Zellwand nicht durchwachsen, da eine Verzweigung der Hyphen innerhalb der Zellwand erfolgt. Die Hyphen wuchsen nachfolgend innerhalb der Zellwand (Moderfäule ›Typ 1‹) in Längsrichtung zur Zellachse. Dieses Wachstum innerhalb der Zellwand hatte zur Folge, dass in Querschnitten vereinzelt kleine Hohlräume in den Fasertracheiden des Spätholzes sichtbar wurden. Die Hohlräume befanden sich in der mittleren S2-Schicht und erreichten Dimensionen von 2-6 µm im Durchmesser. In Tangentialschnitten traten konisch zugespitzte und hintereinander aufgereihte Kavernen auf, die der Richtung der Mikrofibrillen folgten. Die Abmessungen der Kavernen erreichten einen Durchmesser von 2-6 µm bzw. eine Länge von 20-60 µm. Die Zellwände der Holzstrahlen wurden anfangs nur wenig befallen, zunächst wurden leicht verfügbare Kohlenhydrate abgebaut. In stärker abgebauten Zellwandbereichen waren die Sekundärwände der Fasertracheiden fast vollständig abgebaut (Abb. 3D; 4C-D). Allerdings war die Mittelschicht bei stark befallenen Fasertracheiden weitgehend resistent gegenüber einer Holzzersetzung (Abb. 3D; 4C-D).

In Eschenholz wurden in den Librifasern überwiegend ›Typ 2‹ der Moderfäule beobachtet, die einer lokalisierten simultanen Fäule ähnelt, wobei die Zersetzung der Librifasern vom Lumen nach aussen durch die Bildung kleiner Erosionsgräben in Form v-förmiger Kerben erfolgte (Abb. 3A-B; 5A-D). Obwohl die Masseverluste der pyroxyphilen Pilze an TMT Proben von Fichte und Tanne als gering eingestuft werden können, waren sie signifikant höher als die an unbehandelten Kontrollproben. Im Fichten- und Tannenholz wuchsen die Hyphen der pyroxyphilen Pilze im Lumen auf der S3-Schicht (Abb. 4E), und die Zellwand wurde lokal in unmittelbarer Umgebung der Hyphen abgebaut, was zur Bildung von Erosionsgräben führte (Abb. 3F; 4F). Die Hyphen sanken, ähnlich wie ein Fluss in seinem Bett, in die Zellwand ein (Abb. 5E-F). Dieser lokalisierte Zellwandabbau beruht auf einer die Hyphen umgebenden Schleimhülle, durch die die Enzyme einen engeren Kontakt mit den Wandsubstanzen besitzen. Als Folge des Zusammenfließens vieler Erosionsgräben nimmt die Dicke der verholzten Zellwände von innen (Lumen) nach aussen (Mittellamelle) allmählich ab. In vielen Sekundärwänden der Tracheiden wuchsen die Hyphen quer zur Faserrichtung innerhalb der Zellwände (Abb. 5E-F).

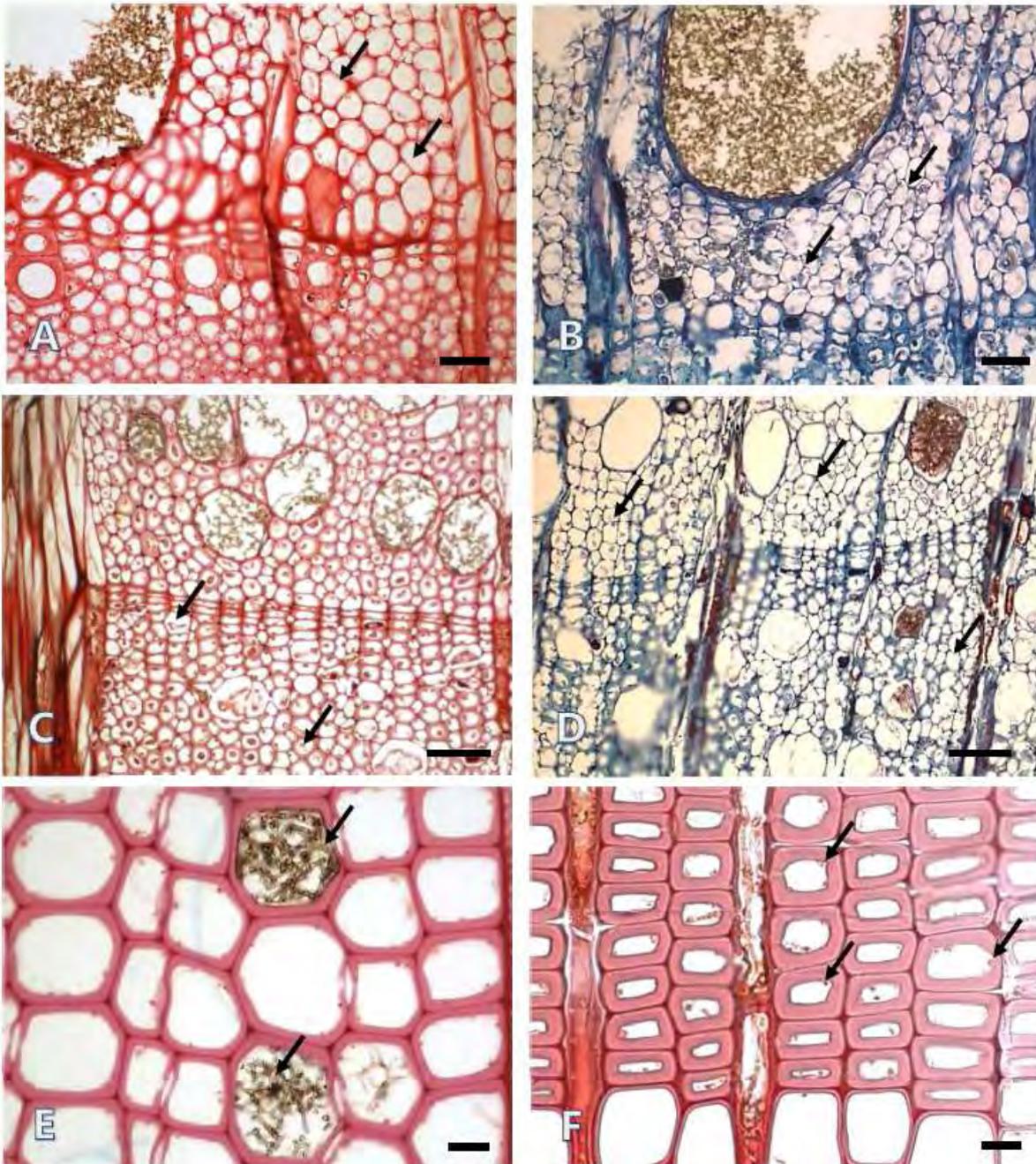


Abb. 4A. Querschnitt von unbehandeltem Eschenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. Die Zellwände der Libriformfasern (Pfeile) sind bereits moderat abgebaut. Abb. 4B. Querschnitt von unbehandeltem Eschenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. Die Zellwände der Libriformfasern sind bis auf die Mittelschicht (Pfeile) komplett abgebaut. Abb. 4C. Querschnitt von unbehandeltem Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. Die Sekundärwände der Fasertracheiden (Pfeile) sind stark zersetzt. Abb. 4D. Querschnitt von TMT-Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. Die Zellwände der Fasertracheiden sind bis auf die Mittelschicht (Pfeile) weitgehend zerstört. Abb. 4E. Querschnitt von unbehandeltem Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. Zahlreiche Hyphen sind in den Frühholztracheiden sichtbar, ohne aber Strukturveränderungen zu verursachen. Abb. 4F. Querschnitt von TMT-Fichtenholz nach Inkubation mit *Daldinia fissa*. In unmittelbarer Umgebung von Hyphen, die im Zelllumen der Spätholztracheiden auf der S3-Schicht wachsen, sind Erosionsgräben erkennbar (Pfeile). Masstab = 20 µm.

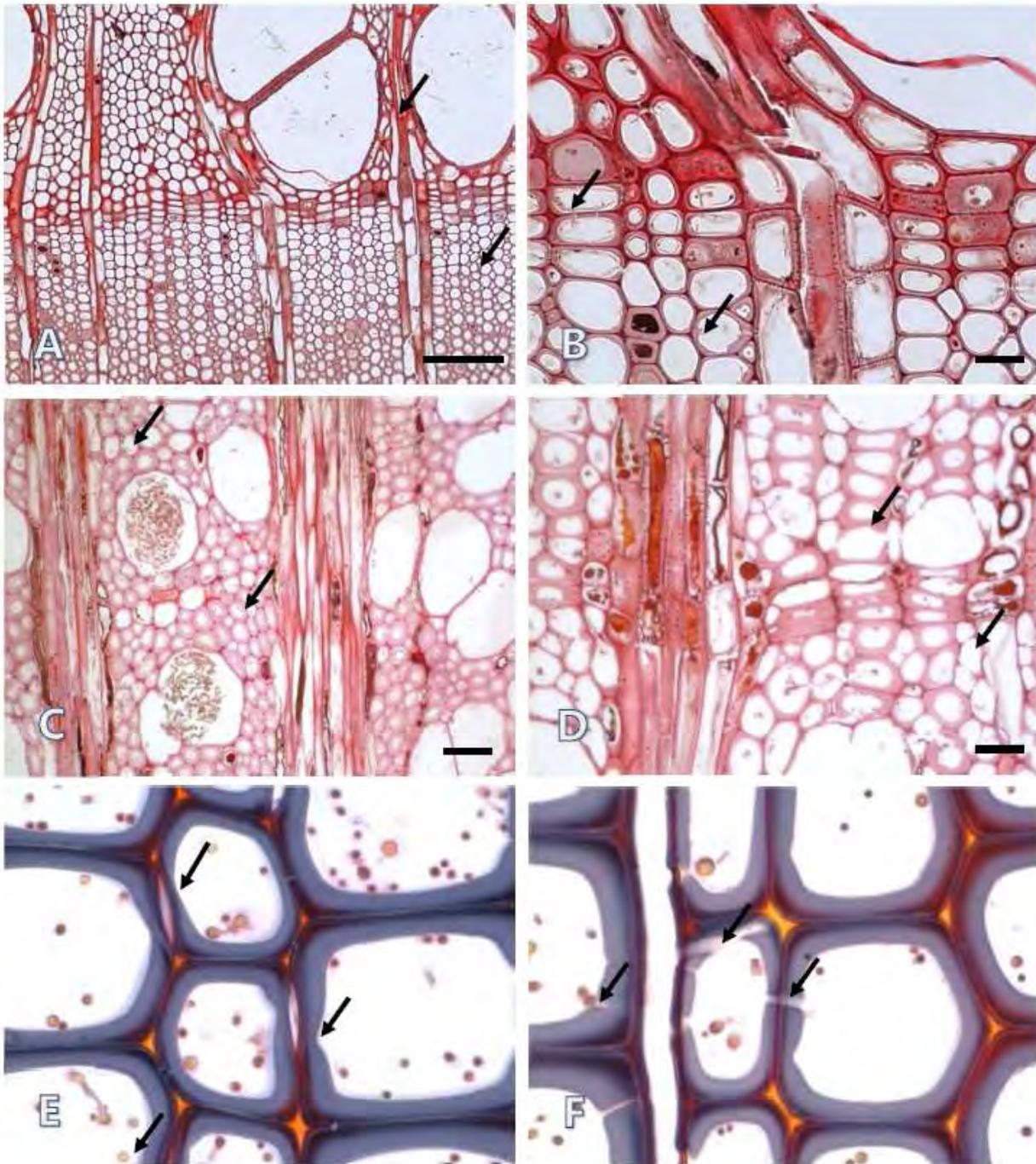


Abb. 5A-B. Querschnitt von TMT-Eschenholz nach Inkubation mit *Daldinia loculata*. Die Zellwände der Librifasern (Pfeile) sind leicht abgebaut. Abb. 5B. Die Zellwände der Librifasern sind bis auf die Mittelschicht (Pfeile) komplett abgebaut. Abb. 5C. Querschnitt von TMT-Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia loculata*. Die Sekundärwände der Fasertracheiden (Pfeile) weisen deutliche Erosionsgräben auf. Abb. 5D. Querschnitt von TMT-Buchenholz nach Inkubation mit *Daldinia loculata*. Die Zellwände der Fasertracheiden sind teilweise bis auf die Mittelschicht (Pfeile) zerstört. Abb. 5E. Querschnitt von behandeltem Fichtenholz nach exponieren mit *Daldinia loculata*. Zahlreiche Hyphen (Pfeile) sind in den Frühholztracheiden auf der S3-Schicht sichtbar. In lokalen Bereichen (Pfeilköpfen) ist die Sekundärwand bereits deutlich abgebaut. Abb. 5F. Zahlreiche Bohrkanäle sind in den Sekundärwänden sichtbar. Massstab = 20 µm.

4.3 Mechanische Untersuchungen

An den vom Myzel gereinigten Stäben waren visuell recht unterschiedliche Abbauerscheinungen zu erkennen: Die Anzeichen eines Pilzbefalles waren generell bei den nicht-wärmebehandelten Kontrollproben (T0) deutlicher als bei den TMT Proben (T1, T2). Bei den nicht-wärmebehandelten Buchen- und Eschen-Stäben der D-Serie war eine flächendeckende, intensive Schwarzfärbung vorhanden (Abbildung 6). Bei den Fichten- und Tannen-Proben war dies nur lokal zu beobachten. Bei den Stäben der D-Serie erschien die Probenform (Querschnitt) mehrheitlich unverändert, hingegen waren bei Buche und Esche auf den frischen Schnittflächen im Querschnitt weissliche, fleckige Bereiche zu erkennen. Bei den Stäben der P-Serie waren bei den nicht-wärmebehandelten Proben (T0) aus Fichte und Tanne teilweise deutliche Abbauerscheinungen (Volumenverlust) vorhanden. Zum einen war die bei der Inkubation auf den Futterbretchen liegende Unterseite der Proben stärker abgebaut als die Seitenflächen und die Oberseite. Zum anderen war der Abbau an den Stirnseiten deutlich stärker als in der Längsmitte der Stäbe. Vereinzelt waren die Stäbe bereits (quer) gebrochen. Der Volumenverlust erschien bei den Stäben aus Buche und Esche insgesamt gering, hingegen erschienen insbesondere die Buchenstäbe ungewöhnlich leicht und zeigten auch auf den Längsflächen weissliche, fleckige Verfärbungen. Einen Überblick über die statistischen Kenndaten der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Thermobehandlung und Pilz-Inkubation gibt Tabelle 3. Entsprechend der höheren Rohdichte sind bei den Laubhölzern Buche und Esche die Werte der mechanischen Eigenschaften höher als bei den Nadelhölzern Fichte und Tanne. Die Daten der unbehandelten Kontrollproben liegen im Bereich der Erfahrungswerte. Sowohl die Thermobehandlung als auch die Pilz-Inkubation führten in der Regel zu einer Verminderung der geprüften Festigkeitseigenschaften. Die festigkeitsmindernde Wirkung der Thermobehandlung ist bei den Laubhölzern tendenziell grösser als bei den Nadelhölzern. Die Auswirkungen einer Pilz-Inkubation sind abhängig von der konkreten Kombination von Substrat und Pilzart. Als Folge der Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch eine Thermobehandlung wird die Festigkeitsreduktion durch Pilzbefall aber meist geringer.

Die Streuung der Festigkeitswerte zwischen den Wiederholungsproben liegt absolut betrachtet (Standardabweichung) in allen Kollektiven (Thermobehandlung x Pilz-Inkubation) in der gleichen Grössenordnung. Bei einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften als Folge von Thermobehandlung oder Pilz-Inkubation steigt die relative Streuung (Variationskoeffizient) an. Der Variationskoeffizient liegt bei der Oberflächenhärte zwischen 10% und 25%. Bei der Bruchschlagarbeit ist er erwartungsgemäss mit durchschnittlich rund 40% deutlich höher.

Die Unterschiede zwischen den nicht-inkubierten Kontrollproben (K) sowie den zwei Pilzbehandlungen (D, P) sind bei den nicht-wärmebehandelten Kontrollproben (T0) meist statistisch signifikant. Dies bedeutet, dass ein Pilzbefall zu einer eindeutigen Veränderung der mechanischen Eigenschaften führt, wobei die Wirkung von pyroxyphilen Pilzen (D) und den Basidiomyceten (P) oft unterschiedlich gross ist. Bei den TMT Proben (T1, T2) sind nur teilweise signifikante Effekte festzustellen. Insbesondere bei Thermo-Esche zeigte eine Pilz-Inkubation kaum Wirkung (Ausnahme Bruchschlagarbeit bei T2).

Tabelle 3. Oberflächenhärte und Bruchschlagarbeit nach verschiedener Thermobehandlung und Pilz-Inkubation.

Brinell-Härte [N/mm ²]					
Pilz-Inkubation	Thermobehandlung				
	T0 (ohne)		T1 (Stufe 1)		T2 (Stufe 2)
F (Fichte)					
Kontrolle K	14.0±2.6	A	12.5±2.7	A	12.2±2.4 A
Daldinia spp. D	13.0±2.1	A	11.2±2.5	A B	10.9±2.9 A
O. placenta P	6.8±0.9	B	9.4±1.5	B	8.4±2.1 B
T (Weisstanne)					
Kontrolle K	16.7±2.7	A	14.7±3.2	A	14.5±2.7 A
Daldinia spp. D	13.7±2.4	B	12.7±2.4	B	12.2±2.5 B
O. placenta P	6.5±1.3	C	7.8±1.4	C	9.1±1.5 C
B (Buche)					
Kontrolle K	36.4±4.4	A	23.5±2.8	A	25.1±4.2 A
Daldinia spp. D	24.7±2.7	B	23.3±2.7	A	23.9±3.1 A
T. versicolor P	15.3±3.7	C	21.9±2.6	B	21.0±3.0 B
E (Esche)					
Kontrolle K	29.7±3.9	A	22.7±3.2	A	23.5±2.7 A
Daldinia spp. D	19.2±3.1	C	21.9±2.8	A	22.4±3.4 A
T. versicolor P	24.3±4.3	B	22.6±3.1	A	21.9±3.3 A
Bruchschlagarbeit [kJ/m²]					
Pilz-Inkubation	Thermobehandlung				
	T0 (ohne)		T1 (Stufe 1)		T2 (Stufe 2)
F (Fichte)					
Kontrolle K	44.8±15.5	B	36.3±17.7	A	42.4±16.7 A
Daldinia spp. D	57.1±17.3	A	41.0±18.9	A B	35.8±17.3 A
O. placenta P	6.6±6.6	C	28.2±19.2	B	23.2±16.0 B
T (Weisstanne)					
Kontrolle K	39.0±7.8	B	42.8±11.7	A	35.6±13.6 A
Daldinia spp. D	46.4±9.1	A	43.1±13.0	A	33.0±14.1 A
O. placenta P	4.8±2.2	C	15.8±8.7	B	20.9±12.7 B
B (Buche)					
Kontrolle K	90.4±10.8	A	37.7±14.9	A	33.5±20.6 A
Daldinia spp. D	29.5±10.3	B	32.7±13.6	A	29.8±11.5 A B
T. versicolor P	15.1±5.5	C	22.8±13.5	B	21.5±15.8 B
E (Esche)					
Kontrolle K	86.6±17.3	A	65.6±15.4	A	66.0±18.4 A
Daldinia spp. D	53.7±26.1	B	65.9±15.5	A	46.7±14.2 B
T. versicolor P	58.4±17.7	B	65.2±18.3	A	45.9±17.1 B

Erläuterungen:

a) Die Zahlen in der Tabelle zeigen den Mittelwert sowie die Standardabweichung über die vorhandenen Wiederholungsproben (in der Regel n=30)

b) Die statistische Signifikanz von Unterschieden zwischen den nicht-inkubierten Kontrollproben sowie den zwei Pilzbehandlungen wurde varianzanalytisch mittels multiplen paarweisen Mittelwertvergleichen (Fisher's least significant difference) überprüft. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben (A, B, C) sind statistisch signifikant verschieden (5% Niveau).

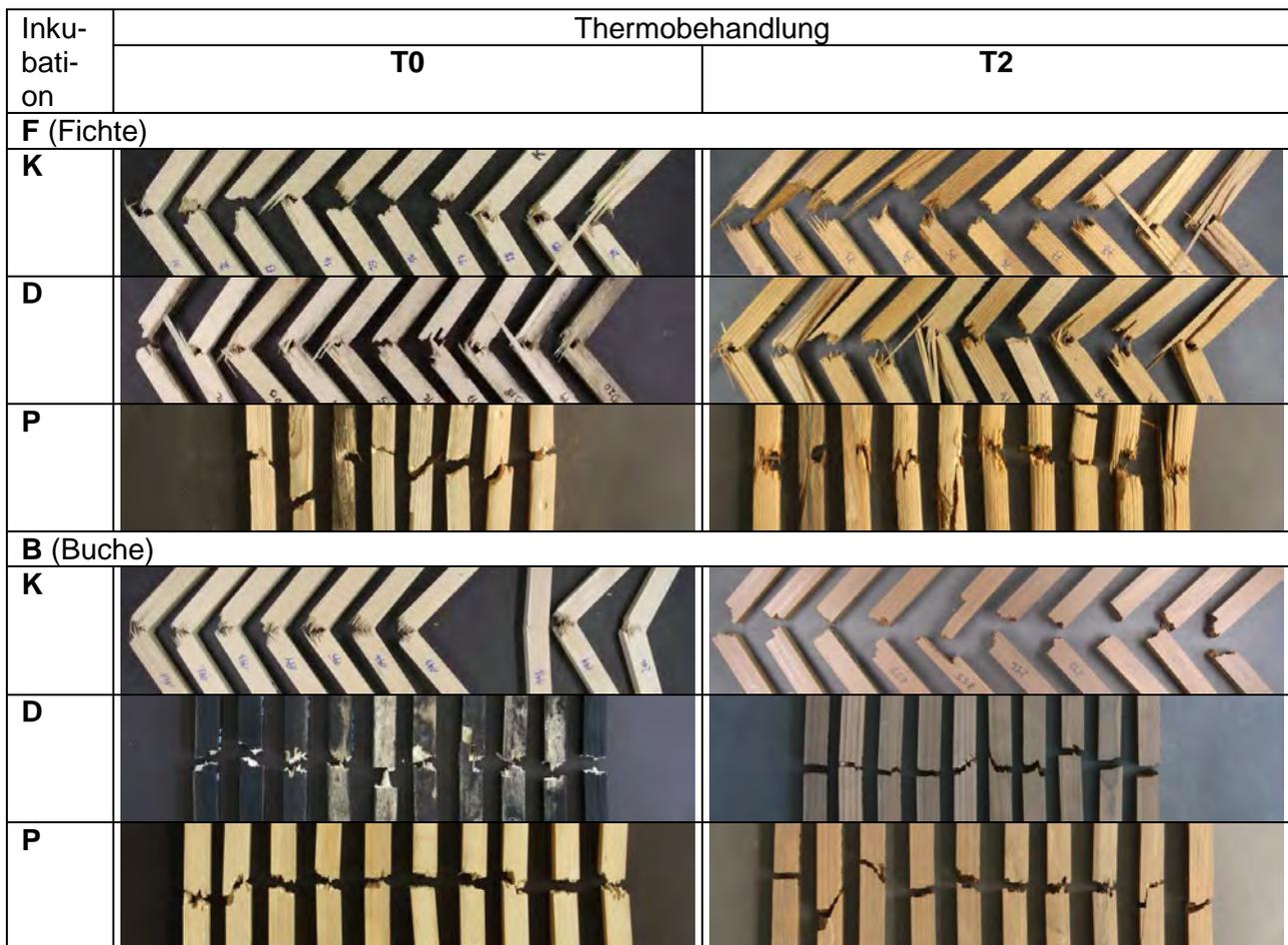


Abbildung 6. Bruchbilder nach dem Schlagbiegeversuch bei Fichte und Buche ohne und mit Thermobehandlung respektive Pilzbefall. Die Proben wurden von rechts nach links durchschlagen.

Thermobehandlung und Pilz-Inkubation beeinflussen nicht nur die absoluten Festigkeitswerte, sondern auch das Bruchverhalten. Dies ist anhand eines Vergleiches der Bruchbilder beim Schlagbiegeversuch an den Beispielen Fichte und Buche ersichtlich (Abb. 6). Bei den nicht-wärmebehandelten Proben (T0) aus Fichte führt ein Befall durch Basidiomyceten (P) zu einem deutlich spröderen Bruch als bei den nicht-inkubierten Kontrollproben (K) oder nach einer Inkubation mit pyroxyphilen Pilzen (D). Bei den TMT Proben (T1, T2) bleibt das Bruchbild hingegen bei allen Pilz-Inkubationen faserig. Auch bei Buche werden die Brüche nach einer Pilz-Inkubation spröder. Allerdings ist die Wirkung der TMT Behandlung diesbezüglich dominanter, wie anhand der Bruchbilder bei allen thermobehandelten Proben (T2) zu erkennen ist.

5. Diskussion

Bislang lagen keine Erfahrungen über die Wechselwirkungen zwischen TMT und pyroxyphilen Pilzen vor. Es wird angenommen, dass die überwiegende Zahl der pyroxyphilen Pilze der Gattung *Daldinia* mit Laubhölzern vergesellschaftet ist (Ju et al. 1997). Pyroxyphile Pilze gehören zur Klasse der Ascomyceten (Schlauchpilze). Die bedeutendste Gattung pyroxyphiler Pilze ist *Daldinia*. Diese Gattung umfasst etwa 20 Pilzarten und gehört zur Familie der Xylariaceae. Einige Arten sind sehr selten. Andere wie etwa *D. childiae* und nahe verwandte Arten treten häufig in Nord Amerika, Europa und Asien auf. *Daldinia loculata* ist ein bedeutender Pilz, der an Holz nach Waldbränden auftritt und mit seltenen pyrophilen Insekten vergesellschaftet ist (Dahlberg 2002). Diese Insekten fliegen gezielt Waldbrände an. Der Grund für dieses sogenannte pyrophile Verhalten ist, dass diese Insekten auf Nahrungsressourcen angewiesen sind, die durch ein Feuer erst geschaffen werden (Esseen et al. 1992). Solche Nahrungsressourcen können z.B. bestimmte Pilzarten, wie etwa *D. loculata*, *D. fissa* und *D. grandis* sein, die nach einem Waldbrand vermehrt auf verbranntem Holz wachsen. Johannesson (2000) beschreibt eine Reihe von *Daldinia*-Arten wie etwa *D. loculata*, *D. fissa* und *D. grandis* die verbranntes Holz besiedeln und abbauen können (Ju et al. 1997) und deshalb als pyrophile oder pyroxyphile Pilze bezeichnet werden (Johannesson 2001; Dahlberg 2002; Maheshwari 2005).

5.1 Unbehandeltes Holz

In der vorliegenden Studie verursachten alle pyroxyphilen Pilzarten deutlich höhere Masseverluste an Kontroll-Holzproben von Buche und Esche als an Nadelholz (Fichte und Tanne). Die Beschaffenheit des Lignins hat grossen Einfluss auf das Abbauverhalten von pyroxyphilen Pilzen. Lignin ist keine wohldefinierte chemische Substanz, sondern vielmehr eine heterogene Klasse von Verbindungen (Otter 1996). Dabei sind die beiden phenylpropanoiden Einheiten Guaiacyl und Syringyl die wichtigsten Monomere des Lignins der Bäume (Abb. 7). Das Nadelholzlignin besteht fast ausschliesslich aus Guaiacyl-Monomeren, das Laubholzlignin dagegen aus etwa gleichen Anteilen Guaiacyl und Syringyl (Abb. 9; Whetten und Sederoff 1995). Die Anteile der genannten Monomere schwanken zwischen einzelnen Zelltypen. So weisen z.B. die Gefässe und die Mittelschicht in den Zellwänden eine sehr hohe Konzentration von Guaiacyl auf und sind damit besonders dauerhaft gegenüber pyroxyphilen Pilzen (Blanchette et al. 1988; Schwarze et al. 1995). Ausserdem wird eine stark verholzte Zellwand durch die Lignininkrustierung dichter und kompakter, so dass Enzyme mit ihren relativ grossen Molekülen, schwerer vordringen können. Die stark verholzten Zwickel der Mittellamelle bleiben deshalb bei den meisten Holzersetzungerscheinungen am längsten erhalten. Als Grundlage für die nachstehende Diskussion dient die Klassifizierung von Braun (1970), der Nadel- und Laubbäume gemäss der histologischen Differenzierung und der funktionellen Arbeitsteilung ihrer Zellen in verschiedene Organisationsstufen des Hydrosystems einteilt (Abb. 8). Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, die vorliegenden Ergebnisse unter Berücksichtigung der stammesgeschichtlichen Entwicklung des Holzes zu diskutieren, die möglicherweise die ko-evolutionäre Entwicklung zwischen holzzerstörenden Pilzen und Bäumen entscheidend geprägt hat. Obgleich das Holzgewebe auch mittels eines Festigungssystems oder eines pneumatischen Systems klassifiziert wird, ist das Hydrosystem das einzige System, das über die Transpiration mit der Umwelt in Beziehung steht und somit von Umweltfaktoren auch selektioniert werden kann. Die entwicklungsgeschichtlich älteren Nadel-

bäume repräsentieren nach Braun (1970) die erste Organisationsstufe des Hydrosystems der Bäume (Abb. 8).

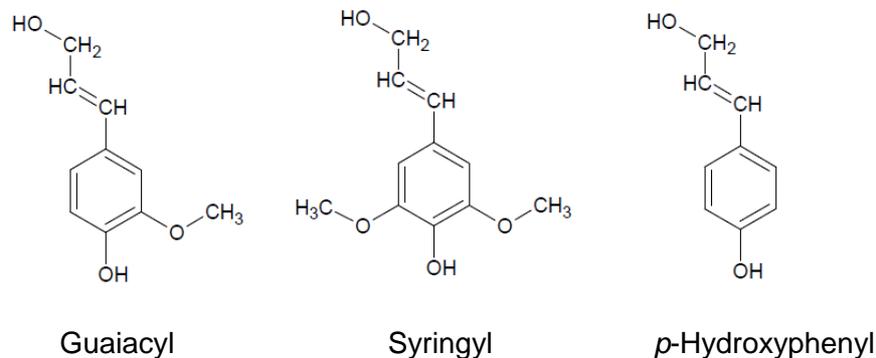


Abbildung 7. Lignin besteht aus den Phenylpropaneinheiten Syringyl (4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl), p-Hydroxyphenyl und Guaiacyl (4-hydroxy-3-methoxyphenyl) (Widsten und Kandelbauer, 2008).

Das Holz von Nadelbäumen ist sehr homogen aufgebaut und besteht weitgehend aus Tracheiden, die zwei Funktionen erfüllen: die der Wasserleitung und die der Festigung. Der Anteil parenchymatischer Zellen ist gering und deren Vorkommen auf einreihige Holzstrahlen bzw. auf die Harzgänge umfassenden Epithelzellen beschränkt. Axialparenchym tritt in nur wenigen Baumarten und dort nur spärlich angeordnet auf. Im Gegensatz zu Laubbäumen dominieren Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer in den Zellwänden der Tracheiden. Syringyl-Einheiten und P-Hydroxyphenyl-Einheiten fehlen dagegen im Holz der Nadelbäume (Abb. 9).

An der Holzersetzung in Nadelbäumen sind überwiegend Braunfäuleerreger beteiligt. Deren geographische Verbreitung ist daher weitgehend auf die nördliche Hemisphäre beschränkt (Watling 1982). Die meisten Braunfäuleerreger stammen aus der Familie der Polyporaceae, nur wenige Arten aus anderen Familien (Gilbertson 1980). In absoluten Zahlen ausgedrückt, werden nur 6 % aller bekannten holzzerstörenden Pilze den Braunfäuleerregern zugeordnet (Gilbertson 1980). Vieles spricht für eine evolutionäre Anpassung der Braunfäuleerreger an das Holz der Nadelbäume. Die Verteilung der Zellwandbestandteile ist, bis auf die erhöhte Menge an Lignin in den Spätholztracheiden und der S₃-Schicht, sehr homogen. Der sehr einfache Aufbau des Nadelholzes korreliert mit den sehr einheitlichen Holzersetzungsmustern der Braunfäuleerreger und den im Vergleich zu den Weissfäuleerregern weitaus höheren Abbauraten an diesem Substrat (Schwarze 1995). Auch in der vorliegenden Studie wurden die höchsten Masseverluste an Fichtenholz verzeichnet, welches mit Braunfäuleerregern inkubiert wurde. Die in dieser Studie verzeichnete Resistenz von Nadelholz gegen pyroxyphile Pilze ist vermutlich neben der Ligninkomposition (Abb. 9) auch auf die besondere Zusammensetzung und den Aufbau der S₃-Schicht der Tracheiden zurück zu führen.

In den höheren Organisationsstufen des Hydrosystems werden ausschliesslich Laubbäume klassifiziert (Braun, 1970). Im Xylem der Laubbäume finden sich einige interessante Übereinstimmungen, was die Verteilung und Zusammensetzung der Ligninpolymere betrifft (Abb. 9). Die relative Ligninkonzentration in den Sekundärwänden der Gefässe ist meist höher und reich an Guaiacyl-Einheiten, in denen der Fasern gewöhnlich geringer und von Syringyl-Einheiten domi-

niert (Blanchette 1992). Unabhängig vom Zelltyp weisen die Mittelschichten und Zellzwickel der Holzzellen die relativ grössten Mengen an Lignin auf, welches meist ausschliesslich aus Guaiacyl-Monomeren aufgebaut ist (Fergus und Goring 1970b; Eriksson et al. 1990). Studien an japanischen Laubbäumen zeigen, dass ein hoher Anteil an Syringyl-Einheiten am Ligninpolymer in Zellen dominiert, die für die mechanische Festigung verantwortlich sind. In solchen Zellen, deren Funktion hauptsächlich der Wasserleitung dienen, herrschen dagegen Guaiacyl-Einheiten im Lignin vor (Yoshinaga et al. 1989, 1992, 1997). Die evolutionären Differenzierungsprozesse, die eine funktionelle Arbeitsteilung der Zellen in Laubbäumen zur Folge hatten, führten dazu, dass in den entwicklungsgeschichtlich jüngeren Librifasern deutlich höhere Syringyl-Einheiten zu finden sind als in den entwicklungsgeschichtlich älteren Fasertracheiden (Yoshinaga et al. 1997; Schwarze et al. 2000a).

Der zweiten Organisationsstufe des Hydrosystems von Braun (1970) werden Laubbäume wie etwa *Fagus sylvatica* zugeordnet, die sich durch ein wasserleitendes Gewebe, bestehend aus Gefässen und Fasertracheiden, auszeichnen (Abb. 8). Obgleich deutlich höhere Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer in den Zellwänden der Gefässe verzeichnet werden können (Abb. 9), überwiegen Syringyl-Einheiten am Ligninpolymer in den Sekundärwänden der Fasertracheiden (Baum 2000). Die höheren Syringyl-Einheiten in den Sekundärwänden der Fasertracheiden stehen im Zusammenhang mit ihrer Festigungsfunktion (Yoshinaga et al. 1989, 1992, 1997). In *F. sylvatica* werden in den Sekundärwänden der Fasertracheiden keine starken Unterschiede in der Ligninzusammensetzung verzeichnet (Abb. 9). Lediglich die letzten Zellreihen des Spätholzes zeigen einen höheren Gesamtgehalt an Lignin, was bei Pilzbefall einen Einfluss auf das Holzerzersetzungsmuster haben kann (Schwarze und Fink 1997). In der Mittelschicht der Fasertracheiden lassen sich stets sehr hohe Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer feststellen (Baum 2000). Hohe Konzentrationen von Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer erhöhen nachweislich die natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes gegen pyroxyphile Pilze. Studien an tropischen Laubhölzern zeigen eine höhere Resistenz guaiacylreicher Baumarten gegenüber solchen, deren Lignin vor allem aus Syringyl-Einheiten aufgebaut ist (Faix et al. 1985; Blanchette 1988). Wie Studien von Liese (1961) zeigen, ist das guaiacylreiche Holz der Nadelbäume vor allem resistenter gegen Moderfäuleerreger als das syringylreiche Holz der Laubbäume.

Im Holz von *F. sylvatica* konnte beobachtet werden, dass die Mittelschicht selbst im Spätstadium der Holzerzersetzung durch pyroxyphile Pilze nicht abgebaut wurde. Grundsätzlich wird Holz von *F. sylvatica*, dessen Gewebe keine strenge funktionelle Arbeitsteilung zeigt bzw. deren Fasertracheiden über den ganzen Jahrring hinweg eine homogene Lignin-Zusammensetzung besitzen (Abb. 9), von einer Vielzahl holzerstörender Pilze abgebaut. Der unspezifische Holzaufbau von *F. sylvatica* und die homogene Verteilung der Zellwandbestandteile in den Fasertracheiden hat daher eine schwach selektierende Wirkung. Bei den dominierenden Pilzen an *F. sylvatica* handelt es sich nicht um Arten, die keine spezifische Anpassung an einen Wirt zeigen, sondern die ebenfalls an zahlreichen anderen Laubbaumarten auftreten (Rayner und Boddy 1988). Unter kontrollierten Bedingungen wird das Holz mit nur wenigen Ausnahmen von Weiss-, Braun- und Moderfäuleerregern schnell zersetzt (Liese und Ammer 1964; Schwarze 1995). Es ist daher nicht verwunderlich, dass in der vorliegenden Studie der Weissfäuleerreger *T. versicolor* die höchsten Masseverluste (40,2%) an Buchenholz verursachte (Tabelle 2).

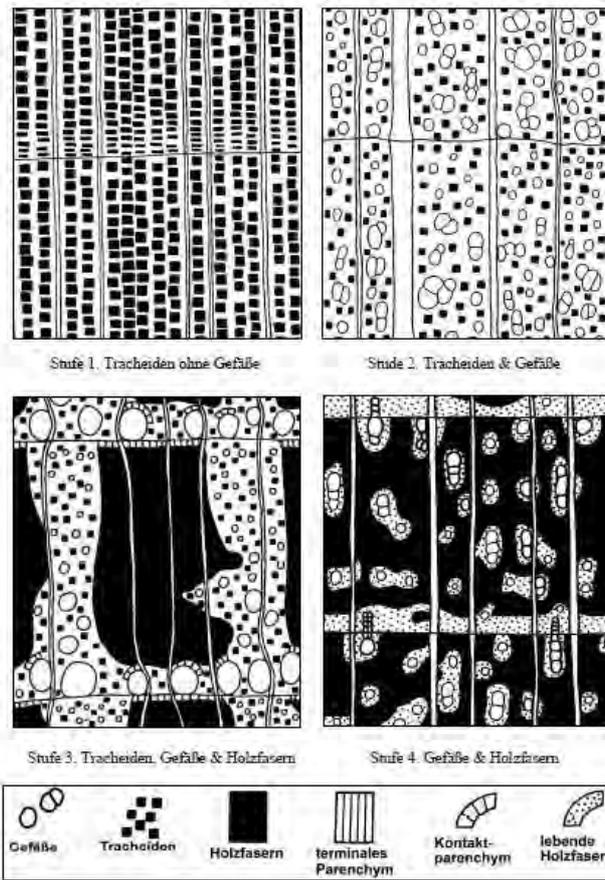


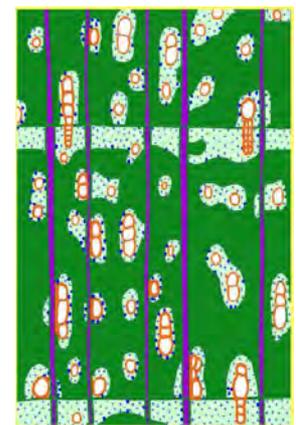
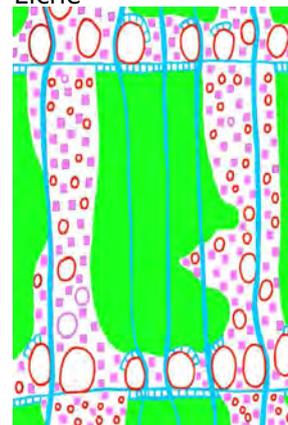
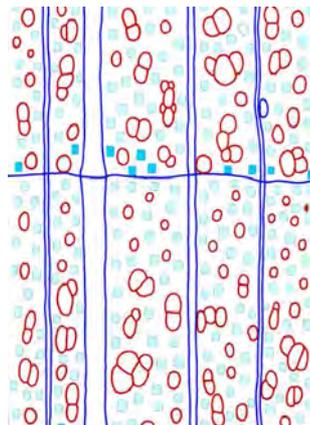
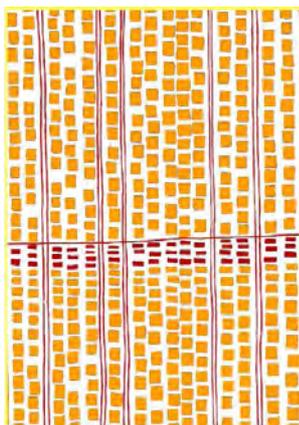
Abbildung 8. Organisationsstufen des Hydrosystems (aus Braun, 1970). Entgegen der Nomenklatur von Braun verwenden viele andere Autoren die Bezeichnung Fasertracheiden für Tracheiden in Laubbäumen.

I. Tracheiden-Stufe
z.B. Fichte

II. Tracheiden-Gefäß-
Stufe z.B. Eiche

III. Eingeschränkte
Tracheiden-Stufe z.B.
Eiche

IV. Gefäß-Holzfasern-
Stufe z.B. Esche



Syringyl Guaiacyl

Abbildung 9. Konzentration und Monomerkomposition des Lignins in den Zellwandschichten von Holzarten der verschiedenen Organisationsstufen. Die Farbintensität repräsentiert die Ligninmenge, der Farbton die Zusammensetzung des Ligninpolymers aus den Monomereinheiten von reinem Syringyl (grün) bis hin zum reinen Guaiacyl (rot) (Schwarze 2007).

Die pyroxyphilen Pilzarten *D. fissa* und *D. loculata* verursachten ebenfalls hohe Masseverluste (15,7% und 18,7%) an Buchenholz. *Daldinia* spp. treten überwiegend an Laubholz auf und verursachen eine Weissfäule bei der alle Bestandteile des Holzes abgebaut werden (Rogers 1979). Nach acht Wochen Inkubationszeit verursachte *Daldinia* enorme Masseverluste von 62,9 % in Splintholzklötzchen von Birke (Nilsson et al. 1989). In dieser Studie wies Buchenholz, welches von *Daldinia loculata* zersetzt wurde, dunkle, konzentrische, gefleckte Zonen auf, die auf melanierte Pilzhyphen in den Frühholzgefässen zurückzuführen sind (Panisset 1929; Rayner and Boddy 1988).

Die dritte Organisationsstufe von Braun (1970) zeichnet sich durch eine funktionelle Arbeitsteilung verschiedener Zelltypen aus. Die wasserleitenden Gefässe sind in einem Grundgewebe bestehend aus Fasertracheiden eingebettet und das Festigungsgewebe besteht aus Libriformfasern, die nicht mehr an der Wasserleitung beteiligt sind (Abb. 8). An *Quercus robur*, einem Vertreter dieser Organisationsstufe, wurden zahlreiche Studien durchgeführt, die dazu dienten, den Einfluss der Ligninzusammensetzung und die Verteilung ihrer Monomere in den einzelnen Zelltypen auf Holzabbauprozesse zu untersuchen (Baum, 2000; Schwarze et al., 2000a, b). Im Gegensatz zum sehr weiten Spektrum der Pilzarten, die an *F. sylvatica* auftreten, sind viele Pilzarten, die an *Q. robur* auftreten, z.B. *Phellinus robustus* (Karst.) Bourd. & Galz, *Inonotus cuticularis* (Fr.) Karst., *Inonotus dryadeus* (Pers.:Fr.) Murr oder *Inonotus dryophillus* (Berk.) Murr. sehr wirtsspezifisch.

In der vierten Organisationsstufe des Hydrosystems von Braun (1970) wird eine vollkommene Trennung der Funktionen von Zellen, die der Wasserleitung und der Festigung dienen, verzeichnet (Abb. 8). Stellvertretend für diese Organisationsstufe wurden Untersuchungen über Abbauprozesse an *Fraxinus excelsior* durchgeführt (Schwarze et al., 2000b). Die Wasserleitung erfolgt über die Gefässe, die Festigungsfunktion wird ausschliesslich von den Libriformfasern übernommen. Die Zellwände der Gefässe und die der paratracheal-vasizentrisch angeordneten Parenchymzellen in *Fraxinus excelsior* zeichnen sich durch sehr hohe Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer aus (Abb. 9; Baum, 2000). Das zwischen den Gefässen angeordnete Gewebe, weist hingegen hohe Syringyl-Einheiten am Ligninpolymer auf (Schwarze et al. 2000b). Der hohe Gehalt an Syringyl in den Zellwänden der Libriformfasern hat zur Folge, dass das Holz gegen pyroxyphile Pilze sehr anfällig ist. Die pyroxyphilen Pilzarten *D. fissa* und *D. loculata* verursachten ebenfalls hohe Masseverluste (17,4% und 17,1%) an Buchenholz.

Wenn man die Einteilung von Braun (1970) näher betrachtet und mit dem Abbauverhalten einzelner Pilzarten vergleicht, kann man feststellen, dass mit aufsteigender Organisationsstufe und fortschreitender Arbeitsteilung des Gewebes die Holzersetzungsmuster vielfältiger und differenzierter ausfallen. An Bäume der ersten Organisationsstufe des Hydrosystems haben sich überwiegend Braunfäuleerreger und an die der letzten Organisationsstufe Weissfäuleerreger und pyroxyphilen Pilzarten angepasst. Ferner wird ersichtlich, dass das Holz von Baumarten der höheren Organisationsstufen durch Pilzarten mit einem schwachen lignolytischen Potenzial, z.B. von Braunfäuleerregern, ungleichmässiger und somit viel langsamer abgebaut wird. Weissfäuleerreger hingegen, die sich entwicklungsgeschichtlich an das Laubholz angepasst haben, können aufgrund ihrer verschiedenen Phenoloxidasen auch Zellbereiche, die gegen Braunfäuleerreger weitgehend resistent sind, effektiv abbauen.

Von den Ausführungen kann man ableiten, dass das Holzsubstrat eine vorrangige Bedeutung für die Holzabbauprozesse besitzt. In Anbetracht der Rolle anderer Faktoren, wie etwa die physikalischen Bedingungen im Holz (O_2 , CO_2 , pH-Wert, Holzfeuchte etc.), die die Abbauprozesse massgeblich beeinflussen können, erscheint diese Aussage stark vereinfachend. Allerdings dürfen die sehr selektive Wirkung des Holzaufbaus und seine Zusammensetzung unumstritten sein. Schliesslich wird die Holzanatomie als ein konservatives und eben deshalb als ein sehr wertvolles Merkmal betrachtet, welches in der Gehölzsystematik eine herausragende Stellung einnimmt.

5.2 Thermisch modifiziertes Holz (TMT)

An TMT Proben von Buche und Esche konnte im Vergleich zur Kontrolle eine signifikante Minderung der Masseverluste durch pyroxyphilen Pilze verzeichnet werden (Tabelle 2). Im Vergleich zu den Kontrollproben verursachten die pyroxyphilen Pilze an TMT Proben von Fichte und Tanne (mit wenigen Ausnahmen und unabhängig von der Intensität der Behandlung) signifikant höhere Masseverluste. An allen TMT Proben die zusätzlich einer QUV-Bewitterung ausgesetzt wurden, konnte im Vergleich zu den Kontrollproben ebenfalls signifikant höhere Masseverluste verzeichnet werden.

5.2.1 Braunfäuleerreger

In den Studien wurden drei Braunfäuleerreger *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* und *Oligoporus placenta* eingesetzt. Histologische Studien zeigten, dass im Holzsubstrat zunächst Zellulose und Hemizellulosen abgebaut wurden, während Lignin in leicht veränderter Form erhalten blieb (Rayner und Boddy, 1988; Green und Highley, 1997). Durch den bevorzugten Abbau von Kohlehydraten erhielt das zersetzte Holz eine spröde Konsistenz, zerbrach würfelförmlich und zerfiel schliesslich pulverig. Dabei gibt der Verbleib von modifiziertem Lignin dem zersetzten Holz seine charakteristische Farbe und Konsistenz.

Der Abbau von Zellulose und Hemizellulose erfolgt in verschiedenen Schritten. Da zelluloseabbauende Enzyme relativ gross sind und die erheblich kleineren Zellwandkapillaren nicht ohne weiteres durchdringen können wird angenommen, dass in einer prä-zellulolytischen Phase Wasserstoffperoxid gebildet wird, das leicht in die Zellwand eindringt und zusammen mit Eisenionen durch oxidative Depolymerisation die Lignozellulosematrix überwindet (Keilisch et al., 1970; Koenigs, 1974a, b). Dabei werden offensichtlich auch die die Zellulose umhüllenden Hemizellulosen angegriffen, mit der Folge, dass die Zellulose dann für Zellulasen zugänglich wird. Es erfolgt eine wahllose Aufspaltung der Zellulosekettenmoleküle, so dass schnell viele einzelne Glukosemoleküle entstehen (Cowling, 1961). Durch den Zelluloseabbau nimmt das Zellwandvolumen ab und es entstehen viele Risse und Spalten. Im Spätstadium schliessen sich diese durch den anhaltenden Volumenverlust der Zellwand und es bleibt ein Gerüst aus modifiziertem Lignin übrig. Die Kombination des bevorzugten und wahllosen Zelluloseabbaus stand in engem Zusammenhang mit einem drastischen Verlust an Biegefestigkeit schon nach sehr kurzer Befallszeit (Pechmann und Schaile, 1950; Wilcox, 1978; Schwarze, 1995). Auch in der vorliegenden Studie wurden die höchsten Verluste der Bruchschlagarbeit stets an Holz verzeichnet, das mit Braunfäuleerregern inkubiert wurde.

5.2.2 Weissfäuleerreger

Die weissfäuleerregenden Pilze sind in allen Ordnungen der Basidiomycotina und in einigen Familien der Ascomycotina, nämlich bei den Xylariaceen, vertreten (Sutherland und Crawford, 1981). Die Bezeichnung Weißfäule wurde im Sprachgebrauch traditionell dafür verwendet, Holzzersetzungsarten zu beschreiben, in denen das Holz eine gebleichte Erscheinung annimmt und Lignin ebenso wie Zellulose und Hemizellulose abgebaut wird. Allerdings unterscheiden sich die relativen Abbaugeschwindigkeiten von Lignin und Zellulose bzw. anderen Zellwandbestandteilen je nach Pilzart und den vorherrschenden Bedingungen im Holz zum Teil erheblich. Trotz der großen Vielfalt in der Holzzersetzung durch Weissfäuleerreger sind zwei wesentliche Formen der Weißfäule allgemein anerkannt, die selektive Delignifizierung und die simultane Fäule (Blanchette 1984a, b; Adaskaveg und Gilbertson 1986; Rayner und Boddy 1988).

Holzerstörende Pilze, wie etwa *Trametes versicolor*, die eine simultane Fäule verursachen, treten überwiegend an Laubbäumen auf. Bei der simultanen Fäule erfolgt der Zellwandabbau in unmittelbarer Hyphenumgebung. Der lokale Zellwandabbau beruht auf einer die Hyphen umgebenden Schleimschicht, durch die die Enzyme einen engeren Kontakt mit den Wandsubstanzen besitzen (Eriksson et al. 1990). Charakteristisch für diese Fäule ist, dass die von den Hyphen ausgeschiedenen Enzyme alle Hauptbestandteile der verholzten Zellwand abbauen können (Liese 1970; Rayner und Boddy, 1988; Eriksson et al. 1990). Die Bezeichnung simultane Fäule bezieht sich darauf, dass der Abbau von Zellulose, Hemizellulose und Lignin proportional zu ihren Mengen in der Zellwand erfolgt. Grundsätzlich wird diese Gruppe von Pilzarten allgemein auch als Weissfäuleerreger bezeichnet (Nilsson et al. 1989). Die Hyphen wachsen im Lumen auf der S₃-Schicht und die Zellwand wird in unmittelbarer Umgebung der Hyphen abgebaut, was zur Bildung von Erosionsgräben führt. Die Hyphen sinken, ähnlich wie ein Fluss in seinem Bett, in die Zellwand ein. Einzelne Hyphen dringen in die Zellwand im rechten Winkel zur Zellachse ein. Mit zunehmender Dauer der Holzzersetzung wird die Zellwand dünner und zahlreiche Bohrlöcher entstehen zwischen benachbarten Zellen. Im Spätstadium tritt ein verzögerter Abbau der Mittelschicht und Zellzwickel ein. Als Folge des Zusammenfließens vieler Erosionsgräben nimmt die Dicke der verholzten Zellwände von innen (Lumen) nach aussen (Mittellamelle) allmählich ab (Liese 1970; Schwarze 1995). In der vorliegenden Studie verursachte *Trametes versicolor* die höchsten Masseverluste an TMT welches nur kurz behandelt wurde (Stufe T1). In der Regel war Holz mit zunehmender Intensität der Hitzebehandlung (Stufe T2) resistenter als die Kontrollproben. Die Dauerhaftigkeit von TMT-Buchenholz (Stufe T2) welches anschliessend mit QUV behandelt wurde, hingegen, war anfälliger gegen *T. versicolor*.

5.2.3 Pyroxyphile Pilze

Es gibt nur wenige Studien zum Holzabbau von pyroxyphilen Pilzen (Penttilä und Kotiranta 1996). *Daldinia* spp. treten überwiegend an Laubholz auf und verursachen eine Weissfäule bei der alle Bestandteile des Holzes abgebaut werden (Rogers 1979). Die vorliegenden Studien zeigen allerdings, dass das Holzzersetzungsmuster je nach Holzzersetzung und Ligninkomposition variiert.

Im unbehandelten Nadelholz konnten keine bedeutenden Strukturveränderungen verzeichnet werden. Im Buchenholz hingegen wuchsen die Hyphen innerhalb der Zellwand (Moderfäule >Typ

1<) in Längsrichtung zur Zellachse. Dieses Wachstum innerhalb der Zellwand hatte zur Folge, dass in Querschnitten vereinzelt kleine Hohlräume in den Fasertracheiden des Spätholzes sichtbar wurden. In Eschenholz wurden in den Librifasern überwiegend >Typ 2< der Moderfäule beobachtet, die einer lokalisierten simultanen Fäule ähnelt, wobei die Zersetzung der Librifasern vom Lumen nach aussen durch die Bildung kleiner v-förmiger Erosionskerben erfolgte. Grundsätzlich war das TMT-Laubholz in der Regel dauerhafter gegen pyroxyphile Pilze als das unbehandelte Holz. Wie Studien von Liese (1961) zeigen, ist das guaiacylreiche Holz der Nadelbäume vor allem resistenter gegen Moderfäuleerreger als das syringylreiche Holz der Laubbäume. Im unbehandelten Nadelholz verleiht ausserdem die enorme Resistenz der S3-Schicht der Tracheiden dem Holz eine erhöhte Dauerhaftigkeit gegen pyroxyphile Pilze, da der Zellwandabbau dieser Pilze in unmittelbarer Umgebung der Hyphen stattfindet (Meier 1955; Eriksson et al. 1990). Jüngste Studien von Skyba (2008) zeigten, dass die Resistenz von TMT-Nadelholz gegen *Daldinia loculata* signifikant herabgesetzt wird. Diese Erkenntnis wurde in der vorliegenden Studie bestätigt. An TMT von Fichte und Tanne wuchsen die Hyphen der pyroxyphilen Pilze im Lumen auf der S3-Schicht, und die Zellwand wurde lokal in unmittelbarer Umgebung der Hyphen abgebaut, was zur Bildung von Erosionsgräben führte. Solche Erosionsgräben konnten im unbehandelten Nadelholz nicht verzeichnet werden. Offensichtlich wird nach der thermischen Behandlung des Nadelholzes, die Struktur und chemische Zusammensetzung der S3-Schicht nachteilig verändert. Alle pyroxyphilen Pilzarten verursachten, wenn auch auf niedrigem Niveau, signifikant höhere Masseverluste an TMT von Fichte und Tanne. Nach zusätzlicher QUV Behandlung stiegen die verzeichneten Masseverluste weiter an.

5.2.4 QUV behandeltes TMT

Um zu überprüfen, ob die EN 113 eine realitätsnahe Prüfung von TMT ist, wurden die Holzprüfkörper vor der Pilzinkubation einer QUV-Behandlung ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass nach einer QUV-Behandlung die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) teilweise sehr stark vermindert wird. Im Vergleich zu unbehandeltem Holz, wies TMT aus Fichten, Tanne und Buche nach der QUV-Behandlung und anschliessender Inkubation mit *O. placenta* keine erhöhte Resistenz mehr auf. TMT von allen Baumarten (ausser Esche T1), welches einer QUV-Behandlung ausgesetzt und anschliessend mit pyroxyphilen Pilzen inkubiert wurde, war stets anfälliger als nicht künstlich bewittertes Holz. Die Studien verdeutlichen, dass eine QUV-Behandlung vor der Pilzinkubation zwingend erforderlich ist für ein realitätsnahes Testverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von TMT.

Die Studien bestätigen, dass die EN 113 grundsätzlich geeignet ist, um die Resistenz von TMT zu prüfen. Allerdings verlangt die EN 113 keinerlei Gebrauchsbeanspruchungen der Prüfkörper z.B. künstliche oder natürliche Bewitterung vor der Pilzinkubation. Die Studien verdeutlichen, dass eine QUV-Behandlung vor der Pilzinkubation unbedingt erforderlich ist für ein realitätsnahes Testverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von TMT.

5.3 Mechanische Untersuchungen

Ein Befall durch holzerstörende Pilze beeinträchtigt in besonderem Masse auch die mechanischen Holzeigenschaften und beeinflusst damit die Gebrauchstauglichkeit des betroffenen Bauteils. Um den diesbezüglichen Einfluss pyroxyphiler Pilze auf TMT zu untersuchen, wurden er-

gänzend zum Masseverlust auch die Oberflächenhärte und die Bruchschlagarbeit an wärmebehandeltem und pilzexponiertem Probenmaterial (sowie entsprechenden unbehandelten Kontrollproben) bestimmt. Die Härte dient dabei primär als Indikator für oberflächliche Veränderungen, während bei der Bruchschlagarbeit der gesamte Probenquerschnitt einbezogen wird. Als dynamische Belastungsart reagiert die Bruchschlagarbeit zudem besonders sensitiv auf holzerstörende Pilze.

Für einen Vergleich der Wirkung der Probenbehandlungen bei den verschiedenen Holzarten war eine Analyse der relativen (prozentualen) Eigenschaftsveränderungen hilfreich. Das Eigenschaftsniveau der nicht-thermobehandelten (T0) und nicht-inkubierten (K) Vergleichsproben wurde dabei für jede Holzart als 100% definiert (Tab. 3). Die Studien zeigen, dass eine Thermobehandlung die Oberflächenhärte je nach Holzart zwischen 10% und 30% reduziert. Ein Befall durch holzerstörende Pilze führt zu einer weiteren Verminderung der Oberflächenhärte, wobei dies bei den Braun- und Weissfäuleerregern deutlicher ausgeprägter war als bei den pyroxyphilen Pilzen. Die auf den Pilzbefall zurückzuführende Reduktion der Oberflächenhärte ist bei den nicht-wärmebehandelten Proben (T0) stärker als bei den TMT Proben und kann bis zu 60% betragen (Fichte, Tanne und Buche).

Bezüglich Bruchschlagarbeit führte die Thermobehandlung bei den Laubhölzern zu einer erheblichen Festigkeitsreduktion, insbesondere bei Buche mit rund 60%. Bei den Nadelhölzern erscheint der Effekt der Thermobehandlung relativ gering, dafür ist bei einem Befall durch holzerstörende Pilze eine sehr grosse Festigkeitsreduktion zu beobachten, welche bei den nicht-wärmebehandelten Proben (T0) über 80% erreichen kann. Wie bei der Oberflächenhärte ist die Festigkeitsreduktion bei den Basidiomyceten deutlicher ausgeprägt als bei pyroxyphilen Pilzen (Ausnahme: Esche). Die Inkubation mit pyroxyphilen Pilzen führte bei den nicht-wärmebehandelten Fichten- und Tannen-Proben (T0) sogar zu einer Erhöhung der Bruchschlagarbeit. An Esche wurden insgesamt die geringsten Effekte durch eine Pilz-Inkubation verzeichnet. Eine Ausnahme bildet die Bruchschlagarbeit bei den wärmebehandelten Proben der Stufe T2, wo nach der Inkubation sowohl mit pyroxyphilen Pilzen als auch mit *T. versicolor* eine grössere Reduktion als bei den Kontrollproben (T0) resultiert. Der zumeist gegenläufige Trend der P-Werte im Vergleich zu den K- und D-Werten zeigt die erhöhte Dauerhaftigkeit von TMT gegenüber einem Befall durch Basidiomyceten. Der weitgehend parallele Werteverlauf der K- und D-Proben bei den Nadelhölzern deutet hingegen darauf hin, dass der Festigkeitsverlust durch eine Inkubation von TMT mit pyroxyphilen Pilzen nicht reduziert ist und mit der Wärmebehandlung diesbezüglich keine erhöhte Dauerhaftigkeit erreicht wird.

6. Schlussfolgerungen

- die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*), ist im Vergleich zu unbehandeltem Holz gegen Braun- und Weissfäuleerreger erhöht.
- die Abbauraten von unbehandeltem Holz durch pyroxyphile Pilze sind im Vergleich zu denen obligater Prüfpilze, die durch die EN 113 vorgeschrieben werden, deutlich geringer

- Holzarten, z.B. Fichte und Tanne, mit einem höheren Anteil von Guaiacyl-Einheiten am Ligninpolymer sind dauerhafter als solche, die einen höheren Anteil von Syringyl-Einheiten am Ligninpolymer besitzen.
- die Dauerhaftigkeit von TMT aus Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*), ist im Vergleich zum unbehandelten Holz gegenüber pyroxyphilen Pilzen erhöht
- die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte und Tanne wird durch die Hitzebehandlung gegen pyroxyphile Pilze signifikant verringert
- histologische Untersuchungen zu den Abbauprozessen von pyroxyphilen Pilzen an TMT zeigen, dass die S3-Schicht, die normalerweise sehr resistent, bevorzugt abgebaut wird
- nach einer QUV-Behandlung wird die Dauerhaftigkeit von TMT aus Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) teilweise stark vermindert (speziell gegen *Oligoporus placenta*)
- die Studien verdeutlichen, dass eine QUV-Behandlung vor der Pilzinkubation unbedingt erforderlich ist für ein realitätsnahes Testverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von TMT

7. Literatur

Arnold M. 2007. *Transverse anisotropy in thermally modified beech and spruce*. In: Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification, 15.-16. October 2007, Cardiff, UK, p. 161-164. ISBN 184-220-096-8.

Blanchette, R.A., Obst, J.R., Hedges, J.I., Weliky, K. 1988. Resistance of hardwood vessels to degradation by white rot Basidiomycetes. *Can. J. Bot.* 66, 1841-1847.

Boddy, L., Gibbon, O. M. Grundy, M.A. 1985. Ecology of *Daldinia concentrica*: effect of abiotic variables on mycelial extension and interspecific interactions " *Transaction of the British Mycological Society* 85: 201-211.

Braun, H.J. 1970. Funktionelle Histologie der sekundären Sproßachse. I. Das Holz. *Handbuch der Pflanzenanatomie*, 2. Aufl. IX/1. Bornträger, Berlin, 190 S.

Dahlberg, A. 2002. Effects of fire on ectomycorrhizal fungi in Fennoscandian boreal forests. *Silva Fennica* 36: 69-80.

EN113. 1996. European Standard (EN 113) Wood preservatives - Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes - Determination of toxic values., European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

EN 350-1. 1994. Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood. Guide to the principles of testing and classification of natural durability of wood. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

Eriksson, K.E.L., Blanchette, R.A., Ander, P. 1990. *Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components*. Springer, Berlin 407 S.

Esseen, P.-A., Ehnstrom, B., Ericson, L., Sjoberg, K. 1992. Boreal forests - the focal habitats of Fennoscandia. In: *Ecological Principles of Nature Conservation* (ed.Hanson L), pp. 252-325. Elsevier Applied Sciences

Faix, O.F., Mozuch, M., Kirk, T.K. 1985. Degradation of gymnosperm (guaiacyl) vs. angiosperm (syringyl/guaiacyl) lignins by *Phanerochaete chrysosporium*. *Holzforschung* 39, 203-208.

Fergus, B.J., Goring, D.A.I. 1970. The distribution of lignin in birch wood determined by ultraviolet microscopy. *Holzforschung* 24, 118-124.

Gilbertson, R.L. 1980. Wood-rotting fungi of North America. *Mycologia* 72, 1-49.

Johannesson, H. 2000. Ecology of *Daldinia* spp. with special emphasis on *Daldinia loculata*. Department of Forest Mycology and Pathology. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, 43 S

Johannesson, H. 2001. Genetic differentiation in Eurasian populations of the postfire ascimycete *Daldinia loculata*. *Molecular Ecology* 10: 1665-1667

Ju, Y.-M., Rogers, J. D., San Martin, F. 1997. A revision of the genus *Daldinia*. *Mycotaxon* 61: 243-293.

Kangas, and K. Oy. 2000. Heat treated timber in Finland. IRG/WP 00-40158.

Liese, W. 1961. Über die natürliche Dauerhaftigkeit einheimischer und tropischer Holzarten gegenüber Moderfäulepilzen. *Mitt. Dtsch. Ges. f. Holzforschung* 48, 18-28.

Liese, W., Ammer, U. 1964. Über den Befall von Buchenholz durch Moderfäulepilze in Abhängigkeit von der Holzfeuchte. *Holzforschung* 18, 97-102.

Otter, T. 1996. Untersuchungen zur Ligninbildung bei der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.). Diss. Univ. Freiburg.

Maheshwari, R. 2005. Fungal biology in the 21st century. *Current Science* 88: 1406-1418.

Meier, H. 1955. Über den Zellwandabbau durch Holzvermorschungspilze und die submikroskopische Struktur von Fichtentracheiden und Birkenholzfasern. *Holz als Roh- Werkst.* 13, 323-338.

Militz, H. 2002a. Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art. Proceedings of FPRS Conference "Enhancing durability of lumber and engineered wood products", Florida, USA.

Militz, H. 2002b. Thermal treatment of wood: European processes and their background. International Research Group on Wood Preservation, Document IRG 02-40231, Cardiff, UK

- Nilsson, T., Daniel, G., Kirk, T.K., Obst, J.R. 1989. Chemistry and microscopy of wood decay by some higher ascomycetes. *Holzforschung* 43: 11-18.
- Panisset, T. E. 1929. *Daldinia concentrica* attacking the wood of *Fraxinus excelsior*. *Annals of Applied Biology* 16: 400-421.
- Penttilä, R., Kotiranta, H. 1996. Short-term effects of prescribed burning on wood-rotting fungi." *Silva Fennica* 30: 399-419.
- Rapp, A.O. and M. Sailer. 2000. Heat treatment in Germany. Proc. of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe," Helsinki.
- Rayner ADM, Boddy L, 1988. *Fungal Decomposition of Wood: Its Biology and Ecology*. John Wiley, Chichester.
- Rogers, J. D. 1979. The Xylariaceae: systematic, biological and evolutionary aspects. *Mycologia* 71: 1-42.
- Schwarze, F.W.M.R. 1995. Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzersetzenden Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro. Diss. Univ. Freiburg. Erndtebrück: SVK, 163 S.
- Schwarze, F.W.M.R. 2007. Wood decay under the microscope. *Fungal Biology Reviews* 1, 133-170.
- Schwarze, F.W.M.R, Fink, S. 1998. Host and cell type affect the mode of degradation by *Meripilus giganteus*. *New Phytol.* 139, 721-731.
- Schwarze, F.W.M.R. & Baum, S. 2000. Mechanisms of reaction zone penetration by decay fungi in wood of beech (*Fagus sylvatica*). *New Phytol.* 146, 129-140.
- Skyba, O. 2008. Durability and physical properties of thermo-hygro-mechanically densified wood. PhD-thesis ETH Zürich.
- Skyba, O. Niemz, P., Schwarze, F.W.M.R. 2008. Resistance of thermo-hygro-mechanically densified wood to colonization and degradation by soft rot fungi. *Holzforschung* 62: 277–283.
- Syrjanen, T., E. Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M. Pizzi, A. Tekely, P., Militz, H.. 1998. Characterisation of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff* 56(3): 149-153
- Tjeerdsma, B.F., Militz, H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63:102-111.
- Vernois, M. 2001. Heat treatment of wood in France - State of the art. Proc. of Special Seminar "Review on heat treatments of wood," Antibes, France.

Watling, R. 1982. Taxonomic status and ecological identity in the basidiomycetes. In: Frankland, J.C., Hedger, J.N. and Swift, M.J. (eds.) *Decomposers Basidiomycetes: Their Biology and Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 1-32.

Whetten, R., Sederoff, R. (1995). Lignin biosynthesis. *Plant Cell* 7, 1001-1013.

Widmann R., Beikircher W., Fischer A. 2007. Mechanical properties of thermal treated hardwood (beech): Bending and tension strength and stiffness of boards. In: Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification, 15.-16. October 2007, Cardiff, UK, p. 187-190. ISBN 184-220-096-8.

Widsten, P.; Kandelbauer, A. 2008. Laccase applications in the forest products industry: A review. *Enzyme and Microbial Technology* 42, pp. 293-307.

Yoshinaga, A., Fujita, M., Saiki, H. 1989. Relationships between cell evolution and lignin structural varieties in oak xylem evaluated by microscopic spectrophotometry with separated cell walls. *J. Japan Wood Res. Soc.* 38, 629-637.

Yoshinaga, A., Fujita, M., Saiki, H. 1992. Compositions of lignin building units and neutral sugars in oak xylem tissue. *J. Japan Wood Res. Soc.* 39, 621-627.

Yoshinaga, A., Fujita, M., Saiki, H. 1997. Cellular distribution of guaiacyl and syringyl lignins within an annual ring in oak wood. *Mokuzai Gakkaishi* 43, 384-390.

Aufstellung der an der Empa geleisteten Personentage und ausgeführten Tätigkeiten

Aufwand Projekt für 2009-2011:

Empa Abt. Holz gesamt 604 Std.

Mitarbeiter	Abteilung	Anstellungs- verhältnis	Tätigkeiten	Geleistete Stunden (Empa gemäss SAP)	Kosten in CHF
Andreas Schmutz	Fa. Balz	Techniker	Thermobehandlung von Ausgangsmaterial	48	8045,80
Markus Heeb	Holz	Laborant	Selektion und Beschaffung von Ausgangsmaterial für Thermobehandlung, Planung und Durchführung der experimentellen Arbeiten, Zusammenstellen der Rohdaten	355,6	42774,10
Bruno Zraggen	Holz	Tech. Mitarbeiter	Experimentelle Arbeiten, Zusammenstellen der Rohdaten	47,25	8065,80
Daniel Heer	Holz	Schreiner	Selektion und Beschaffung von Ausgangsmaterial für Thermobehandlung, Anfertigung von Prüfkörpern	266	31722
Martin Arnold	Holz	Wissenschaftler	Literaturstudie, Planung, Versuchsdesign, experimentelle Arbeiten, Datenauswertung	212,25	36208
Francis Schwarze	Holz	Senior Scientist	Literaturstudie, Planung, Versuchsdesign, Auswertung der experimentellen Arbeiten, histologische Studien.	98,4	24304,80
Michael Strässle	Holz	Techniker	Mechanische Prüfungen	61,5	7626
PKW Spesen					1698
			Gesamt:	1089	160444,50

Hiermit bestätige ich die Richtigkeit und Vollständigkeit dieses Schlussberichts

Ort, Datum

Hauptgesuchsteller/Projektleiter: Prof. Dr. F.W.M.R. Schwarze